Guia de Operações do OmniUPF

Índice

Visão Geral

OmniUPF (Função de Plano do Usuário baseada em eBPF) é uma Função de Plano do Usuário 5G/LTE de alto desempenho que fornece encaminhamento de pacotes de grau de operadora, aplicação de QoS e gerenciamento de tráfego para redes móveis. Construído sobre a tecnologia eBPF do Linux (Filtro de Pacotes de Berkeley Estendido) e aprimorado com capacidades de gerenciamento abrangentes, o OmniUPF fornece a infraestrutura central de processamento de pacotes necessária para redes 5G SA, 5G NSA e LTE.

O que é uma Função de Plano do Usuário?

A Função de Plano do Usuário (UPF) é o elemento de rede padronizado pela 3GPP responsável pelo processamento e encaminhamento de pacotes em redes 5G e LTE. Ela fornece:

- **Encaminhamento de pacotes de alta velocidade** entre dispositivos móveis e redes de dados
- **Aplicação de Qualidade de Serviço (QoS)** para diferentes tipos de tráfego
- **Detecção e roteamento de tráfego** com base em filtros e regras de pacotes
- **Relatórios de uso** para cobrança e análises
- **Bufferização de pacotes** para cenários de mobilidade e gerenciamento de sessões
- Suporte a **interceptação legal** para conformidade regulatória

OmniUPF implementa toda a funcionalidade do UPF definida na 3GPP TS 23.501 (5G) e TS 23.401 (LTE), fornecendo uma solução de plano do usuário completa e pronta para produção usando a tecnologia eBPF do kernel Linux para desempenho máximo.

Principais Capacidades do OmniUPF

Processamento de Pacotes:

- Processamento de pacotes do plano do usuário totalmente compatível com 3GPP
- Caminho de dados baseado em eBPF para desempenho em nível de kernel
- Encapsulação e desencapsulação de GTP-U (Protocolo de Túnel GPRS)
- Suporte a IPv4 e IPv6 para redes de acesso e dados
- XDP (Caminho de Dados eXpress) para processamento de latência ultra-baixa
- Processamento de pacotes multi-threaded

QoS e Gerenciamento de Tráfego:

- Regras de Aplicação de QoS (QER) para gerenciamento de largura de banda
- Regras de Detecção de Pacotes (PDR) para classificação de tráfego
- Regras de Ação de Encaminhamento (FAR) para decisões de roteamento

- Filtragem de Fluxo de Dados de Serviço (SDF) para roteamento específico de aplicação
- Regras de Relatório de Uso (URR) para rastreamento de volume e cobrança

Controle e Gerenciamento:

- Interface PFCP (Protocolo de Controle de Encaminhamento de Pacotes) para SMF/PGW-C
- API RESTful para monitoramento e diagnósticos
- Estatísticas e métricas em tempo real
- Monitoramento de capacidade de mapas eBPF
- Painel de controle baseado na web

Características de Desempenho:

- Processamento de pacotes sem cópia via eBPF
- Encaminhamento de pacotes em nível de kernel (sem sobrecarga de espaço do usuário)
- Escalabilidade multi-core
- Capaz de descarregar para aceleração de hardware
- Otimizado para implantações nativas em nuvem

Para detalhes sobre o uso do painel de controle, consulte Operações da Interface Web.

Entendendo a Arquitetura do Plano do Usuário

OmniUPF é uma solução unificada de plano do usuário que fornece encaminhamento de pacotes de grau de operadora para redes 5G Standalone (SA), 5G NSA e 4G LTE/EPC. **OmniUPF é um único produto** que pode funcionar simultaneamente como:

- **UPF (Função de Plano do Usuário)** - plano do usuário 5G/NSA (controlado pelo OmniSMF via N4/PFCP)

- **PGW-U (Gateway de PDN do Plano do Usuário)** - gateway EPC 4G para redes externas (controlado pelo OmniPGW-C via Sxc/PFCP)
- **SGW-U (Gateway de Serviço do Plano do Usuário)** - gateway de serviço EPC 4G (controlado pelo OmniSGW-C via Sxb/PFCP)

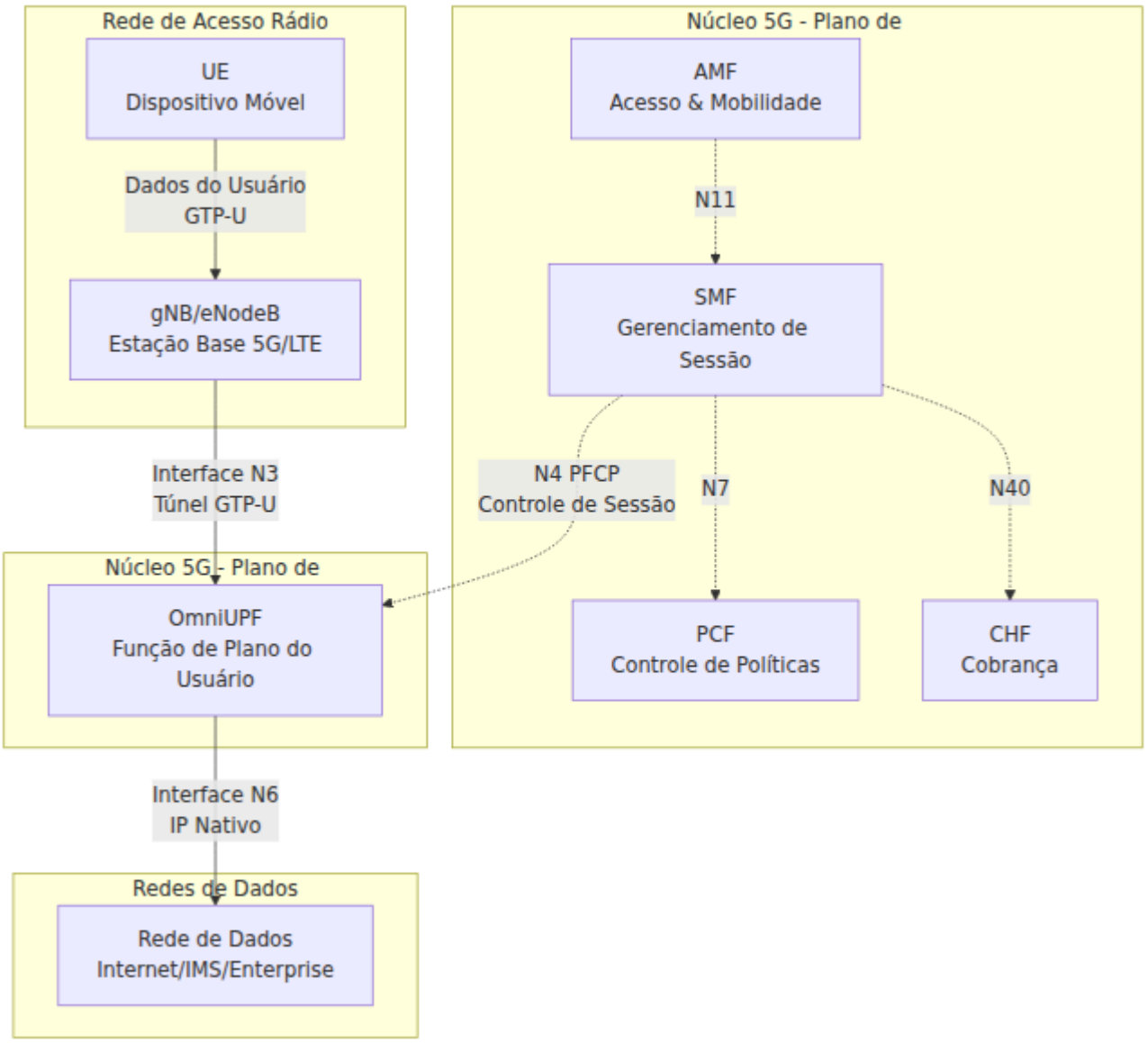
OmniUPF pode operar em **qualquer combinação** desses modos:

- **Apenas UPF**: Implantação pura de 5G
- **PGW-U + SGW-U**: Gateway combinado 4G (implantação típica de EPC)
- **UPF + PGW-U + SGW-U**: Suporte simultâneo a 4G e 5G (cenário de migração)

Todos os modos usam o mesmo mecanismo de processamento de pacotes baseado em eBPF e protocolo PFCP, fornecendo desempenho alto e consistente, seja operando como UPF, PGW-U, SGW-U, ou os três simultaneamente.

Arquitetura da Rede 5G (Modo SA)

A solução OmniUPF está situada no plano de dados das redes 5G, fornecendo a camada de encaminhamento de pacotes de alta velocidade que conecta dispositivos móveis a redes e serviços de dados.



Arquitetura da Rede 4G LTE/EPC

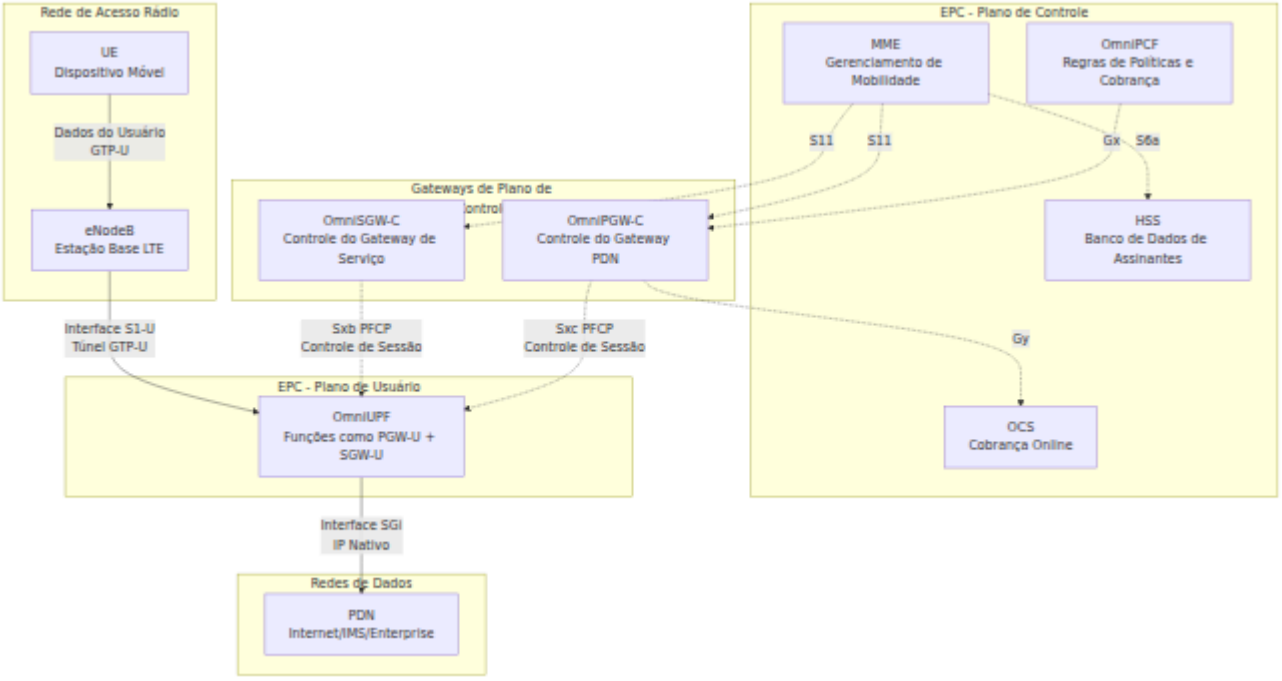
OmniUPF também suporta implantações 4G LTE e EPC (Evolved Packet Core), funcionando como OmniPGW-U ou OmniSGW-U, dependendo da arquitetura da rede.

Modo Combinado PGW-U/SGW-U (Implantação Típica de 4G)

Neste modo, o OmniUPF atua como SGW-U e PGW-U, controlado por funções de plano de controle separadas.

Modo Separado SGW-U e PGW-U (Roaming/Múltiplos Sites)

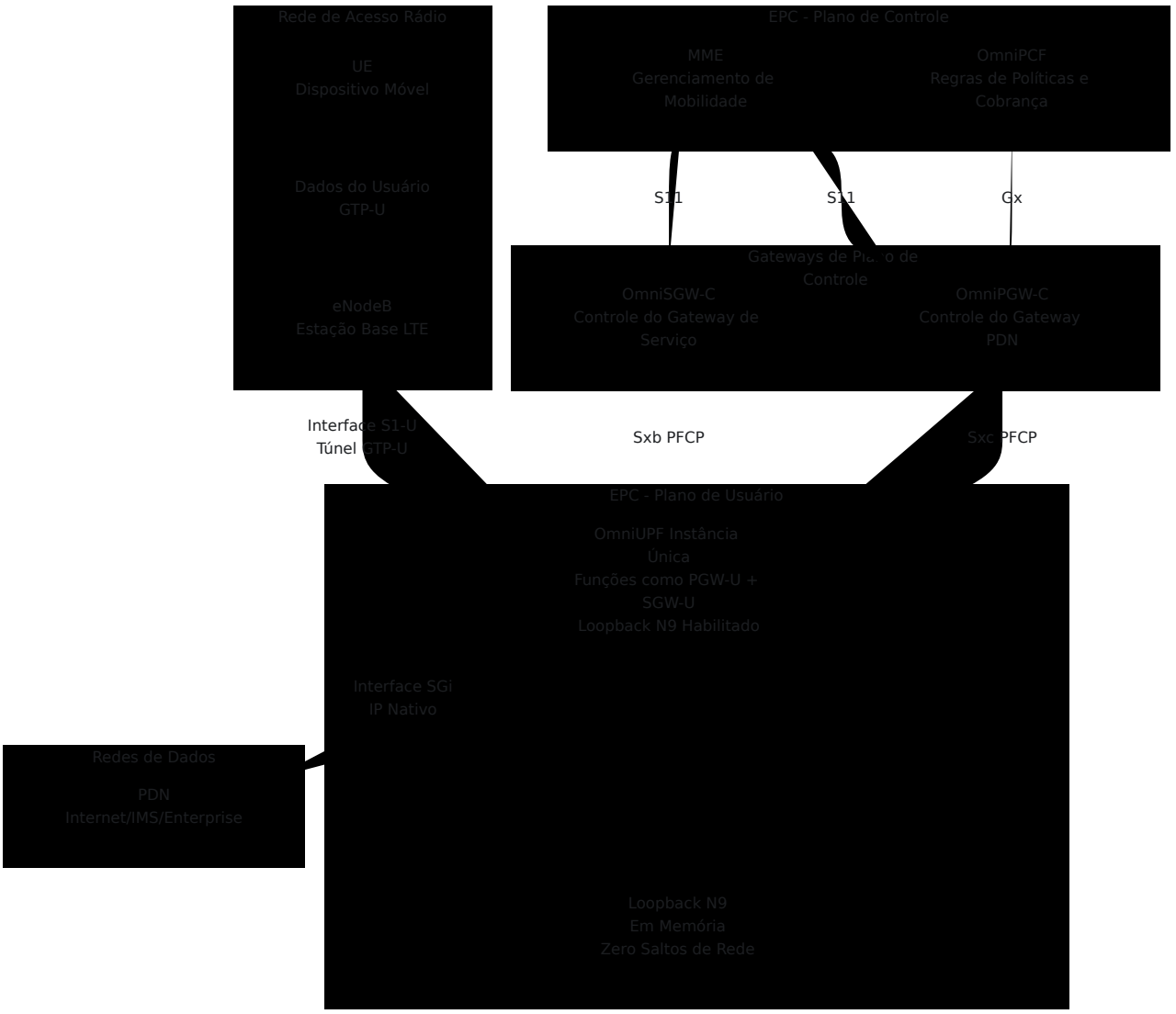
Em implantações de roaming ou múltiplos sites, duas instâncias separadas do OmniUPF podem ser implantadas - uma como SGW-U e outra como PGW-U.



Modo de Loopback N9 (Instância Única SGWU+PGWU)

Para implantações simplificadas, o OmniUPF pode executar **tanto os papéis de SGWU quanto de PGWU em uma única instância** com processamento

de loopback N9 totalmente em eBPF.



Principais Recursos:

- **Latência N9 sub-microsegundo** - Processado inteiramente em eBPF, nunca toca a rede
- **Redução de CPU de 40-50%** - Uma única passagem XDP vs. duas instâncias separadas
- **Implantação simplificada** - Uma instância, um arquivo de configuração
- **Detecção automática** - Quando `n3_address` = `n9_address`, loopback é habilitado
- **Total conformidade com 3GPP** - Protocolos PFCP e GTP-U padrão

Configuração:

```
# /etc/omniupf/runtime.exs
xdp_interfaces = "eth0"
n3_address = "10.0.1.10"        # IP da interface S1-U
n9_address = n3_address          # O mesmo IP habilita o loopback
N9
pfcp_address = "10.0.1.10"      # Tanto SGWU-C quanto PGWU-C se
conectam aqui
pfcp_port = 8805
```

Quando usar:

- Implantações de computação em borda (minimizar latência)
- Ambientes com restrições de custo (servidor único)
- Laboratório/testes (configuração simplificada)
- Implantações pequenas a médias (< 100K assinantes)

Quando NÃO usar:

- Redundância geográfica necessária (SGWU e PGWU em locais diferentes)
- Mandatos regulatórios para gateways separados
- Escala massiva (> 1M assinantes)

Para detalhes completos, exemplos de configuração, solução de problemas e métricas de desempenho, consulte **Guia de Operações de Loopback N9**.

Como as Funções de Plano do Usuário Funcionam na Rede

A função de plano do usuário (OmniUPF, OmniPGW-U ou OmniSGW-U) opera como o plano de encaminhamento controlado pelo respectivo plano de controle:

1. **Estabelecimento de Sessão**
    - **5G**: OmniSMF estabelece associação PFCP via interface N4 com OmniUPF

- **4G**: OmniPGW-C ou OmniSGW-C estabelece associação PFCP via Sxb/Sxc com OmniPGW-U/OmniSGW-U
- O plano de controle cria sessões PFCP para cada sessão PDU do UE (5G) ou contexto PDP (4G)
- O plano do usuário recebe regras PDR, FAR, QER e URR via PFCP
- Os mapas eBPF são preenchidos com regras de encaminhamento

2. **Processamento de Pacotes de Uplink** (UE → Rede de Dados)

- **5G**: Pacotes chegam na interface N3 do gNB com encapsulação GTP-U
- **4G**: Pacotes chegam na interface S1-U (SGW-U) ou S5/S8 (PGW-U) do eNodeB com encapsulação GTP-U
- O plano do usuário combina pacotes com PDRs de uplink com base no TEID
- O programa eBPF aplica QER (limitação de taxa, marcação)
- FAR determina a ação de encaminhamento (encaminhar, descartar, bufferizar, duplicar)
- Túnel GTP-U removido, pacotes encaminhados para a interface N6 (5G) ou SGi (4G)
- URR rastreia contagens de pacotes e bytes para cobrança

3. **Processamento de Pacotes de Downlink** (Rede de Dados → UE)

- **5G**: Pacotes chegam na interface N6 como IP nativo
- **4G**: Pacotes chegam na interface SGi como IP nativo
- O plano do usuário combina pacotes com PDRs de downlink com base no endereço IP do UE
- Filtros SDF podem classificar ainda mais o tráfego por porta, protocolo ou aplicação
- FAR determina o túnel GTP-U e parâmetros de encaminhamento
- Encapsulação GTP-U adicionada com o TEID apropriado
- **5G**: Pacotes encaminhados para a interface N3 em direção ao gNB
- **4G**: Pacotes encaminhados para S1-U (SGW-U) ou S5/S8 (PGW-U) em direção ao eNodeB

4. **Mobilidade e Transferência**

- **5G**: OmniSMF atualiza regras PDR/FAR durante cenários de transferência
- **4G**: OmniSGW-C/OmniPGW-C atualiza regras durante a transferência inter-eNodeB ou TAU (Atualização de Área de Rastreamento)
- O plano do usuário pode bufferizar pacotes durante a troca de caminho
- Transição sem interrupções entre estações base sem perda de pacotes

Integração com o Plano de Controle (4G e 5G)

OmniUPF integra-se com funções de plano de controle 5G e 4G via interfaces padrão 3GPP:

Interfaces 5G

Interface	De → Para	Propósito	Especificação 3GPP
N4	OmniSMF ↔ OmniUPF	Estabelecimento, modificação, exclusão de sessão PFCP	TS 29.244
N3	gNB → OmniUPF	Tráfego do plano do usuário da RAN (GTP-U)	TS 29.281
N6	OmniUPF → Rede de Dados	Tráfego do plano do usuário para DN (IP nativo)	TS 23.501
N9	OmniUPF ↔ OmniUPF	Comunicação inter-UPF para roaming/borda	TS 23.501

Interfaces 4G/EPC

Interface	De → Para	Propósito	Especificação 3GPP
Sxb	OmniSGW-C ↔ OmniUPF (modo SGW-U)	Controle de sessão PFCP para gateway de serviço	TS 29.244
Sxc	OmniPGW-C ↔ OmniUPF (modo PGW-U)	Controle de sessão PFCP para gateway PDN	TS 29.244
S1-U	eNodeB → OmniUPF (modo SGW-U)	Tráfego do plano do usuário da RAN (GTP-U)	TS 29.281
S5/S8	OmniUPF (SGW-U) ↔ OmniUPF (PGW-U)	Plano do usuário inter-gateway (GTP-U)	TS 29.281
SGi	OmniUPF (modo PGW-U) → PDN	Tráfego do plano do usuário para a rede de dados (IP nativo)	TS 23.401

Nota: Todas as interfaces PFCP (N4, Sxb, Sxc) usam o mesmo protocolo PFCP definido na TS 29.244. Os nomes das interfaces diferem, mas o protocolo e os formatos de mensagem são idênticos.

Componentes do UPF

Caminho de Dados eBPF

O **caminho de dados eBPF** é o mecanismo central de processamento de pacotes que roda no kernel do Linux para desempenho máximo.

Funções Principais:

- **Processamento de GTP-U**: Encapsulação e desencapsulação de túneis GTP-U
- **Classificação de Pacotes**: Combinação de pacotes com regras PDR usando TEID, IP do UE ou filtros SDF
- **Aplicação de QoS**: Aplicar limitação de taxa e marcação de pacotes por regras QER
- **Decisões de Encaminhamento**: Executar ações FAR (encaminhar, descartar, bufferizar, duplicar, notificar)
- **Rastreamento de Uso**: Incrementar contadores URR para cobrança baseada em volume

Mapas eBPF: O caminho de dados usa mapas eBPF (tabelas hash na memória do kernel) para armazenamento de regras:

Nome do Mapa	Propósito	Chave	Valor
`uplink_pdr_map`	PDRs de uplink	TEID (32 bits)	Informações PDR (ID FAR, ID QER, IDs URR)
`downlink_pdr_map`	PDRs de downlink (IPv4)	Endereço IP do UE	Informações PDR
`downlink_pdr_map_ip6`	PDRs de downlink (IPv6)	Endereço IPv6 do UE	Informações PDR
`far_map`	Regras de encaminhamento	ID FAR	Parâmetros de encaminhamento (ação, informações do túnel)
`qer_map`	Regras de QoS	ID QER	Parâmetros de QoS (MBR, GBR, marcação)
`urr_map`	Rastreamento de uso	ID URR	Contadores de volume (uplink, downlink, total)
`sdf_filter_map`	Filtros SDF	ID PDR	Filtros de aplicação (portas, protocolos)

Características de Desempenho:

- **Zero-cópia**: Pacotes processados inteiramente no espaço do kernel
- **Suporte a XDP**: Anexar no nível do driver de rede para latência sub-microsegundo

- **Multi-core**: Escala entre núcleos de CPU com suporte a mapas por CPU
- **Capacidade**: Milhões de PDRs/FARs em mapas eBPF (limitado pela memória do kernel)

Para monitoramento de capacidade, consulte Gerenciamento de Capacidade.

Manipulador de Interface PFCP

A **interface PFCP** implementa a 3GPP TS 29.244 para comunicação com SMF ou PGW-C.

Funções Principais:

- **Gerenciamento de Associação**: Batimento de coração PFCP e configuração/liberação de associação
- **Ciclo de Vida da Sessão**: Criar, modificar e excluir sessões PFCP
- **Instalação de Regras**: Traduzir IEs PFCP em entradas de mapa eBPF
- **Relatório de Eventos**: Notificar SMF sobre limites de uso, erros ou eventos de sessão

Suporte a Mensagens PFCP:

Tipo de Mensagem	Direção	Propósito
Configuração de Associação	SMF → UPF	Estabelecer associação de controle PFCP
Liberação de Associação	SMF → UPF	Destruir associação PFCP
Batimento de Coração	Bidirecional	Manter associação ativa
Estabelecimento de Sessão	SMF → UPF	Criar nova sessão PDU com PDR/FAR/QER/URR
Modificação de Sessão	SMF → UPF	Atualizar regras para mobilidade, mudanças de QoS
Exclusão de Sessão	SMF → UPF	Remover sessão e todas as regras associadas
Relatório de Sessão	UPF → SMF	Relatar uso, erros ou eventos

Elementos de Informação (IE) Suportados:

- Criar PDR, FAR, QER, URR
- Atualizar PDR, FAR, QER, URR
- Remover PDR, FAR, QER, URR
- Informações de Detecç��o de Pacotes (IP do UE, F-TEID, filtro SDF)
- Parâmetros de Encaminhamento (instância de rede, criação de cabeçalho externo)
- Parâmetros de QoS (MBR, GBR, QFI)
- Gatilhos de Relatório de Uso (limite de volume, limite de tempo)

Servidor API REST

A **API REST** fornece acesso programático ao estado e operações do UPF.

Funções Principais:

- **Monitoramento de Sessões**: Consultar sessões PFCP ativas e associações
- **Inspeção de Regras**: Visualizar configurações de PDR, FAR, QER, URR
- **Estatísticas**: Recuperar contadores de pacotes, estatísticas de rotas, estatísticas de XDP
- **Gerenciamento de Buffers**: Visualizar e controlar buffers de pacotes
- **Informações de Mapas**: Monitorar uso e capacidade de mapas eBPF

Endpoints da API: (34 endpoints no total)

Categoria	Endpoints	Descrição
Saúde	`/health`	Verificação de saúde e status
Configuração	`/config`	Configuração do UPF
Sessões	`/pfcp_sessions`, `/pfcp_associations`	Dados de sessão/associação PFCP
PDRs	`/uplink_pdr_map`, `/downlink_pdr_map`, `/downlink_pdr_map_ip6`, `/uplink_pdr_map_ip6`	Regras de detecção de pacotes
FARs	`/far_map`	Regras de ação de encaminhamento
QERs	`/qer_map`	Regras de aplicação de QoS
URRs	`/urr_map`	Regras de relatório de uso
Buffers	`/buffer`	Status e controle do buffer de pacotes
Estatísticas	`/packet_stats`, `/route_stats`, `/xdp_stats`, `/n3n6_stats`	Métricas de desempenho
Capacidade	`/map_info`	Capacidade e uso de mapas eBPF
Dataplane	`/dataplane_config`	Endereços das interfaces N3/N9

Para detalhes da API e uso, consulte **Guia de Monitoramento**.

Painel de Controle Web

O **Painel de Controle Web** fornece um painel em tempo real para monitoramento e gerenciamento do UPF.

Recursos:

- **Visualização de Sessões**: Navegar por sessões PFCP ativas com IP do UE, TEID e contagens de regras
- **Gerenciamento de Regras**: Visualizar e gerenciar PDRs, FARs, QERs e URRs em todas as sessões
- **Monitoramento de Buffers**: Rastrear pacotes bufferizados e controlar a bufferização por FAR
- **Painel de Estatísticas**: Estatísticas em tempo real de pacotes, rotas, XDP e interfaces N3/N6
- **Monitoramento de Capacidade**: Uso de mapas eBPF com indicadores de capacidade codificados por cores
- **Visualização de Configuração**: Exibir configuração do UPF e endereços do dataplane
- **Visualizador de Logs**: Streaming de logs ao vivo para solução de problemas

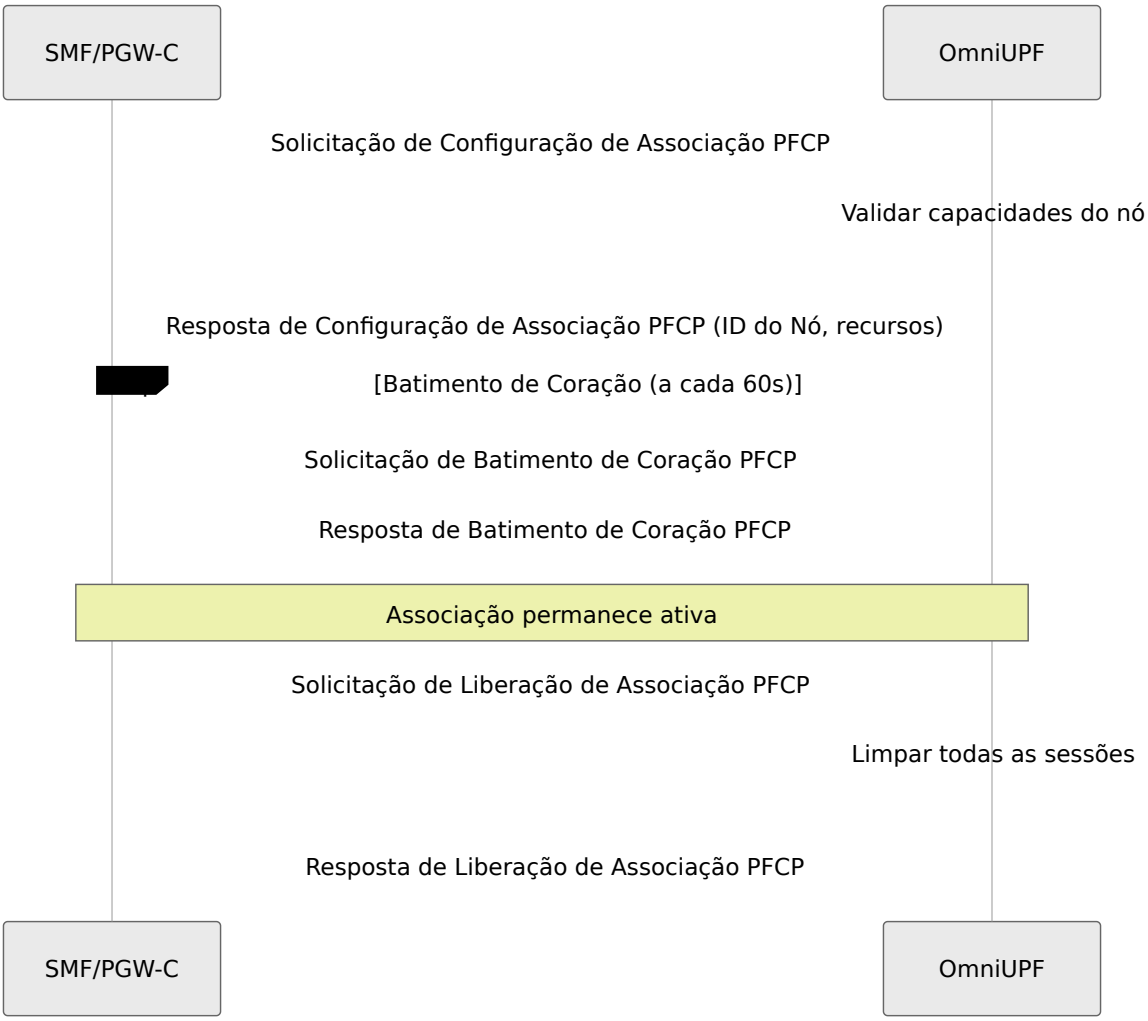
Para operações detalhadas da interface, consulte **Guia de Operações da Interface Web**.

Integração do Protocolo PFCP e SMF

Associação PFCP

Antes que as sessões possam ser criadas, o SMF deve estabelecer uma associação PFCP com o UPF.

Ciclo de Vida da Associação:



Pontos Chave:

- Cada SMF estabelece uma associação com o UPF
- O UPF rastreia a associação pelo ID do Nó (FQDN ou endereço IP)
- Mensagens de batimento de coração mantêm a vivacidade da associação
- Todas as sessões sob uma associação são excluídas se a associação for liberada

Para visualizar associações, consulte Visualização de Sessões.

Detecção de Reinício do SMF e Limpeza de Sessões Órfãs

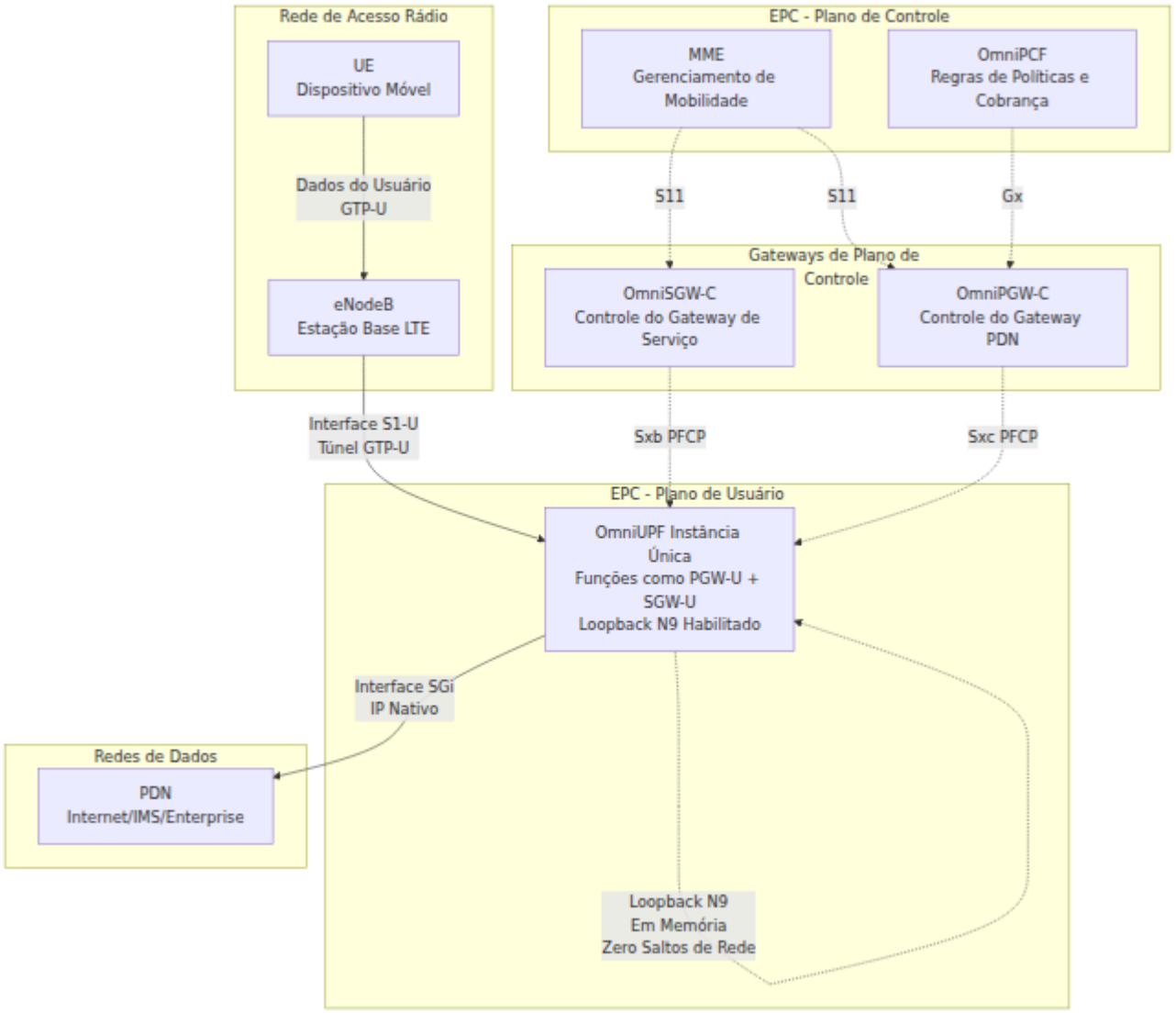
O OmniUPF detecta automaticamente quando um SMF reinicia e limpa sessões órfãs de acordo com as especificações da 3GPP TS 29.244.

Como Funciona:

Quando um SMF estabelece uma associação PFCP, ele fornece um **Timestamp de Recuperação** indicando quando começou. O OmniUPF armazena esse timestamp para cada associação. Se o SMF reiniciar:

1. O SMF perde todo o estado da sessão na memória
2. O SMF restabelece a associação PFCP com o UPF
3. O SMF envia um **novo Timestamp de Recuperação** (diferente do anterior)
4. O UPF detecta a mudança de timestamp = SMF reiniciado
5. O UPF exclui automaticamente **todas as sessões órfãs** da antiga instância do SMF
6. O SMF cria novas sessões para assinantes ativos

Fluxo de Detecção de Reinício:



Exemplo de Log:

Quando um SMF reinicia, você verá:

```
WARN: Associação com NodeID: smf-1 e endereço: 192.168.1.10 já
existe
WARN: Timestamp de Recuperação do SMF alterado (antigo: 2025-01-
15T10:00:00Z, novo: 2025-01-15T10:30:15Z) - SMF reiniciado,
excluindo 245 sessões órfãs
INFO: Excluindo sessão órfã 2 (LocalSEID) devido ao reinício do
SMF
INFO: Excluindo sessão órfã 3 (LocalSEID) devido ao reinício do
SMF
...
INFO: Excluindo sessão órfã 246 (LocalSEID) devido ao reinício do
SMF
```

Notas Importantes:

1. **Isolamento**: Apenas as sessões do SMF reiniciado são excluídas. Outras associações de SMF e suas sessões **não são afetadas**.

2. **Comparação de Timestamp**: Se o Timestamp de Recuperação for **idêntico**, as sessões são **mantidas** (SMF reconectado sem reiniciar).

3. **Conformidade com 3GPP**: Esse comportamento é exigido pela Seção 5.22.2 da 3GPP TS 29.244:

   > "Se o Timestamp de Recuperação da função CP mudou desde a última Configuração de Associação, a função UP deve considerar que a função CP reiniciou e deve excluir todas as sessões PFCP associadas a essa função CP."

Para solucionar problemas de sessões órfãs, consulte Detecção de Sessões Órfãs.

Manipulação de Indicações de Erro GTP-U

O OmniUPF lida com mensagens de Indicação de Erro GTP-U de pares a jusante (PGW-U, SGW-U, eNodeB, gNodeB) de acordo com as especificações da 3GPP TS 29.281.

O que são Indicações de Erro:

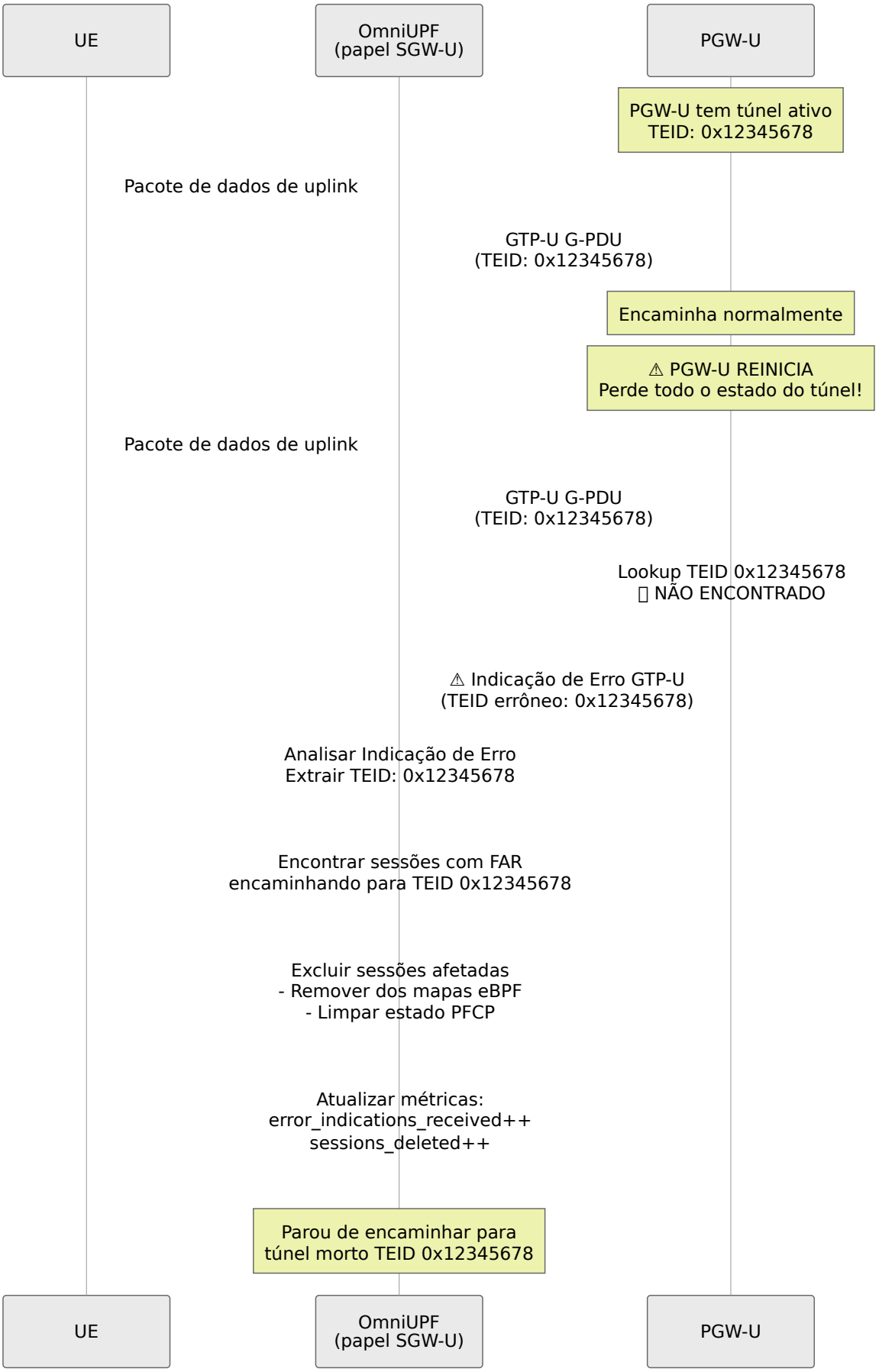
Quando o OmniUPF encaminha um pacote GTP-U para um par remoto (por exemplo, PGW-U em implantação SGW-U), o par pode enviar uma **Indicação de Erro** se não reconhecer o TEID (Identificador de Ponto de Túnel). Isso indica:

- O par remoto reiniciou e perdeu o estado do túnel
- O túnel nunca foi criado no lado remoto (incompatibilidade de configuração)
- O túnel já foi excluído no lado remoto

Como Funciona:

1. **UPF encaminha pacote** → Envia pacote GTP-U com TEID X para o par remoto (porta 2152)
2. **Par remoto não reconhece TEID X** → Procura TEID na sua tabela de túneis, não encontrado
3. **Par remoto envia Indicação de Erro** → Mensagem GTP-U tipo 26 com IE contendo TEID errôneo
4. **UPF recebe Indicação de Erro** → Analisa a mensagem para extrair TEID X
5. **UPF encontra sessões afetadas** → Procura todas as sessões por FARs que encaminham para TEID X
6. **UPF exclui sessões** → Remove sessões dos mapas eBPF e do estado PFCP
7. **UPF atualiza métricas** → Incrementa contadores do Prometheus para monitoramento

Fluxo de Indicação de Erro:



Formato do Pacote (Seção 7.3.1 da 3GPP TS 29.281):

```
Indicação de Erro GTP-U:
┌──────────────────────────────────────────────┐
│ Cabeçalho GTP-U (12 bytes)                   │
├──────────────────────────────────────────────┤
│ Versão, PT, Flags          │ 0x32            │
│ Tipo de Mensagem           │ 26 (0x1A)       │
│ Comprimento                │ 9 bytes         │
│ TEID                       │ 0 (sempre)      │
│ Número de Sequência        │ varia           │
│ Número de N-PDU            │ 0               │
│ Próximo Cabeçalho de Extensão │ 0            │
├──────────────────────────────────────────────┤
│ IE: Dados TEID I (5 bytes)                   │
├──────────────────────────────────────────────┤
│ Tipo                       │ 16 (0x10)       │
│ TEID errôneo               │ 4 bytes         │
└──────────────────────────────────────────────┘
```

Quando Isso Importa:

Cenário 1: Reinício do PGW-U na Arquitetura GTP S5/S8

- SGW-U (OmniUPF) encaminha tráfego S5/S8 para PGW-U
- PGW-U reinicia e perde todo o estado do túnel S5/S8
- SGW-U continua encaminhando para TEIDs antigos
- PGW-U envia Indicações de Erro
- SGW-U **para automaticamente de usar túneis mortos**

Cenário 2: Reinício do UPF Par na Arquitetura N9

- UPF-1 (OmniUPF) encaminha tráfego N9 para UPF-2
- UPF-2 reinicia
- UPF-1 recebe Indicações de Erro
- UPF-1 limpa sessões

Exemplo de Log:

Ao receber uma Indicação de Erro:

```
WARN: Recebida Indicação de Erro GTP-U de 192.168.50.10:2152 para
TEID 0x12345678 - par remoto não reconhece este TEID
WARN: Encontrada sessão LocalSEID=42 com FAR GlobalId=1
encaminhando para TEID errôneo 0x12345678 do par 192.168.50.10
INFO: Excluindo sessão LocalSEID=42 devido à Indicação de Erro
GTP-U para TEID 0x12345678 de 192.168.50.10
WARN: Excluídas 1 sessão(ões) devido à Indicação de Erro GTP-U
para TEID 0x12345678 do par 192.168.50.10
```

Métricas do Prometheus:

Monitore a atividade de Indicações de Erro com granularidade por par e por nó:

```
# Total de Indicações de Erro recebidas de pares
upf_buffer_listener_error_indications_received_total{node_id="pgw-u-
1",peer_address="192.168.50.10"}

# Sessões excluídas devido a Indicações de Erro
upf_buffer_listener_error_indication_sessions_deleted_total{node_id="
u-1",peer_address="192.168.50.10"}

# Indicações de Erro enviadas (para TEIDs de entrada desconhecidos)
upf_buffer_listener_error_indications_sent_total{node_id="enodeb-
1",peer_address="10.60.0.1"}
```

Rótulos de Métricas:

- `node_id`: ID do Nó PFCP da associação (ou "desconhecido" se nenhuma associação existir)
- `peer_address`: Endereço IP do par remoto

Essas métricas ajudam a identificar pares problemáticos e rastrear padrões de Indicações de Erro por nó de plano de controle.

Notas Importantes:

1. **Limpeza Automática**: Nenhuma intervenção do operador necessária - as sessões são excluídas automaticamente

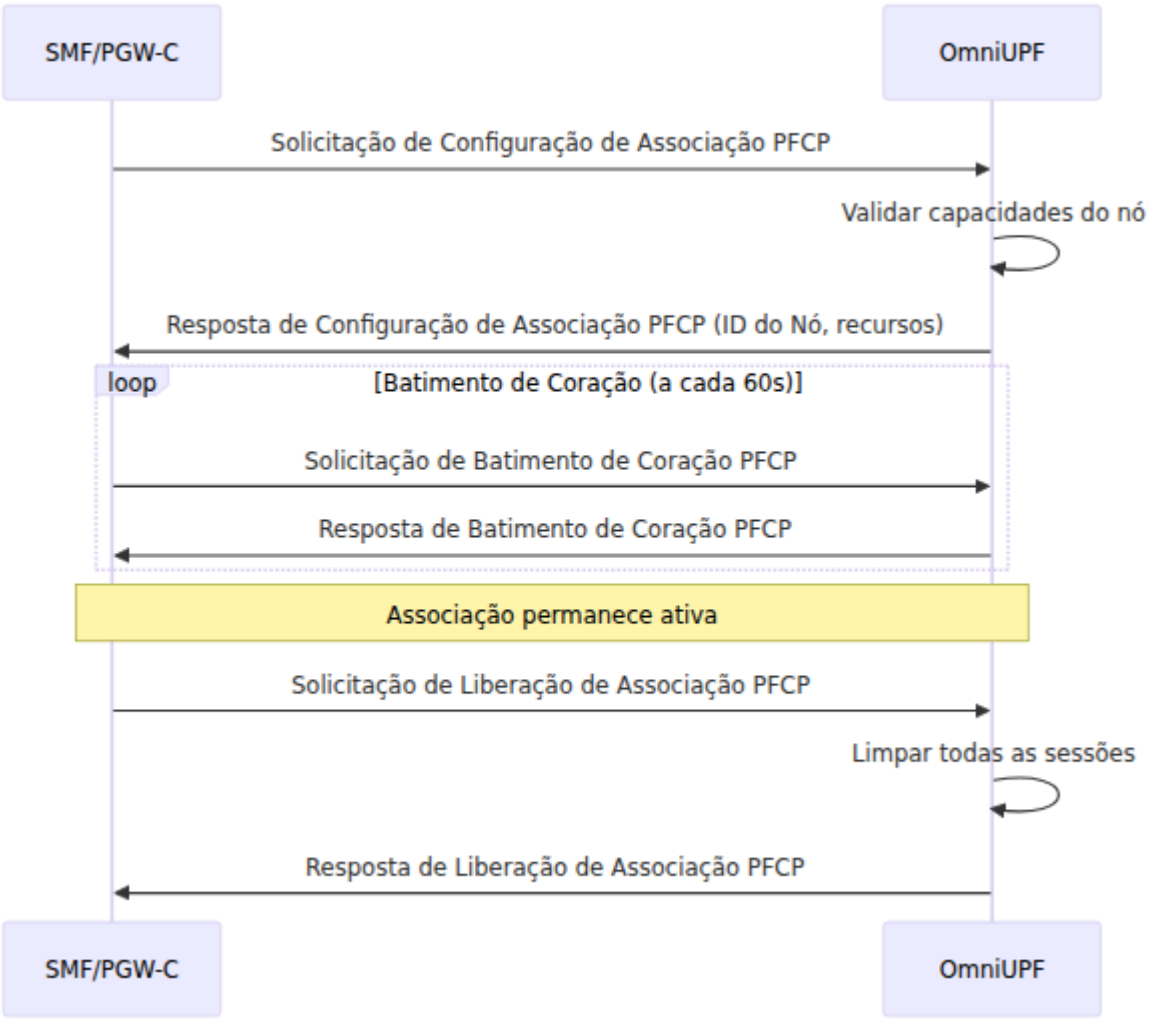
2. **Correspondência de TEID**: Apenas sessões com FARs encaminhando para o TEID errôneo exato são excluídas
3. **Isolamento por Par**: Indicações de Erro de um par apenas afetam sessões que encaminham para aquele par
4. **Múltiplas Sessões**: Se várias sessões encaminham para o mesmo TEID morto, **todas são excluídas**
5. **Complementar ao Timestamp de Recuperação**:
    - Detecção de Timestamp de Recuperação = proativa (detecta reinício durante a configuração da associação)
    - Manipulação de Indicação de Erro = reativa (detecta túneis mortos quando o tráfego flui)
6. **Manipulação de Pacote Malformado**: Indicações de Erro inválidas são registradas e ignoradas (nenhuma sessão excluída)

Para solucionar problemas de Indicações de Erro, consulte Depuração de Indicações de Erro GTP-U.

Criação de Sessão PFCP

Quando um UE estabelece uma sessão PDU (5G) ou contexto PDP (LTE), o SMF cria uma sessão PFCP no UPF.

Fluxo de Estabelecimento de Sessão:



Conteúdos Típicos da Sessão:

- **PDR de Uplink**: Combinar no TEID N3, encaminhar via FAR para N6
- **PDR de Downlink**: Combinar no endereço IP do UE, encaminhar via FAR para N3 com encapsulação GTP-U
- **FAR**: Parâmetros de encaminhamento (criação de cabeçalho externo, instância de rede)
- **QER**: Limites de QoS (MBR, GBR) e marcação de pacotes (QFI)
- **URR**: Relatório de volume para cobrança (opcional)

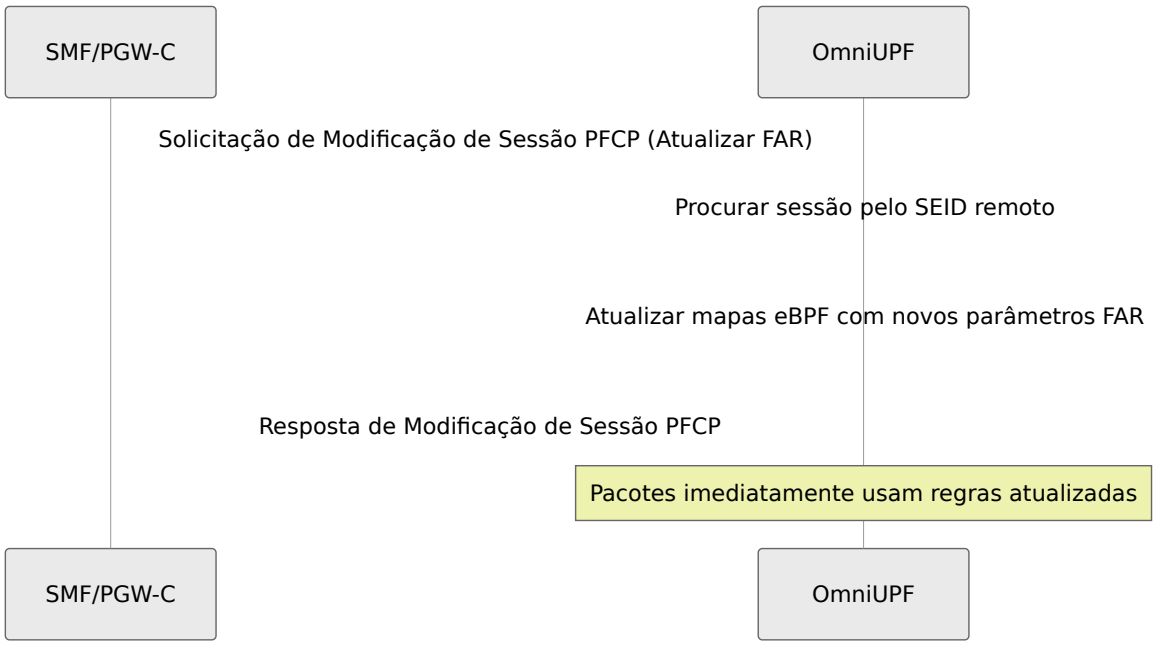
Modificação de Sessão PFCP

O SMF pode modificar sessões para eventos de mobilidade (transferência), mudanças de QoS ou atualizações de serviço.

Cenários Comuns de Modificação:

1. **Transferência (baseada em N2)**
    - Atualizar FAR de uplink com novo ponto de túnel do gNB (F-TEID)
    - Opcionalmente bufferizar pacotes durante a troca de caminho
    - Limpar o buffer para o novo caminho quando estiver pronto
2. **Mudança de QoS**
    - Atualizar QER com novos valores de MBR/GBR
    - Pode adicionar/remover filtros SDF em PDR para QoS específica de aplicação
3. **Atualização de Serviço**
    - Adicionar novos PDRs para fluxos de tráfego adicionais
    - Modificar FARs para mudanças de roteamento

Fluxo de Modificação de Sessão:

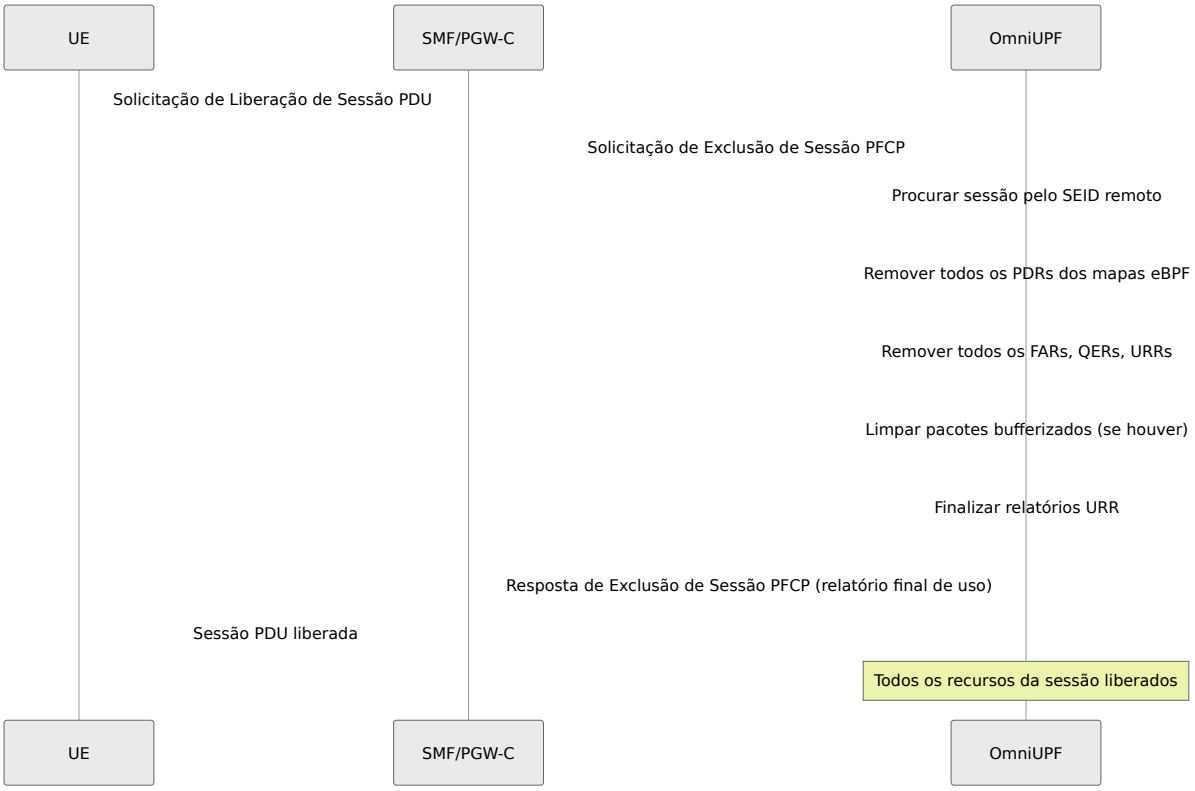


Para gerenciamento de regras, consulte Guia de Gerenciamento de Regras.

Exclusão de Sessão PFCP

Quando uma sessão PDU é liberada, o SMF exclui a sessão PFCP no UPF.

Fluxo de Exclusão de Sessão:



Limpeza Realizada:

- Todos os PDRs removidos (uplink e downlink)
- Todos os FARs, QERs, URRs removidos
- Buffers de pacotes limpos
- Relatório final de uso enviado ao SMF para cobrança

Operações Comuns

O OmniUPF fornece capacidades operacionais abrangentes através de seu painel de controle baseado na web e API REST. Esta seção cobre tarefas operacionais comuns e suas significâncias.

Monitoramento de Sessões

Entendendo Sessões PFCP:

As sessões PFCP representam sessões PDU ativas do UE (5G) ou contextos PDP (LTE). Cada sessão contém:

- SEIDs local e remoto (Identificadores de Ponto de Sessão)
- PDRs para classificação de pacotes
- FARs para decisões de encaminhamento
- QERs para aplicação de QoS (opcional)
- URRs para rastreamento de uso (opcional)

Operações Chave de Sessão:

- **Visualizar todas as sessões** com endereços IP do UE, TEIDs e contagens de regras
- **Filtrar sessões** por endereço IP ou TEID
- **Inspecionar detalhes da sessão** incluindo configurações completas de PDR/FAR/QER/URR
- **Monitorar contagens de sessão** por associação PFCP

Para procedimentos detalhados de sessão, consulte Visualização de Sessões.

Gerenciamento de Regras

Regras de Detecção de Pacotes (PDR):

As PDRs determinam quais pacotes correspondem a fluxos de tráfego específicos. Os operadores podem:

- **Visualizar PDRs de uplink** indexados por TEID da interface N3
- **Visualizar PDRs de downlink** indexados por endereço IP do UE (IPv4 e IPv6)
- **Inspecionar filtros SDF** para classificação específica de aplicação
- **Monitorar contagens de PDR** e uso de capacidade

Regras de Ação de Encaminhamento (FAR):

As FARs definem o que fazer com pacotes correspondentes. Os operadores podem:

- **Visualizar ações FAR** (ENCAMINHAR, DESCARTAR, BUFFERIZAR, DUPLICAR, NOTIFICAR)

- **Inspecionar parâmetros de encaminhamento** (criação de cabeçalho externo, destino)
- **Monitorar status de bufferização** por FAR
- **Alternar bufferização** para FARs específicas durante solução de problemas

Regras de Aplicação de QoS (QER):

As QERs aplicam limites de largura de banda e marcação de pacotes. Os operadores podem:

- **Visualizar parâmetros de QoS** (MBR, GBR)
- **Monitorar QERs ativas** por sessão
- **Inspecionar marcações QFI** para fluxos de QoS 5G

Regras de Relatório de Uso (URR):

As URRs rastreiam volumes de dados para cobrança. Os operadores podem:

- **Visualizar contadores de volume** (uplink, downlink, total de bytes)
- **Monitorar limites de uso** e gatilhos de relatório
- **Inspecionar URRs ativas** em todas as sessões

Para operações de regras, consulte Guia de Gerenciamento de Regras.

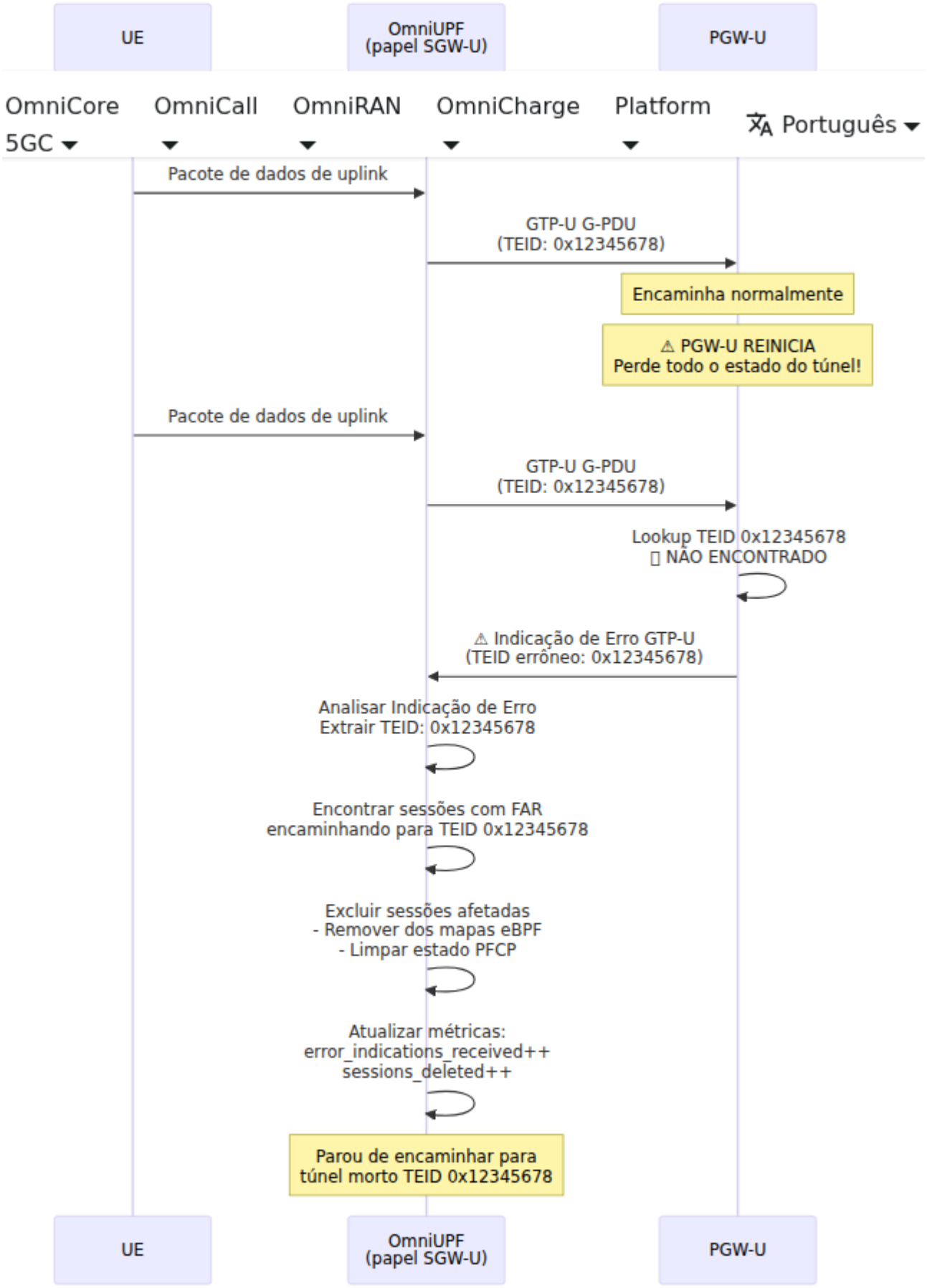
Bufferização de Pacotes

Por que a Bufferização é Crítica para o UPF

A bufferização de pacotes é uma das funções mais importantes de um UPF porque previne a perda de pacotes durante eventos de mobilidade e reconfigurações de sessão. Sem bufferização, os usuários móveis experimentariam desconexões, downloads interrompidos e falhas em comunicações em tempo real toda vez que se movessem entre torres de celular ou quando as condições da rede mudassem.

O Problema: Perda de Pacotes Durante a Mobilidade

Em redes móveis, os usuários estão constantemente se movendo. Quando um dispositivo se move de uma torre de celular para outra (transferência), ou quando a rede precisa reconfigurar o caminho de dados, há uma janela crítica onde pacotes estão em trânsito, mas o novo caminho ainda não está pronto:



Sem bufferização: Pacotes que chegam durante essa janela crítica seriam **descartados**, causando:

- **Conexões TCP estagnadas** ou redefinidas (navegação na web, downloads interrompidos)
- **Chamadas de vídeo congeladas** ou descartadas (Zoom, Teams, chamadas do WhatsApp falham)
- **Sessões de jogos desconectadas** (jogos online, aplicativos em tempo real falham)
- **Chamadas VoIP com lacunas** ou que caem completamente (chamadas telefônicas interrompidas)
- **Downloads que falham** e precisam ser reiniciados

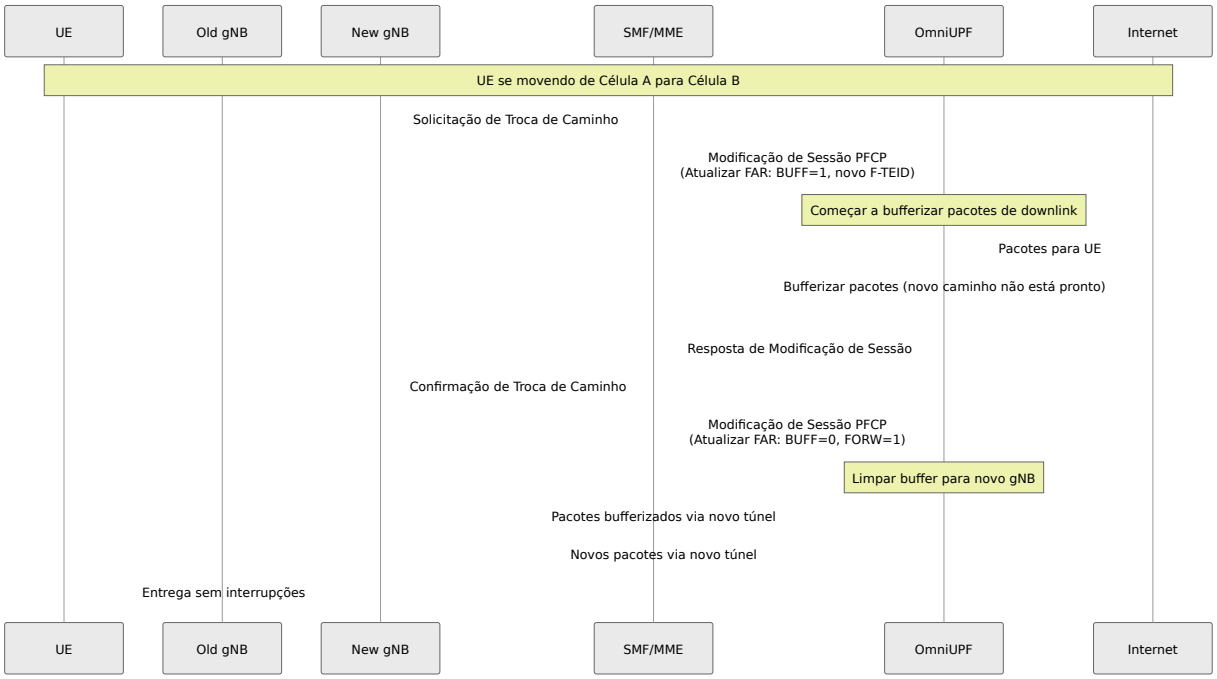
Com bufferização: OmniUPF retém temporariamente pacotes até que o novo caminho seja estabelecido, então os encaminha sem problemas. O usuário experimenta **zero interrupção**.

Quando a Bufferização Acontece

OmniUPF bufferiza pacotes nessas situações críticas:

1. Transferência Baseada em N2 (5G) / Transferência Baseada em X2 (4G)

Quando um UE se move entre torres de celular:



Linha do Tempo:

- **T+0ms**: Caminho antigo ainda ativo
- **T+10ms**: SMF diz ao UPF para bufferizar (caminho antigo fechando, novo caminho não pronto)
- **T+10-50ms**: **Janela crítica de bufferização** - pacotes chegam, mas não podem ser encaminhados
- **T+50ms**: Novo caminho pronto, SMF diz ao UPF para encaminhar
- **T+50ms+**: UPF limpa pacotes bufferizados para novo caminho, então encaminha novos pacotes normalmente

Sem bufferização: ~40ms de pacotes (potencialmente milhares) seriam **perdidos**. **Com bufferização**: Zero perda de pacotes, transferência sem interrupções.

---

2. Modificação de Sessão (Mudança de QoS, Atualização de Caminho)

Quando a rede precisa mudar parâmetros da sessão:

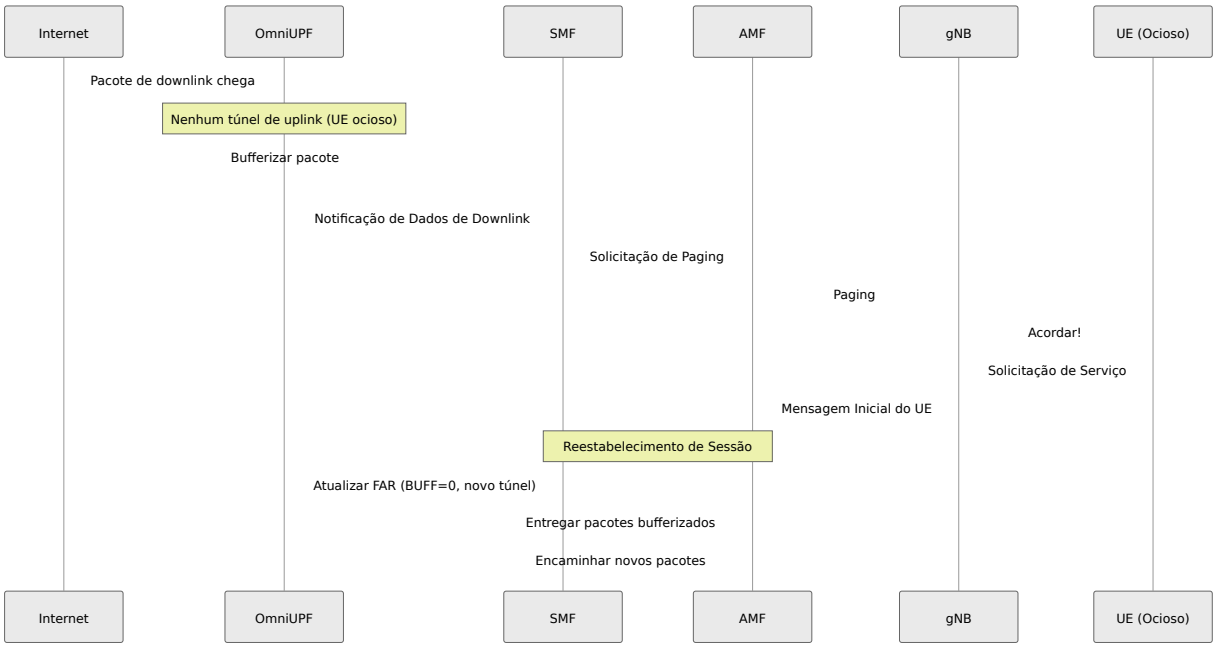
- **Atualização/diminuição de QoS**: Usuário se move de cobertura 4G para 5G (modo NSA)
- **Mudança de política**: Usuário corporativo entra no campus corporativo (mudanças de direcionamento de tráfego)
- **Otimização de rede**: A rede central redireciona tráfego para um UPF mais próximo (atualização ULCL)

Durante a modificação, o plano de controle pode precisar atualizar várias regras de forma atômica. A bufferização garante que os pacotes não sejam encaminhados com conjuntos de regras parciais/inconsistentes.

---

3. Notificação de Dados de Downlink (Recuperação em Modo Ocioso)

Quando um UE está em modo ocioso (tela desligada, economia de bateria) e dados de downlink chegam:



Sem bufferização: O pacote inicial que acionou a notificação seria **perdido**, exigindo que o remetente retransmitisse (aumenta a latência). **Com bufferização**: O pacote que acordou o UE é entregue imediatamente quando o UE reconecta.

---

4. Transferência Inter-RAT (4G ↔ 5G)

Quando um UE se move entre 4G e 5G:

- Mudanças de arquitetura (eNodeB ↔ gNB)
- Mudanças nos pontos de túnel (alocação de TEID diferente)
- A bufferização garante uma transição suave entre tipos de RAT

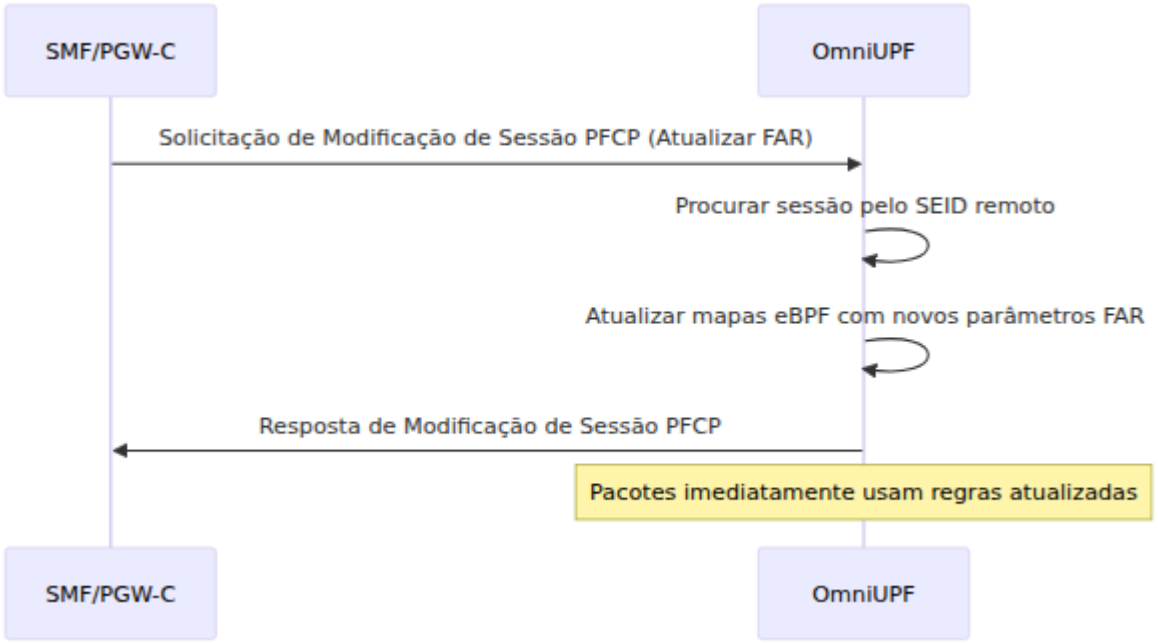
Como a Bufferização Funciona no OmniUPF

Mecanismo Técnico:

OmniUPF usa uma **arquitetura de bufferização em duas etapas**:

1. **Etapa eBPF (Kernel)**: Detecta pacotes que requerem bufferização com base em flags de ação FAR
2. **Etapa de Espaço do Usuário**: Armazena e gerencia pacotes bufferizados na memória

Processo de Bufferização:



Detalhes Chave:

- **Porta de Buffer**: Porta UDP 22152 (pacotes enviados do eBPF para o espaço do usuário)
- **Encapsulação**: Pacotes embrulhados em GTP-U com ID FAR como TEID
- **Armazenamento**: Buffers em memória por FAR com metadados (timestamp, direção, tamanho do pacote)
- **Limites**:
  - Limite por FAR: 10.000 pacotes (padrão)
  - Limite global: 100.000 pacotes em todos os FARs
  - TTL: 30 segundos (padrão) - pacotes mais velhos que TTL são descartados
- **Limpeza**: Processo em segundo plano remove pacotes expirados a cada 60 segundos

Ciclo de Vida do Buffer:

1. **Bufferização Habilitada**: SMF define ação FAR BUFF=1 (bit 2) via Modificação de Sessão PFCP
2. **Pacotes Bufferizados**: eBPF detecta flag BUFF, encapsula pacotes, envia para a porta 22152

3. **Armazenamento do Espaço do Usuário**: Gerenciador de buffer armazena pacotes com ID FAR, timestamp, direção
4. **Bufferização Desabilitada**: SMF define ação FAR FORW=1, BUFF=0 com novos parâmetros de encaminhamento
5. **Limpar Buffer**: Gerenciador do espaço do usuário reproduz pacotes bufferizados usando novas regras FAR (novo ponto de túnel)
6. **Retomar Normal**: Novos pacotes encaminhados imediatamente via novo caminho

---

Por que Isso Importa para a Experiência do Usuário

Impacto no Mundo Real:

Cenário	Sem Bufferização	Com Bufferização
Chamada de Vídeo Durante a Transferência	Chamada congela por 1-2 segundos, pode cair	Sem interrupções, nenhuma interrupção
Download de Arquivo na Borda da Célula	Download falha, precisa reiniciar	Download continua sem interrupções
Jogos Online Enquanto se Move	Conexão cai, expulso do jogo	Jogo suave, sem desconexões
Chamada VoIP no Carro	Chamada cai a cada transferência	Cristalina, sem quedas
Streaming de Vídeo no Trem	Vídeo bufferiza, qualidade cai	Reprodução suave
Hotspot Móvel para Laptop	Sessão SSH cai, chamada de vídeo falha	Todas as conexões mantidas

Benefícios para o Operador de Rede:

- **Redução da Taxa de Queda de Chamadas (CDR)**: KPI crítico para qualidade da rede
- **Maior Satisfação do Cliente**: Usuários não percebem transferências
- **Menores Custos de Suporte**: Menos reclamações sobre conexões caindo
- **Vantagem Competitiva**: "Melhor rede para cobertura" marketing

---

Operações de Gerenciamento de Buffer

Os operadores podem monitorar e controlar a bufferização através da Interface Web e API:

Monitoramento:

- **Visualizar pacotes bufferizados** por ID FAR (contagem, bytes, idade)
- **Rastrear uso de buffer** em relação aos limites (por FAR, global)
- **Alertar sobre overflow de buffer** ou duração excessiva de bufferização
- **Identificar buffers presos** (pacotes bufferizados > limite TTL)

Operações de Controle:

- **Limpar buffers**: Acionar manualmente a reprodução do buffer (solução de problemas)
- **Limpar buffers**: Descartar pacotes bufferizados (limpar buffers presos)
- **Ajustar TTL**: Alterar tempo de expiração dos pacotes
- **Modificar limites**: Aumentar capacidade de buffer por FAR ou global

Solução de Problemas:

- **Buffer não limpando**: Verifique se o SMF enviou atualização de FAR para desabilitar bufferização
- **Overflow de buffer**: Aumente limites ou investigue por que a duração da bufferização é excessiva
- **Pacotes antigos no buffer**: TTL pode estar muito alto, ou atualização de FAR atrasada
- **Bufferização excessiva**: Pode indicar problemas de mobilidade ou problemas com o SMF

Para operações detalhadas de buffer, consulte Guia de Gerenciamento de Buffer.

Configuração de Buffer

Configure o comportamento de bufferização em `/etc/omniupf/runtime.exs`:

```
# Configurações de Buffer
buffer_port = 22152                # Porta UDP para pacotes
bufferizados (padrão)
```

Recomendações:

- **Redes de alta mobilidade** (estradas, trens): Aumente `buffer_max_packets` para 20.000+
- **Áreas urbanas densas** (transferências frequentes): Diminua `buffer_packet_ttl` para 15s
- **Aplicações de baixa latência**: Defina `buffer_packet_ttl` para 10s para evitar dados obsoletos
- **Redes IoT**: Diminua limites (dispositivos IoT geram menos tráfego durante a transferência)

Para opções completas de configuração, consulte Guia de Configuração.

Estatísticas e Monitoramento

Estatísticas de Pacotes:

Métricas de processamento de pacotes em tempo real, incluindo:

- **Pacotes RX**: Total recebido de todas as interfaces
- **Pacotes TX**: Total transmitido para todas as interfaces
- **Pacotes descartados**: Pacotes descartados devido a erros ou políticas
- **Pacotes GTP-U**: Contagens de pacotes encapsulados

Estatísticas de Rota:

Métricas de encaminhamento por rota:

- **Acertos de Rota**: Pacotes correspondidos por cada rota
- **Contagens de Encaminhamento**: Sucesso/falha por destino
- **Contadores de Erro**: TEIDs inválidos, IPs desconhecidos do UE

Estatísticas de XDP:

Métricas de desempenho do eXpress Data Path:

- **XDP processados**: Pacotes tratados na camada XDP
- **XDP passados**: Pacotes enviados para a pilha de rede
- **XDP descartados**: Pacotes descartados na camada XDP
- **XDP abortados**: Erros de processamento

Estatísticas da Interface N3/N6:

Contadores de tráfego por interface:

- **N3 RX/TX**: Tráfego de/para a RAN (gNB/eNodeB)
- **N6 RX/TX**: Tráfego de/para a rede de dados
- **Contagens totais de pacotes**: Estatísticas agregadas da interface

Para detalhes sobre monitoramento, consulte Guia de Monitoramento.

Gerenciamento de Capacidade

Monitoramento de Capacidade de Mapas eBPF:

O desempenho do UPF depende da capacidade dos mapas eBPF. Os operadores podem:

- **Monitorar uso de mapas** com indicadores de porcentagem em tempo real
- **Visualizar limites de capacidade** para cada mapa eBPF
- **Alertas codificados por cores**:
  - Verde (<50%): Normal

    - Amarelo (50-70%): Cuidado
    - Âmbar (70-90%): Aviso
    - Vermelho (>90%): Crítico

Mapas Críticos a Monitorar:

- `uplink_pdr_map`: Classificação de tráfego de uplink
- `downlink_pdr_map`: Classificação de tráfego de downlink IPv4
- `far_map`: Regras de encaminhamento
- `qer_map`: Regras de QoS
- `urr_map`: Rastreamento de uso

Planejamento de Capacidade:

- Cada PDR consome uma entrada de mapa (tamanho da chave + tamanho do valor)
- A capacidade do mapa é configurada na inicialização do UPF (limite de memória do kernel)
- Exceder a capacidade causa falhas na criação de sessões

Para monitoramento de capacidade, consulte Gerenciamento de Capacidade.

Gerenciamento de Configuração

Configuração do UPF:

Visualize e verifique os parâmetros operacionais do UPF:

- **Interface N3**: Endereço IP para conectividade com a RAN (GTP-U)
- **Interface N6**: Endereço IP para conectividade com a rede de dados
- **Interface N9**: Endereço IP para comunicação inter-UPF (opcional)
- **Interface PFCP**: Endereço IP para conectividade com SMF
- **Porta da API**: Porta de escuta da API REST
- **Endpoint de Métricas**: Porta de métricas do Prometheus

Configuração do Dataplane:

Parâmetros ativos do caminho de dados eBPF:

- **Endereço N3 ativo**: Ligação da interface N3 em tempo de execução
- **Endereço N9 ativo**: Ligação da interface N9 em tempo de execução (se habilitada)

Para visualização de configuração, consulte Visualização de Configuração.

Solução de Problemas

Esta seção cobre problemas operacionais comuns e suas estratégias de resolução.

Falhas no Estabelecimento de Sessão

Sintomas: Sessões PFCP falham ao criar, UE não consegue estabelecer conectividade de dados

Causas Raiz Comuns:

1. **Associação PFCP Não Estabelecida**
    - Verifique se o SMF pode alcançar a interface PFCP do UPF (porta 8805)
    - Verifique o status da associação PFCP na visualização de Sessões
    - Verifique se a configuração do ID do Nó corresponde entre SMF e UPF
2. **Capacidade do Mapa eBPF Exaurida**
    - Verifique a visualização de Capacidade para uso de mapa vermelho (>90%)
    - Aumente os tamanhos dos mapas eBPF na configuração do UPF
    - Exclua sessões obsoletas se o mapa estiver cheio
3. **Configuração Inválida de PDR/FAR**
    - Verifique se o endereço IP do UE é único e válido
    - Verifique se a alocação de TEID não está em conflito
    - Certifique-se de que o FAR referencia instâncias de rede válidas

4. **Problemas de Configuração de Interface**
    - Verifique se o IP da interface N3 é acessível a partir do gNB
    - Verifique tabelas de roteamento para conectividade N6 com a rede de dados
    - Confirme se o tráfego GTP-U não está bloqueado por firewall

Para solução de problemas detalhada, consulte Guia de Solução de Problemas.

Problemas de Perda ou Encaminhamento de Pacotes

Sintomas: UE tem conectividade, mas experimenta perda de pacotes ou nenhum fluxo de tráfego

Causas Raiz Comuns:

1. **Configuração de PDR Incorreta**
    - Verifique se o TEID de uplink PDR corresponde ao TEID atribuído pelo gNB
    - Verifique se o PDR de downlink IP do UE corresponde ao IP atribuído
    - Inspecione filtros SDF para regras excessivamente restritivas
2. **Problemas de Ação FAR**
    - Verifique se a ação FAR é ENCAMINHAR (não DESCARTAR ou BUFFERIZAR)
    - Verifique os parâmetros de criação de cabeçalho externo para GTP-U
    - Certifique-se de que o endpoint de destino está correto
3. **Limites de QoS Excedidos**
    - Verifique as configurações de QER MBR (Taxa

Guia de Arquitetura do OmniUPF

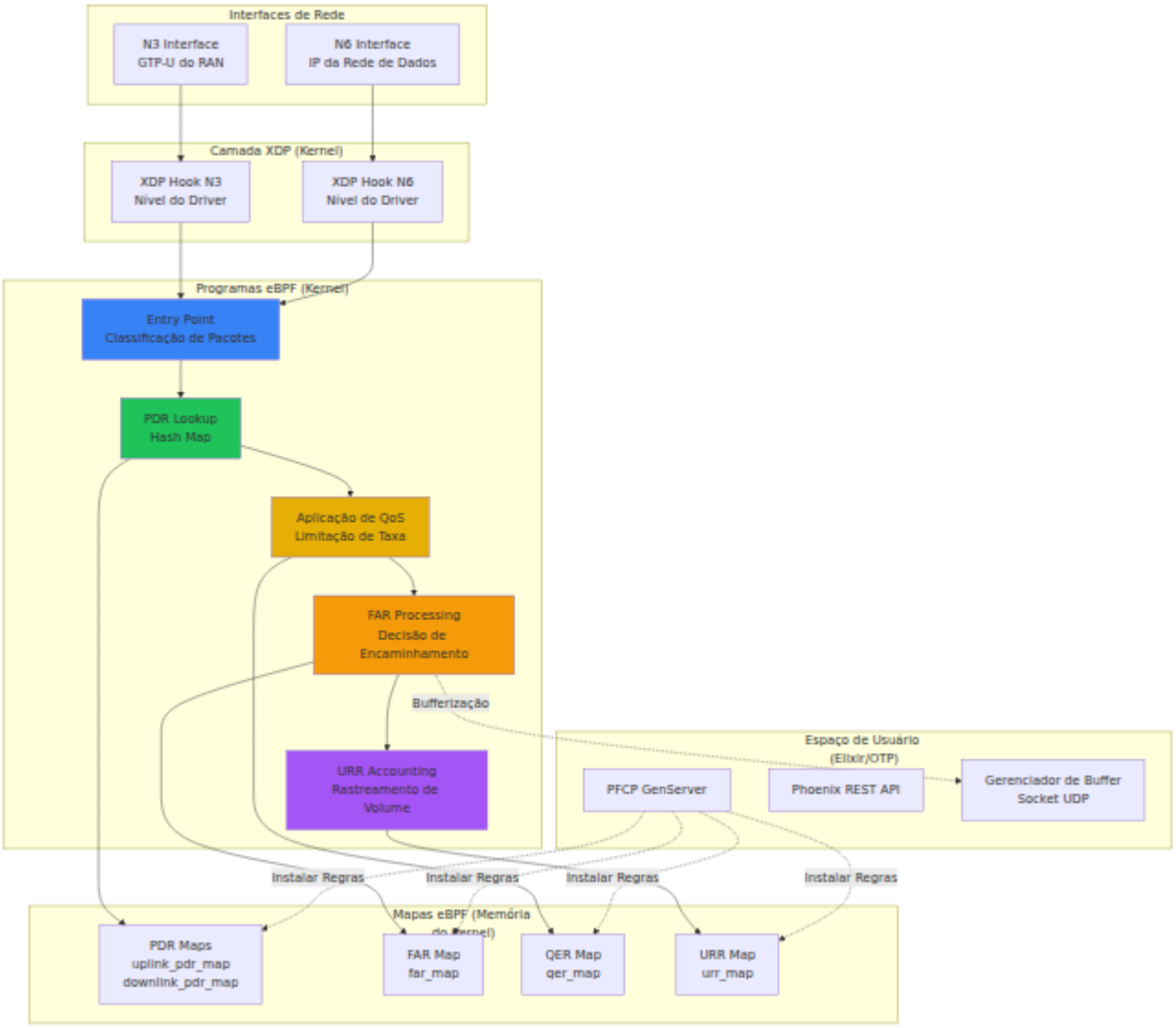
Índice

Visão Geral

OmniUPF aproveita o eBPF (Extended Berkeley Packet Filter) e o XDP (eXpress Data Path) para alcançar desempenho de nível carrier-grade para processamento de pacotes 5G/LTE. O plano de controle é implementado em Elixir/OTP usando gerenciamento de sessão PFCP baseado em GenServer, enquanto o plano de dados executa programas eBPF diretamente no kernel do Linux. Essa separação elimina a sobrecarga do processamento de pacotes em espaço de usuário e alcança uma taxa de transferência de múltiplos gigabits com latência de microssegundos.

O arquivo objeto eBPF (`ipentrypoint_bpf.o`) é compilado a partir do código-fonte C (no diretório `ebpf/xdp/`) e carregado em tempo de execução pelo plano de controle Elixir via ligações NIF para libbpf.

Camadas da Arquitetura



Princípios de Design Chave

Processamento Zero-Copy:

- Pacotes processados inteiramente no espaço do kernel
- Sem cópias de dados entre o kernel e o espaço de usuário
- Manipulação direta de pacotes usando XDP

Estruturas de Dados Sem Bloqueio:

- Mapas eBPF usam tabelas hash por CPU
- Operações atômicas para acesso concorrente

- Sem sobrecarga de mutex/spinlock

Pronto para Offload de Hardware:

- O modo de offload XDP suporta execução em SmartNIC
- Compatível com placas de rede que suportam XDP
- Retorno para modos nativos de driver ou genéricos

Fundação da Tecnologia eBPF

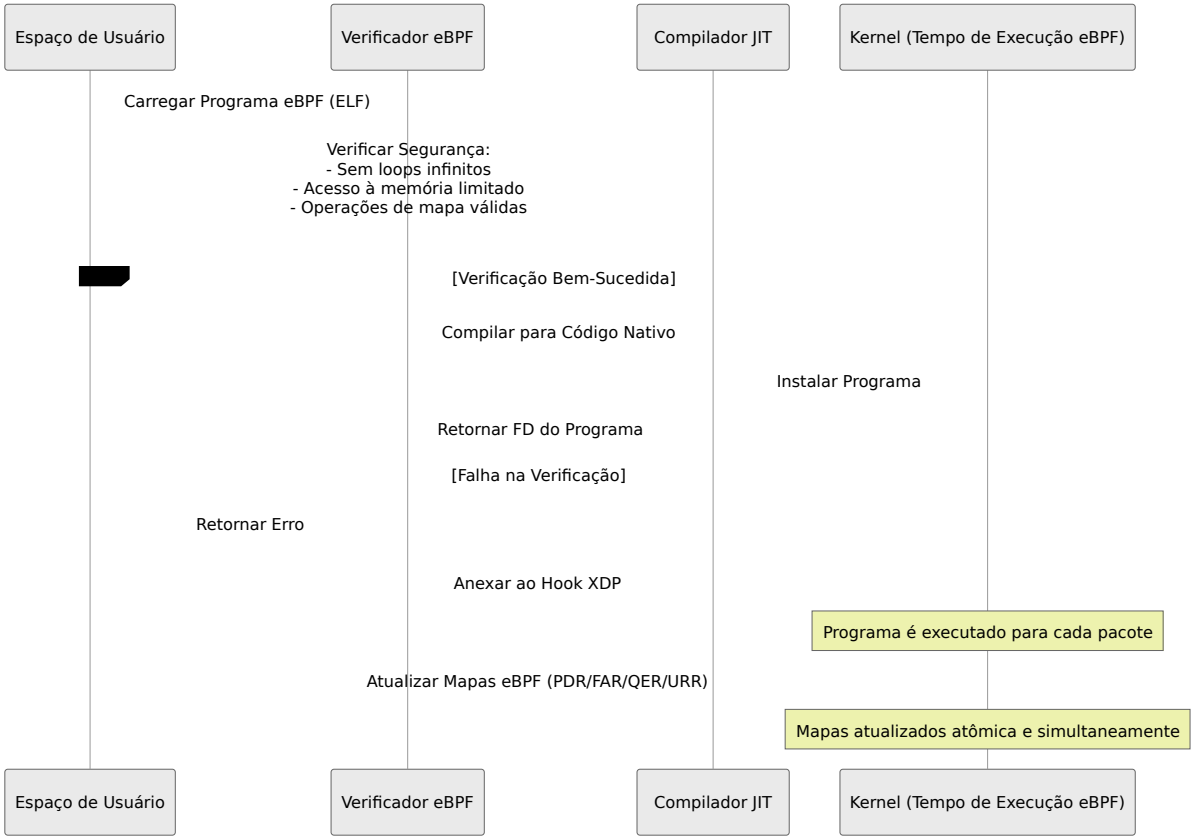
O que é eBPF?

eBPF (Extended Berkeley Packet Filter) é uma tecnologia revolucionária do kernel Linux que permite que programas seguros e isolados sejam executados no espaço do kernel sem alterar o código-fonte do kernel ou carregar módulos do kernel.

Características Principais:

- **Segurança**: O verificador eBPF garante que os programas não possam travar o kernel
- **Desempenho**: Executa na velocidade nativa do kernel (sem sobrecarga de interpretação)
- **Flexibilidade**: Pode ser atualizado em tempo de execução sem reiniciar o kernel
- **Observabilidade**: Rastreio e estatísticas integrados

Ciclo de Vida do Programa eBPF



Mapas eBPF

Os mapas eBPF são estruturas de dados do kernel compartilhadas entre programas eBPF e espaço de usuário.

Tipos de Mapa Usados no OmniUPF:

Tipo de Mapa	Descrição	Caso de Uso
`BPF_MAP_TYPE_HASH`	Tabela hash com pares chave-valor	Pesquisa PDR por TEID ou IP do UE
`BPF_MAP_TYPE_ARRAY`	Array indexado por inteiro	Pesquisa QER, FAR, URR por ID
`BPF_MAP_TYPE_PERCPU_HASH`	Tabela hash por CPU (sem bloqueio)	Pesquisas PDR de alto desempenho
`BPF_MAP_TYPE_LRU_HASH`	Hash LRU (Least Recently Used)	Evicção automática de entradas antigas

Operações de Mapa:

- **Lookup**: O(1) pesquisa hash (sub-microsegundo)
- **Update**: Atualizações atômicas do espaço de usuário
- **Delete**: Remoção imediata de entradas
- **Iterate**: Operações em lote para despejos de mapa

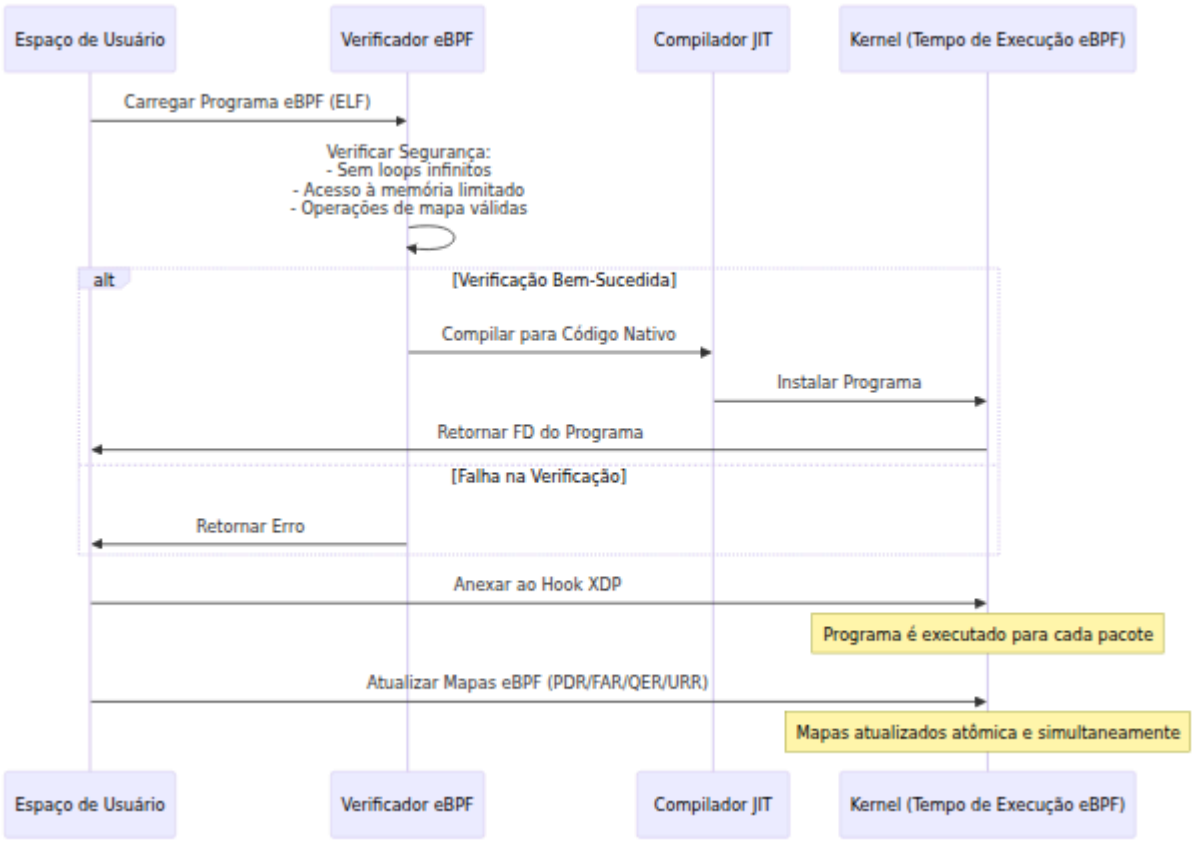
Caminho de Dados XDP

Visão Geral do XDP

XDP (eXpress Data Path) é um hook do kernel Linux que permite que programas eBPF processem pacotes no ponto mais precoce possível—logo após o driver de rede recebê-los, antes da pilha de rede do kernel.

Modos de Anexação do XDP

OmniUPF suporta três modos de anexação do XDP, cada um com diferentes características de desempenho e compatibilidade.



1. Modo de Offload XDP

Execução em Hardware (Melhor Desempenho):

- Programa eBPF é executado diretamente no hardware SmartNIC
- Processamento de pacotes no NIC sem tocar na CPU
- Alcança taxa de transferência de 100 Gbps+
- Requer SmartNIC compatível (Netronome, Mellanox ConnectX-6)

Configuração (em `runtime.exs`):

```
xdp_attach_mode = "offload"
```

Limitações:

- Requer hardware SmartNIC caro
- Complexidade limitada do programa eBPF
- Nem todos os recursos eBPF suportados em hardware

---

2. Modo Nativo XDP (Padrão para Produção)

Execução em Nível de Driver (Alto Desempenho):

- Programa eBPF é executado no contexto do driver de rede
- Pacotes processados antes da alocação de SKB (socket buffer)
- Alcança 10-40 Gbps por núcleo
- Requer driver com suporte a XDP (a maioria dos drivers modernos)

Configuração (em `runtime.exs`):

```
xdp_attach_mode = "native"
```

Vantagens:

- Desempenho muito alto (milhões de pps)
- Ampla compatibilidade de hardware
- Conjunto completo de recursos eBPF

Drivers Suportados:

- Intel: i40e, ice, ixgbe, igb
- Mellanox: mlx4, mlx5
- Broadcom: bnxt
- Amazon: ena
- A maioria das placas de rede 10G+

---

3. Modo Genérico XDP

Emulação de Software (Compatibilidade):

- Programa eBPF é executado após o kernel alocar SKB
- Emulação de software do comportamento XDP
- Funciona em qualquer interface de rede
- Útil para testes e desenvolvimento

Configuração (em `runtime.exs`):

```
xdp_attach_mode = "generic"
```

Casos de Uso:

- Desenvolvimento e testes
- Ambientes virtualizados (VMs sem SR-IOV)
- Hardware de rede mais antigo
- Testes de interface de loopback

Desempenho: 1-5 Gbps (significativamente mais lento que nativo/offload)

Códigos de Retorno do XDP

Programas eBPF retornam códigos de ação XDP para informar ao kernel o que fazer com os pacotes:

Código de Retorno	Significado	Uso no OmniUPF
`XDP_PASS`	Enviar pacote para a pilha de rede do kernel	Bufferização (entrega local), ICMP, tráfego desconhecido
`XDP_DROP`	Descartar pacote imediatamente	Pacotes inválidos, limitação de taxa, descartes de política
`XDP_TX`	Transmitir pacote de volta pela mesma interface	Não utilizado atualmente
`XDP_REDIRECT`	Enviar pacote para interface diferente	Caminho principal de encaminhamento (N3 ↔ N6)
`XDP_ABORTED`	Erro de processamento, descartar pacote e registrar	Erros de programa eBPF

Pipeline de Processamento de Pacotes

Estrutura do Programa

OmniUPF usa chamadas de cauda eBPF para criar um pipeline modular de processamento de pacotes.

Chamadas de Cauda:

- Permitem que programas eBPF chamem outros programas eBPF
- Reutiliza o mesmo quadro de pilha (profundidade de pilha limitada)

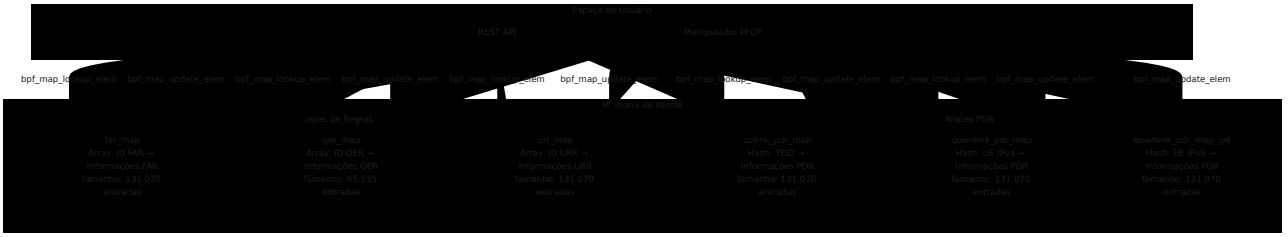
- Habilita design modular de pipeline
- Profundidade máxima de 33 chamadas de cauda

Processamento de Pacotes de Uplink

Processamento de Pacotes de Downlink

Arquitetura do Mapa eBPF

Layout da Memória do Mapa



Dimensionamento do Mapa

OmniUPF calcula automaticamente os tamanhos dos mapas com base na configuração `max_sessions`:

```
Mapas PDR = 2 × max_sessions  (uplink + downlink)
Mapas FAR = 2 × max_sessions  (uplink + downlink)
Mapas QER = 1 × max_sessions  (compartilhado por sessão)
Mapas URR = 3 × max_sessions  (múltiplos URRs por sessão)
```

Exemplo (max_sessions = 65.535):

- Mapas PDR: 131.070 entradas cada
- Mapa FAR: 131.070 entradas
- Mapa QER: 65.535 entradas
- Mapa URR: 131.070 entradas

Memória Total:

```
Mapas PDR: 3 × 131.070 × 212 B = ~83 MB
Mapa FAR:  131.070 × 20 B = ~2.6 MB
Mapa QER:  65.535 × 36 B = ~2.3 MB
Mapa URR:  131.070 × 20 B = ~2.6 MB
Total: ~91 MB de memória do kernel
```

Mecanismo de Bufferização

Visão Geral da Bufferização

OmniUPF implementa bufferização de pacotes para cenários de transferência de controle encapsulando pacotes em GTP-U e enviando-os para um processo de espaço de usuário via socket UDP.

Arquitetura de Bufferização

Parse error on line 4: ...ionar Cabeçalho UDP (porta 22152)
3. ----------^ Expecting 'SQE', 'DOUBLECIRCLEEND', 'PE', '-)', 'STADIUMEND', 'SUBROUTINEEND', 'PIPE', 'CYLINDEREND', 'DIAMOND_STOP', 'TAGEND', 'TRAPEND', 'INVTRAPEND', 'UNICODE_TEXT', 'TEXT', 'TAGSTART', got 'PS'

Tentar novamente

Detalhes da Encapsulação do Buffer

Quando a bufferização está habilitada (bit de ação FAR 2 definido), o programa eBPF:

1. **Calcula o Tamanho do Pacote Original**:

```
orig_packet_len = ntohs(ip->tot_len);  // Do cabeçalho IP
```

2. **Expande o Cabeçalho do Pacote**:

```
// Adicionar espaço para: IP Externo + UDP + GTP-U
gtp_encap_size = sizeof(struct iphdr) + sizeof(struct udphdr) +
sizeof(struct gtpuhdr);
bpf_xdp_adjust_head(ctx, -gtp_encap_size);
```

3. **Constrói o Cabeçalho IP Externo**:

```
ip->saddr = original_sender_ip;  // Preservar fonte para evitar
filtragem martiana
ip->daddr = local_upf_ip;        // IP local onde o listener de
espaço de usuário se conecta
ip->protocol = IPPROTO_UDP;
ip->ttl = 64;
```

4. **Constrói o Cabeçalho UDP**:

```
udp->source = htons(22152);  // BUFFER_UDP_PORT
udp->dest = htons(22152);
udp->len = htons(sizeof(udphdr) + sizeof(gtpuhdr) +
orig_packet_len);
```

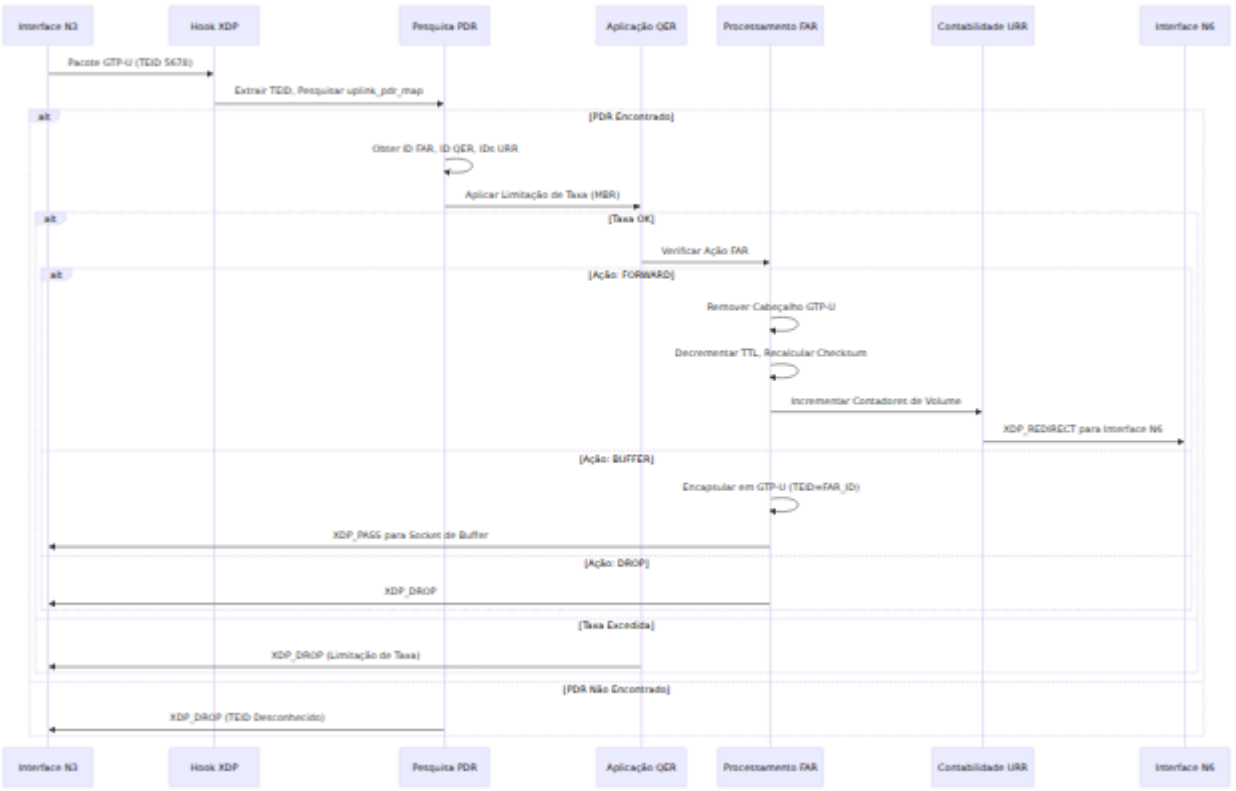
5. **Constrói o Cabeçalho GTP-U**:

```
gtp->version = 1;
gtp->message_type = GTPU_G_PDU;
gtp->teid = htonl(far_id | (direction << 24));  // Codificar ID
FAR e direção
gtp->message_length = htons(orig_packet_len);
```

6. **Retorna XDP_PASS**:
    - O kernel entrega o pacote ao socket UDP local na porta 22152
    - O gerenciador de buffer de espaço de usuário recebe e armazena o pacote

Operação de Limpeza do Buffer

Quando a transferência é concluída, o SMF atualiza o FAR para limpar a flag BUFFER. Os pacotes armazenados são reproduzidos:



Parâmetros de Gerenciamento de Buffer

Parâmetro	Padrão	Descrição
Máximo por FAR	10.000 pacotes	Máximo de pacotes armazenados por FAR
Máximo Total	100.000 pacotes	Máximo total de pacotes armazenados
TTL do Pacote	30 segundos	Tempo antes que pacotes armazenados expirem
Porta de Buffer	22152	Porta UDP para entrega de buffer
Intervalo de Limpeza do Buffer	60 segundos	Com que frequência verificar pacotes expirados

Aplicação de QoS

Algoritmo de Limitação de Taxa

OmniUPF implementa um **limitador de taxa de janela deslizante** para aplicação de QoS.

Parse error on line 5: ...amanho_pacote × 8 × (NSEC_PER_SEC / taxa ----------
----------^ Expecting 'SQE', 'DOUBLECIRCLEEND', 'PE', '-)', 'STADIUMEND',
'SUBROUTINEEND', 'PIPE', 'CYLINDEREND', 'DIAMOND_STOP', 'TAGEND',
'TRAPEND', 'INVTRAPEND', 'UNICODE_TEXT', 'TEXT', 'TAGSTART', got 'PS'

Tentar novamente

Implementação da Janela Deslizante

Algoritmo (de `qer.h`):

```c
static __always_inline enum xdp_action limit_rate_sliding_window(
    const __u64 packet_size,
    volatile __u64 *window_start,
    const __u64 rate)
{
    static const __u64 NSEC_PER_SEC = 1000000000ULL;
    static const __u64 window_size = 5000000ULL;  // janela de 5ms

    // Taxa = 0 significa ilimitado
    if (rate == 0)
        return XDP_PASS;

    // Calcular tempo de transmissão para este pacote
    __u64 tx_time = packet_size * 8 * (NSEC_PER_SEC / rate);
    __u64 now = bpf_ktime_get_ns();

    // Verificar se estamos à frente da janela (pacote seria
transmitido no futuro)
    __u64 start = *window_start;
    if (start + tx_time > now)
        return XDP_DROP;  // Limite de taxa excedido

    // Se a janela passou, redefina-a
    if (start + window_size < now) {
        *window_start = now - window_size + tx_time;
        return XDP_PASS;
    }

    // Atualizar janela para contabilizar este pacote
    *window_start = start + tx_time;
    return XDP_PASS;
}
```

Parâmetros Chave:

- **Tamanho da Janela**: 5ms (5.000.000 nanosegundos)
- **Por Direção**: Janelas separadas para uplink e downlink
- **Atualizações Atômicas**: Usa ponteiros voláteis para acesso concorrente
- **MBR = 0**: Tratado como largura de banda ilimitada

Exemplo de Cálculo de QoS

Cenário: MBR = 100 Mbps, Tamanho do Pacote = 1500 bytes

1. **Tempo de Transmissão**:

```
tx_time = 1500 bytes × 8 bits/byte × (1.000.000.000 ns/sec ÷
100.000.000 bps)
tx_time = 1500 × 8 × 10 = 120.000 ns = 120 µs
```

2. **Verificação de Taxa**:

   - Se o último pacote foi transmitido em `t=0`, o próximo pacote pode ser transmitido em `t=120µs`
   - Se o pacote chega em `t=100µs`, ele é descartado (muito cedo)
   - Se o pacote chega em `t=150µs`, ele é encaminhado (janela avançada)

3. **Taxa Máxima de Pacotes**:

```
Max PPS = (100 Mbps ÷ 8) ÷ 1500 bytes = 8.333 pacotes/segundo
Gap entre pacotes = 120 µs
```

Características de Desempenho

Taxa de Transferência

Configuração	Taxa de Transferência	Pacotes/Segundo	Latência
XDP Offload (SmartNIC)	100 Gbps	148 Mpps	< 1 µs
XDP Nativo (NIC de 10G, núcleo único)	10 Gbps	8 Mpps	2-5 µs
XDP Nativo (NIC de 10G, 4 núcleos)	40 Gbps	32 Mpps	2-5 µs
XDP Genérico	1-5 Gbps	0.8-4 Mpps	50-100 µs

Quebra de Latência

Latência Total de Processamento de Pacotes (XDP Nativo):

Estágio	Latência	Acumulativo
RX do NIC	0.5 µs	0.5 µs
Invocação do Hook XDP	0.1 µs	0.6 µs
Pesquisa PDR (Hash)	0.3 µs	0.9 µs
Verificação de Taxa QER	0.1 µs	1.0 µs
Processamento FAR	0.5 µs	1.5 µs
Atualização URR	0.2 µs	1.7 µs
Encapsulação/Decapsulação GTP-U	0.8 µs	2.5 µs
XDP_REDIRECT	0.5 µs	3.0 µs
TX do NIC	0.5 µs	3.5 µs

Total: ~3.5 µs por pacote (XDP Nativo, NIC de 10G)

Utilização da CPU

Capacidade de Processamento por Núcleo:

- Núcleo único: 8-10 Mpps (XDP Nativo)
- Com hyper-threading: 12-15 Mpps
- Escalonamento multi-núcleo: quase linear até 8 núcleos

Uso da CPU pela Taxa de Pacotes:

```
Uso da CPU % ≈ (Taxa de Pacotes / 10.000.000) × 100% por núcleo
```

Exemplo: Tráfego de 2 Mpps usa ~20% de um núcleo

Largura de Banda da Memória

Acesso ao Mapa eBPF:

- Pesquisa hash: ~100 ns (acerto de cache)
- Pesquisa hash: ~300 ns (erro de cache)
- Pesquisa de array: ~50 ns (sempre acerto de cache)

Largura de Banda de Memória Requerida:

```
Largura de Banda = Taxa de Pacotes × (Tamanho Médio do Pacote + Pesquisas de Mapa × 64 bytes)
```

Exemplo: 10 Mpps × (1500 B + 3 pesquisas × 64 B) ≈ 160 Gbps de largura de banda de memória

Escalabilidade e Ajustes

Escalonamento Horizontal

Múltiplas Instâncias UPF:

Setting SMF as parent of SMF would create a cycle

Tentar novamente

Distribuição de Sessões:

- O SMF distribui sessões entre as instâncias UPF
- Cada UPF gerencia um subconjunto das sessões do UE
- Nenhuma comunicação inter-UPF necessária (sem estado)

Escalonamento Vertical

Ajustes de CPU:

1. Habilitar afinidade de CPU para processamento XDP

2. Usar RSS (Receive Side Scaling) para distribuir filas RX
3. Fixar programas eBPF em núcleos específicos

Ajustes de NIC:

1. Aumentar o tamanho do buffer de anel RX
2. Habilitar NICs de múltiplas filas (RSS)
3. Usar diretor de fluxo para direcionamento de tráfego

Ajustes de Kernel:

```
# Aumentar limite de memória bloqueada para mapas eBPF
ulimit -l unlimited

# Desativar balanceamento de IRQ para núcleos XDP
systemctl stop irqbalance

# Definir governador da CPU para desempenho
cpupower frequency-set -g performance

# Aumentar tamanhos de buffer de rede
sysctl -w net.core.rmem_max=134217728
sysctl -w net.core.wmem_max=134217728
```

Planejamento de Capacidade

Fórmula:

```
Núcleos de CPU Requeridos = (PPS Esperados ÷ 10.000.000) × 1.5
(50% de margem)
Memória Requerida = (Sessões Máximas × 212 B × 3) + 100 MB (mapas
eBPF + sobrecarga)
Rede Requerida = (Taxa de Pico × 2) + 10 Gbps (margem)
```

Exemplo (1 milhão de sessões, 20 Gbps de pico):

- CPU: (20 Gbps ÷ 10 Gbps por núcleo) × 1.5 = 3-4 núcleos
- Memória: (1M × 212 B × 3) + 100 MB ≈ 750 MB

- Rede: (20 Gbps × 2) + 10 Gbps = 50 Gbps de interfaces

Documentação Relacionada

- **Guia de Operações do UPF** - Operações gerais do UPF e implantação
- **Guia de Gerenciamento de Regras** - Detalhes sobre PDR, FAR, QER, URR
- **Guia de Monitoramento** - Monitoramento de desempenho e métricas
- **Guia de Operações da Interface Web** - Uso do painel de controle
- **Guia de Solução de Problemas** - Problemas comuns e diagnósticos
- **Guia de Jardim Murado** - Redirecionamento fora de crédito usando o mecanismo BUFF para interceptação de pacotes em espaço de usuário

Guia de Configuração do OmniUPF

Índice

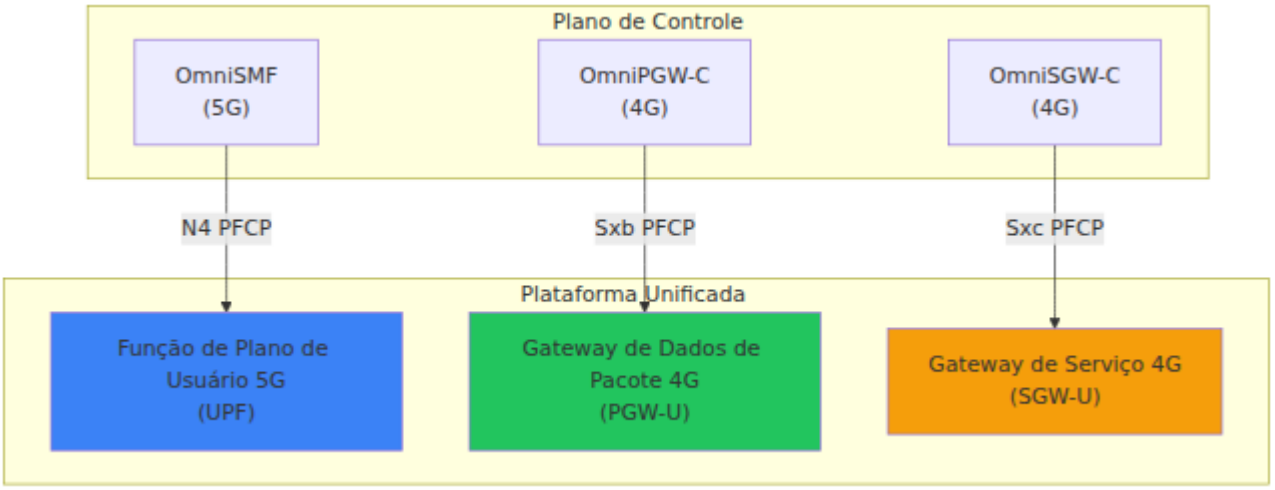
Visão Geral

OmniUPF é uma função de plano de usuário versátil que pode operar em múltiplos modos para suportar redes centrais 4G (EPC) e 5G. O plano de controle é implementado em Elixir/OTP, e a configuração é gerenciada através de um arquivo de configuração Elixir (`runtime.exs`).

Na instalação do pacote, o arquivo de configuração é colocado em `/etc/omniupf/runtime.exs` e preservado durante as atualizações. O UPF deve ser reiniciado após alterações na configuração.

Modos de Operação

OmniUPF é uma **plataforma unificada** que pode operar simultaneamente como:



Configuração do Modo

O modo de operação é **determinado pelo plano de controle** (SMF, PGW-C ou SGW-C) que estabelece associações PFCP com o OmniUPF. Nenhuma configuração específica do OmniUPF é necessária para alternar entre os modos.

Operação Simultânea:

- OmniUPF pode aceitar associações PFCP de múltiplos planos de controle simultaneamente
- Uma única instância do OmniUPF pode atuar como UPF, PGW-U e SGW-U **ao mesmo tempo**
- Sessões de diferentes planos de controle são isoladas e gerenciadas de forma independente

---

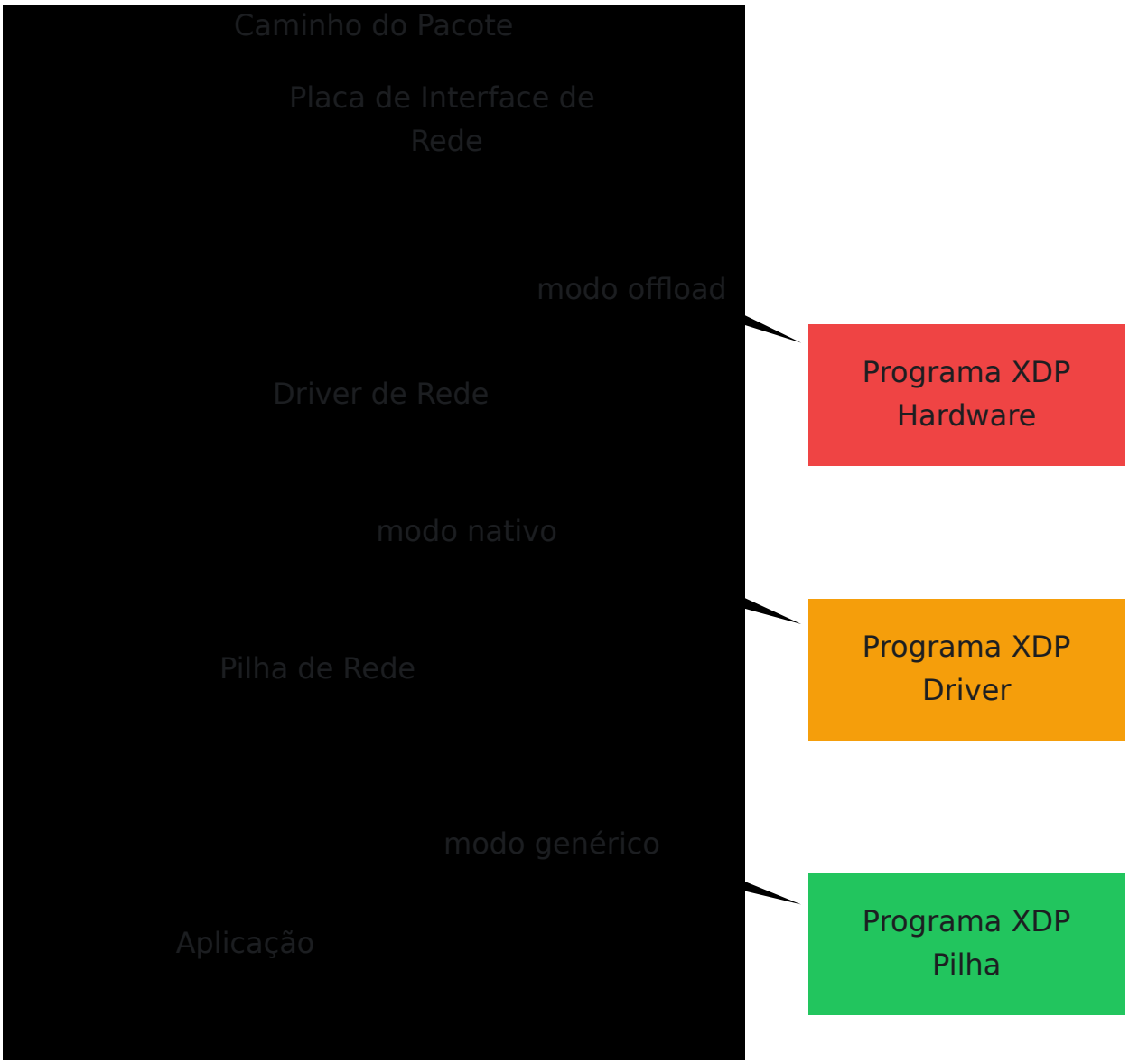
Modos de Anexação XDP

OmniUPF usa XDP (eXpress Data Path) para processamento de pacotes de alto desempenho. Três modos de anexação são suportados.

Para instruções detalhadas de configuração do XDP, especialmente para Proxmox e outros hypervisores, veja o Guia de Modos XDP.

Comparação de Modos

Modo	Ponto de Anexação	Desempenho	Caso de Uso	Requisitos de NIC
Genérico	Pilha de rede (kernel)	~1-2 Mpps	Testes, desenvolvimento, compatibilidade	Qualquer NIC
Nativo	Driver de rede (kernel)	~5-10 Mpps	Produção (bare metal, VM com SR-IOV)	Driver compatível com XDP
Offload	Hardware NIC (SmartNIC)	~10-40 Mpps	Produção de alto throughput	SmartNIC com offload XDP



Modo Genérico (Padrão)

Descrição: O programa XDP é executado na pilha de rede do kernel

Vantagens:

- Funciona com **qualquer** interface de rede
- Sem requisitos especiais de driver ou hardware
- Ideal para testes e desenvolvimento
- Compatível com todos os hypervisores e plataformas de virtualização

Desvantagens:

- Desempenho mais baixo (~1-2 Mpps por núcleo)
- Pacotes já passaram pelo driver antes do processamento XDP

Configuração (em `runtime.exs`):

```
xdp_attach_mode = "generic"
```

Melhor para:

- Máquinas virtuais sem SR-IOV
- Ambientes de testes e validação
- NICs sem suporte a driver XDP
- Hypervisores como Proxmox, VMware, VirtualBox

Modo Nativo (Recomendado)

Descrição: O programa XDP é executado no nível do driver de rede

Vantagens:

- Alto desempenho (~5-10 Mpps por núcleo)
- Pacotes processados antes de entrar na pilha de rede
- Latência significativamente menor do que o modo genérico
- Funciona em bare metal e VMs com SR-IOV

Desvantagens:

- Requer driver de rede com suporte a XDP
- Nem todas as NICs/drivers suportam XDP nativo

Configuração (em `runtime.exs`):

```
xdp_attach_mode = "native"
```

Melhor para:

- Implantações de produção em bare metal
- VMs com passthrough SR-IOV
- NICs com drivers compatíveis com XDP (Intel, Mellanox, etc.)

Requisitos:

- Driver de rede compatível com XDP (veja Compatibilidade com NIC)
- Kernel Linux 5.15+ com suporte a XDP habilitado

Modo Offload (Máximo Desempenho)

Descrição: O programa XDP é executado diretamente no hardware SmartNIC

Vantagens:

- Máximo desempenho (~10-40 Mpps)
- Zero sobrecarga de CPU para processamento de pacotes
- Latência sub-microsegundo
- Libera CPU para processamento do plano de controle

Desvantagens:

- Requer hardware SmartNIC caro
- Disponibilidade limitada de SmartNIC
- Configuração e instalação complexas

Configuração (em `runtime.exs`):

```
xdp_attach_mode = "offload"
```

Melhor para:

- Implantações de produção de ultra-alto throughput
- Computação de borda com requisitos de latência rigorosos
- Ambientes onde os recursos de CPU são limitados

Requisitos:

- SmartNIC com suporte a offload XDP (Netronome Agilio CX, Mellanox BlueField)
- Firmware e drivers especializados

Parâmetros de Configuração

Interfaces de Rede

Parâmetro	Descrição	Tipo	Padrão
`xdp_interfaces`	Interfaces de rede para tráfego N3/N6/N9 (separadas por vírgula, ou `"auto"` para todas não-loopback)	String	`"auto"`
`n3_address`	Endereço IPv4 para interface N3 (GTP-U da RAN)	IP	`"127.0.0.1"`
`n9_address`	Endereço IPv4 para interface N9 (UPF-to-UPF para ULCL)	IP	Mesmo que `n3_address`

Exemplo (em `runtime.exs`):

```
xdp_interfaces = "eth0,eth1"
n3_address = "10.100.50.233"
n9_address = "10.100.50.234"
```

Configuração PFCP

Parâmetro	Descrição	Tipo	Padrão
`pfcp_address`	Endereço local para o servidor PFCP (interface N4/Sxb/Sxc)	IP String	`"127.0.0.1"`
`pfcp_port`	Porta PFCP	Inteiro	`8805`
`node_id`	ID do Nó Local para o protocolo PFCP	IP String	`"127.0.0.1"`
`heartbeat_interval_ms`	Intervalo de heartbeat PFCP (milissegundos)	Inteiro	`5000`
`heartbeat_timeout_ms`	Timeout de heartbeat PFCP (milissegundos)	Inteiro	`5000`
`heartbeat_retries`	Número de tentativas de heartbeat antes de declarar o par como inativo	Inteiro	`3`

Exemplo (em `runtime.exs`):

```
pfcp_address = "10.100.50.241"
pfcp_port = 8805
node_id = "10.100.50.241"
heartbeat_interval_ms = 10_000
heartbeat_retries = 5
```

API e Monitoramento

Parâmetro	Descrição	Tipo	Padrão
`api_port`	Porta local para o servidor REST API (Phoenix)	Inteiro	`8080`
`log_level`	Nível de log (`:debug`, `:info`, `:warning`, `:error`)	Átomo	`:info`

Exemplo (em `runtime.exs`):

```
api_port = 8080
log_level = :debug
```

Gerenciamento de Caminho GTP

Parâmetro	Descrição	Tipo	Padrão
`gtpu_port`	Porta GTP-U	Inteiro	`2152`
`gtp_echo_interval`	Intervalo de eco padrão em segundos	Inteiro	`10`
`gtp_echo_retries`	Máximo de ecos perdidos antes da falha do caminho	Inteiro	`3`
`gtp_peers`	Lista de pares GTP para keepalives de Echo Request	Lista	`[]`

Exemplo (em `runtime.exs`):

```
gtp_echo_interval = 15
gtp_echo_retries = 3
gtp_peers = [
  %{address: parse_ip.("10.100.50.50"), echo: true, echo_interval:
10},
  %{address: parse_ip.("10.100.50.60"), echo: false},
]
```

Capacidade do Mapa eBPF

Parâmetro	Descrição	Tipo	Padrão
`max_sessions`	Número máximo de sessões simultâneas	Inteiro	`1_000_000`
`far_map_size`	Tamanho do mapa FAR eBPF	Inteiro	`131_070`
`qer_map_size`	Tamanho do mapa QER eBPF	Inteiro	`65_535`
`urr_map_size`	Tamanho do mapa URR eBPF	Inteiro	`65_535`

Exemplo (em `runtime.exs`):

```
max_sessions = 100_000
far_map_size = 131_070
qer_map_size = 65_535
urr_map_size = 131_070
```

Configuração de Buffer

Parâmetro	Descrição	Tipo	Padrão
`buffer_port`	Porta UDP para pacotes armazenados do eBPF	Inteiro	`22152`

Exemplo (em `runtime.exs`):

```
buffer_port = 22152
```

Flags de Recursos

Parâmetro	Descrição	Tipo	Padrão
`feature_ueip`	Habilitar alocação de IP de UE pelo OmniUPF	Booleano	`false`
`ueip_pool`	Pool de IP para alocação de IP de UE (requer `feature_ueip`)	String CIDR	`"10.60.0.0/24"`
`feature_ftup`	Habilitar alocação de F-TEID pelo OmniUPF	Booleano	`true`
`teid_pool_start`	Início do intervalo de alocação de TEID	Inteiro	`1`
`teid_pool_end`	Fim do intervalo de alocação de TEID	Inteiro	`10_000_000`

Exemplo (alocação de IP de UE) (em `runtime.exs`):

```
feature_ueip = true
ueip_pool = "10.45.0.0/16"
```

Exemplo (alocação de F-TEID) (em `runtime.exs`):

```
feature_ftup = true
teid_pool_start = 1
teid_pool_end = 1_000_000
```

Configuração do Gerenciador de Rotas

Para sincronização de rotas de UE com o daemon FRR (Free Range Routing). Veja o Guia de Gerenciamento de Rotas para detalhes.

Parâmetro	Descrição	Tipo	Padrão
`route_manager_enabled`	Habilitar sincronização automática de rotas de UE	Booleano	`true`
`route_manager_type`	Tipo de daemon de roteamento (`"frr"` ou `"static"`)	String	`"frr"`

Exemplo (em `runtime.exs`):

```
route_manager_enabled = true
route_manager_type = "frr"
```

Quando Habilitar:

- Implantações Multi-UPF que requerem anúncio de rotas
- Integração com protocolos de roteamento OSPF ou BGP
- Requer daemon FRRouting instalado e configurado

Configuração eBPF / XDP

Parâmetro	Descrição	Tipo	Padrão
`xdp_interfaces`	Lista separada por vírgulas de interfaces para XDP, ou `"auto"` para todas não-loopback	String	`"auto"`
`xdp_attach_mode`	Modo XDP: `"generic"`, `"native"` ou `"offload"`	String	`"generic"`
`ebpf_pin_path`	Caminho do sistema de arquivos BPF para pinagem	String	`"/sys/fs/bpf/upf_pipeline"`
`xdp_obj_path`	Caminho para o objeto eBPF compilado	String	`"/etc/omniupf/ipentrypoint_bpf`

Exemplo (em `runtime.exs`):

```
xdp_interfaces = "auto"              # ou "eth0,eth1" para
interfaces específicas
xdp_attach_mode = "native"
ebpf_pin_path = "/sys/fs/bpf/upf_pipeline"
xdp_obj_path = "/etc/omniupf/ipentrypoint_bpf.o"
```

Arquivo de Configuração

Arquivo de Configuração Elixir (runtime.exs)

Arquivo: `/etc/omniupf/runtime.exs`

O arquivo de configuração usa a sintaxe Elixir com atribuições de variáveis simples para legibilidade. As variáveis são aplicadas à configuração do aplicativo na parte inferior do arquivo via `config :upf_ex, ...`.

```
import Config

parse_ip = fn str ->
  {:ok, addr} = :inet.parse_address(String.to_charlist(str))
  addr
end

#
============================================================================
# Configuração PFCP (N4/Sx)
#
============================================================================
pfcp_address = "10.100.50.241"       # Endereço IP para escutar mensa
PFCP
pfcp_port = 8805                      # Porta PFCP (padrão: 8805)
node_id = "10.100.50.241"            # ID do Nó anunciado na Configur
Associação

#
============================================================================
# Configuração do Plano de Dados GTP-U
#
============================================================================
n3_address = "10.100.50.233"         # IP da interface N3 (GTP-U em c
RAN)
n9_address = n3_address               # IP da interface N9 (padrão pa
gtpu_port = 2152                      # Porta GTP-U (padrão: 2152)
buffer_port = 22152                   # Porta do listener de buffer

#
============================================================================
# Configuração eBPF / XDP
#
============================================================================
xdp_interfaces = "auto"              # "auto" para todas não-loopback
lista separada por vírgulas
xdp_attach_mode = "native"           # Modo XDP: "generic", "native"
"offload"
ebpf_pin_path = "/sys/fs/bpf/upf_pipeline"
xdp_obj_path = "/etc/omniupf/ipentrypoint_bpf.o"

#
============================================================================
```

```
# Configuração de Sessão e Pool de Recursos
#
============================================================================
max_sessions = 100_000
teid_pool_start = 1
teid_pool_end = 10_000_000
far_map_size = 131_070
qer_map_size = 65_535
urr_map_size = 65_535

#
============================================================================
# Flags de Recursos
#
============================================================================
feature_ueip = true
feature_ftup = true
ueip_pool = "10.45.0.0/16"

#
============================================================================
# Gerenciamento de Rotas
#
============================================================================
route_manager_enabled = true
route_manager_type = "frr"

#
============================================================================
# Configuração de Heartbeat
#
============================================================================
heartbeat_interval_ms = 10_000
heartbeat_timeout_ms = 5_000
heartbeat_retries = 5

#
============================================================================
# Monitoramento de Eco de Pares GTP-U
#
============================================================================
gtp_echo_interval = 10
gtp_echo_retries = 3
gtp_peers = [
```

```
  %{address: parse_ip.("10.100.50.50"), echo: true, echo_interval: 10
]

#
# API HTTP e Registro
#
api_port = 8080
log_level = :info

#
# Aplicar Configuração (não edite abaixo desta linha)
#
config :upf_ex,
  pfcp_address: parse_ip.(pfcp_address),
  pfcp_port: pfcp_port,
  n3_address: parse_ip.(n3_address),
  n9_address: parse_ip.(n9_address),
  node_id: parse_ip.(node_id),
  api_port: api_port,
  ebpf_pin_path: ebpf_pin_path,
  xdp_obj_path: xdp_obj_path,
  interface_names: String.split(xdp_interfaces, ","),
  xdp_attach_mode: xdp_attach_mode,
  feature_ueip: feature_ueip,
  feature_ftup: feature_ftup,
  ueip_pool: ueip_pool,
  teid_pool_start: teid_pool_start,
  teid_pool_end: teid_pool_end,
  far_map_size: far_map_size,
  qer_map_size: qer_map_size,
  urr_map_size: urr_map_size,
  max_sessions: max_sessions,
  route_manager_enabled: route_manager_enabled,
  route_manager_type: route_manager_type,
  buffer_port: buffer_port,
  gtpu_port: gtpu_port,
  heartbeat_interval_ms: heartbeat_interval_ms,
  heartbeat_timeout_ms: heartbeat_timeout_ms,
  heartbeat_retries: heartbeat_retries,
  gtp_echo_interval: gtp_echo_interval,
```

```
  gtp_echo_retries: gtp_echo_retries,
  gtp_peers: gtp_peers

config :logger, level: log_level
```

Gerenciando o Serviço

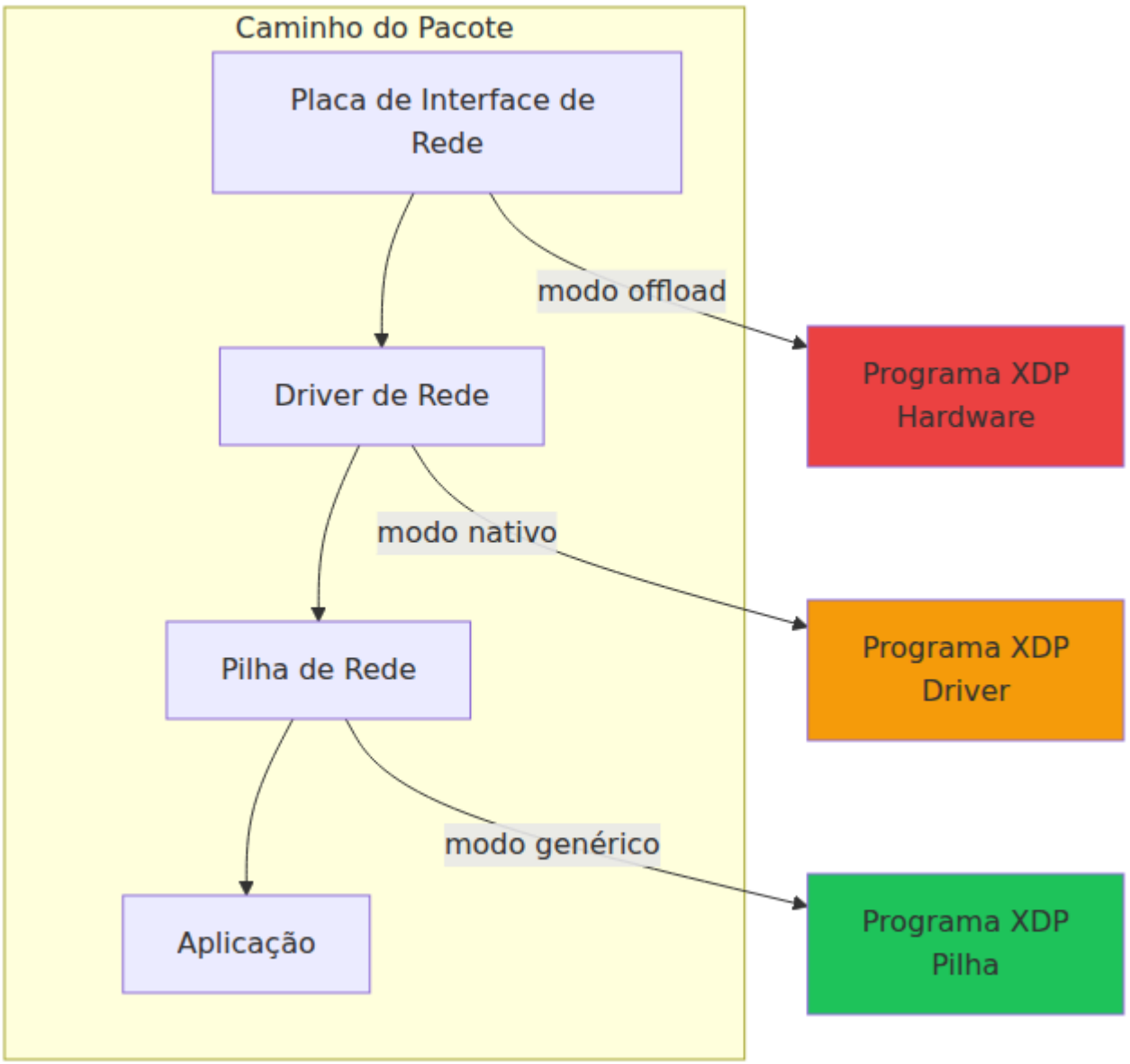
```
# Iniciar o UPF
sudo systemctl start omniupf

# Parar o UPF
sudo systemctl stop omniupf

# Reiniciar após alterações na configuração
sudo systemctl restart omniupf

# Verificar status
sudo systemctl status omniupf

# Ver logs
sudo journalctl -u omniupf -f

# Ou use o binário de release diretamente
sudo /opt/omniupf/bin/upf_ex start
sudo /opt/omniupf/bin/upf_ex stop
sudo /opt/omniupf/bin/upf_ex daemon   # iniciar como daemon em
segundo plano
```

Compatibilidade com Hypervisores

Visão Geral

OmniUPF é compatível com todos os principais hypervisores e plataformas de virtualização. O modo de anexação XDP e a configuração de rede dependem das capacidades de rede do hypervisor.

Para instruções passo a passo sobre como habilitar o XDP nativo no Proxmox e outros hypervisores, veja o Guia de Modos XDP.



Proxmox VE

Configurações Suportadas:

1. Modo Bridge (XDP Genérico)

Caso de uso: Rede padrão de VM

Configuração:

- Dispositivo de Rede: VirtIO ou E1000
- Modo XDP: `generic`
- Desempenho: ~1-2 Mpps

Configurações da VM Proxmox:

```
Dispositivo de Rede: net0
Modelo: VirtIO (paravirtualizado)
Bridge: vmbr0
```

Configuração do OmniUPF (em `runtime.exs`):

```
xdp_interfaces = "eth0"
xdp_attach_mode = "generic"
```

---

2. Passthrough SR-IOV (XDP Nativo)

Caso de uso: Produção de alto desempenho

Configuração:

- Dispositivo de Rede: Função Virtual SR-IOV
- Modo XDP: `native`
- Desempenho: ~5-10 Mpps

Requisitos:

- NIC física com suporte a SR-IOV (Intel X710, Mellanox ConnectX-5)
- SR-IOV habilitado na BIOS
- IOMMU habilitado (`intel_iommu=on` ou `amd_iommu=on` no GRUB)

Habilitar SR-IOV no Proxmox:

```
# Editar configuração do GRUB
nano /etc/default/grub

# Adicionar ao GRUB_CMDLINE_LINUX_DEFAULT:
intel_iommu=on iommu=pt

# Atualizar GRUB e reiniciar
update-grub
reboot

# Habilitar VFs na NIC (exemplo: 4 funções virtuais em eth0)
echo 4 > /sys/class/net/eth0/device/sriov_numvfs

# Tornar persistente
echo "echo 4 > /sys/class/net/eth0/device/sriov_numvfs" >>
/etc/rc.local
chmod +x /etc/rc.local
```

Configurações da VM Proxmox:

```
Hardware -> Adicionar -> Dispositivo PCI
Selecionar: Função Virtual SR-IOV
Todas as Funções: Não
GPU Primária: Não
PCI-Express: Sim (opcional)
```

Configuração do OmniUPF (em `runtime.exs`):

```
xdp_interfaces = "ens1f0"    # Nome da VF SR-IOV
xdp_attach_mode = "native"
```

---

3. Passthrough PCI (XDP Nativo)

Caso de uso: NIC dedicada para uma única VM

Configuração:

- Toda a NIC física passada para a VM

- Modo XDP: `native` ou `offload` (se SmartNIC)
- Desempenho: ~5-40 Mpps (depende da NIC)

Configurações da VM Proxmox:

```
Hardware -> Adicionar -> Dispositivo PCI
Selecionar: NIC Física (ex: 0000:01:00.0)
Todas as Funções: Sim
GPU Primária: Não
PCI-Express: Sim
```

Configuração do OmniUPF (em `runtime.exs`):

```
xdp_interfaces = "ens1f0"
xdp_attach_mode = "native"    # ou "offload" para SmartNIC
```

KVM/QEMU

Modo Bridge:

```
virt-install \
  --name omniupf \
  --network bridge=br0,model=virtio \
  --disk path=/var/lib/libvirt/images/omniupf.qcow2 \
  ...
```

Passthrough SR-IOV:

```
<interface type='hostdev' managed='yes'>
  <source>
    <address type='pci' domain='0x0000' bus='0x01' slot='0x10'
function='0x1'/>
  </source>
</interface>
```

VMware ESXi

vSwitch Padrão (XDP Genérico):

- Adaptador de Rede: VMXNET3
- Modo XDP: `generic`

SR-IOV (XDP Nativo):

- Habilitar SR-IOV nas configurações do host ESXi
- Adicionar adaptador de rede SR-IOV à VM
- Modo XDP: `native`

Microsoft Hyper-V

Switch Virtual (XDP Genérico):

- Adaptador de Rede: Sintético
- Modo XDP: `generic`

SR-IOV (XDP Nativo):

- Habilitar SR-IOV no Gerenciador Hyper-V
- Configurar SR-IOV no adaptador de rede virtual
- Modo XDP: `native`

VirtualBox

Modo NAT/Bridge (apenas XDP Genérico):

- Adaptador de Rede: VirtIO-Net ou Intel PRO/1000
- Modo XDP: `generic`
- Nota: O VirtualBox **não** suporta SR-IOV

Compatibilidade com NIC

Entendendo Mpps vs Throughput

Pacotes por segundo (Mpps) e throughput (Gbps) não são diretamente equivalentes - a relação depende inteiramente do tamanho do pacote. O tráfego de rede móvel varia dramaticamente em tamanho de pacote, desde pequenos pacotes de VoIP até grandes quadros de streaming de vídeo.

Impacto do Tamanho do Pacote no Throughput

Em redes móveis, o UPF processa pacotes encapsulados GTP-U na interface N3 e pacotes IP nativos na interface N6.

Sobrecarga de Encapsulamento GTP-U (Interface N3):

- **Cabeçalho IPv4 externo**: 20 bytes
- **Cabeçalho UDP externo**: 8 bytes
- **Cabeçalho GTP-U**: 8 bytes
- **Total de sobrecarga GTP-U**: 36 bytes

Pacote GTP-U Mínimo (N3):

- **Cabeçalho IP interno**: 20 bytes (IPv4)
- **Cabeçalho UDP interno**: 8 bytes
- **Carga útil mínima**: 1 byte
- **Total do pacote interno**: 29 bytes
- **Mais sobrecarga GTP-U**: 36 bytes
- **Tamanho total do pacote**: 65 bytes

Throughput a 1 Mpps com pacotes GTP-U mínimos:

```
65 bytes x 1,000,000 pps x 8 bits/byte = 520 Mbps
```

Pacote GTP-U Máximo (N3 com MTU de 1500):

- **MTU IP interno**: 1500 bytes (pacote IP interno completo)

- **Mais sobrecarga GTP-U**: 36 bytes
- **Tamanho total do pacote**: 1536 bytes

Throughput a 1 Mpps com pacotes GTP-U máximos:

```
1536 bytes x 1,000,000 pps x 8 bits/byte = 12,288 Mbps ~ 12.3 Gbps
```

Pacotes IP Nativos (Interface N6):

Na N6 (em direção à Internet), os pacotes são IP nativos sem GTP-U:

Pacote N6 Mínimo:

- **Cabeçalho IP**: 20 bytes
- **Cabeçalho UDP**: 8 bytes
- **Carga útil mínima**: 1 byte
- **Total**: 29 bytes

Throughput a 1 Mpps com pacotes N6 mínimos:

```
29 bytes x 1,000,000 pps x 8 bits/byte = 232 Mbps
```

Pacote N6 Máximo (MTU de 1500):

- **MTU IP**: 1500 bytes
- **Total**: 1500 bytes

Throughput a 1 Mpps com pacotes N6 máximos:

```
1500 bytes x 1,000,000 pps x 8 bits/byte = 12,000 Mbps = 12 Gbps
```

Exemplos de Desempenho no Mundo Real

NIC Intel X710 (capacidade de 10 Mpps na interface N3 com GTP-U):

Padrão de Tráfego	Tamanho do Pacote Interno	Total GTP-U	Throughput a 10 Mpps	Caso de Uso Típico
Chamadas VoIP (N3)	65-150 bytes	101-186 bytes	**0.8-1.5 Gbps**	Voz AMR-WB, G.711
Web leve (N3)	400-600 bytes	436-636 bytes	**3.5-5.1 Gbps**	HTTP/HTTPS, mensagens
Móvel moderno (N3)	**1200 bytes**	**1236 bytes**	**9.9 Gbps**	**Mistura típica de tráfego de 2024**
Streaming de vídeo (N3)	1400-1450 bytes	1436-1486 bytes	**11.5-11.9 Gbps**	Fragmentos de vídeo HD/4K
MTU Máximo (N3)	1500 bytes	1536 bytes	**12.3 Gbps**	Grandes downloads de TCP

Na interface N6 (IP nativo, sem GTP-U):

Padrão de Tráfego	Tamanho do Pacote	Throughput a 10 Mpps	Caso de Uso Típico
Pacotes VoIP	65-150 bytes	**0.5-1.2 Gbps**	Fluxos de voz RTP
Web leve	400-600 bytes	**3.2-4.8 Gbps**	Requisições HTTP
Móvel moderno	**1200 bytes**	**9.6 Gbps**	**Tráfego típico de 2024**
Streaming de vídeo	1400-1450 bytes	**11.2-11.6 Gbps**	Downloads de vídeo
MTU Máximo	1500 bytes	**12.0 Gbps**	Transferências de arquivos grandes

A 10 Mpps com tráfego móvel moderno (média de 1200 bytes), espere **~10 Gbps de throughput** nas interfaces N3 e N6.

Planejamento de Capacidade Prática:

Com tamanho médio de pacote de 1200 bytes (típico para redes móveis modernas com streaming de vídeo):

Capacidade Mpps da NIC	Throughput N3 (GTP-U)	Throughput N6 (IP Nativo)	Implantação Realista
1 Mpps	~1.0 Gbps	~1.0 Gbps	Site de pequena célula, gateway IoT
5 Mpps	~4.9 Gbps	~4.8 Gbps	Site de célula média, empresarial
10 Mpps	~9.9 Gbps	~9.6 Gbps	Site de grande célula, pequena cidade
20 Mpps	~19.7 Gbps	~19.2 Gbps	Área metropolitana, cidade média
40 Mpps	~39.4 Gbps	~38.4 Gbps	Grande metrópole, hub regional

Drivers de Rede Compatíveis com XDP

OmniUPF requer drivers de rede com suporte a XDP para os modos **nativo** e **offload**. O modo genérico funciona com **qualquer** NIC.

NICs Intel

Modelo	Driver	Suporte a XDP	Modo	Desempenho
Intel X710	i40e	Sim	Nativo	~10 Mpps
Intel XL710	i40e	Sim	Nativo	~10 Mpps
Intel E810	ice	Sim	Nativo	~15 Mpps
Intel 82599ES	ixgbe	Sim	Nativo	~8 Mpps
Intel I350	igb	Limitado	Genérico	~1 Mpps
Intel E1000	e1000	Não	Apenas Genérico	~1 Mpps

NICs Mellanox/NVIDIA

Modelo	Driver	Suporte a XDP	Modo	Desempenho
Mellanox ConnectX-5	mlx5	Sim	Nativo	~12 Mpps
Mellanox ConnectX-6	mlx5	Sim	Nativo	~20 Mpps
Mellanox BlueField	mlx5	Sim	Nativo + Offload	~40 Mpps
Mellanox ConnectX-4	mlx4	Limitado	Genérico	~2 Mpps

NICs Broadcom

Modelo	Driver	Suporte a XDP	Modo	Desempenho
Broadcom BCM57xxx	bnxt_en	Sim	Nativo	~8 Mpps
Broadcom NetXtreme II	bnx2x	Não	Apenas Genérico	~1 Mpps

Outros Fornecedores

Modelo	Driver	Suporte a XDP	Modo	Desempenho
Netronome Agilio CX	nfp	Sim	Offload	~30 Mpps
Amazon ENA	ena	Sim	Nativo	~5 Mpps
Solarflare SFC9xxx	sfc	Sim	Nativo	~8 Mpps
VirtIO	virtio_net	Limitado	Genérico	~2 Mpps

Verificando o Suporte a XDP da NIC

Verifique se o driver suporta XDP:

```
# Encontrar driver da NIC
ethtool -i eth0 | grep driver

# Verificar suporte a XDP no driver
modinfo <driver_name> | grep -i xdp

# Exemplo para Intel i40e
modinfo i40e | grep -i xdp
```

Verifique se o programa XDP está anexado:

```
# Verifique se o programa XDP está anexado
ip link show eth0 | grep -i xdp

# Exemplo de saída (XDP anexado):
# 2: eth0: <BROADCAST,MULTICAST,UP,LOWER_UP> mtu 1500 xdp qdisc mq
```

NICs Recomendadas por Caso de Uso

Com tamanho médio de pacote de 1200 bytes (tráfego móvel moderno):

Caso de Uso	NIC Recomendada	Modo	Capacidade Mpps	Th
Teste/Desenvolvimento	Qualquer NIC (VirtIO, E1000)	Genérico	1-2 Mpps	1-
Site de Pequena Célula	Intel X710, Mellanox CX-5	Nativo	5-10 Mpps	5-
Célula Média/Metrô	Intel E810, Mellanox CX-6	Nativo	10-20 Mpps	10
Grande Metrô	Mellanox CX-6, Intel E810 (duplo)	Nativo	20-40 Mpps	20
Hub Regional	Mellanox BlueField, Netronome Agilio	Offload	40+ Mpps	40
VM Proxmox (Bridge)	VirtIO	Genérico	1-2 Mpps	1-
VM Proxmox (SR-IOV)	Intel X710/E810 VF, Mellanox CX-5 VF	Nativo	5-10 Mpps	5-

---

Recursos Adicionais

Documentação Oficial do XDP:

- Projeto XDP

- Documentação do Kernel XDP

Listas de Compatibilidade com NIC:

- Lista de Suporte a Hardware XDP do Cilium
- Drivers XDP do IO Visor

Exemplos de Configuração

Exemplo 1: Ambiente de Desenvolvimento (Modo Genérico)

Cenário: Testando o OmniUPF em laptop ou VM sem SR-IOV

```
# Configuração de desenvolvimento (/etc/omniupf/runtime.exs)
xdp_interfaces = "eth0"
xdp_attach_mode = "generic"
api_port = 8080
pfcp_address = "127.0.0.1"
pfcp_port = 8805
node_id = "127.0.0.1"
n3_address = "127.0.0.1"
log_level = :debug
max_sessions = 1_000
```

Exemplo 2: Produção Bare Metal (Modo Nativo)

Cenário: UPF de produção em servidor bare metal com NIC Intel X710

```
# Configuração bare metal de produção (/etc/omniupf/runtime.exs)
xdp_interfaces = "ens1f0,ens1f1"    # N3 em ens1f0, N6 em ens1f1
xdp_attach_mode = "native"
api_port = 8080
pfcp_address = "10.100.50.241"
pfcp_port = 8805
node_id = "10.100.50.241"
n3_address = "10.100.50.233"
n9_address = "10.100.50.234"
log_level = :info
max_sessions = 500_000
gtp_echo_interval = 30
gtp_peers = [
  %{address: parse_ip.("10.100.50.10"), echo: true, echo_interval:
30},
  %{address: parse_ip.("10.100.50.11"), echo: true, echo_interval:
30},
]
heartbeat_interval_ms = 10_000
feature_ueip = true
ueip_pool = "10.45.0.0/16"
```

Exemplo 3: VM Proxmox com SR-IOV (Modo Nativo)

Cenário: UPF de produção em VM Proxmox com passthrough SR-IOV

```
# Configuração Proxmox SR-IOV (/etc/omniupf/runtime.exs)
xdp_interfaces = "ens1f0"           # VF SR-IOV
xdp_attach_mode = "native"
api_port = 8080
pfcp_address = "192.168.100.10"
pfcp_port = 8805
node_id = "192.168.100.10"
n3_address = "192.168.100.10"
log_level = :info
max_sessions = 100_000
gtp_echo_interval = 15
gtp_peers = [
  %{address: parse_ip.("192.168.100.50"), echo: true},
]
```

Exemplo 4: Modo PGW-U (EPC 4G)

Cenário: OmniUPF atuando como PGW-U em rede EPC 4G

```
# Configuração PGW-U (/etc/omniupf/runtime.exs)
xdp_interfaces = "eth0"
xdp_attach_mode = "native"
api_port = 8080
pfcp_address = "10.200.1.10"
pfcp_port = 8805
node_id = "10.200.1.10"
n3_address = "10.200.1.10"          # Interface S5/S8 (GTP-U)
log_level = :info
max_sessions = 200_000
gtp_echo_interval = 20
gtp_peers = [
  %{address: parse_ip.("10.200.1.50"), echo: true, echo_interval:
20},
]
heartbeat_interval_ms = 5_000
```

Exemplo 5: Múltiplos Modos (UPF + PGW-U Simultaneamente)

Cenário: OmniUPF servindo simultaneamente redes 5G e 4G

```
# Configuração de múltiplos modos (/etc/omniupf/runtime.exs)
xdp_interfaces = "eth0,eth1"
xdp_attach_mode = "native"
api_port = 8080
pfcp_address = "10.50.1.100"
pfcp_port = 8805
node_id = "10.50.1.100"
n3_address = "10.50.1.100"
n9_address = "10.50.1.101"
log_level = :info
max_sessions = 300_000
gtp_echo_interval = 15
gtp_peers = [
  %{address: parse_ip.("10.50.2.10"), echo: true, echo_interval:
15},
  %{address: parse_ip.("10.50.2.20"), echo: true, echo_interval:
15},
]
heartbeat_interval_ms = 10_000
feature_ueip = true
ueip_pool = "10.60.0.0/16"
```

Exemplo 6: Modo Offload SmartNIC

Cenário: Implantação de ultra-alto throughput com SmartNIC Netronome Agilio CX

```
# Configuração de offload SmartNIC (/etc/omniupf/runtime.exs)
xdp_interfaces = "enp1s0np0"        # Interface SmartNIC
xdp_attach_mode = "offload"
api_port = 8080
pfcp_address = "10.10.1.50"
pfcp_port = 8805
node_id = "10.10.1.50"
n3_address = "10.10.1.50"
log_level = :warning
max_sessions = 1_000_000
far_map_size = 2_000_000
qer_map_size = 1_000_000
gtp_echo_interval = 30
gtp_peers = [
  %{address: parse_ip.("10.10.2.10"), echo: true},
  %{address: parse_ip.("10.10.2.20"), echo: true},
  %{address: parse_ip.("10.10.2.30"), echo: true},
]
heartbeat_interval_ms = 15_000
```

Dimensionamento de Mapas e Planejamento de Capacidade

Definindo Tamanhos de Mapas

Defina `max_sessions` e configure tamanhos de mapa para sua implantação:

```
max_sessions = 100_000
far_map_size = 131_070
qer_map_size = 65_535
urr_map_size = 131_070
```

Uso de memória: ~91 MB para 100K sessões

Estimativa de Capacidade

Calcule o número máximo de sessões:

```
Max Sessions = min(
  pdr_map_size / 2,
  far_map_size / 2,
  qer_map_size
)
```

Exemplo:

- Mapa PDR: 200,000
- Mapa FAR: 200,000
- Mapa QER: 100,000

Max Sessions = min(100,000, 100,000, 100,000) = **100,000**

Requisitos de Memória

Uso de memória por sessão:

- PDR: 2 x 212 B = 424 B
- FAR: 2 x 20 B = 40 B
- QER: 1 x 36 B = 36 B
- URR: 2 x 20 B = 40 B
- **Total**: ~540 B por sessão

Para 100K sessões: ~52 MB de memória do kernel

Recomendação: Certifique-se de que o limite de memória bloqueada permite 2x o uso estimado:

```
# Verifique o limite atual
ulimit -l

# Defina como ilimitado (requerido para eBPF)
ulimit -l unlimited
```

Documentação Relacionada

- **Guia de Arquitetura** - Detalhes técnicos de eBPF/XDP e otimização de desempenho
- **Guia de Gerenciamento de Regras** - Configuração de PDR, FAR, QER, URR
- **Guia de Monitoramento** - Estatísticas, monitoramento de capacidade e alertas
- **Referência de Métricas** - Referência completa de métricas Prometheus
- **Guia de UI Web** - Operações do painel de controle
- **Guia de Operações** - Visão geral da arquitetura e implantação do UPF
- **Guia de Jardim Murado** - Redirecionamento fora de crédito, portal cativo e configuração de lista branca

Referência de Métricas

Este documento descreve todas as métricas do Prometheus expostas pelo OmniUPF no endpoint `/metrics`.

Categorias de Métricas

1. **Métricas de mensagens PFCP** - Contadores de mensagens do protocolo de controle e latência por par
2. **Métricas de Ação XDP** - Veredictos de pacotes do plano de dados (descartar, passar, redirecionar, etc.)
3. **Métricas de Pacotes** - Contadores de pacotes recebidos por tipo de protocolo
4. **Métricas de Sessão e Associação PFCP** - Contagens de sessões e associações por par
5. **Métricas URR** - Contadores de volume de tráfego agregados por par PFCP
6. **Métricas de Bufferização de Pacotes** - Estado do buffer de pacotes, capacidade e taxa de transferência
7. **Métricas de Relatório de Dados de Downlink (Notificação)** - Notificações de Solicitação de Relatório de Sessão PFCP e rastreamento de índice FAR
8. **Métricas de Capacidade do Mapa eBPF** - Utilização e capacidade do mapa eBPF

Referência de Métricas

Métricas de mensagens PFCP

Métricas para rastrear mensagens do protocolo PFCP entre o UPF e os n��s do plano de controle.

Nome da Métrica	Tipo	Rótulos	Descrição
upf_pfcp_rx	Counter	`message_name`, `peer_address`	Número total de mensagens PFCP recebidas por tipo de mensagem e par
upf_pfcp_tx	Counter	`message_name`, `peer_address`	Número total de mensagens PFCP transmitidas por tipo de mensagem e par
upf_pfcp_rx_errors	Counter	`message_name`, `cause_code`, `peer_address`	Número total de mensagens PFCP rejeitadas com causa de erro por tipo de mensagem e par
upf_pfcp_rx_latency	Summary	`message_type`, `peer_address`	Duração do processamento da mensagem PFCP em microsegundos (quantis p50, p90, p99) por tipo de mensagem e par

Nota: Todos os contadores rastreiam mensagens por par PFCP para visibilidade granular no comportamento do nó do plano de controle.

Métricas de Ação XDP

Contadores de pacotes por ação/veredicto do programa XDP. Essas métricas rastreiam a decisão do plano de dados para cada pacote.

Nome da Métrica	Tipo	Rótulos	Descrição
upf_xdp_aborted	Counter	none	Número total de pacotes abortados (XDP_ABORTED)
upf_xdp_drop	Counter	none	Número total de pacotes descartados (XDP_DROP)
upf_xdp_pass	Counter	none	Número total de pacotes passados para o kernel (XDP_PASS)
upf_xdp_tx	Counter	none	Número total de pacotes transmitidos (XDP_TX)
upf_xdp_redirect	Counter	none	Número total de pacotes redirecionados (XDP_REDIRECT)

Métricas de Pacotes

Contadores para pacotes recebidos por tipo de protocolo. Todas as métricas usam o rótulo `packet_type`.

Nome da Métrica	Tipo	Rótulos	Descrição
upf_rx	Counter	`packet_type`	Número total de pacotes recebidos por tipo
upf_route	Counter	`packet_type`	Número total de pacotes roteados pelo resultado da busca

Valores de packet_type de upf_rx:

- `arp` - Pacotes ARP
- `icmp` - Pacotes ICMP
- `icmp6` - Pacotes ICMPv6
- `ip4` - Pacotes IPv4
- `ip6` - Pacotes IPv6
- `tcp` - Pacotes TCP
- `udp` - Pacotes UDP
- `other` - Outros tipos de pacotes
- `gtp-echo` - Solicitação/resposta de eco GTP
- `gtp-pdu` - PDU GTP-U (dados de usuário encapsulados)
- `gtp-other` - Outros tipos de mensagens GTP
- `gtp-unexp` - Pacotes GTP inesperados/malformados

Valores de packet_type de upf_route:

- `ip4-cache` - Acertos de cache de rota IPv4
- `ip4-ok` - Sucesso na busca FIB IPv4
- `ip4-error-drop` - Falha na busca FIB IPv4, pacote descartado
- `ip4-error-pass` - Falha na busca FIB IPv4, pacote passado para o kernel
- `ip6-cache` - Acertos de cache de rota IPv6
- `ip6-ok` - Sucesso na busca FIB IPv6
- `ip6-error-drop` - Falha na busca FIB IPv6, pacote descartado
- `ip6-error-pass` - Falha na busca FIB IPv6, pacote passado para o kernel

Métricas de Sessão e Associação PFCP

Métricas para rastrear sessões e associações PFCP entre o UPF e os nós do plano de controle.

Nome da Métrica	Tipo	Rótulos	Descrição
upf_pfcp_sessions	Gauge	none	Número total de sessões PFCP atualmente estabelecidas (todos os pares)
upf_pfcp_associations	Gauge	none	Número total de associações PFCP atualmente estabelecidas (todos os pares)
upf_pfcp_association_status	Gauge	`node_id`, `address`	Status da associação PFCP por par (1=ativo, 0=inativo)
upf_pfcp_sessions_per_node	Gauge	`node_id`, `address`	Número de sessões PFCP ativas por nó do plano de controle

Métricas URR (Regra de Relatório de Uso)

Métricas de volume de tráfego agregadas por par PFCP. O volume de cada par representa a soma de todos os contadores URR em todas as sessões daquele nó do plano de controle.

Nome da Métrica	Tipo	Rótulos	Descrição
upf_urr_uplink_volume_bytes	Gauge	`peer_address`	Volume total de tráfego uplink em bytes para todas as sessões deste par
upf_urr_downlink_volume_bytes	Gauge	`peer_address`	Volume total de tráfego downlink em bytes para todas as sessões deste par
upf_urr_total_volume_bytes	Gauge	`peer_address`	Volume total de tráfego em bytes (uplink + downlink) para todas as sessões deste par

Nota: Os volumes são agregados por par PFCP para evitar problemas de alta cardinalidade. Estatísticas URR individuais estão disponíveis via API REST em `/api/v1/urr_map`.

Métricas de Bufferização de Pacotes

Métricas para rastrear o estado e o desempenho do buffer de pacotes. O UPF pode armazenar pacotes de downlink quando um UE está em estado ocioso, retendo-os até que o UE seja chamado e transite para o estado conectado.

Nome da Métrica	Tipo	Rótulos	
upf_buffer_packets_total	Counter	none	N o a b a
upf_buffer_packets_dropped	Counter	`reason`	N o o b
upf_buffer_packets_flushed	Counter	none	N o e b
upf_buffer_packets_current	Gauge	none	N o b
upf_buffer_bytes_total	Counter	none	N o a b a
upf_buffer_bytes_current	Gauge	none	B r
upf_buffer_fars_active	Gauge	none	N o p a

Nome da Métrica	Tipo	Rótulos	
upf_buffer_listener_packets_received_total	Counter	none	T p r li b o e
upf_buffer_listener_packets_buffered_total	Counter	none	T p a c p
upf_buffer_listener_errors_total	Counter	`type`	E p o li b
upf_buffer_listener_error_indications_sent_total	Counter	`remote_peer`	T n I E e T o p
upf_buffer_flush_success_total	Counter	none	T o e o s

Nome da Métrica	Tipo	Rótulos	
upf_buffer_flush_errors_total	Counter	`reason`	T o e o f
upf_buffer_flush_packets_sent_total	Counter	none	T p e o o e

Valores de reason de upf_buffer_packets_dropped:

- `expired` - Pacotes descartados devido à expiração do TTL
- `global_limit` - Descartados devido ao limite total do buffer alcançado
- `far_limit` - Descartados devido ao limite de buffer por FAR alcançado
- `cleared` - Pacotes manualmente limpos do buffer

Valores de type de upf_buffer_listener_errors_total:

- `read_error` - Erro ao ler do socket do buffer
- `too_small` - Pacote muito pequeno para o cabeçalho GTP
- `invalid_gtp_type` - Tipo de mensagem GTP não-G-PDU
- `unknown_teid` - Nenhum PDR/FAR encontrado para TEID
- `not_buffering_far` - FAR não tem ação BUFF
- `truncated_ext` - Cabeçalhos de extensão GTP truncados
- `no_payload` - Pacote GTP sem carga útil
- `buffer_full` - Capacidade do buffer excedida

Valores de reason de upf_buffer_flush_errors_total:

- `far_lookup_failed` - Falha ao buscar informações do FAR no mapa eBPF

- `no_forw_action` - FAR não tem ação FORW definida
- `connection_failed` - Falha ao criar conexão UDP para esvaziamento

Métricas de Relatório de Dados de Downlink (Notificação)

Métricas para notificações de Solicitação de Relatório de Sessão PFCP enviadas ao plano de controle quando pacotes são armazenados. Essas notificações acionam o plano de controle para chamar o UE.

Nome da Métrica	Tipo	Rótulos	De
upf_dldr_sent_total	Counter	none	Núm de noti de F de D Dow (DLI env SMF
upf_dldr_send_errors	Counter	none	Núm de e env noti de F de D Dow
upf_dldr_active_notifications	Gauge	none	Núm de F noti DLD (ain limp
upf_far_index_size	Gauge	none	Núm de F regi no F para noti DLD
upf_far_index_registrations_total	Counter	none	Núm de r

Nome da Métrica	Tipo	Rótulos	De
			de F Farl
upf_far_index_unregistrations_total	Counter	none	Núm de des de F Farl
upf_buffer_notify_to_flush_duration_seconds	Histogram	`pfcp_peer`	Tem o er noti DLD esv dos arm

upf_buffer_notify_to_flush_duration_seconds:

- Baldes de histograma: 0.01, 0.05, 0.1, 0.5, 1.0, 2.0, 5.0, 10.0, 30.0, 60.0 segundos
- Rótulo `pfcp_peer`: Endereço SMF/PGW-C (por exemplo, `10.100.50.241`)
- Mede a latência entre o UPF enviando a notificação ao SMF e o SMF respondendo com a modificação da sessão para esvaziar pacotes
- Útil para monitorar a capacidade de resposta do plano de controle durante transições de ocioso para conectado

Métricas de Indicação de Erro GTP-U

Métricas para rastrear mensagens de Indicação de Erro GTP-U enviadas e recebidas. Indicações de Erro são enviadas quando um par recebe pacotes para TEIDs desconhecidos, indicando incompatibilidades de estado de túnel (frequentemente devido a reinicializações de pares).

Nome da Métrica	Tipo	Ró
upf_buffer_listener_error_indications_sent_total	Counter	`node_` `peer_`
upf_buffer_listener_error_indications_received_total	Counter	`node_` `peer_`
upf_buffer_listener_error_indication_sessions_deleted_total	Counter	`node_` `peer_`

Definições de Rótulos:

- `node_id`: ID do Nó PFCP da associação (por exemplo, `"pgw-u-1"`, `"smf-1"`). Definido como `"unknown"` se não existir associação PFCP para aquele par.
- `peer_address`: Endereço IP do par remoto (por exemplo, `"192.168.50.10"`)

Quando as Indicações de Erro São Enviadas:

- O UPF recebe um pacote GTP-U para um TEID que não existe (por exemplo, após a reinicialização do UPF, a sessão já foi deletada)
- O remetente (eNodeB, gNodeB, UPF a montante) está encaminhando para um túnel obsoleto/deletado
- O UPF envia uma Indicação de Erro para informar ao remetente para parar de enviar

Quando as Indicações de Erro São Recebidas:

- O UPF encaminha um pacote GTP-U para um par a jusante (PGW-U, SGW-U, UPF) para um TEID desconhecido
- O par remoto não reconhece o TEID de destino (por exemplo, o par foi reiniciado e perdeu o estado do túnel)
- O UPF automaticamente deleta sessões afetadas para parar de encaminhar para túneis mortos

Casos de Uso:

- Detectar reinicializações de pares (alta taxa de Indicações de Erro indica perda de estado)
- Identificar incompatibilidades de configuração (problemas de alocação de TEID)
- Monitorar a saúde da sincronização de túneis entre elementos de rede
- Alertar sobre exclusões inesperadas de sessões

Exemplos de Consultas PromQL:

```
# Taxa de Indicações de Erro recebidas por par (por segundo)
rate(upf_buffer_listener_error_indications_received_total[5m])

# Total de sessões deletadas devido a Indicações de Erro de um par es
upf_buffer_listener_error_indication_sessions_deleted_total{peer_addr

# Pares enviando TEIDs desconhecidos para este UPF
sum by (node_id, peer_address) (upf_buffer_listener_error_indications
```

Métricas de Capacidade do Mapa eBPF

Métricas para rastrear a utilização do mapa eBPF. Essas métricas ajudam a monitorar o uso de recursos e detectar potenciais problemas de capacidade.

Nome da Métrica	Tipo	Rótulos	Descrição
upf_ebpf_map_capacity	Gauge	`map_name`	Capacidade máxima do mapa eBPF
upf_ebpf_map_used	Gauge	`map_name`	Número atual de entradas no mapa eBPF

Valores comuns de map_name:

- `pdr_map` - Mapa de Regras de Detecção de Pacotes
- `far_map` - Mapa de Regras de Ação de Encaminhamento
- `qer_map` - Mapa de Regras de Aplicação de QoS
- `session_map` - Mapa de busca de sessão
- `teid_map` - Mapeamento de TEID para sessão
- `ue_ip_map` - Mapeamento de endereço IP de UE para sessão

Usando Métricas do Prometheus

Acessando Métricas

As métricas são expostas no endpoint `/metrics` no endereço especificado por `metrics_address` no arquivo de configuração (padrão `:9090`):

```
# Ver métricas brutas
curl http://localhost:9090/metrics

# Exemplo de saída
upf_pfcp_sessions 42
upf_pfcp_associations 2
upf_urr_total_volume_bytes{peer_address="10.100.50.241"}
1048576000
```

Configuração do Prometheus

Adicione o alvo OmniUPF ao seu `prometheus.yml`:

```
scrape_configs:
  - job_name: 'omniupf'
    static_configs:
      - targets: ['localhost:9090']
```

Painéis do Grafana

Importe métricas para o Grafana para visualização:

- Contagens e tendências de sessões
- Volume de tráfego por par PFCP
- Taxas de processamento de pacotes
- Utilização de buffer
- Monitoramento da capacidade do mapa eBPF

Documentação Relacionada

- **Guia de Monitoramento** - Monitoramento de estatísticas, planejamento de capacidade e alertas
- **Guia de Configuração** - Configurar `metrics_address` e outras opções do UPF
- **Guia da Interface Web** - Visualizar métricas na página de Estatísticas
- **Guia de Arquitetura** - Caminho de dados eBPF e otimização de desempenho
- **Guia de Gestão de Regras** - Compreendendo métricas PDR, FAR, QER, URR
- **Guia de Solução de Problemas** - Usando métricas para diagnósticos

Guia de Monitoramento

Índice

Visão Geral

O monitoramento eficaz do OmniUPF é crítico para manter a qualidade do serviço, prevenir a exaustão da capacidade e solucionar problemas de desempenho. O OmniUPF fornece métricas abrangentes em tempo real através de sua interface Web e API REST.

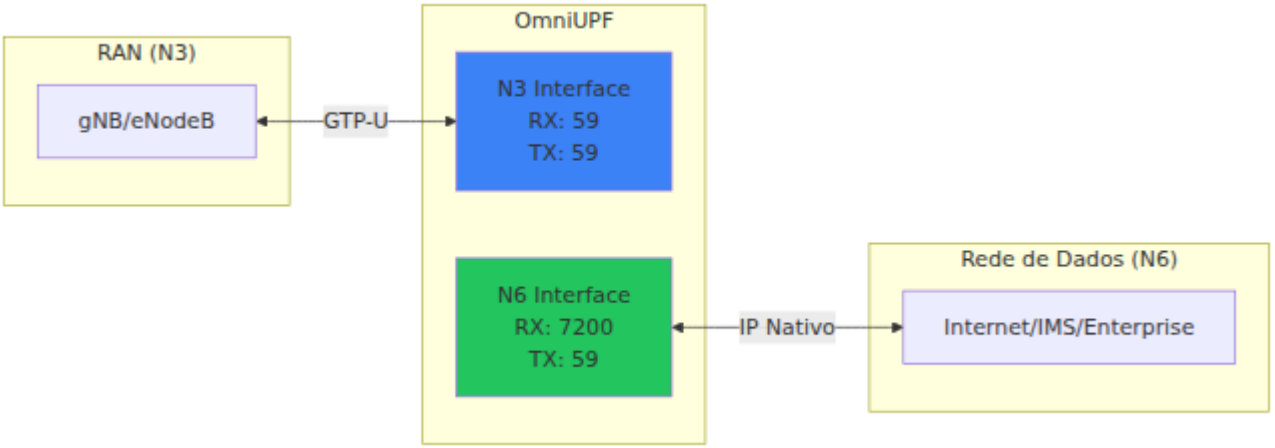
Categorias de Monitoramento

Categoria	Propósito	Frequência de Atualização	Métricas Chave
Estatísticas de Pacotes	Acompanhar taxas de processamento de pacotes e erros	Em tempo real	Pacotes RX/TX, descartes, detalhamento de protocolo
Estatísticas de Interface	Monitorar a distribuição de tráfego N3/N6	Em tempo real	N3 RX/TX, N6 RX/TX
Estatísticas de XDP	Acompanhar o desempenho do caminho de dados do kernel	Em tempo real	XDP processados, passados, descartados, abortados
Estatísticas de Roteamento	Monitorar decisões de roteamento de pacotes	Em tempo real	Consultas FIB, acertos/miss de cache
Capacidade do Mapa eBPF	Prevenir exaustão de recursos	A cada 10s	Percentuais de uso do mapa, usado vs. capacidade
Estatísticas de Buffer	Acompanhar o buffer de pacotes durante a mobilidade	A cada 5s	Pacotes em buffer, idade do buffer, contagem de FAR

Monitoramento de Estatísticas

Estatísticas da Interface N3/N6

As estatísticas da interface N3/N6 fornecem visibilidade sobre a distribuição de tráfego entre a RAN (N3) e a Rede de Dados (N6).



Métricas:

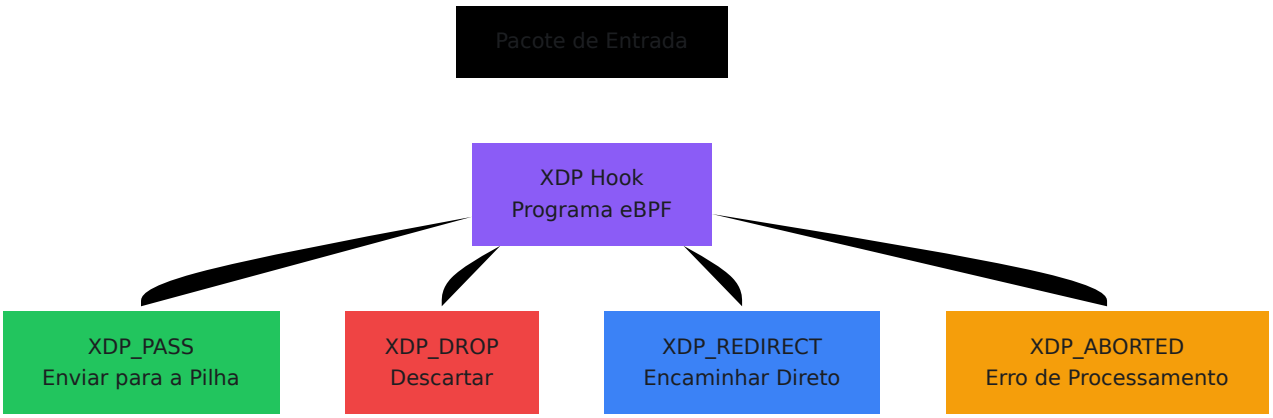
- **RX N3**: Pacotes recebidos da RAN (tráfego GTP-U de uplink)
- **TX N3**: Pacotes transmitidos para a RAN (tráfego GTP-U de downlink)
- **RX N6**: Pacotes recebidos da Rede de Dados (IP nativo de downlink)
- **TX N6**: Pacotes transmitidos para a Rede de Dados (IP nativo de uplink)
- **Total**: Contagem agregada de pacotes em todas as interfaces

Comportamento Esperado:

- **RX N3 ≈ TX N6**: Pacotes de uplink fluem da RAN para a Rede de Dados
- **RX N6 ≈ TX N3**: Pacotes de downlink fluem da Rede de Dados para a RAN
- Um desequilíbrio significativo pode indicar:
  - Tráfego assimétrico (downloads >> uploads)
  - Descartes de pacotes ou erros de encaminhamento
  - Configurações de roteamento incorretas

Estatísticas de XDP

As estatísticas de XDP (eXpress Data Path) mostram o desempenho do processamento de pacotes a nível de kernel.



Métricas:

- **Abortado**: O programa XDP encontrou um erro (deve ser sempre 0)
- **Descartar**: Pacotes descartados intencionalmente pelo programa XDP

- **Passar**: Pacotes passados para a pilha de rede para processamento adicional
- **Redirecionar**: Pacotes redirecionados diretamente para a interface de saída
- **TX**: Pacotes transmitidos via XDP

Interpretação:

- **Abortado > 0**: Problema crítico com o programa eBPF ou compatibilidade do kernel
- **Descartar > 0**: Descartes baseados em políticas ou pacotes inválidos
- **Passar alto**: A maioria dos pacotes processados na pilha de rede (normal)
- **Redirecionar alto**: Pacotes encaminhados diretamente (desempenho ideal)

Estatísticas de Pacotes

Detalhamento do protocolo de pacotes e contadores de processamento.

Contadores de Protocolo:

- **RX ARP**: Pacotes do Protocolo de Resolução de Endereços
- **RX GTP ECHO**: GTP-U Echo Request/Response (keepalive)
- **RX GTP OTHER**: Outras mensagens de controle GTP
- **RX GTP PDU**: Dados de usuário encapsulados em GTP-U (tráfego principal)
- **RX GTP UNEXP**: Tipos de pacotes GTP inesperados
- **RX ICMP**: Protocolo de Mensagens de Controle da Internet (ping, erros)
- **RX ICMP6**: Pacotes ICMPv6
- **RX IP4**: Pacotes IPv4
- **RX IP6**: Pacotes IPv6
- **RX OTHER**: Outros protocolos
- **RX TCP**: Pacotes do Protocolo de Controle de Transmissão
- **RX UDP**: Pacotes do Protocolo de Datagramas do Usuário

Casos de Uso:

- **Monitorar contagem de GTP-U PDU**: Indicador primário de tráfego de usuários
- **Verificar ICMP para conectividade**: Teste de acessibilidade da rede
- **Acompanhar a proporção TCP vs UDP**: Padrões de tráfego de aplicativos
- **Detectar protocolos inesperados**: Problemas de segurança ou configuração incorreta

---

Estatísticas de Roteamento

Estatísticas de consulta FIB (Forwarding Information Base) para decisões de roteamento.

Consulta FIB IPv4:

- **Cache**: Consultas de roteamento em cache (caminho rápido)
- **OK**: Consultas de roteamento bem-sucedidas

Consulta FIB IPv6:

- **Cache**: Consultas de roteamento IPv6 em cache
- **OK**: Consultas de roteamento IPv6 bem-sucedidas

Indicadores de Desempenho:

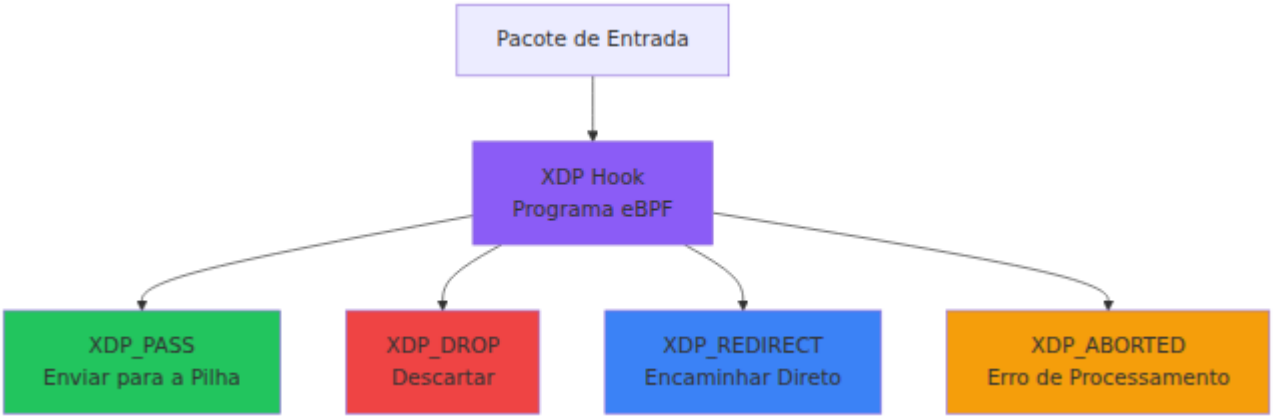
- **Alta Taxa de Acerto de Cache**: Indica bom desempenho do cache de roteamento
- **Alta Contagem de OK**: Confirma que as tabelas de roteamento estão configuradas corretamente
- **Baixas ou Zero Consultas**: Pode indicar tráfego não fluindo ou desvio de roteamento

---

Monitoramento de Capacidade

Capacidade do Mapa eBPF

O monitoramento da capacidade do mapa eBPF previne falhas na estabelecimento de sessões devido à exaustão de recursos.



Mapas eBPF Críticos

far_map (Regras de Ação de Encaminhamento):

- **Capacidade**: 131.070 entradas
- **Tamanho da Chave**: 4 B (ID FAR)
- **Tamanho do Valor**: 16 B (parâmetros de encaminhamento)
- **Uso de Memória**: ~2,6 MB
- **Criticidade**: Alta - Usado para todas as decisões de encaminhamento de pacotes

pdr_map_downlin (PDRs de Downlink - IPv4):

- **Capacidade**: 131.070 entradas
- **Tamanho da Chave**: 4 B (endereço IPv4 do UE)
- **Tamanho do Valor**: 208 B (informações do PDR)
- **Uso de Memória**: ~27 MB
- **Criticidade**: Crítica - A falha na estabelecimento de sessões ocorre se estiver cheia

pdr_map_downlin_ip6 (PDRs de Downlink - IPv6):

- **Capacidade**: 131.070 entradas
- **Tamanho da Chave**: 16 B (endereço IPv6 do UE)
- **Tamanho do Valor**: 208 B (informações do PDR)
- **Uso de Memória**: ~29 MB
- **Criticidade**: Crítica - A falha na estabelecimento de sessões IPv6 ocorre se estiver cheia

pdr_map_teid_ip (PDRs de Uplink):

- **Capacidade**: 131.070 entradas
- **Tamanho da Chave**: 4 B (TEID)
- **Tamanho do Valor**: 208 B (informações do PDR)
- **Uso de Memória**: ~27 MB
- **Criticidade**: Crítica - O tráfego de uplink falha se estiver cheio

qer_map (Regras de Aplicação de QoS):

- **Capacidade**: 65.535 entradas
- **Tamanho da Chave**: 4 B (ID QER)
- **Tamanho do Valor**: 32 B (parâmetros de QoS)
- **Uso de Memória**: ~2,3 MB
- **Criticidade**: Média - Aplicação de QoS apenas

urr_map (Regras de Relatório de Uso):

- **Capacidade**: 131.070 entradas
- **Tamanho da Chave**: 4 B (ID URR)
- **Tamanho do Valor**: 16 B (contadores de volume)
- **Uso de Memória**: ~2,6 MB
- **Criticidade**: Baixa - Afeta apenas a cobrança

Limites de Capacidade

Limite	Ação Necessária
0-50% (Verde)	Operação normal - Nenhuma ação necessária
50-70% (Amarelo)	Cuidado - Monitorar tendências de crescimento, planejar aumento de capacidade
70-90% (Âmbar)	Aviso - Agendar aumento de capacidade dentro de 1 semana
90-100% (Vermelho)	Crítico - Ação imediata necessária, novas sessões falharão

Procedimento de Aumento de Capacidade

Antes de aumentar a capacidade:

1. Revisar tendências de uso atuais
2. Estimar a taxa de crescimento futura
3. Calcular a capacidade necessária

Passos para aumentar a capacidade do mapa:

1. Parar o serviço OmniUPF
2. Atualizar o arquivo de configuração do UPF com novos tamanhos de mapa
3. Reiniciar o serviço OmniUPF
4. Verificar nova capacidade na visualização de Capacidade
5. Monitorar para estabelecimento bem-sucedido de sessões

Nota: Alterar a capacidade do mapa eBPF requer reinício do UPF e limpa todas as sessões existentes.

Métricas de Desempenho

Para informações detalhadas sobre todas as métricas Prometheus expostas pelo OmniUPF, consulte a **Referência de Métricas**.

Taxa de Processamento de Pacotes

Cálculo:

```
Taxa de Pacotes (pps) = (Delta de Contagem de Pacotes) / (Delta de Tempo em segundos)
```

Exemplo:

- Pacotes RX iniciais: 7.000
- Após 10 segundos: 17.000

- Taxa de Pacotes = (17.000 - 7.000) / 10 = 1.000 pps

Metas de Desempenho:

- **Pequeno UPF**: 10.000 - 100.000 pps
- **Médio UPF**: 100.000 - 1.000.000 pps
- **Grande UPF**: 1.000.000 - 10.000.000 pps

Indicadores de Gargalo:

- Contagem de XDP abortados aumentando
- Alta utilização da CPU
- Aumento de descartes de pacotes
- Aumento de latência

Cálculo de Throughput

Cálculo:

```
Throughput (Mbps) = (Delta de Contagem de Bytes × 8) / (Delta de
Tempo em segundos × 1.000.000)
```

Exemplo:

- Bytes RX iniciais: 500 MB
- Após 60 segundos: 800 MB
- Throughput = (300 MB × 8) / (60 × 1.000.000) = 40 Mbps

Planejamento de Capacidade:

- Monitorar horários de pico de throughput (por exemplo, horas da noite)
- Comparar com a capacidade do link (velocidades das interfaces N3/N6)
- Planejar para 2x o throughput de pico para margem

Taxa de Descarte

Cálculo:

```
Taxa de Descarte (%) = (Pacotes Descartados / Total de Pacotes RX)
× 100
```

Limites Aceitáveis:

- **< 0,1%**: Excelente (perda de pacotes normal devido a erros)
- **0,1% - 1%**: Bom (problemas menores ou limitação de taxa)
- **1% - 5%**: Ruim (investigar problemas de QoS ou capacidade)
- **> 5%**: Crítico (grande problema de encaminhamento ou capacidade)

Causas Comuns de Descarte:

- Limitação de taxa do QER (MBR excedido)
- Falhas de consulta do mapa eBPF
- TEIDs ou IPs de UE inválidos
- Erros de roteamento

Alertas e Limites

Alertas Recomendados

Alertas Críticos (Resposta imediata necessária):

- Capacidade do mapa eBPF > 90%
- Contagem de abortos de XDP > 0
- Taxa de descarte > 5%
- Verificação de saúde do UPF falhou

Alertas de Aviso (Resposta dentro de 1 hora):

- Capacidade do mapa eBPF > 70%

- Taxa de descarte > 1%
- Taxa de pacotes se aproximando da capacidade do link
- TTL do buffer excedido (pacotes mais antigos que 30s)

Alertas Informativos (Monitorar tendências):

- Capacidade do mapa eBPF > 50%
- Contagem de pacotes em buffer aumentando
- Novas associações PFCP estabelecidas/liberadas
- Limites de volume URR excedidos

Configuração de Alertas

Os alertas podem ser configurados via:

1. **Métricas Prometheus**: Exportar métricas para monitoramento externo (veja Referência de Métricas para lista completa)
2. **Monitoramento de Logs**: Analisar logs do OmniUPF em busca de padrões de erro
3. **Polling da API REST**: Consultar periodicamente os endpoints `/map_info`, `/packet_stats`
4. **Monitoramento da Web UI**: Monitoramento manual através das páginas de Estatísticas e Capacidade

---

Planejamento de Capacidade

Estimativa de Capacidade de Sessão

Calcular sessões máximas:

```
Max Sessions = min(
  Capacidade do Mapa PDR / 2,  # PDRs de Downlink + Uplink por
sessão
  Capacidade do Mapa FAR / 2,  # FARs de Downlink + Uplink por
sessão
  Capacidade do Mapa QER       # Opcional, um QER por sessão
)
```

Exemplo:

- Capacidade do Mapa PDR: 131.070
- Capacidade do Mapa FAR: 131.070
- Capacidade do Mapa QER: 65.535

Max Sessions = min(131.070 / 2, 131.070 / 2, 65.535) = **65.535 sessões**

Capacidade de Memória

Calcular a memória total do mapa eBPF:

```
Memória = Σ (Capacidade do Mapa × (Tamanho da Chave + Tamanho do
Valor))
```

Exemplo de Configuração:

- Mapas PDR: 3 × 131.070 × 212 B = 83,3 MB
- Mapa FAR: 131.070 × 20 B = 2,6 MB
- Mapa QER: 65.535 × 36 B = 2,3 MB
- Mapa URR: 131.070 × 20 B = 2,6 MB
- **Total**: ~91 MB de memória do kernel

Considerações sobre Memória do Kernel:

- Garantir limite de memória bloqueada suficiente (`ulimit -l`)
- Reservar 2x o uso estimado para margem de segurança
- Monitorar a disponibilidade de memória do kernel

Capacidade de Tráfego

Calcular a capacidade de throughput necessária:

1. **Estimar o throughput médio da sessão**:
    - Streaming de vídeo: ~5 Mbps
    - Navegação na web: ~1 Mbps
    - VoIP: ~0,1 Mbps
2. **Calcular o throughput agregado**:

    ```
    Throughput Total = Sessões × Throughput Médio da Sessão
    ```

3. **Adicionar margem**:

    ```
    Capacidade Necessária = Throughput Total × 2  # 100% de margem
    ```

Exemplo:

- 10.000 sessões simultâneas
- Média de 2 Mbps por sessão
- Total: 20 Gbps
- Capacidade necessária: 40 Gbps (interfaces N3 + N6)

Planejamento de Crescimento

Análise de Tendências:

1. Registrar a contagem de sessões de pico diária
2. Calcular a taxa de crescimento semanal
3. Extrapolar para o limite de capacidade

Fórmula da Taxa de Crescimento:

```
Semanas até a Capacidade = (Capacidade - Uso Atual) / (Crescimento Semanal)
```

Exemplo:

- Sessões atuais: 30.000
- Capacidade: 65.535 sessões
- Crescimento semanal: 2.000 sessões
- Semanas até a capacidade: (65.535 - 30.000) / 2.000 = **17,8 semanas**

Ação: Planejar atualização de capacidade em 12 semanas (deixando 5 semanas de margem).

Solução de Problemas de Desempenho

Alta Taxa de Descarte de Pacotes

Sintomas: Taxa de descarte > 1%, reclamações de usuários sobre conectividade ruim

Diagnóstico:

1. Verificar Estatísticas → Estatísticas de Pacotes
2. Identificar se os descartes são específicos de protocolo
3. Revisar Estatísticas de XDP para descartes vs. abortos de XDP

Causas Comuns:

- **Limitação de Taxa do QER**: Verificar valores de MBR do QER vs. tráfego real
- **TEIDs Inválidos**: Verificar se o TEID do PDR de uplink corresponde à atribuição do gNB

- **IPs de UE Desconhecidos**: Verificar se o PDR de downlink existe para o IP do UE
- **Overflow de Buffer**: Verificar estatísticas de buffer

Resolução:

- Aumentar o MBR do QER se houver limitação de taxa
- Verificar se o SMF criou os PDRs corretos
- Limpar buffers se o overflow for detectado

Erros de Processamento de XDP

Sintomas: XDP abortado > 0

Diagnóstico:

1. Navegar até Estatísticas → Estatísticas de XDP
2. Verificar contador de abortos
3. Revisar logs do OmniUPF para erros de eBPF

Causas Comuns:

- Falha de verificação do programa eBPF
- Incompatibilidade da versão do kernel
- Erros de acesso ao mapa eBPF
- Corrupção de memória

Resolução:

- Reiniciar o serviço OmniUPF
- Verificar se a versão do kernel atende aos requisitos mínimos (Linux 5.4+)
- Revisar logs do programa eBPF
- Contatar suporte se o problema persistir

Exaustão de Capacidade

Sintomas: Falhas na estabelecimento de sessões, capacidade do mapa em 100%

Diagnóstico:

1. Navegar até a página de Capacidade
2. Identificar qual mapa está em 100%
3. Verificar se as sessões estão presas (não sendo excluídas)

Mitigação Imediata:

1. Identificar sessões obsoletas (verificar página de Sessões)
2. Solicitar ao SMF que exclua sessões antigas
3. Limpar buffers para liberar entradas de FAR

Resolução a Longo Prazo:

1. Aumentar a capacidade do mapa eBPF
2. Agendar reinício do UPF com mapas maiores
3. Implementar políticas de limpeza de sessões

Degradação de Desempenho

Sintomas: Alta latência, baixo throughput, saturação da CPU

Diagnóstico:

1. Verificar taxa de pacotes vs. linha de base histórica
2. Revisar estatísticas de XDP para atrasos de processamento
3. Monitorar a utilização da CPU no host UPF
4. Verificar a utilização das interfaces N3/N6

Causas Comuns:

- Tráfego excedendo a capacidade do UPF
- Núcleos de CPU insuficientes para processamento de pacotes

- Gargalo na interface de rede
- Colisões de hash do mapa eBPF

Resolução:

- Escalar o UPF horizontalmente (adicionar mais instâncias)
- Atualizar a CPU ou habilitar RSS (Receive Side Scaling)
- Atualizar interfaces de rede para maior velocidade
- Ajustar a função de hash do mapa eBPF

Documentação Relacionada

- **Referência de Métricas** - Referência completa de métricas Prometheus
- **Guia de Operações do UPF** - Arquitetura e operações gerais do UPF
- **Guia de Gerenciamento de Regras** - Configuração de PDR, FAR, QER, URR
- **Guia de Operações da Web UI** - Recursos de monitoramento do painel de controle
- **Guia de Solução de Problemas** - Problemas comuns e diagnósticos
- **Guia de Arquitetura** - Caminho de dados eBPF e otimização de desempenho

N9 Loopback: Executando SGWU e PGWU na Mesma Instância

Visão Geral

OmniUPF suporta a execução de ambas as funções **SGWU (Serving Gateway User Plane)** e **PGWU (PDN Gateway User Plane)** na **mesma instância** com **loopback N9 de zero latência**. Este modo de implantação é ideal para:

- **Implantações simplificadas de EPC 4G** - Uma única instância de UPF em vez de duas
- **Otimização de custos** - Redução da complexidade de infraestrutura e operacional
- **Computação de borda** - Minimizar a latência para cenários de breakout local
- **Ambientes de laboratório/teste** - Plano de usuário EPC completo em um único servidor

Quando configurado com o mesmo endereço IP para as interfaces N3 e N9, o OmniUPF **detecta automaticamente** o tráfego fluindo entre os papéis de SGWU e PGWU e o processa **totalmente em eBPF** sem nunca enviar pacotes para a interface de rede.

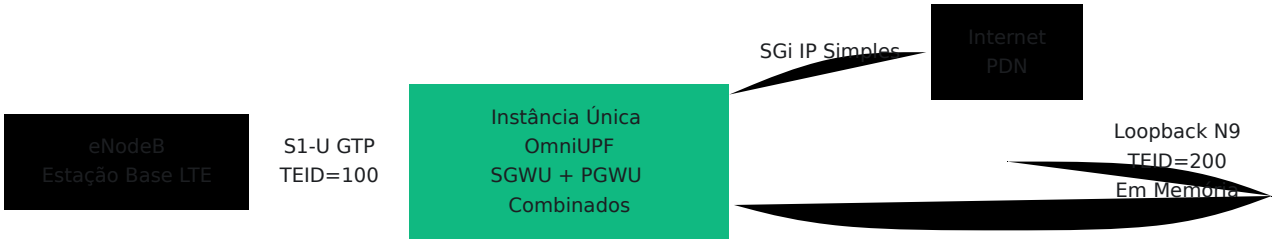
Como Funciona

Implantação Tradicional (Duas Instâncias)

Fluxo de Pacotes:

1. eNodeB → SGWU: Pacote GTP (TEID=100) chega no S1-U
2. SGWU: Combina PDR de uplink, encapsula em um novo túnel GTP (TEID=200)
3. **Pacote enviado pela rede física N9** para a instância PGWU
4. PGWU: Recebe GTP (TEID=200), decapsula, encaminha para a Internet
5. **Total: 2 passes XDP + 1 salto de rede**

Implantação de Loopback N9 (Uma Única Instância)



Fluxo de Pacotes com Loopback N9:

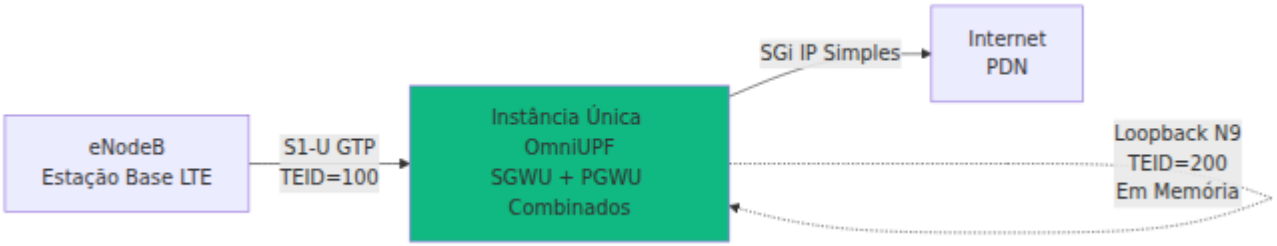
1. eNodeB → papel SGWU: Pacote GTP (TEID=100) chega no S1-U
2. papel SGWU: Combina PDR de uplink
3. **Detecção de Loopback:** IP de destino = IP local (10.0.1.10)
4. **Processamento in-place:** Atualiza GTP TEID para 200 (sessão PGWU)
5. papel PGWU: Decapsula, encaminha para a Internet
6. **Total: 1 passe XDP, zero saltos de rede**

Benefício de desempenho: Encaminhamento interno sub-microsegundo vs milissegundos para ida e volta na rede

---

Detalhes do Processamento de Pacotes

Fluxo de Uplink: eNodeB → SGWU → PGWU → Internet

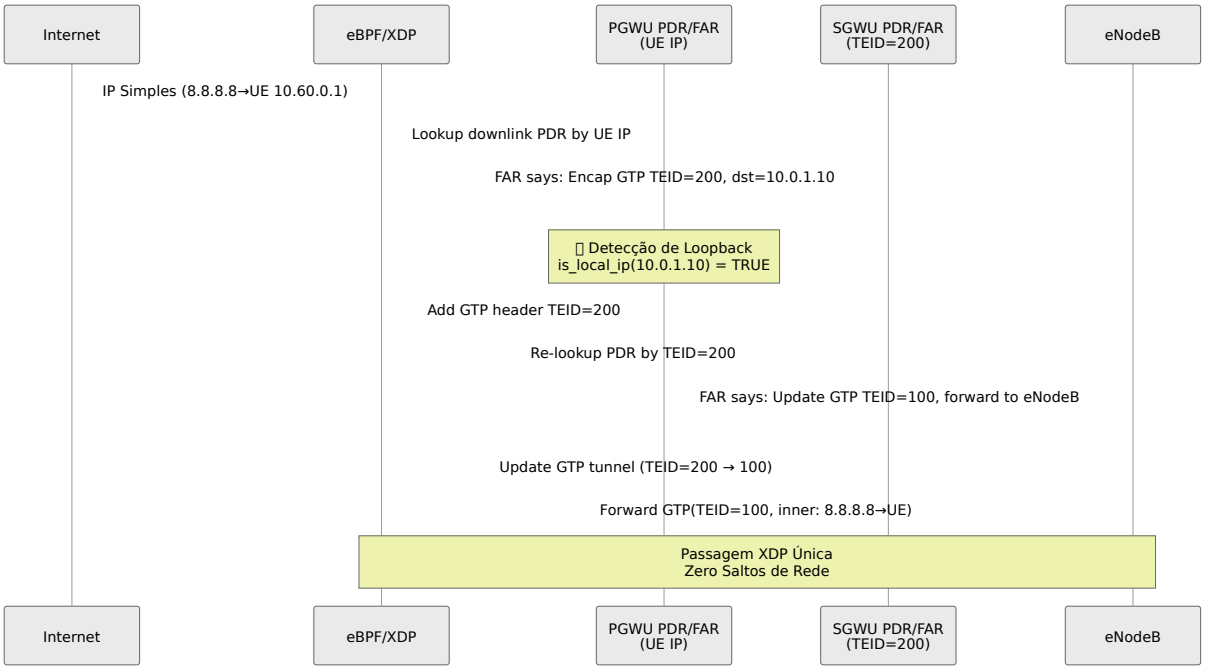


Caminho do Código eBPF: `ebpf/xdp/n3n6_entrypoint.c` linhas 349-403

Passos Chave:

1. **Receber:** Pacote GTP do eNodeB com TEID=100
2. **Combinação de PDR:** Lookup PDR de uplink para sessão SGWU (TEID=100)
3. **Ação FAR:** Encapsular em GTP com TEID=200, encaminhar para 10.0.1.10
4. **Verificação de Loopback:** `is_local_ip(10.0.1.10)` retorna TRUE
5. **Atualizar TEID:** Mudar `ctx->gtp->teid` de 100 para 200 (na memória do kernel)
6. **Reprocessar:** Lookup PDR para TEID=200 (sessão PGWU)
7. **Ação FAR:** Remover cabeçalho GTP, encaminhar para a Internet
8. **Rota:** Enviar pacote IP simples para a interface N6

Fluxo de Downlink: Internet → PGWU → SGWU → eNodeB



Caminho do Código eBPF: `ebpf/xdp/n3n6_entrypoint.c` linhas 137-194 (IPv4), 265-322 (IPv6)

Passos Chave:

1. **Receber:** Pacote IP simples da Internet destinado ao UE (10.60.0.1)
2. **Combinação de PDR:** Lookup PDR de downlink pelo IP do UE (sessão PGWU)
3. **Ação FAR:** Encapsular em GTP com TEID=200, encaminhar para 10.0.1.10
4. **Verificação de Loopback:** `is_local_ip(10.0.1.10)` retorna TRUE
5. **Adicionar GTP:** Encapsular pacote com TEID=200
6. **Reprocessar:** Lookup PDR para TEID=200 (sessão SGWU)
7. **Ação FAR:** Atualizar túnel GTP para eNodeB TEID=100
8. **Rota:** Enviar pacote GTP para a interface S1-U (eNodeB)

Configuração

Requisitos

Plano de Controle:

- **SGWU-C**: Deve conectar à interface PFCP do OmniUPF (por exemplo, `192.168.1.10:8805`)
- **PGWU-C**: Deve conectar à **mesma** interface PFCP do OmniUPF

Rede:

- **Um único endereço IP** para as interfaces N3 e N9
- **Endereços IP diferentes** para SGWU-C e PGWU-C (se executando no mesmo host, use portas diferentes)

Configuração do OmniUPF

`/etc/omniupf/runtime.exs`:

```
# Interfaces de rede
xdp_interfaces = "eth0"              # Interface única para S1-U e
N9
xdp_attach_mode = "native"           # Use nativo para melhor
desempenho

# Interface PFCP
pfcp_address = "192.168.1.10"        # Endereço PFCP do OmniUPF
pfcp_port = 8805                     # Porta PFCP
node_id = "192.168.1.10"             # ID do Nó PFCP do OmniUPF

# Interfaces do Plano de Usuário
n3_address = "10.0.1.10"             # IP da interface S1-U/N3
n9_address = n3_address               # IP da interface N9 (MESMO
que N3)

# Pools de Recursos
feature_ueip = true
ueip_pool = "10.60.0.0/16"           # Pool de endereços IP do UE
feature_ftup = true
teid_pool_start = 1
teid_pool_end = 65_535

# Capacidade
max_sessions = 100_000               # Máximo de sessões
simultâneas de UE

# API
api_port = 8080
```

Configuração Chave:

- `n3_address` **e** `n9_address` **DEVEM ser idênticos** para habilitar o loopback
- Endereço PFCP de escuta único para ambos os planos de controle
- Suficiente `max_sessions` para carga combinada de SGWU + PGWU

Configuração do Plano de Controle

Configuração do SGWU-C

```yaml
# Aponte para a interface PFCP do OmniUPF
upf_pfcp_address: "192.168.1.10:8805"

# Interface S1-U (mesma que o n3_address do OmniUPF)
sgwu_s1u_address: "10.0.1.10"

# Interface N9 para encaminhamento para PGWU (mesma que o OmniUPF)
sgwu_n9_address: "10.0.1.10"
```

Configuração do PGWU-C

```yaml
# Aponte para a MESMA interface PFCP do OmniUPF
upf_pfcp_address: "192.168.1.10:8805"

# Interface N9 (recebe do SGWU)
pgwu_n9_address: "10.0.1.10"

# Interface SGi para conectividade com a Internet
pgwu_sgi_address: "192.168.100.1"
```

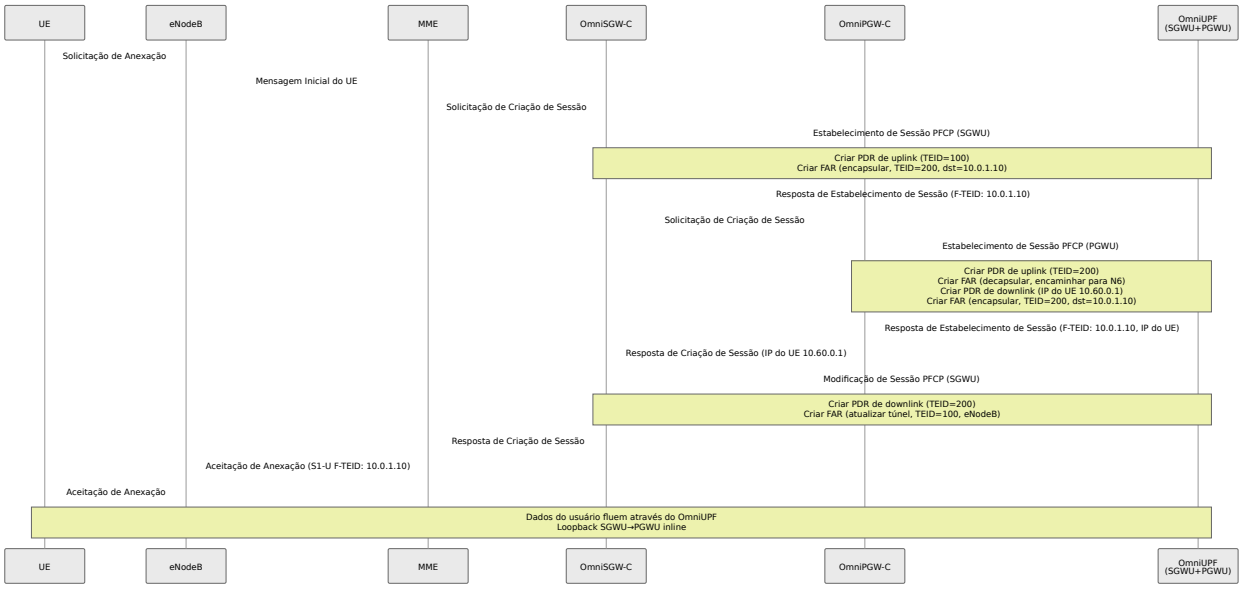
Importante:

- Ambos os planos de controle conectam-se ao **mesmo ponto de extremidade PFCP** (`:8805`)
- OmniUPF cria **associações PFCP separadas** para SGWU-C e PGWU-C
- As sessões são isoladas por plano de controle (monitoradas pelo ID do Nó)

Exemplo de Fluxo de Sessão

Anexação do UE e Estabelecimento da Sessão PDU

Cenário: UE se conecta à rede, estabelece sessão de dados



Sessões PFCP Criadas:

Sessão SGWU (do OmniSGW-C):

- **PDR de Uplink:** Combina TEID=100 (do eNodeB) → FAR: Encapsular TEID=200, dst=10.0.1.10
- **PDR de Downlink:** Combina TEID=200 (do PGWU) → FAR: Atualizar túnel TEID=100, encaminhar para eNodeB

Sessão PGWU (do OmniPGW-C):

- **PDR de Uplink:** Combina TEID=200 (do SGWU) → FAR: Decapsular, encaminhar para a Internet
- **PDR de Downlink:** Combina IP do UE=10.60.0.1 → FAR: Encapsular TEID=200, dst=10.0.1.10

Monitoramento e Verificação

Verifique se o Loopback N9 está Ativo

Verifique os Logs do XDP:

```
# Veja a saída de depuração em tempo real do eBPF
sudo cat /sys/kernel/debug/tracing/trace_pipe | grep loopback
```

Saída esperada:

```
upf: [n3] session for teid:100 -> 200 remote:10.0.1.10
upf: [n9-loopback] self-forwarding detected, processing inline
TEID:200
upf: [n9-loopback] decapsulated, routing to N6

upf: [n6] use mapping 10.60.0.1 -> teid:200
upf: [n6-loopback] downlink self-forwarding detected, processing
inline TEID:200
upf: [n6-loopback] SGWU updating GTP tunnel to eNodeB TEID:100
upf: [n6-loopback] forwarding to eNodeB
```

Monitore Sessões via API REST

Liste Associações PFCP:

```
curl http://localhost:8080/api/v1/upf_pipeline | jq
```

Saída esperada:

```
{
  "associations": [
    {
      "node_id": "sgwc.example.com",
      "address": "192.168.1.20:8805",
      "sessions": 1000
    },
    {
      "node_id": "pgwc.example.com",
      "address": "192.168.1.21:8805",
      "sessions": 1000
    }
  ],
  "total_sessions": 2000
}
```


Verifique duas associações separadas (uma para SGWU-C, uma para PGWU-C)

Liste Sessões Ativas:

```
curl http://localhost:8080/api/v1/sessions | jq '.sessions[] |
{local_seid, ue_ip, uplink_teid}'
```

Saída esperada:


```
{
  "local_seid": 12345,
  "ue_ip": "10.60.0.1",
  "uplink_teid": 100
}
{
  "local_seid": 67890,
  "ue_ip": "10.60.0.1",
  "uplink_teid": 200
}
```


Cada UE tem DUAS sessões:

- Sessão do SGWU-C (TEID=100, interface S1-U)
- Sessão do PGWU-C (TEID=200, interface N9)

Métricas de Desempenho

Verifique Estatísticas de Pacotes:

```
curl http://localhost:8080/api/v1/xdp_stats | jq
```

Métricas chave:

- `xdp_processed`: Total de pacotes processados em eBPF
- `xdp_pass`: Pacotes passados para a pilha de rede (deve ser zero para tráfego de loopback)
- `xdp_redirect`: Pacotes encaminhados via redirecionamento XDP
- `xdp_tx`: Pacotes transmitidos (tráfego de loopback usa isso)

Para tráfego de loopback N9:

- `xdp_pass` deve ser **mínimo** (apenas tráfego não loopback)
- `xdp_tx` ou `xdp_redirect` conta o encaminhamento de loopback

Solução de Problemas

Tráfego N9 Indo para a Rede em vez de Loopback

Sintoma: Pacotes enviados para a interface de rede, alta latência

Causa Raiz: `n3_address` ≠ `n9_address`

Solução (em `runtime.exs`):

```
# ERRADO:
n3_address = "10.0.1.10"
n9_address = "10.0.1.20"   # IP diferente, sem loopback!

# CORRETO:
n3_address = "10.0.1.10"
n9_address = n3_address     # Mesmo IP, habilita loopback
```

Verificação:

```
curl http://localhost:8080/api/v1/dataplane_config | jq
```

Deve mostrar:

```
{
  "n3_ipv4_address": "10.0.1.10",
  "n9_ipv4_address": "10.0.1.10"
}
```

PDR Não Encontrado Após Loopback

Sintoma: Logs mostram `[n9-loopback] no PDR for destination TEID`

Causa Raiz: Sessão PGWU não criada ou incompatibilidade de TEID

Diagnóstico:

1. **Verifique Sessões PFCP:**

   ```
   curl http://localhost:8080/api/v1/sessions | jq '.sessions[] |
   select(.uplink_teid == 200)'
   ```

2. **Verifique Configuração FAR:**

```
curl http://localhost:8080/api/v1/far_map | jq '.[] |
select(.teid == 200)'
```

Solução: Certifique-se de que o PGWU-C cria sessão com TEID correspondente que o SGWU-C usa para encaminhamento N9

Uso Alto de CPU

Sintoma: Uso de CPU maior que o esperado

Causa Raiz: Programa eBPF processando pacotes várias vezes ou excessivas buscas em mapas

Diagnóstico:

```
# Verifique os padrões de acesso ao mapa eBPF
sudo bpftool map dump name pdr_map_teid_ip4 | wc -l
sudo bpftool map dump name far_map | wc -l
```

Solução:

- Aumente `max_sessions` se o mapa estiver cheio (causa falhas de busca)
- Verifique se o limite de taxa QER não está causando perdas e retransmissões
- Verifique se há buffer excessivo de pacotes

Perda de Pacotes Durante Handover

Sintoma: Pacotes descartados durante a transferência do eNodeB

Causa Raiz: Buffering não configurado ou limites de buffer insuficientes

Configuração:

```
# Em runtime.exs
buffer_port = 22152
```

Verificação:

```
curl http://localhost:8080/api/v1/upf_buffer_info | jq
```

Benefícios do Loopback N9

Desempenho

Métrica	Duas Instâncias	Uma Única Instância (Loopback N9)	Melhoria
Latência	1-5 ms	< 1 µs	**1000x mais rápido**
Throughput	Limitado pela rede	Limitado por CPU/memória	**2-3x maior**
Uso de CPU	2× passes XDP + pilha de rede	1× passe XDP	**Redução de 40-50%**
Perda de Pacotes	Risco durante congestionamento de rede	Zero (em memória)	**Eliminado**

Operacional

- **Implantação Simplificada:** Uma única instância OmniUPF em vez de duas

- **Infraestrutura Reduzida:** Metade dos servidores, portas de rede, endereços IP
- **Menor Complexidade:** Uma única configuração, um único ponto de monitoramento
- **Economia de Custos:** Redução de hardware, energia, refrigeração, manuten��ão
- **Solução de Problemas Mais Fácil:** Rastreio de pacotes único, saída de depuração eBPF única

Casos de Uso

Ideal Para:

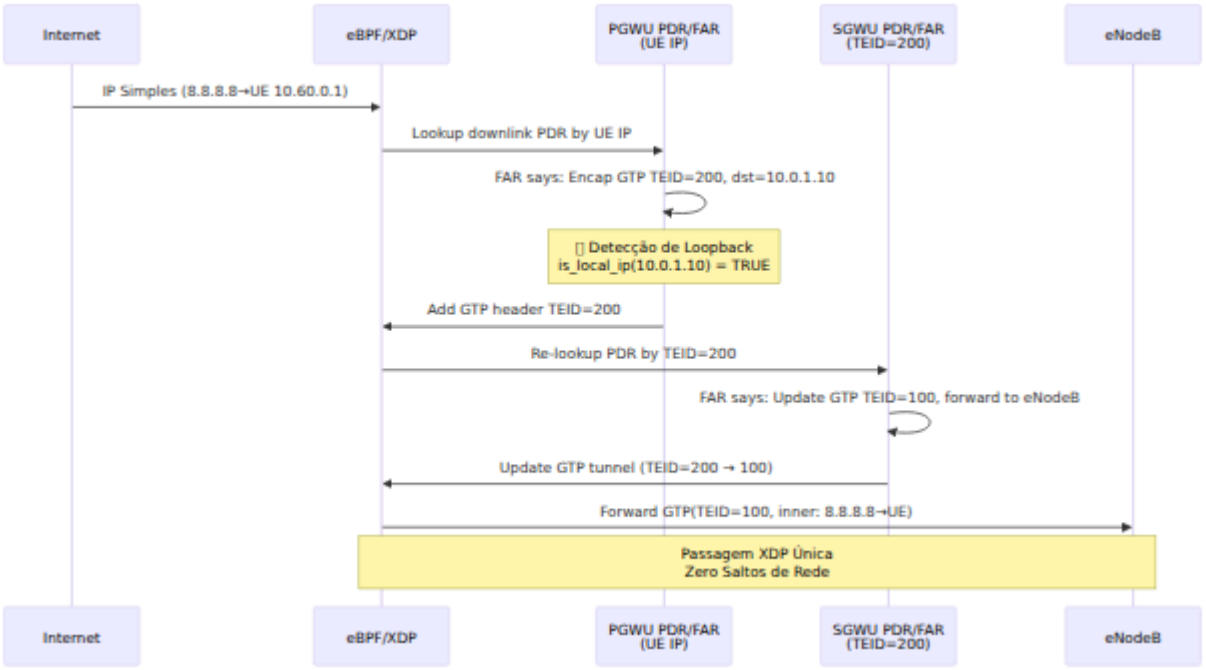
- **Computação de Borda:** Minimizar latência para breakout local
- **Implantações Pequenas/Médias:** < 100K assinantes
- **Laboratório/Teste:** Plano de usuário EPC completo em uma única VM
- **Com Orçamento Limitado:** Orçamento de hardware restrito

Não Recomendado Para:

- **Redundância Geográfica:** SGWU e PGWU em diferentes data centers
- **Escala Massiva:** > 1M assinantes (considere escalonamento horizontal)
- **Requisitos Regulatórios:** Separação mandatória de SGW e PGW

Comparação com Outros Modos de Implantação

Instância Única (Loopback N9) vs. Instâncias Separadas



Resumo

O Loopback N9 permite **plano de usuário EPC 4G de grau de operadora em uma única instância OmniUPF** processando tráfego SGWU→PGWU totalmente em eBPF sem saltos de rede. Isso proporciona:

- **Latência sub-microsegundo** para encaminhamento entre gateways
- **Redução de CPU de 40-50%** em comparação com instâncias separadas
- **Operações simplificadas** - instância única, configuração, monitoramento
- **Custo mais baixo** - metade da infraestrutura
- **Total conformidade com 3GPP** - protocolos PFCP, GTP-U padrão

A configuração é automática quando `n3_address == n9_address` - nenhuma bandeira ou configuração especial necessária. O caminho de dados eBPF do OmniUPF detecta condições de loopback e processa pacotes inline.

Para mais informações:

- **Configuração:** CONFIGURATION.md
- **Arquitetura:** ARCHITECTURE.md
- **Referência de Métricas:** METRICS.md
- **Monitoramento:** MONITORING.md
- **Operações:** OPERATIONS.md
- **Solução de Problemas:** TROUBLESHOOTING.md

Referência de Códigos de Causa PFCP

Visão Geral

PFCP (Protocolo de Controle de Encaminhamento de Pacotes) utiliza códigos de causa em mensagens de resposta para indicar o resultado das solicitações. Este documento descreve os códigos de causa implementados no OmniUPF e quando eles ocorrem durante o processamento de mensagens PFCP.

Todos os códigos de causa estão em conformidade com as especificações **3GPP TS 129.244** e são retornados em mensagens de resposta PFCP para indicar sucesso, falha ou condições de erro específicas.

Monitoramento de Códigos de Causa

OmniUPF rastreia os resultados das mensagens PFCP usando métricas do Prometheus. Cada resposta PFCP inclui um código de causa que é registrado em:

```
upf_pfcp_rx_errors{message_name="...", cause_code="...",
peer_address="..."}
```

Isso permite o monitoramento de:

- **Taxas de sucesso** por tipo de mensagem e nó do plano de controle
- **Padrões de erro** indicando configurações incorretas ou problemas de protocolo
- **Saúde da associação** com base nas taxas de rejeição

Veja a Referência de Métricas para a documentação completa das métricas PFCP.

Categorias de Códigos de Causa

Códigos de Sucesso

Código	Nome	Quando Ocorre
1	**RequestAccepted**	Solicitação processada com sucesso. Todos os IEs obrigatórios presentes e válidos. Regras criadas/modificadas/excluídas com sucesso.

Códigos de Erro do Cliente

Código	Nome	Quando Ocorre
64	**RequestRejected**	Rejeição geral por erros não especificados. Usado quando nenhum código de causa específico se aplica.
65	**SessionContextNotFound**	Modificação ou exclusão de sessão solicitada para SEID desconhecido. A sessão especificada não existe neste UPF.
66	**MandatoryIEMissing**	Elemento de Informação obrigatório ausente. Exemplos: NodeID ausente na Configuração de Associação, F-SEID ausente na Estabelecimento de Sessão, RecoveryTimeStamp ausente.
67	**ConditionalIEMissing**	IE condicionalmente obrigatório ausente com base em outros IEs presentes. Usado quando IEs dependem da presença uns dos outros.
69	**MandatoryIEIncorrect**	IE obrigatório presente, mas contém dados inválidos. Exemplos: Formato de NodeID não

Código	Nome	Quando Ocorre
		analisável, valor de RecoveryTimeStamp inválido, F-SEID malformado.
72	**NoEstablishedPFCPAssociation**	Operação de sessão tentada sem associação ativa. Deve estabelecer associação PFCP antes de criar sessões.
73	**RuleCreationModificationFailure**	Erro ao aplicar regras PDR, FAR, QER ou URR ao caminho de dados eBPF. Causas possíveis: capacidade do mapa eBPF esgotada, parâmetros de regra inválidos, falha na alocação de recursos.

Códigos de Erro do Servidor/Recurso

Código	Nome	Quando Ocorre
74	**PFCPEntityInCongestion**	UPF enfrentando alta carga ou exaustão de recursos. Temporariamente incapaz de processar solicitações.
75	**NoResourcesAvailable**	Recursos insuficientes para atender à solicitação. Exemplos: capacidade do mapa eBPF esgotada, falha na alocação de memória, pool de TEID esgotado.
77	**SystemFailure**	Erro interno crítico impedindo o processamento da solicitação. Exemplos: falha no programa eBPF, erro na interface do kernel, corrupção de banco de dados.

Códigos de Funcionalidade Não Suportada

Código	Nome	Quando Ocorre
68	**InvalidLength**	O campo de comprimento do IE não corresponde ao comprimento real dos dados. Atualmente não utilizado no OmniUPF.
70	**InvalidForwardingPolicy**	Política de encaminhamento não suportada pelo UPF. Atualmente não utilizado no OmniUPF.
71	**InvalidFTEIDAllocationOption**	Opção de alocação de F-TEID não suportada. Atualmente não utilizado no OmniUPF.
76	**ServiceNotSupported**	Serviço ou funcionalidade solicitada não implementada. Atualmente não utilizado no OmniUPF.
78	**RedirectionRequested**	UPF solicita redirecionamento para outra instância do UPF. Atualmente não utilizado no OmniUPF.

Cenários e Causas Comuns

Falhas na Configuração da Associação

Cenário: NodeID Ausente

```
SMF → UPF: Associação Configuração Solicitação (sem NodeID)
UPF → SMF: Associação Configuração Resposta (Causa:
MandatoryIEMissing)
```

Resolução: Garantir que o SMF inclua o IE NodeID em todas as Solicitações de Configuração de Associação.

Cenário: Formato de NodeID Inválido

```
SMF → UPF: Associação Configuração Solicitação (NodeID="inválido")
UPF → SMF: Associação Configuração Resposta (Causa:
MandatoryIEIncorrect)
```

Resolução: NodeID deve ser um FQDN válido ou endereço IPv4/IPv6.

Cenário: Timestamp de Recuperação Ausente

```
SMF → UPF: Associação Configuração Solicitação (sem
RecoveryTimeStamp)
UPF → SMF: Associação Configuração Resposta (Causa:
MandatoryIEMissing)
```

Resolução: Incluir RecoveryTimeStamp na Solicitação de Configuração de Associação.

Falhas na Estabelecimento de Sessão

Cenário: Nenhuma Associação Estabelecida

```
SMF → UPF: Estabelecimento de Sessão Solicitação
UPF → SMF: Estabelecimento de Sessão Resposta (Causa:
NoEstablishedPFCPAssociation)
```

Resolução: Estabelecer associação PFCP antes de criar sessões.

Cenário: Falha na Criação de Regra

```
SMF → UPF: Estabelecimento de Sessão Solicitação
UPF processa FARs, QERs, URRs com sucesso
UPF falha ao criar PDR (mapa eBPF cheio)
UPF → SMF: Estabelecimento de Sessão Resposta (Causa:
RuleCreationModificationFailure)
```

Resolução:

- Verifique a capacidade do mapa eBPF (veja Monitoramento de Capacidade)
- Aumente os tamanhos dos mapas na configuração do UPF
- Reduza a contagem de sessões ativas

Cenário: F-SEID Ausente

```
SMF → UPF: Estabelecimento de Sessão Solicitação (sem CP F-SEID)
UPF → SMF: Estabelecimento de Sessão Resposta (Causa:
MandatoryIEMissing)
```

Resolução: Incluir CP F-SEID na Solicitação de Estabelecimento de Sessão.

Falhas na Modificação de Sessão

Cenário: SEID Desconhecido

```
SMF → UPF: Modificação de Sessão Solicitação (SEID=12345)
UPF não possui sessão com SEID 12345
UPF → SMF: Modificação de Sessão Resposta (Causa:
SessionContextNotFound)
```

Resolução:

- Verifique se o SEID corresponde ao valor da Resposta de Estabelecimento de Sessão
- Verifique se a sessão já foi excluída
- Certifique-se de usar a instância correta do UPF (cenários de loopback N9)

Falhas na Exclusão de Sessão

Cenário: SEID Desconhecido

```
SMF → UPF: Exclusão de Sessão Solicitação (SEID=67890)
UPF não possui sessão com SEID 67890
UPF → SMF: Exclusão de Sessão Resposta (Causa:
SessionContextNotFound)
```

Resolução: O SEID pode já ter sido excluído ou nunca existiu.

Solução de Problemas com Códigos de Causa

Usando Métricas do Prometheus

Consultas Prometheus para identificar padrões de erro:

```
# Taxa de erro por código de causa
rate(upf_pfcp_rx_errors{cause_code!="RequestAccepted"}[5m])

# Principais causas de rejeição
topk(5, sum by (cause_code) (upf_pfcp_rx_errors))

# Erros por par SMF
sum by (peer_address, cause_code)
(upf_pfcp_rx_errors{cause_code!="RequestAccepted"})

# Falhas na estabelecimento de sessão
upf_pfcp_rx_errors{message_name="SessionEstablishmentRequest",
cause_code!="RequestAccepted"}
```

Usando a Interface Web

Navegue até a página **Sessões** para visualizar:

- Contagem de sessões ativas por nó do plano de controle
- Taxas de sucesso/falha no estabelecimento de sessão
- Erros recentes de sessão

Navegue até a página **Capacidade** para diagnosticar:

- Utilização do mapa eBPF (causa raiz de RuleCreationModificationFailure)
- Indicadores de exaustão de recursos

Veja o Guia da Interface Web para instruções detalhadas de monitoramento.

Passos Comuns de Depuração

Alta Taxa de MandatoryIEMissing:

1. Verifique a configuração do SMF para IEs obrigatórios
2. Verifique a compatibilidade da versão da biblioteca PFCP
3. Revise os logs do SMF para erros de construção de IE

Falhas Frequentes de RuleCreationModificationFailure:

1. Verifique a capacidade do mapa eBPF: `GET /api/v1/map_info`
2. Monitore o uso do mapa: `upf_ebpf_map_used / upf_ebpf_map_capacity`
3. Aumente os tamanhos dos mapas na configuração se > 70% utilizado
4. Veja Planejamento de Capacidade

Erros NoEstablishedPFCPAssociation:

1. Verifique se a associação existe: `GET /api/v1/pfcp_associations`
2. Verifique a configuração do tempo limite de heartbeat
3. Revise os logs de configuração da associação
4. Certifique-se de que SMF e UPF possam se alcançar

SessionContextNotFound na Modificação:

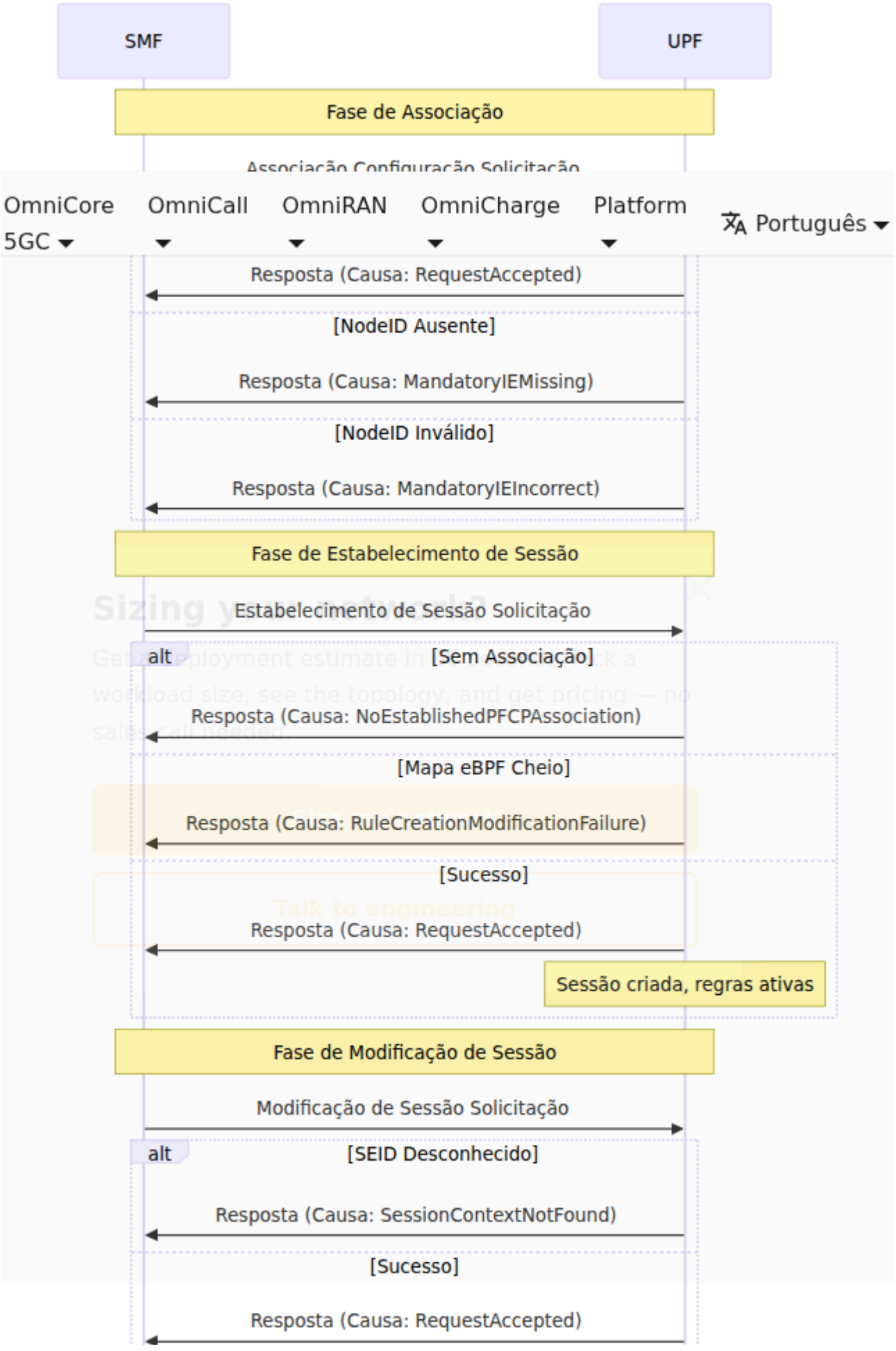
1. Verifique o SEID da resposta de estabelecimento de sessão
2. Verifique se a sessão foi excluída
3. Para loopback N9: Certifique-se de usar o endpoint correto do UPF

4. Consulte sessões ativas: `GET /api/v1/pfcp_sessions`

Impacto do Código de Causa nas

Operações

Ciclo de Vida da Sessão


SMF
UPF
Fase de Associação
Associação Configuração Solicitação
OmniCore 5GC
OmniCall
OmniRAN
OmniCharge
Platform
Português
Resposta (Causa: RequestAccepted)
[NodeID Ausente]
Resposta (Causa: MandatoryIEMissing)
[NodeID Inválido]
Resposta (Causa: MandatoryIEIncorrect)
Fase de Estabelecimento de Sessão
Estabelecimento de Sessão Solicitação
alt
[Sem Associação]
Resposta (Causa: NoEstablishedPFCPAssociation)
[Mapa eBPF Cheio]
Resposta (Causa: RuleCreationModificationFailure)
[Sucesso]
Resposta (Causa: RequestAccepted)
Sessão criada, regras ativas
Fase de Modificação de Sessão
Modificação de Sessão Solicitação
alt
[SEID Desconhecido]
Resposta (Causa: SessionContextNotFound)
[Sucesso]
Resposta (Causa: RequestAccepted)

Métricas e Alertas

Alertas Recomendados:

```
# Crítico: Alta taxa de rejeição
- alert: PfcpHighRejectionRate
  expr: |
    rate(upf_pfcp_rx_errors{cause_code!="RequestAccepted"}[5m]) > 0.1
  annotations:
    summary: "Alta taxa de rejeição PFCP: {{ $value }}/s"

# Aviso: Problemas de capacidade
- alert: PfcpRuleCreationFailures
  expr: |

rate(upf_pfcp_rx_errors{cause_code="RuleCreationModificationFailure"}
[5m]) > 0
  annotations:
    summary: "Falhas na criação de regras PFCP detectadas"

# Aviso: Problemas de associação
- alert: PfcpNoAssociation
  expr: |

rate(upf_pfcp_rx_errors{cause_code="NoEstablishedPFCPAssociation"}
[5m]) > 0
  annotations:
    summary: "Sessões PFCP tentadas sem associação"
```

Conformidade com Padrões 3GPP

OmniUPF implementa códigos de causa de acordo com:

- **3GPP TS 129.244 v16.4.0** - especificação PFCP
- **Seção 8.2.1** - definição de IE de Causa

- **Seção 8.19** - tabela de valores de Causa

Documentação Relacionada

- **Integração do Protocolo PFCP** - arquitetura PFCP e tratamento de mensagens
- **Referência de Métricas** - documentação da métrica upf_pfcp_rx_errors
- **Guia de Monitoramento** - monitoramento de capacidade e alertas
- **Guia de Solução de Problemas** - problemas de associação e sessão PFCP
- **Guia da Interface Web** - monitoramento de sessões e associações

Guia de Gerenciamento de Regras

Índice

Visão Geral

OmniUPF usa um conjunto de regras interconectadas para classificar, encaminhar, modelar e rastrear o tráfego do plano do usuário. Essas regras são instaladas pelo SMF via PFCP e armazenadas em mapas eBPF para processamento de pacotes de alto desempenho. Compreender essas regras e suas relações é crítico para operar e solucionar problemas no UPF.

Tipos de Regras

Tipo de Regra	Propósito	Campo Chave	Instalado Por
PDR (Regra de Detecção de Pacotes)	Classificar pacotes em fluxos	TEID ou IP do UE	SMF via Estabelecimento/Modificação de Sessão PFCP
FAR (Regra de Ação de Encaminhamento)	Determinar ação de encaminhamento	ID do FAR	SMF via Estabelecimento/Modificação de Sessão PFCP
QER (Regra de Aplicação de QoS)	Aplicar limites de largura de banda e marcação	ID do QER	SMF via Estabelecimento/Modificação de Sessão PFCP
URR (Regra de Relatório de Uso)	Rastrear volumes de dados para cobrança	ID do URR	SMF via Estabelecimento/Modificação de Sessão PFCP

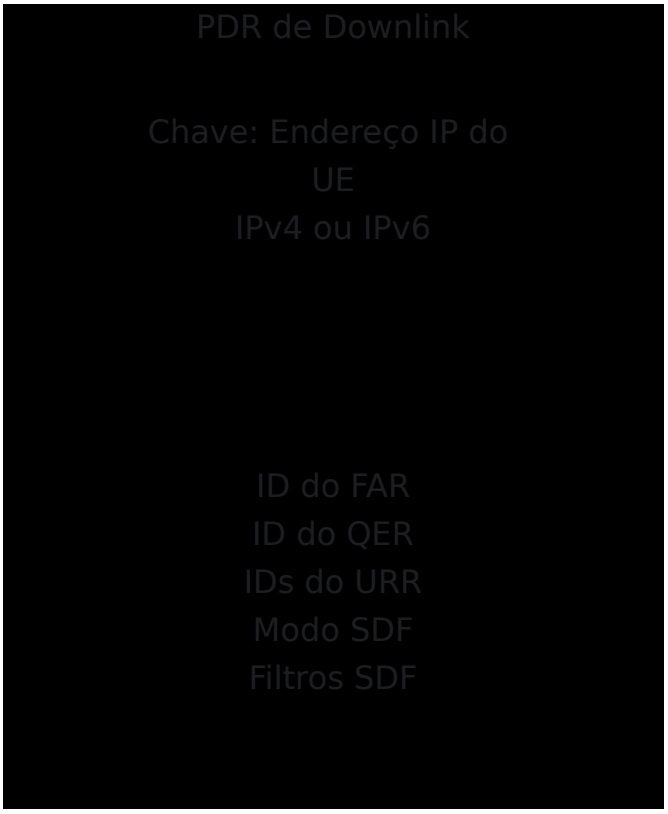
Fluxo de Processamento de Regras

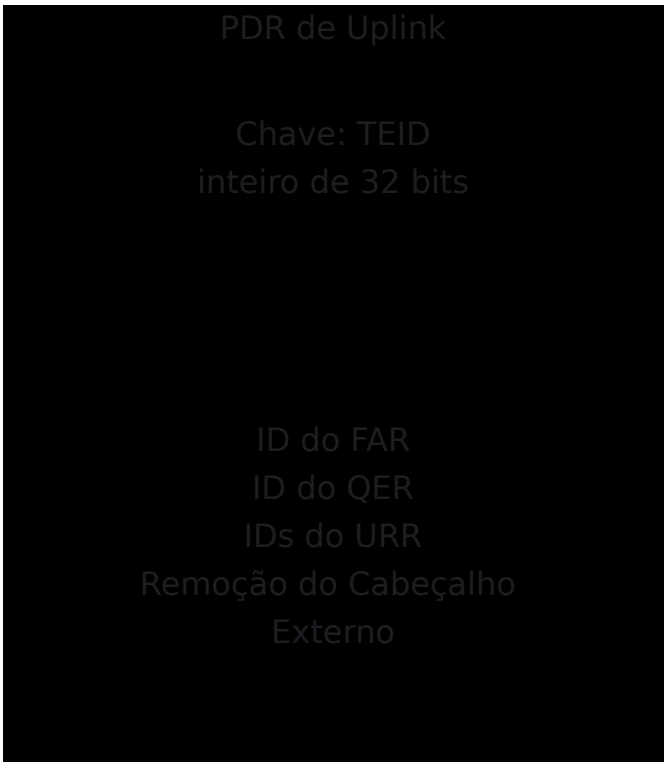
Regras de Detecção de Pacotes (PDR)

Propósito

As PDRs classificam pacotes de entrada em fluxos de tráfego. Elas são o ponto de entrada para todo o processamento de pacotes no UPF.

Estrutura da PDR





PDRs de Uplink

As PDRs de Uplink combinam pacotes que chegam na interface N3 da RAN.

Campo Chave: TEID (Identificador de Ponto de Extremidade do Túnel)

- Inteiro sem sinal de 32 bits
- Atribuído pelo SMF e sinalizado para gNB
- Único por fluxo de tráfego do UE

Campos de Valor:

- **ID do FAR**: Referência à regra de ação de encaminhamento
- **ID do QER**: Referência à regra de aplicação de QoS (opcional)
- **IDs do URR**: Lista de regras de relatório de uso (opcional)
- **Remoção do Cabeçalho Externo**: Flag para remover a encapsulação GTP-U

Processo de Busca:

1. Extrair TEID do cabeçalho GTP-U
2. Busca hash no mapa eBPF `uplink_pdr_map`
3. Se uma combinação for encontrada, recuperar ID do FAR, ID do QER e IDs do URR
4. Se não houver combinação, descartar o pacote

Exemplo:

```
TEID: 5678
ID do FAR: 2
ID do QER: 1
Remoção do Cabeçalho Externo: Falso
Modo SDF: Sem SDF
```

PDRs de Downlink

As PDRs de Downlink combinam pacotes que chegam na interface N6 da rede de dados.

Campo Chave: Endereço IP do UE

- Endereço IPv4 (32 bits) ou endereço IPv6 (128 bits)
- Atribuído pelo SMF durante o estabelecimento da sessão PDU
- Único por UE

Campos de Valor:

- **ID do FAR**: Referência à regra de ação de encaminhamento
- **ID do QER**: Referência à regra de aplicação de QoS (opcional)
- **IDs do URR**: Lista de regras de relatório de uso (opcional)
- **Modo SDF**: Modo de filtro de Fluxo de Dados de Serviço
  - `Sem SDF`: Sem filtragem, todo o tráfego combina

    - `Somente SDF`: Apenas o tráfego que combina com SDF é encaminhado
    - `SDF + Padrão`: O tráfego que combina com SDF usa regras específicas, o outro tráfego usa o FAR padrão
- **Filtros SDF**: Filtros específicos de aplicação (portas, protocolos, intervalos de IP)

Processo de Busca:

1. Extrair IP de destino do cabeçalho do pacote
2. Busca hash no `downlink_pdr_map` (IPv4) ou `downlink_pdr_map_ip6` (IPv6)
3. Se uma combinação for encontrada, verificar filtros SDF (se configurados)
4. Recuperar ID do FAR, ID do QER e IDs do URR
5. Se não houver combinação, descartar o pacote

Exemplo:

```
IP do UE: 10.45.0.1
ID do FAR: 1
ID do QER: 1
Remoção do Cabeçalho Externo: Falso
Modo SDF: Sem SDF
```

Filtros SDF (Fluxo de Dados de Serviço)

Os filtros SDF fornecem classificação de tráfego específica de aplicação dentro de uma PDR.

Casos de Uso:

- Diferenciar o tráfego do YouTube da navegação na web
- Aplicar QoS diferente para VoIP vs. dados de melhor esforço
- Roteamento de aplicações específicas através de diferentes caminhos de rede

Critérios de Filtro:

- **Protocolo**: TCP, UDP, ICMP
- **Intervalo de Portas**: Portas de destino (por exemplo, 443 para HTTPS, 5060 para SIP)
- **Intervalo de Endereço IP**: Redes de destino específicas
- **Descrição do Fluxo**: Modelos de fluxo definidos pela 3GPP

Exemplo de Configuração SDF:

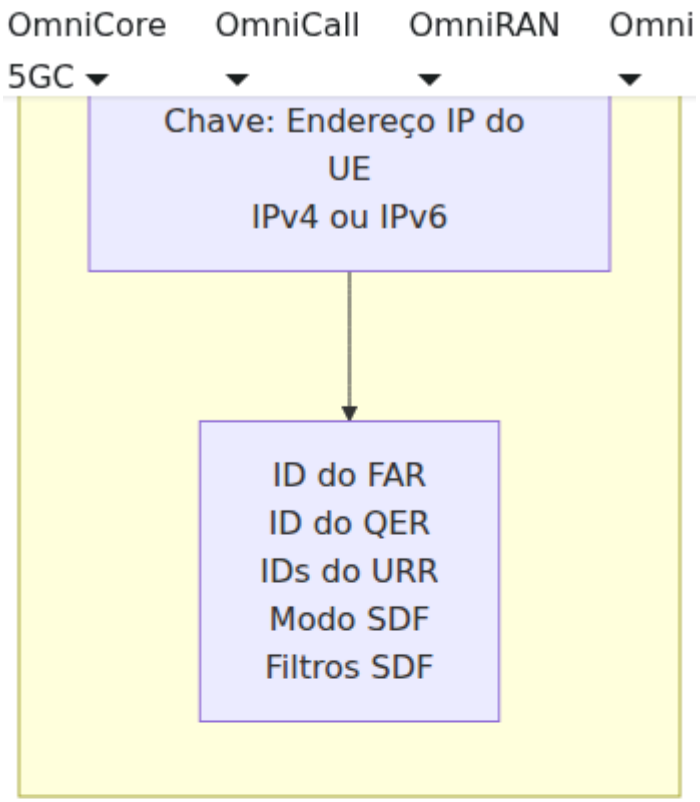
```
ID da PDR: 10
IP do UE: 10.45.0.1
Modo SDF: Somente SDF
Filtros SDF:
  - Protocolo: UDP, Portas: 5060-5061 → ID do FAR 5 (FAR VoIP)
  - Protocolo: TCP, Porta: 443 → ID do FAR 1 (FAR Padrão)
```

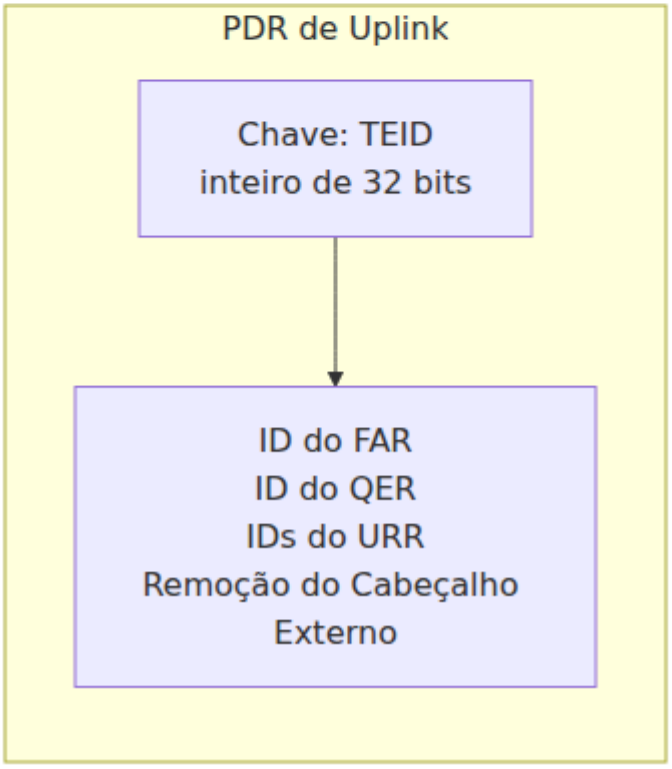
Regras de Ação de Encaminhamento (FAR)

Propósito

As FARs determinam o que fazer com pacotes que combinam com uma PDR. Elas definem ações de encaminhamento, parâmetros de encapsulação GTP-U e pontos de destino.

Estrutura da FAR





Flags de Ação

As ações da FAR são flags bitwise que podem ser combinadas:

Flag	Bit	Valor	Descrição
ENCAMINHAR	1	2	Encaminhar pacote para o destino
BUFFER	2	4	Armazenar pacote no buffer
DESCARTAR	0	1	Descartar pacote
NOTIFICAR	3	8	Enviar notificação para o plano de controle
DUPLICAR	4	16	Duplicar pacote para múltiplos destinos

Combinações Comuns de Ação:

- `Ação: 2 (ENCAMINHAR)` - Encaminhamento normal (mais comum)
- `Ação: 6 (ENCAMINHAR + BUFFER)` - Encaminhar e armazenar durante a transferência
- `Ação: 4 (BUFFER)` - Apenas armazenar (durante a troca de caminho)
- `Ação: 1 (DESCARTAR)` - Descartar pacote (raro, geralmente para aplicação de políticas)

Controle de Bufferização

A flag BUFFER (bit 2) controla a bufferização de pacotes durante eventos de mobilidade. A bufferização é um recurso crítico do UPF que previne a perda de pacotes durante transições de estado do UE.

Quando a Bufferização é Usada

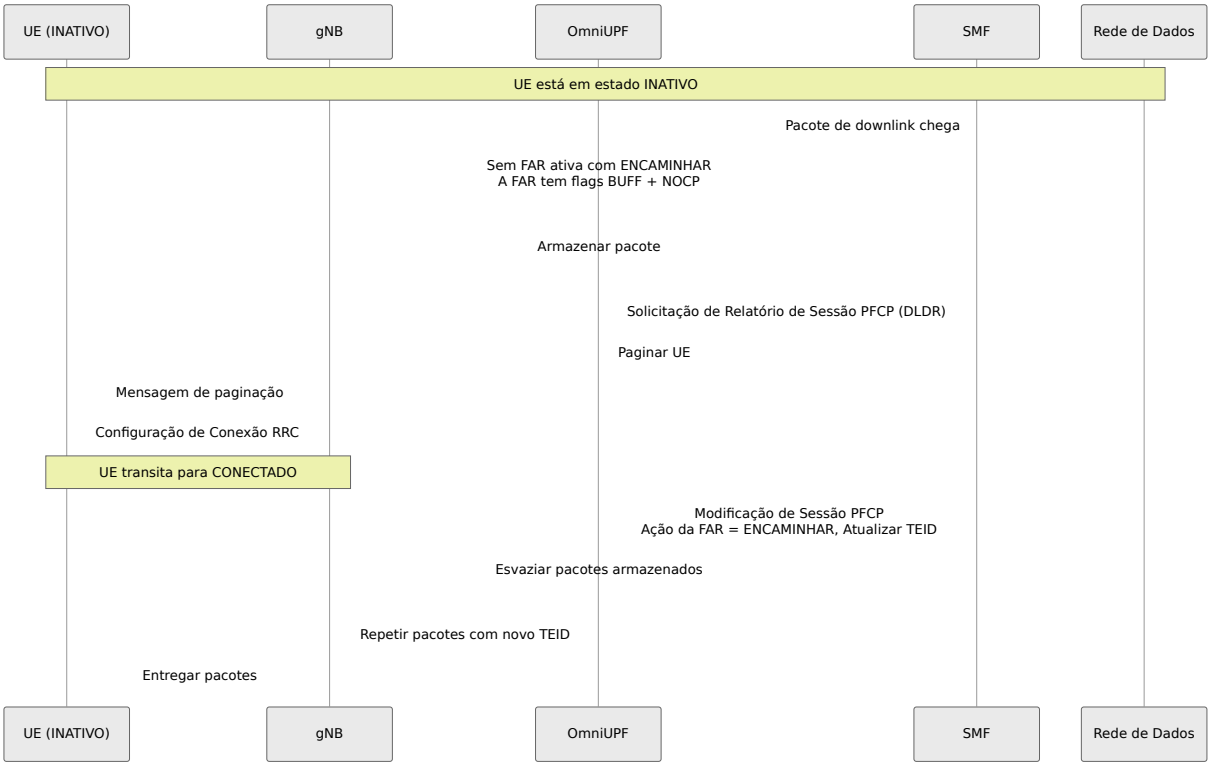
Transição de Inativo para Conectado: Quando pacotes de downlink chegam para um UE em estado INATIVO (não conectado ao gNB), o UPF:

1. Armazena os pacotes

2. Envia uma Notificação de Dados de Downlink (DLDR) para o SMF
3. O SMF pagina o UE para acordar e conectar
4. Uma vez conectado, o SMF atualiza a FAR com a ação de ENCAMINHAR
5. O UPF esvazia os pacotes armazenados para o UE

Transferência (Conectado para Conectado): Durante a transferência de gNB para gNB, o UPF temporariamente armazena pacotes para prevenir perda:

1. A conexão antiga do gNB é descartada
2. O SMF define a ação da FAR como BUFFER
3. Pacotes são enfileirados durante a troca de caminho
4. O UE conecta ao novo gNB
5. O SMF atualiza a FAR com um novo TEID e ação de ENCAMINHAR
6. O UPF esvazia os pacotes para o novo gNB



Capacidade e Limites de Buffer

Limites de Buffer Global:

- **Máximo Total de Pacotes**: 100.000 (configurável)
- **Máximo Total de Bytes**: Baseado na memória disponível

- **TTL (Tempo de Vida)**: 60 segundos (configurável)
- **Pacotes que excedem o TTL**: Descartados automaticamente

Limites por FAR:

- **Máximo de Pacotes por FAR**: 10.000 (configurável)
- **Propósito**: Prevenir que um único FAR esgote a capacidade do buffer

Comportamento de Overflow do Buffer:

- Quando o limite global ou por FAR é atingido, novos pacotes são descartados
- Métricas rastreiam descartes com `reason="global_limit"` ou `reason="far_limit"`
- Pacotes mais antigos NÃO são automaticamente removidos (descartes explícitos apenas na expiração do TTL)

Notificação de Dados de Downlink (DLDR)

Quando o UPF armazena um pacote para um UE INATIVO, ele envia uma Solicitação de Relatório de Sessão PFCP para o SMF:

Conteúdos do DLDR:

- **Tipo de Relatório**: Relatório de Dados de Downlink (DLDR)
- **ID do FAR**: O FAR que acionou a bufferização
- **Informações de Serviço de Dados de Downlink**: QFI opcional, Indicador de Política de Paginação

Ações do SMF no DLDR:

1. Paginar o UE via AMF → gNB
2. Aguardar o UE estabelecer a conexão RRC
3. Enviar Solicitação de Modificação de Sessão PFCP para atualizar a FAR
4. A ação da FAR muda de `BUFF+NOCP` para `FORW`
5. O UPF esvazia os pacotes armazenados

Métricas para DLDR:

- `upf_dldr_sent_total`: Total de DLDRs enviados
- `upf_dldr_send_errors`: DLDRs falhados
- `upf_buffer_notify_to_flush_duration_seconds`: Latência do DLDR até o esvaziamento

Veja Referência de Métricas para a lista completa.

Operações de Bufferização

Habilitar Bufferização (Definir flag BUFF):

- Ação da FAR `|= 0x04` (definir bit 2)
- Exemplo: `Ação: 2 (FORW)` → `Ação: 6 (FORW+BUFF)`
- Usado durante a preparação para transferência

Modo Apenas Buffer (BUFF sem FORW):

- Ação da FAR `= 0x04` (apenas BUFF)
- Pacotes são armazenados, mas NÃO encaminhados
- Usado para estado INATIVO do UE (pendente de paginação)

Desabilitar Bufferização (Limpar flag BUFF):

- Ação da FAR `&= ~0x04` (limpar bit 2)
- Exemplo: `Ação: 6 (FORW+BUFF)` → `Ação: 2 (FORW)`
- Pacotes armazenados permanecem até serem esvaziados ou limpos

Esvaziar Buffer:

- Repetir todos os pacotes armazenados usando as regras da FAR **atual**
- Pacotes são encaminhados com TEID/destino atualizado
- O buffer é esvaziado após o esvaziamento bem-sucedido
- A FAR deve ter a ação FORW definida

Limpar Buffer:

- Descartar todos os pacotes armazenados sem encaminhamento
- Usado quando a transferência falha ou a sessão é excluída

- Métricas rastreiam com `reason="cleared"`

Monitorando Pacotes Armazenados

Página de Buffers (Interface Web): Navegue até **Buffers** para visualizar:

- Total de pacotes armazenados
- Total de bytes armazenados
- Número de FARs com pacotes armazenados
- Contagens de pacotes por FAR
- Timestamp do pacote mais antigo
- Habilitar/Desabilitar bufferização por FAR
- Operações de esvaziamento ou limpeza

Indicadores Chave:

- **Pacotes > 10 segundos antigos**: Potencial atraso de paginação
- **Pacotes > 30 segundos antigos**: Provável falha de paginação, limpar buffer
- **Alta contagem de pacotes**: Verificar sessões travadas ou falhas de paginação

Métricas Prometheus:

- `upf_buffer_packets_current`: Pacotes armazenados atuais
- `upf_buffer_bytes_current`: Bytes armazenados atuais
- `upf_buffer_fars_active`: FARs com pacotes armazenados
- `upf_buffer_packets_dropped{reason}`: Contagens de pacotes descartados

Veja Referência de Métricas para métricas completas de buffer.

Cenários Comuns de Bufferização

Cenário 1: UE INATIVO Dados de Downlink

```
Estado Inicial:
- UE em modo INATIVO (sem conexão gNB)
- Ação da FAR: 0x04 (apenas BUFF)

Chegada de Dados:
1. DN envia pacote de downlink
2. UPF combina PDR, aplica FAR
3. FAR tem flag BUFF → pacote armazenado
4. UPF envia DLDR para SMF
5. SMF pagina UE
6. UE conecta ao gNB
7. SMF modifica FAR: Ação = 0x02 (FORW)
8. UPF esvazia pacotes armazenados com novo TEID
```

Cenário 2: Preparação para Transferência

```
Estado Inicial:
- UE conectado ao gNB-1 (TEID 1234)
- Ação da FAR: 0x02 (FORW)

Processo de Transferência:
1. SMF modifica FAR: Ação = 0x06 (FORW+BUFF)
2. Pacotes encaminhados para gNB-1 E armazenados
3. UE muda para gNB-2
4. SMF modifica FAR: TEID = 5678, Ação = 0x02 (FORW)
5. UPF esvazia pacotes armazenados para gNB-2 com novo TEID
6. Sem perda de pacotes durante a transferência
```

Cenário 3: Troca de Caminho

```
Estado Inicial:
- UE conectado, fluxo de dados ativo

Troca de Caminho:
1. SMF modifica FAR: Ação = 0x04 (apenas BUFF)
2. Todos os pacotes de entrada armazenados (não encaminhados)
3. Rede reconfigura caminho
4. SMF modifica FAR: Ação = 0x02 (FORW), novo destino
5. UPF esvazia todos os pacotes armazenados para o novo caminho
```

Criação de Cabeçalho Externo

Determina se a encapsulação GTP-U deve ser adicionada.

FAR de Uplink (N3 → N6):

- Criação de Cabeçalho Externo: Falso
- Ação: Remover GTP-U, encaminhar pacote IP nativo

FAR de Downlink (N6 → N3):

- Criação de Cabeçalho Externo: Verdadeira
- IP Remoto: endereço IP do gNB (por exemplo, 200.198.5.10)
- TEID: ID do túnel para tráfego do UE
- Ação: Adicionar cabeçalho GTP-U, encaminhar para gNB

Busca da FAR na Interface Web

A página de Gerenciamento de Regras fornece busca da FAR por ID:

Passos:

1. Navegue até Regras → aba FARs
2. Insira o ID da FAR no campo de busca
3. Clique em "Buscar" para visualizar os detalhes da FAR

Informações Exibidas:

- ID do FAR
- Ação (numérica + flags decodificadas)
- Status de bufferização (LIGADO/DESLIGADO)
- Criação de Cabeçalho Externo
- Endereço IP remoto (com representação inteira)
- TEID
- Marcação de Nível de Transporte

Regras de Aplicação de QoS (QER)

Propósito

As QERs aplicam parâmetros de Qualidade de Serviço aos fluxos de tráfego, incluindo limites de largura de banda e marcação de pacotes.

Estrutura da QER


Parâmetros da QER
QFI
Identificador de Fluxo
QoS
Estado do Portão UL
Aberto/Fechado
Estado do Portão DL
Aberto/Fechado
ID do QER
Identificador Único
MBR Uplink
Taxa Máxima de Bits
MBR Downlink
Taxa Máxima de Bits
GBR Uplink
Taxa Garantida de Bits
GBR Downlink
Taxa Garantida de Bits

Parâmetros de QoS

QFI (Identificador de Fluxo QoS):

- Identificador de 6 bits para fluxos QoS 5G
- Valores de 1-9 são padronizados (por exemplo, QFI 9 = portadora padrão)
- Usado para marcação de pacotes no 5GC

Estado do Portão:

- **Aberto (0)**: Tráfego permitido
- **Fechado (não zero)**: Tráfego bloqueado

Taxa Máxima de Bits (MBR):

- Largura de banda máxima permitida para o fluxo de tráfego
- Especificado em kbps
- **MBR = 0**: Sem limite de taxa (ilimitado)
- Tráfego que excede o MBR é descartado

Taxa Garantida de Bits (GBR):

- Largura de banda mínima garantida para o fluxo de tráfego
- Especificado em kbps
- **GBR = 0**: Melhor esforço (sem garantia)
- **GBR > 0**: Fluxo priorizado com largura de banda garantida

Tipos de Fluxos de QoS

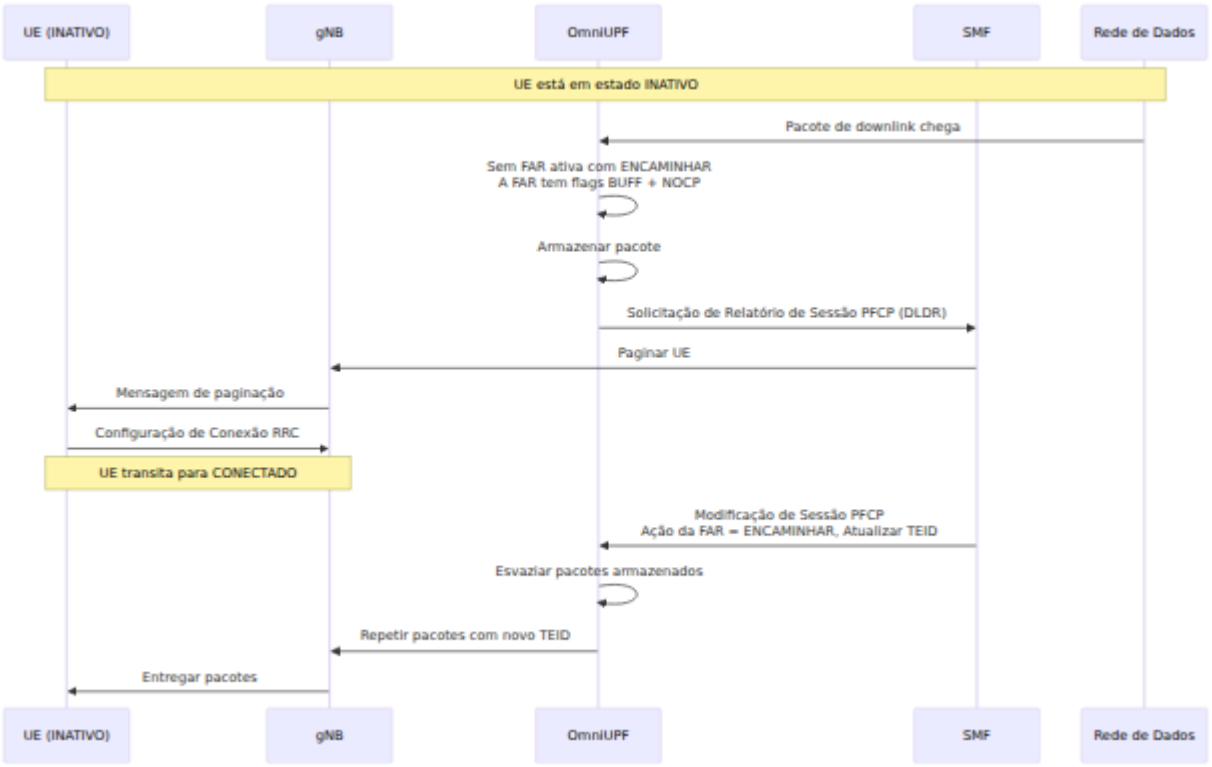
Fluxos de Melhor Esforço (GBR = 0):

```
ID do QER: 1
QFI: 9
MBR Uplink: 100000 kbps (100 Mbps)
MBR Downlink: 100000 kbps (100 Mbps)
GBR Uplink: 0 kbps
GBR Downlink: 0 kbps
```

Fluxos Garantidos (GBR > 0):

```
ID do QER: 2
QFI: 1
MBR Uplink: 10000 kbps (10 Mbps)
MBR Downlink: 10000 kbps (10 Mbps)
GBR Uplink: 5000 kbps (5 Mbps)
GBR Downlink: 5000 kbps (5 Mbps)
```

Algoritmo de Aplicação de QoS



Mecanismo de Aplicação de MBR

OmniUPF aplica limites de MBR (Taxa Máxima de Bits) usando um **limitador de taxa de janela deslizante** implementado no caminho de dados eBPF. Este algoritmo opera com precisão de nanossegundos diretamente na camada XDP, garantindo desempenho em linha sem trocas de contexto do kernel.

Como Funciona

Algoritmo: Limitação de Taxa de Janela Deslizante

Para cada pacote, o UPF realiza as seguintes verificações:

1. **Verificação do Estado do Portão**: Se o estado do portão for `FECHADO` (não zero), descartar o pacote imediatamente
2. **Verificação de MBR**: Se MBR = 0, ignorar a limitação de taxa (largura de banda ilimitada)
3. **Cálculo do Tempo de Transmissão**:

```
tx_time = (tamanho_do_pacote_bytes × 8) × (1.000.000.000
ns/sec) / MBR_kbps
```

4. **Verificação da Janela**: Se o tempo atual estiver dentro da janela deslizante de 5ms, descartar o pacote
5. **Avanço da Janela**: Se o pacote for permitido, avançar a janela por `tx_time`

Exemplo de Cálculo:

Suponha:

- MBR = 100.000 kbps (100 Mbps)
- Tamanho do pacote = 1500 bytes
- Tamanho da janela = 5.000.000 ns (5 ms)

```
Passo 1: Calcular o tempo de transmissão a 100 Mbps
tx_time = (1500 bytes × 8 bits/byte) × (1.000.000.000 ns/sec) /
100.000.000 bps
        = 12.000.000.000 / 100.000.000
        = 120 ns

Passo 2: Verificar se o pacote se encaixa na janela
tempo_atual = 1000000000 ns
início_da_janela = 999990000 ns
if (início_da_janela + tx_time > tempo_atual):
    DESCARTAR pacote (excederia o limite de taxa)

Passo 3: Se permitido, avançar a janela
início_da_janela = início_da_janela + 120 ns
PACOTE ACEITO
```

Comportamento da Janela Deslizante

Tamanho da Janela de 5ms:

- O algoritmo usa uma janela deslizante de 5 milissegundos
- A janela é redefinida automaticamente se ociosa por mais de 5ms
- Previne a fome de burst enquanto aplica a taxa média

Tratamento de Burst:

- Pequenos bursts são permitidos dentro da janela de 5ms
- Tráfego sustentado acima do MBR é limitado por taxa
- Mais preciso do que algoritmos simples de balde de token

Limitação de Taxa por Direção:

- MBR de uplink usa timestamp `qer->ul_start`
- MBR de downlink usa timestamp `qer->dl_start`
- Cada direção é limitada por taxa de forma independente

Pontos de Aplicação de Limitação de MBR

Uplink (N3 → N6):

1. Pacote chega na interface N3 (do gNB)
2. Busca PDR por TEID
3. Busca QER por ID do QER
4. Verificar `ul_gate_status` → descartar se fechado
5. Aplicar `limit_rate_sliding_window()` com `ul_maximum_bitrate`
6. Se aprovado, encaminhar para N6 e atualizar contadores do URR

Downlink (N6 → N3):

1. Pacote chega na interface N6 (da Rede de Dados)
2. Busca PDR por endereço IP do UE
3. Busca QER por ID do QER
4. Verificar `dl_gate_status` → descartar se fechado
5. Aplicar `limit_rate_sliding_window()` com `dl_maximum_bitrate`
6. Se aprovado, adicionar cabeçalho GTP-U e encaminhar para N3

Loopback N9 (SGWU ↔ PGWU):

- Tanto QERs de uplink quanto de downlink podem ser aplicados em cenários de loopback N9
- Cada QER é verificado independentemente nas fronteiras SGWU e PGWU

MBR vs. Throughput Observado

Por que o throughput observado pode diferir do MBR:

- **Sobrecarga de Protocolo**: Cabeçalhos GTP-U, UDP, IP adicionam ~50-60 bytes por pacote
- **Variação no Tamanho do Pacote**: Pacotes menores = mais sobrecarga, menor eficiência
- **Precisão da Limitação de Taxa**: A aplicação acontece por pacote, não por byte
- **Comportamento de Redefinição da Janela**: Períodos ociosos de 5ms permitem breves bursts acima do MBR

Exemplo:

```
MBR Configurado: 100 Mbps
Throughput Observado: ~95-98 Mbps (devido à sobrecarga GTP-
U/UDP/IP)
```

Como Verificar a Limitação de Taxa:

1. Verifique os contadores de volume do URR ao longo do tempo: `upf_urr_*_volume_bytes`
2. Calcule o throughput: `(volume_delta_bytes × 8) / time_delta_seconds / 1000` = kbps
3. Compare com o MBR configurado na QER

GBR (Taxa Garantida de Bits)

Importante: O OmniUPF **não** aplica atualmente os mínimos de GBR. GBR é armazenado na QER, mas não é usado para priorização de tráfego ou controle de admissão.

Comportamento do GBR:

- Valores de GBR são aceitos do SMF via PFCP
- GBR é armazenado no mapa QER e visível via API

- **Sem reserva de largura de banda** ou priorização de tráfego com base no GBR
- GBR serve como metadado para rastreamento do tipo de fluxo (melhor esforço vs. garantido)

Aprimoramento Futuro:

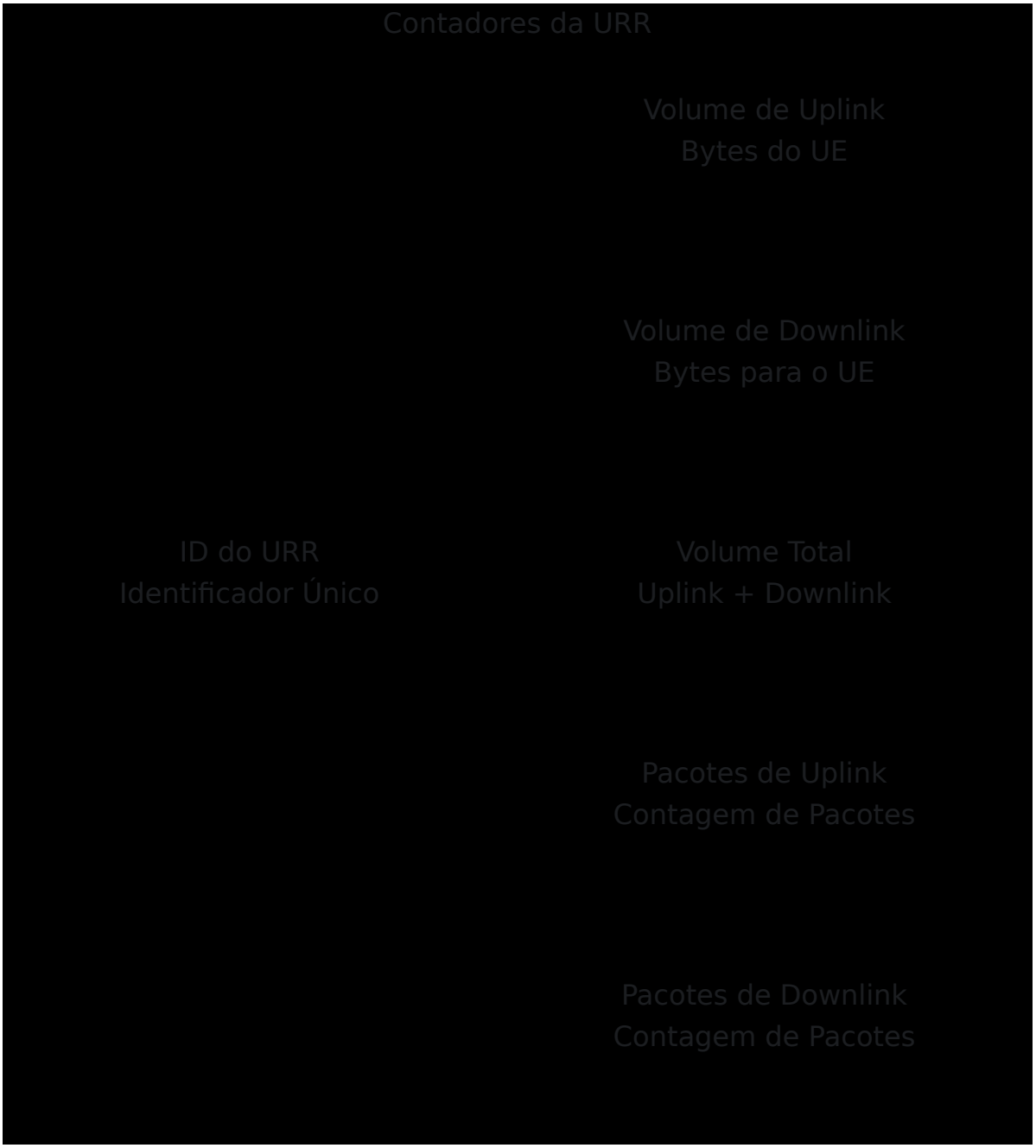
- A aplicação de GBR requer agendamento de tráfego ou enfileiramento ponderado
- Pode ser implementado usando capacidades de QoS eBPF em versões futuras

Regras de Relatório de Uso (URR)

Propósito

As URRs rastreiam volumes de dados para cobrança, análises e aplicação de políticas. Elas mantêm contadores de pacotes e bytes que são relatados ao SMF para registros de cobrança.

Estrutura da URR



Rastreamento de Volume

Volume de Uplink:

- Bytes transmitidos do UE para a Rede de Dados
- Medido após a desencapsulação GTP-U
- Inclui cabeçalho IP e payload

Volume de Downlink:

- Bytes transmitidos da Rede de Dados para o UE
- Medido antes da encapsulação GTP-U
- Inclui cabeçalho IP e payload

Volume Total:

- Soma dos volumes de uplink e downlink
- Usado para relatório de uso total

Gatilhos de Relatório de Uso

As URRs podem acionar relatórios com base em:

Limite de Volume:

- Relatar quando o volume excede o limite configurado
- Exemplo: Relatar a cada 1 GB de uso

Limite de Tempo:

- Relatar em intervalos periódicos
- Exemplo: Relatar a cada 5 minutos

Baseado em Eventos:

- Relatar na terminação da sessão
- Relatar na alteração de QoS
- Relatar na transferência

Formatação de Exibição de Volume

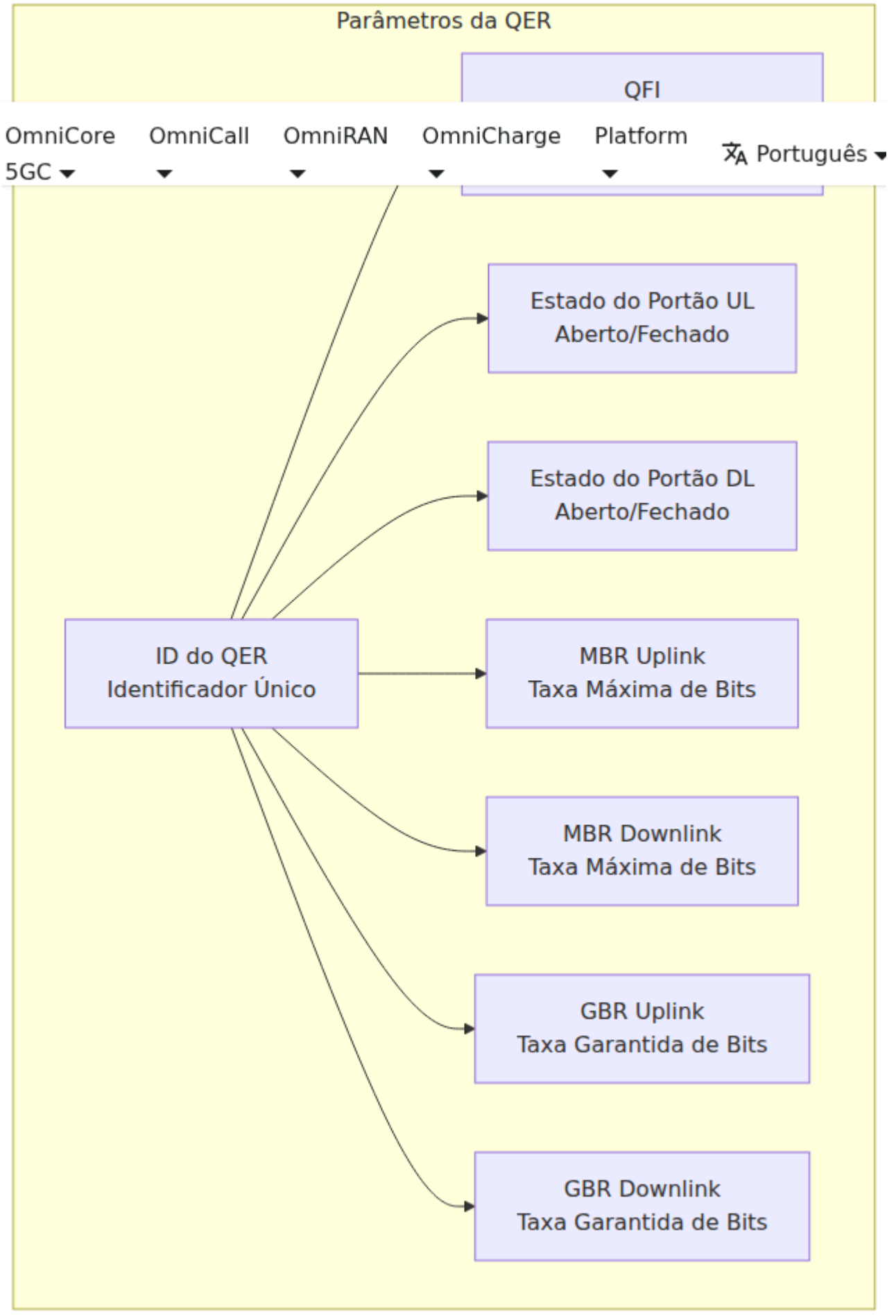
A interface Web formata automaticamente o volume em unidades legíveis:

Bytes	Exibição
0 - 1023	B (Bytes)
1024 - 1048575	KB (Kilobytes)
1048576 - 1073741823	MB (Megabytes)
1073741824 - 1099511627775	GB (Gigabytes)
1099511627776+	TB (Terabytes)

Exemplo:

```
ID do URR: 0
Volume de Uplink: 12.3 KB
Volume de Downlink: 9.0 KB
Volume Total: 21.3 KB
```

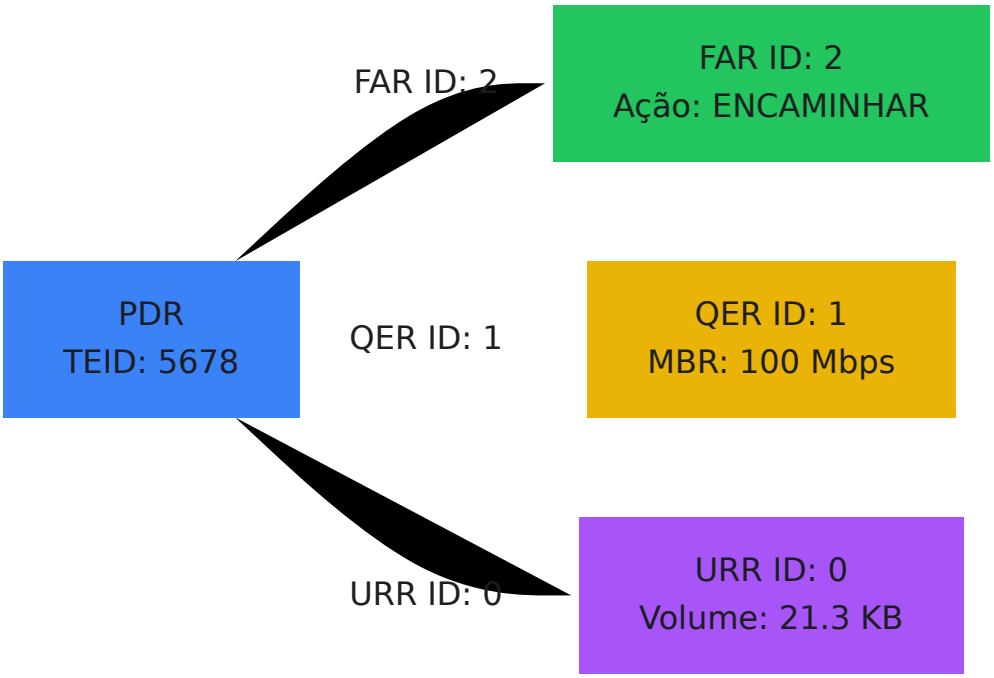
Fluxo de Relatório da URR


Parâmetros da QER
QFI
OmniCore 5GC
OmniCall
OmniRAN
OmniCharge
Platform
Português
Estado do Portão UL
Aberto/Fechado
Estado do Portão DL
Aberto/Fechado
ID do QER
Identificador Único
MBR Uplink
Taxa Máxima de Bits
MBR Downlink
Taxa Máxima de Bits
GBR Uplink
Taxa Garantida de Bits
GBR Downlink
Taxa Garantida de Bits

Relações entre Regras

Cadeia PDR → FAR → QER → URR

Cada PDR referencia uma FAR, que pode referenciar uma QER e uma ou mais URRs.



Exemplo de Configuração de Sessão

PDR de Uplink:

```
TEID: 5678
ID do FAR: 2
ID do QER: 1
IDs do URR: [0]
Remoção do Cabeçalho Externo: Falso
```

PDR de Downlink:

```
IP do UE: 10.45.0.1
ID do FAR: 1
ID do QER: 1
IDs do URR: [0]
Modo SDF: Sem SDF
```

FAR ID 1 (Downlink):

```
Ação: 2 (ENCAMINHAR)
Criação de Cabeçalho Externo: Verdadeira
IP Remoto: 200.198.5.10
TEID: 5678
```

FAR ID 2 (Uplink):

```
Ação: 2 (ENCAMINHAR)
Criação de Cabeçalho Externo: Falsa
```

QER ID 1:

```
QFI: 9
MBR Uplink: 100000 kbps
MBR Downlink: 100000 kbps
GBR Uplink: 0 kbps
GBR Downlink: 0 kbps
```

URR ID 0:

```
Volume de Uplink: 12.3 KB
Volume de Downlink: 9.0 KB
Volume Total: 21.3 KB
```

Operações Comuns

Visualizar Regras para uma Sessão

Via Página de Sessões:

1. Navegue até Sessões
2. Encontre o UE pelo IP ou TEID
3. Clique em "Expandir" para visualizar todas as regras (PDR, FAR, QER, URR)

Via Página de Regras:

1. Navegue até Regras
2. Use a busca por TEID (uplink) ou IP do UE (downlink) na aba PDR
3. Anote o ID do FAR, ID do QER, IDs do URR
4. Mude para as abas FAR/QER/URR para visualizar as regras referenciadas

Habilitar/Desabilitar Bufferização

Cenário: Durante a transferência, bufferizar pacotes para prevenir perda

Passos:

1. Navegue até Regras → FARs
2. Insira o ID do FAR no campo de busca
3. Clique em "Buscar"
4. Se a bufferização estiver DESLIGADA, clique em "Habilitar Bufferização"
5. Verifique se o bit 2 da ação da FAR está definido (o valor da ação aumenta em 4)

Alternativa via Página de Buffers:

1. Navegue até Buffers
2. Visualize FARs com bufferização habilitada
3. Clique em "Desabilitar Buffer" quando a transferência for concluída

Monitorar Conformidade com QoS

Verifique se o tráfego está sendo limitado por taxa:

1. Navegue até Regras → QERs
2. Encontre o ID do QER associado à sessão do UE
3. Anote os valores de MBR Uplink e MBR Downlink
4. Compare com a taxa de crescimento do volume do URR

Calcule o Throughput Médio:

```
Throughput (kbps) = (Delta de Volume em bytes × 8) / (Delta de
Tempo em segundos × 1000)
```

Se o throughput se aproximar do MBR, o tráfego está sendo limitado por taxa.

Rastrear Uso de Dados

Monitore os volumes do URR:

1. Navegue até Regras → URRs
2. Visualize os volumes de uplink, downlink e total
3. Classifique por Volume Total para encontrar os maiores usuários
4. Atualize periodicamente para observar o crescimento do volume

Casos de Uso:

- Verificar integração de cobrança
- Detectar uso anômalo de dados
- Planejar capacidade com base em padrões de tráfego

Solução de Problemas

Sem Fluxo de Tráfego

Verifique a PDR:

1. Verifique se a PDR existe para TEID (uplink) ou IP do UE (downlink)
2. Confirme se o ID do FAR é válido
3. Verifique se os filtros SDF não estão bloqueando o tráfego

Verifique a FAR:

1. Verifique se a ação da FAR é ENCAMINHAR (não DESCARTAR ou apenas BUFFER)
2. Confirme se a criação do cabeçalho externo corresponde à direção
3. Verifique se o IP Remoto e o TEID estão corretos para downlink

Verifique a QER:

1. Verifique se o Estado do Portão está Aberto (0)
2. Verifique se o MBR não é muito restritivo

Pacotes Sendo Descartados

Verifique a Limitação de Taxa da QER:

1. Navegue até Regras → QERs
2. Verifique se o MBR é adequado para a carga de tráfego
3. Verifique se o crescimento do volume do URR corresponde ao throughput esperado

Verifique a Ação da FAR:

1. Navegue até Regras → FARs
2. Verifique se a ação é ENCAMINHAR, não DESCARTAR
3. Verifique se a bufferização não está presa em modo apenas BUFFER

Problemas de Bufferização

Pacotes presos no buffer:

1. Navegue até a página de Buffers
2. Verifique o timestamp do pacote mais antigo
3. Se > 30 segundos, a transferência pode ter falhado

4. Esvazie ou limpe manualmente o buffer
5. Desabilite a bufferização na FAR

Overflow do buffer:

1. Verifique o total de pacotes vs. Máximo Total (padrão 100.000)
2. Verifique pacotes por FAR vs. Máximo por FAR (padrão 10.000)
3. Limpe buffers se estiverem cheios
4. Investigue por que a bufferização não foi desabilitada

URR Não Rastreando

Contadores de volume em zero:

1. Verifique se a PDR referencia o ID do URR
2. Verifique se os pacotes estão combinando com a PDR
3. Verifique se a FAR está encaminhando (não descartando) pacotes
4. Confirme se o ID do URR existe no mapa URR

Volume não relatando ao SMF:

1. Verifique a configuração do Relatório de Sessão PFCP
2. Verifique os gatilhos de relatório do URR (limites de volume/tempo)
3. Revise os logs para mensagens de Relatório de Sessão PFCP

Documentação Relacionada

- **Guia de Operações do UPF** - Visão geral da arquitetura e componentes do OmniUPF
- **Guia de Operações da Interface Web** - Uso do painel de controle para visualização de regras
- **Guia de Monitoramento** - Estatísticas e monitoramento de capacidade
- **Guia de Solução de Problemas** - Problemas comuns e diagnósticos

Guia de Solução de Problemas do OmniUPF

Índice

Visão Geral

Este guia fornece procedimentos sistemáticos de solução de problemas para problemas comuns do OmniUPF. Cada seção inclui sintomas, etapas de diagnóstico, causas raiz e procedimentos de resolução.

Lista de Verificação Rápida de Diagnóstico

Antes de uma soluç��o de problemas mais profunda, verifique:

```
# 1. Verifique se o OmniUPF está em execução
systemctl status omniupf

# 2. Verifique a associação PFCP
curl http://localhost:8080/api/v1/upf_pipeline

# 3. Verifique se os mapas eBPF estão carregados
ls /sys/fs/bpf/

# 4. Verifique se o programa XDP está anexado
ip link show | grep -i xdp

# 5. Verifique os logs do kernel em busca de erros
dmesg | tail -50
journalctl -u omniupf -n 50
```

Ferramentas de Diagnóstico

API REST do OmniUPF

Verifique o status do UPF:

```
curl http://localhost:8080/api/v1/upf_status
```

Verifique as associações PFCP:

```
curl http://localhost:8080/api/v1/upf_pipeline
```

Verifique a contagem de sessões:

```
curl http://localhost:8080/api/v1/sessions | jq 'length'
```

Verifique a capacidade do mapa eBPF:

```
curl http://localhost:8080/api/v1/map_info
```

Verifique as estatísticas de pacotes:

```
curl http://localhost:8080/api/v1/packet_stats
```

Verifique as estatísticas de XDP:

```
curl http://localhost:8080/api/v1/xdp_stats
```

Inspeção do Mapa eBPF

Liste todos os mapas eBPF:

```
ls -lh /sys/fs/bpf/
bpftool map list
```

Mostre os detalhes do mapa:

```
bpftool map show
bpftool map dump name pdr_map_downlin
```

Conte as entradas no mapa:

```
bpftool map dump name far_map | grep -c "key:"
```

Inspeção do Programa XDP

Verifique se o programa XDP está anexado:

```
ip link show eth0 | grep xdp
```

Liste todos os programas XDP:

```
bpftool net list
```

Mostre os detalhes do programa XDP:

```
bpftool prog show
```

Despeje as estatísticas do XDP:

```
bpftool prog dump xlated name xdp_upf_func
```

Depuração de Rede

Capture o tráfego PFCP na N4 (plano de controle):

```
# PFCP não é processado pelo XDP, tcpdump funciona normalmente
tcpdump -i eth0 -n udp port 8805 -w /tmp/pfcp_traffic.pcap
```

Capture o tráfego GTP-U na N3 (requer captura fora de banda):

```
# AVISO: O tcpdump padrão no host UPF NÃO PODE capturar pacotes
processados pelo XDP!
# O XDP processa GTP-U antes que a pilha de rede do kernel veja os
pacotes.

# Use captura fora de banda em vez disso:
# 1. TAP de rede entre gNB e UPF
# 2. Espelhamento de porta do switch/SPAN para copiar o tráfego N3
# 3. Espelhamento de porta do switch virtual para VM de analisador

# No host de análise/monitoramento (NÃO no UPF):
# tcpdump -i <mirror_interface> -n udp port 2152 -w
/tmp/n3_capture.pcap

# Ou use a API de estatísticas para contagens de pacotes:
curl http://localhost:8080/api/v1/packet_stats
curl http://localhost:8080/api/v1/n3n6_stats
```

Monitore os contadores de pacotes:

```
watch -n 1 'ip -s link show eth0'
```

Verifique a tabela de roteamento:

```
ip route show
ip route get 10.45.0.100  # Verifique a rota para o IP do UE
```

Verifique a tabela ARP:

```
ip neigh show
```

Problemas de Instalação

Problema: "sistema de arquivos eBPF não montado"

Sintomas:

```
ERRO[0000] falha ao carregar objetos eBPF: monte o sistema de
arquivos bpf em /sys/fs/bpf
```

Causa: sistema de arquivos eBPF não montado

Resolução:

```
# Monte o sistema de arquivos eBPF
sudo mount bpffs /sys/fs/bpf -t bpf

# Faça persistente (adicione ao /etc/fstab)
echo "bpffs /sys/fs/bpf bpf defaults 0 0" | sudo tee -a /etc/fstab

# Verifique o montado
mount | grep bpf
```

Problema: Versão do kernel muito antiga

Sintomas:

```
ERRO[0000] versão do kernel 5.4.0 é muito antiga, o mínimo
requerido é 5.15.0
```

Causa: versão do kernel Linux abaixo do requisito mínimo

Resolução:

```
# Verifique a versão do kernel
uname -r

# Atualize o kernel (Ubuntu/Debian)
sudo apt update
sudo apt install linux-generic-hwe-22.04
sudo reboot

# Verifique o novo kernel
uname -r  # Deve ser >= 5.15.0
```

Problema: Dependência libbpf ausente

Sintomas:

```
erro ao carregar bibliotecas compartilhadas: libbpf.so.0: não é
possível abrir o arquivo de objeto compartilhado
```

Causa: biblioteca libbpf não instalada

Resolução:

```
# Instale libbpf (Ubuntu/Debian)
sudo apt update
sudo apt install libbpf-dev

# Verifique a instalação
ldconfig -p | grep libbpf
```

Problemas de Configuração

Problema: Arquivo de configuração inválido

Sintomas:

```
ERRO[0000] não foi possível ler o arquivo de configuração: erros
de deserialização
```

Causa: erro de sintaxe YAML no arquivo de configuração

Resolução:

```
# Valide a sintaxe YAML
cat config.yml | python3 -c "import yaml, sys;
yaml.safe_load(sys.stdin)"

# Problemas comuns:
# - Indentação incorreta (use espaços, não tabs)
# - Dois pontos ausentes após chaves
# - Strings não entre aspas com caracteres especiais
# - Itens de lista sem hífens

# Exemplo de YAML correto:
cat > config.yml <<EOF
interface_name: [eth0]
xdp_attach_mode: generic
api_address: :8080
pfcp_address: :8805
EOF
```

Problema: Nome da interface não encontrado

Sintomas:

```
ERRO[0000] interface eth0 não encontrada
```

Causa: interface configurada não existe

Resolução:

```
# Liste todas as interfaces de rede
ip link show

# Verifique o status da interface
ip addr show eth0

# Se a interface tiver um nome diferente, atualize config.yml:
interface_name: [ens1f0]  # Use o nome real da interface

# Para VMs, verifique o esquema de nomenclatura da interface
ls /sys/class/net/
```

Problema: Porta já em uso

Sintomas:

```
ERRO[0000] falha ao iniciar o servidor API: endereço já em uso
```

Causa: Porta 8080, 8805 ou 9090 já vinculada por outro processo

Resolução:

```
# Encontre o processo usando a porta
sudo lsof -i :8080
sudo netstat -tulpn | grep :8080

# Mate o processo conflitante
sudo kill <PID>

# Ou altere a porta do OmniUPF na configuração
api_address: :8081
pfcp_address: :8806
metrics_address: :9091
```

Problema: ID do nó PFCP inválido

Sintomas:

```
ERRO[0000] id do nó pfcp inválido: deve ser um endereço IPv4
válido
```

Causa: ID do nó PFCP não é um endereço IPv4 válido

Resolução:

```
# Correto: Use endereço IP (não nome de host)
pfcp_node_id: 10.100.50.241

# Incorreto:
# pfcp_node_id: localhost
# pfcp_node_id: upf.example.com
```

Problemas de Associação PFCP

Problema: Nenhuma associação PFCP estabelecida

Sintomas:

- A interface da Web mostra "Sem associações"
- Logs do SMF mostram "Falha na configuração da associação PFCP"

Diagnóstico:

```
# 1. Verifique se o servidor PFCP está escutando
sudo netstat -ulpn | grep 8805

# 2. Verifique as regras do firewall
sudo iptables -L -n | grep 8805
sudo ufw status

# 3. Capture o tráfego PFCP
tcpdump -i any -n udp port 8805 -vv

# 4. Verifique as associações PFCP via API
curl http://localhost:8080/api/v1/upf_pipeline
```

Causas Comuns e Resoluções:

Firewall bloqueando PFCP

Resolução:

```
# Permita o tráfego PFCP (UDP 8805)
sudo ufw allow 8805/udp
sudo iptables -A INPUT -p udp --dport 8805 -j ACCEPT
```

ID do nó PFCP errado

Resolução:

```
# Defina o ID do nó PFCP para o IP correto da interface N4
pfcp_node_id: 10.100.50.241  # Deve corresponder ao IP na rede N4
```

Rede inacessível para o SMF

Resolução:

```
# Teste a conectividade com o SMF
ping <SMF_IP>

# Verifique o roteamento para o SMF
ip route get <SMF_IP>

# Adicione rota se estiver ausente
sudo ip route add <SMF_NETWORK>/24 via <GATEWAY>
```

SMF configurado com IP do UPF errado

Resolução:

- Verifique a configuração do SMF para o endereço do UPF
- Certifique-se de que o SMF tem o IP `pfcp_node_id` do UPF configurado
- Verifique se o SMF pode rotear para a rede N4 do UPF

Problema: Falhas de heartbeat PFCP

Sintomas:

```
WARN[0030] tempo limite de heartbeat PFCP para associação
10.100.50.10
```

Diagnóstico:

```
# Verifique as estatísticas PFCP
curl http://localhost:8080/api/v1/upf_pipeline | jq
'.associations[] | {remote_id, uplink_teid_count}'

# Monitore os logs de heartbeat
journalctl -u omniupf -f | grep heartbeat
```

Causas e Resoluções:

Perda de pacotes na rede

Resolução:

```
# Verifique a perda de pacotes para o SMF
ping -c 100 <SMF_IP> | grep loss

# Se a perda for alta, investigue a rede:
# - Verifique o status do link
# - Verifique a saúde do switch/roteador
# - Verifique se há congestionamento
```

Intervalo de heartbeat muito agressivo

Resolução:

```
# Aumente o intervalo de heartbeat
heartbeat_interval: 30  # Aumente de 5 para 30 segundos
heartbeat_retries: 5    # Aumente as tentativas
heartbeat_timeout: 10   # Aumente o tempo limite
```

Problemas de Processamento de Pacotes

Problema: Nenhum pacote fluindo (contadores RX/TX em 0)

Sintomas:

- A página de estatísticas mostra 0 pacotes RX/TX
- UE não consegue estabelecer sessão de dados

Diagnóstico:

```
# 1. Verifique se o programa XDP está anexado
ip link show eth0 | grep xdp

# 2. Verifique se a interface está ATIVA
ip link show eth0

# 3. Verifique as estatísticas de pacotes (ciente do XDP)
# Nota: tcpdump não pode ver pacotes GTP-U processados pelo XDP
curl http://localhost:8080/api/v1/packet_stats
```

Resoluções:

Programa XDP não anexado

Resolução:

```
# Reinicie o OmniUPF para re-anexar o XDP
sudo systemctl restart omniupf

# Verifique a anexação
ip link show eth0 | grep xdp
bpftool net list
```

Interface inativa ou sem link

Resolução:

```
# Ative a interface
sudo ip link set eth0 up

# Verifique o status do link
ethtool eth0 | grep "Link detected"

# Se o link estiver inativo, verifique a conexão física ou a
configuração de rede da VM
```

Interface configurada incorretamente

Resolução:

```
# Atualize config.yml com a interface correta
interface_name: [ens1f0]  # Use o nome real da interface do 'ip
link show'
```

Problema: Pacotes recebidos, mas não encaminhados (alta taxa de perda)

Sintomas:

- Contadores RX aumentando, mas contadores TX não
- Taxa de perda > 1%

Diagnóstico:

```
# Verifique as estatísticas de perda
curl http://localhost:8080/api/v1/xdp_stats | jq '.drop'

# Verifique as estatísticas de roteamento
curl http://localhost:8080/api/v1/packet_stats | jq '.route_stats'

# Monitore as perdas de pacotes
watch -n 1 'curl -s http://localhost:8080/api/v1/packet_stats | jq
".total_rx, .total_tx, .total_drop"'
```

Causas Comuns:

Nenhuma correspondência PDR (TEID desconhecido ou IP do UE)

Resolução:

```
# Verifique se as sessões existem
curl http://localhost:8080/api/v1/sessions

# Se não houver sessões, verifique:
# - A associação PFCP está estabelecida
# - O SMF criou sessões
# - O estabelecimento da sessão foi bem-sucedido

# Verifique as entradas do mapa PDR
bpftool map dump name pdr_map_teid_ip | grep -c key
bpftool map dump name pdr_map_downlin | grep -c key
```

Falhas de roteamento

Resolução:

```
# Verifique falhas de consulta FIB
curl http://localhost:8080/api/v1/packet_stats | jq '.route_stats'

# Teste o roteamento para o IP do UE
ip route get 10.45.0.100

# Adicione a rota ausente
sudo ip route add 10.45.0.0/16 dev eth1  # Roteie o pool do UE
para N6
```

Limitação de taxa QER

Sintomas:

- Throughput menor que o esperado
- Tráfego limitado a uma taxa específica
- Contadores de volume URR mostram comportamento de platô
- Contadores de perda do XDP aumentando durante picos de tráfego

Diagnóstico:

1. **Verifique o MBR configurado para a sessão**:

```
# Encontre o ID do QER da sessão
curl http://localhost:8080/api/v1/pfcp_sessions | jq '.data[] |
select(.ue_ip == "10.45.0.1")'

# Procure a configuração do QER
curl http://localhost:8080/api/v1/qer_map | jq '.data[] |
select(.qer_id == 1)'
```

2. **Verifique o status do portão**:

```
# O status do portão deve ser 0 (ABERTO) para uplink e downlink
curl http://localhost:8080/api/v1/qer_map | jq '.data[] |
{qer_id, ul_gate: .ul_gate_status, dl_gate: .dl_gate_status}'
```

3. **Calcule o throughput real a partir do URR**:

```
# Consulte os contadores de volume URR em dois pontos no tempo
curl http://localhost:8080/api/v1/urr_map | jq '.data[] |
select(.urr_id == 0)'

# Calcule o throughput (manual):
# throughput_kbps = (volume_delta_bytes × 8) /
time_delta_seconds / 1000
```

4. **Compare MBR vs. throughput real**:
    - Throughput esperado ≈ 95-98% do MBR (devido à sobrecarga do protocolo)
    - Se o throughput estiver significativamente abaixo do MBR, verifique outros gargalos
    - Se o throughput corresponder exatamente ao MBR, a limitação de taxa está funcionando como esperado

Resolução:

- **Se o MBR for muito baixo**: Solicite ao SMF que atualize o QER com um MBR mais alto via Modificação de Sessão PFCP

- **Se o portão estiver fechado**: Investigue por que o SMF fechou o portão (política, cota ou erro)
- **Se a limitação de taxa for inesperada**: Verifique a configuração de política do SMF e o perfil QoS

Entendendo a Aplicação do MBR:

O OmniUPF usa um algoritmo de janela deslizante para aplicar limites de MBR com precisão em nanossegundos no caminho de dados eBPF. Veja o Guia de Gerenciamento de Regras - Mecanismo de Aplicação de MBR para uma explicação detalhada sobre:

- Como o tamanho do pacote e a taxa determinam decisões de perda
- Por que o throughput observado difere do MBR configurado
- Limitação de taxa por direção (uplink/downlink)
- Comportamento da janela deslizante de 5ms

Cenários Comuns:

- **Chamadas VoIP caindo**: Verifique se o MBR é suficiente para a taxa de bits do codec (G.711 = ~80 kbps)
- **Bufferização de streaming de vídeo**: Certifique-se de que o MBR > taxa de bits do vídeo + sobrecarga (1080p = ~5-10 Mbps)
- **Tráfego de pico**: Pequenos picos permitidos dentro da janela de 5ms, taxa de tráfego sustentada limitada

---

Problema: Tráfego unidirecional (uplink funciona, downlink não)

Sintomas:

- Pacotes RX N3, mas nenhum pacote TX N3 (problema de downlink)
- Pacotes RX N6, mas nenhum pacote TX N6 (problema de uplink)

Diagnóstico:

```
# Verifique as estatísticas da interface N3/N6 (método ciente do
XDP)
curl http://localhost:8080/api/v1/n3n6_stats
curl http://localhost:8080/api/v1/packet_stats

# Nota: O tcpdump padrão não pode capturar tráfego GTP-U
processado pelo XDP
# Use a API de estatísticas ou xdpdump para análise de tráfego
# Veja a seção "Captura de Pacotes com XDP" para detalhes
```

Falha de Uplink (RX N3, sem TX N6):

Causa: Nenhuma ação FAR ou problema de roteamento para N6

Resolução:

```
# Verifique se o FAR tem ação FORWARD
curl http://localhost:8080/api/v1/sessions | jq '.[].fars[] |
select(.applied_action == 2)'

# Verifique se a rota N6 existe
ip route get 8.8.8.8  # Teste a rota para a internet

# Adicione a rota padrão se estiver ausente
sudo ip route add default via <N6_GATEWAY> dev eth1
```

Falha de Downlink (RX N6, sem TX N3):

Causa: Nenhuma PDR de downlink ou encapsulamento GTP ausente

Resolução:

```
# Verifique se a PDR de downlink existe para o IP do UE
curl http://localhost:8080/api/v1/sessions | jq '.[].pdrs[] |
select(.pdi.ue_ip_address)'

# Verifique se o FAR tem CRIAÇÃO_DE_CABEÇALHO_EXTERNO
curl http://localhost:8080/api/v1/sessions | jq '.[].fars[] |
.outer_header_creation'

# Verifique a acessibilidade do gNB
ping <GNB_N3_IP>
```

Problemas de XDP e eBPF

Para configuração detalhada de XDP, seleção de modo e solução de problemas, veja o Guia de Modos XDP.

Problema: Programa XDP falhou ao carregar

Sintomas:

```
ERRO[0000] falha ao carregar o programa XDP: argumento inválido
```

Diagnóstico:

```
# Verifique o suporte XDP do kernel
grep XDP /boot/config-$(uname -r)

# Deve mostrar:
# CONFIG_XDP_SOCKETS=y
# CONFIG_BPF=y
# CONFIG_BPF_SYSCALL=y

# Verifique dmesg para erro detalhado
dmesg | grep -i bpf
```

Causas e Resoluções:

Kernel sem suporte a XDP

Resolução:

```
# Recompile o kernel com suporte a XDP ou atualize para um kernel
mais novo
# Ubuntu 22.04+ tem XDP habilitado por padrão
sudo apt install linux-generic-hwe-22.04
sudo reboot
```

Falha de verificação do programa XDP

Resolução:

```
# Verifique os logs do OmniUPF em busca de erros de verificador
journalctl -u omniupf | grep verifier

# Problemas comuns:
# - A complexidade do eBPF excede os limites (aumente os limites
do kernel)
# - Acesso à memória inválido (bug no código eBPF)

# Aumente o nível de log do verificador eBPF para depuração
sudo sysctl kernel.bpf_stats_enabled=1
```

Problema: Contagem de abortos do XDP aumentando

Sintomas:

- Estatísticas do XDP mostram abortos > 0
- Aumento das perdas de pacotes

Diagnóstico:

```
# Verifique a contagem de abortos do XDP
curl http://localhost:8080/api/v1/xdp_stats | jq '.aborted'

# Monitore as estatísticas do XDP
watch -n 1 'curl -s http://localhost:8080/api/v1/xdp_stats'
```

Causa: programa eBPF encontrou erro em tempo de execução

Resolução:

```
# Verifique os logs do kernel em busca de erros eBPF
dmesg | grep -i bpf

# Reinicie o OmniUPF para recarregar o programa eBPF
sudo systemctl restart omniupf

# Se o problema persistir, ative o log eBPF (requer recompilação):
# Compile o OmniUPF com BPF_ENABLE_LOG=1
```

Problema: Mapa eBPF cheio (capacidade esgotada)

Sintomas:

- Estabelecimento de sessão falha
- Capacidade do mapa em 100%

Diagnóstico:

```
# Verifique a capacidade do mapa
curl http://localhost:8080/api/v1/map_info | jq '.[] | {map_name,
capacity, used, usage_percent}'

# Identifique mapas cheios
curl http://localhost:8080/api/v1/map_info | jq '.[] |
select(.usage_percent > 90)'
```

Mitigação Imediata:

```
# 1. Identifique sessões obsoletas
curl http://localhost:8080/api/v1/sessions | jq '.[] | {seid,
uplink_teid, created_at}'

# 2. Solicite ao SMF que exclua sessões antigas
# (via interface de administração do SMF ou API)

# 3. Monitore a diminuição do uso do mapa
watch -n 5 'curl -s http://localhost:8080/api/v1/map_info | jq ".
[] | select(.map_name==\"pdr_map_downlin\") | .usage_percent"'
```

Resolução a Longo Prazo:

```
# Aumente a capacidade do mapa em config.yml
max_sessions: 200000  # Aumente de 100000

# Ou defina tamanhos individuais de mapa
pdr_map_size: 400000
far_map_size: 400000
qer_map_size: 200000
```

Importante: Alterar tamanhos de mapa requer reinício do OmniUPF e **limpa todas as sessões existentes**.

Problemas de Desempenho

Problema: Throughput baixo (abaixo do esperado)

Sintomas:

- Throughput < 1 Gbps apesar de NIC capaz
- Alta utilização da CPU

Diagnóstico:

```
# Verifique a taxa de pacotes
curl http://localhost:8080/api/v1/packet_stats | jq '.total_rx,
.total_tx'

# Verifique as estatísticas da NIC
ethtool -S eth0 | grep -i drop

# Verifique o modo XDP
ip link show eth0 | grep xdp
```

Resoluções:

Usando modo XDP genérico

Resolução:

```
# Mude para o modo nativo para melhor desempenho
xdp_attach_mode: native  # Requer NIC/drivers compatíveis com XDP
```

Gargalo de núcleo único

Resolução:

```
# Ative RSS (Receive Side Scaling) na NIC
ethtool -L eth0 combined 4  # Use 4 filas RX/TX

# Verifique se o RSS está ativado
ethtool -l eth0

# Prenda interrupções a CPUs específicas
# Veja /proc/interrupts e use irqbalance ou afinidade manual
```

Buffer bloat

Resolução:

```yaml
# Reduza os limites de buffer para diminuir a latência
buffer_max_packets: 5000
buffer_packet_ttl: 15
```

Problema: Latência alta

Sintomas:

- Latência de ping > 50ms
- Degradação da experiência do usuário

Diagnóstico:

```
# Teste a latência para o UE
ping -c 100 <UE_IP> | grep avg

# Verifique pacotes bufferizados
curl http://localhost:8080/api/v1/upf_buffer_info | jq
'.total_packets_buffered'

# Verifique o desempenho do cache de roteamento
curl http://localhost:8080/api/v1/packet_stats | jq '.route_stats'
```

Resoluções:

Pacotes sendo bufferizados excessivamente

Resolução:

```
# Verifique por que os pacotes estão bufferizados
curl http://localhost:8080/api/v1/upf_buffer_info | jq '.buffers[]
| {far_id, packet_count, direction}'

# Limpe os buffers se estiverem travados
# (reinicie o OmniUPF ou acione a modificação da sessão PFCP para
aplicar FAR)
```

Latência de consulta FIB

Resolução:

```
# Certifique-se de que o cache de roteamento está habilitado
(opção de tempo de compilação)
# Compile com BPF_ENABLE_ROUTE_CACHE=1

# Otimize a tabela de roteamento
# Use menos rotas, mais específicas em vez de muitas pequenas
rotas
```

Problema: Perda de pacotes sob carga

Sintomas:

- Taxa de perda aumenta com o tráfego
- Erros RX na NIC

Diagnóstico:

```
# Verifique erros na NIC
ethtool -S eth0 | grep -E "drop|error|miss"

# Verifique o tamanho do buffer de anel
ethtool -g eth0

# Monitore perdas em tempo real
watch -n 1 'ethtool -S eth0 | grep -E "drop|miss"'
```

Resolução:

```
# Aumente o tamanho do buffer de anel RX
ethtool -G eth0 rx 4096

# Aumente o tamanho do buffer de anel TX
ethtool -G eth0 tx 4096

# Verifique as novas configurações
ethtool -g eth0
```

Problemas Específicos de Hypervisor

Para instruções passo a passo de configuração de hypervisor, veja o Guia de Modos XDP.

Proxmox: XDP não funciona na VM

Sintomas:

- Não é possível anexar o programa XDP no modo nativo
- Apenas o modo genérico funciona

Causa: VM usando rede em ponte sem SR-IOV

Resolução:

Opção 1: Use o modo genérico (mais simples)

```
xdp_attach_mode: generic
```

Opção 2: Configure o passthrough SR-IOV

```
# No host Proxmox:
# 1. Habilite IOMMU
nano /etc/default/grub
# Adicione: intel_iommu=on iommu=pt
update-grub
reboot

# 2. Crie VFs
echo 4 > /sys/class/net/eth0/device/sriov_numvfs

# 3. Atribua VF à VM na interface do Proxmox
# Hardware → Adicionar → Dispositivo PCI → Selecione VF

# Na VM:
interface_name: [ens1f0]  # VF SR-IOV
xdp_attach_mode: native
```

VMware: Modo promíscuo necessário

Sintomas:

- Pacotes não recebidos pelo OmniUPF

Causa: vSwitch bloqueando endereços MAC não correspondentes

Resolução:

```
# Habilite o modo promíscuo no vSwitch (no vSphere Client):
# 1. Selecione vSwitch → Editar Configurações
# 2. Segurança → Modo Promíscuo: Aceitar
# 3. Segurança → Mudanças de Endereço MAC: Aceitar
# 4. Segurança → Transmissões Forjadas: Aceitar
```

VirtualBox: Desempenho muito baixo

Sintomas:

- Throughput < 100 Mbps

Causa: VirtualBox não suporta SR-IOV ou XDP nativo

Resolução:

```
# Use o modo genérico (única opção)
xdp_attach_mode: generic

# Otimize as configurações do VirtualBox:
# - Use adaptador VirtIO-Net (se disponível)
# - Habilite o modo promíscuo "Permitir Tudo"
# - Aloque mais núcleos de CPU para a VM
# - Use rede em ponte em vez de NAT

# Considere migrar para KVM/Proxmox para melhor desempenho
```

Problemas de NIC e Driver

Problema: Driver NIC não suporta XDP

Sintomas:

```
ERRO[0000] falha ao anexar o programa XDP: operação não suportada
```

Diagnóstico:

```
# Verifique o driver da NIC
ethtool -i eth0 | grep driver

# Verifique se o driver suporta XDP
modinfo <driver_name> | grep -i xdp

# Liste interfaces compatíveis com XDP
ip link show | grep -B 1 "xdpgeneric\|xdpdrv\|xdpoffload"
```

Resolução:

Opção 1: Use o modo genérico

```
xdp_attach_mode: generic
```

Opção 2: Atualize o driver da NIC

```
# Verifique se há atualizações de driver (Ubuntu)
sudo apt update
sudo apt install linux-modules-extra-$(uname -r)

# Ou instale o driver específico do fornecedor
# Exemplo para Intel:
# Baixe de https://downloadcenter.intel.com/
```

Opção 3: Substitua a NIC

```
# Use NIC compatível com XDP:
# - Intel X710, E810
# - Mellanox ConnectX-5, ConnectX-6
# - Broadcom BCM57xxx (driver bnxt_en)
```

Problema: Driver falha ou causa pânico no kernel

Sintomas:

- Pânico no kernel após anexar XDP
- NIC para de responder

Diagnóstico:

```
# Verifique os logs do kernel
dmesg | tail -100

# Verifique bugs no driver
journalctl -k | grep -E "BUG:|panic:"
```

Resolução:

```
# 1. Atualize kernel e drivers
sudo apt update
sudo apt upgrade
sudo reboot

# 2. Desative o offload do XDP (use apenas nativo)
xdp_attach_mode: native

# 3. Use o modo genérico como solução alternativa
xdp_attach_mode: generic

# 4. Relate o bug ao fornecedor da NIC ou à equipe do kernel Linux
```

Falhas na Estabelecimento de Sessão

Problema: Estabelecimento de sessão falha

Sintomas:

- SMF relata falha no estabelecimento de sessão
- UE não consegue estabelecer sessão PDU

Veja Referência de Códigos de Causa PFCP para cenários comuns de falha e resoluções.

Diagnóstico:

```
# Verifique os logs do OmniUPF em busca de erros de sessão
journalctl -u omniupf | grep -i "estabelecimento de sessão"

# Verifique a contagem de sessões PFCP
curl http://localhost:8080/api/v1/sessions | jq 'length'

# Capture o tráfego PFCP durante o estabelecimento da sessão
tcpdump -i any -n udp port 8805 -w /tmp/pfcp_session.pcap
```

Causas Comuns:

Capacidade do mapa cheia

Resolução:

```
# Verifique o uso do mapa
curl http://localhost:8080/api/v1/map_info | jq '.[] |
select(.usage_percent > 90)'

# Aumente a capacidade (veja a seção sobre mapa eBPF cheio acima)
```

Parâmetros PDR/FAR inválidos

Resolução:

```
# Verifique os logs do OmniUPF em busca de erros de validação
journalctl -u omniupf | grep -E "inválido|erro" | tail -20

# Problemas comuns:
# - Endereço IP do UE inválido (0.0.0.0 ou duplicado)
# - TEID inválido (0 ou duplicado)
# - FAR ausente para PDR
# - Ação FAR inválida

# Verifique a configuração do SMF e os parâmetros da sessão
```

Recurso não suportado (UEIP/FTUP)

Resolução:

```
# Habilite recursos necessários, se necessário
feature_ueip: true  # Alocação de IP do UE pelo UPF
ueip_pool: 10.60.0.0/16

feature_ftup: true  # Alocação de F-TEID pelo UPF
teid_pool: 100000
```

Problemas de Bufferização

Problema: Pacotes presos no buffer

Sintomas:

- Contagem de pacotes bufferizados aumentando
- Pacotes não entregues após transferência

Diagnóstico:

```
# Verifique as estatísticas do buffer
curl http://localhost:8080/api/v1/upf_buffer_info

# Verifique os buffers individuais do FAR
curl http://localhost:8080/api/v1/upf_buffer_info | jq '.buffers[]
| {far_id, packet_count, oldest_packet_ms}'

# Monitore o tamanho do buffer
watch -n 5 'curl -s http://localhost:8080/api/v1/upf_buffer_info |
jq ".total_packets_buffered"'
```

Causas e Resoluções:

FAR nunca atualizado para FORWARD

Causa: SMF nunca enviou Modificação de Sessão PFCP para aplicar FAR

Resolução:

```
# Verifique o status do FAR
curl http://localhost:8080/api/v1/sessions | jq '.[].fars[] |
{far_id, applied_action}'

# Ação BUFF = 1 (bufferização)
# Ação FORW = 2 (encaminhamento)

# Se travado no estado BUFF, solicite ao SMF que:
# - Envie a Solicitação de Modificação de Sessão PFCP
# - Atualize o FAR com a ação FORW
```

TTL do buffer expirado

Causa: Pacotes expiraram antes da atualização do FAR

Resolução:

```yaml
# Aumente o TTL do buffer
buffer_packet_ttl: 60  # Aumente de 30 para 60 segundos
```

Overflow do buffer

Causa: Muitos pacotes bufferizados por FAR

Resolução:

```yaml
# Aumente os limites de buffer
buffer_max_packets: 20000  # Por FAR
buffer_max_total: 200000   # Limite global
```

Depuração Avançada

Habilitar Registro de Depuração

```
logging_level: debug  # trace | debug | info | warn | error
```

```
# Reinicie o OmniUPF com registro de depuração
sudo systemctl restart omniupf

# Monitore os logs em tempo real
journalctl -u omniupf -f --output cat
```

Rastreamento do Programa eBPF

```
# Rastreie a execução do programa eBPF (requer bpftrace)
sudo bpftrace -e 'tracepoint:xdp:* { @[probe] = count(); }'

# Rastreie operações de mapa
sudo bpftrace -e 'tracepoint:bpf:bpf_map_lookup_elem {
printf("%s\n", str(args->map_name)); }'
```

Captura de Pacotes com XDP

Entendendo as Limitações de Captura de Pacotes do XDP:

O XDP processa pacotes **antes** da pilha de rede do kernel, portanto, o `tcpdump` padrão **não pode ver o tráfego processado pelo XDP**. Pacotes GTP-U (porta UDP 2152) na N3 são processados pelo XDP e não aparecerão no tcpdump no host UPF.

Métodos Recomendados para Análise de Tráfego:

```
# Método 1: Use a API de estatísticas para monitoramento
(RECOMENDADO)
curl http://localhost:8080/api/v1/xdp_stats
curl http://localhost:8080/api/v1/packet_stats | jq
curl http://localhost:8080/api/v1/n3n6_stats

# Método 2: Capture o tráfego PFCP (não afetado pelo XDP)
tcpdump -i any -n udp port 8805 -w /tmp/pfcp.pcap

# Método 3: Captura de pacotes fora de banda (RECOMENDADO para
GTP-U)
# Use TAP de rede ou espelhamento de porta do switch para capturar
tráfego
# Exemplos:
# - TAP físico entre gNB e UPF
# - Espelhamento/mirror de porta do switch copiando tráfego N3
para analisador
# - Espelhamento de porta de switch virtual no hypervisor
#
# No host de captura (NÃO no UPF):
# tcpdump -i <mirror_interface> -n udp port 2152 -w
/tmp/n3_mirror.pcap
```

Exemplos de Configuração de Captura Fora de Banda:

Rede Física:

```
# Use um TAP de rede ou configure o espelhamento de porta do
switch
# Exemplo: Configuração SPAN de switch Cisco
(config)# monitor session 1 source interface Gi1/0/1
(config)# monitor session 1 destination interface Gi1/0/24

# No host de monitoramento conectado ao Gi1/0/24:
tcpdump -i eth0 -n udp port 2152 -w /tmp/n3_capture.pcap
```

Ambiente Virtual (VMware, KVM, etc.):

```
# Configure o espelhamento de porta do switch virtual para enviar
tráfego do UPF para a VM de analisador
# Exemplo: bridge Linux com tcpdump em VM diferente
# No hypervisor, espelhe a interface N3 do UPF para a interface do
analisador

# Na VM de analisador:
tcpdump -i eth1 -n udp port 2152 -w /tmp/n3_virtual.pcap
```

Por que a Captura Fora de Banda é Necessária:

- O XDP contorna completamente a pilha de rede do kernel
- Pacotes são processados no driver da NIC ou no hardware
- O tcpdump baseado em host vê pacotes APÓS o processamento do XDP (tarde demais)
- A captura fora de banda vê o tráfego bruto antes do processamento do UPF

O que você PODE Capturar no Host UPF:

- □ Tráfego PFCP (UDP 8805) - plano de controle, não processado pelo XDP
- □ Respostas da API e métricas
- □ Tráfego GTP-U (UDP 2152) - plano de dados, processado pelo XDP

Obtendo Ajuda

Se os passos de solução de problemas não resolverem seu problema:

1. **Colete informações de diagnóstico**:

```
# Informações do sistema
uname -a
cat /etc/os-release

# Informações do OmniUPF
curl http://localhost:8080/api/v1/upf_status
curl http://localhost:8080/api/v1/map_info
curl http://localhost:8080/api/v1/packet_stats

# Logs
journalctl -u omniupf --since "1 hour ago" > /tmp/omniupf.log
dmesg > /tmp/dmesg.log

# Informações de rede
ip addr > /tmp/network.txt
ip route >> /tmp/network.txt
ethtool eth0 >> /tmp/network.txt
```

2. **Relate o problema** com:
    - Versão do OmniUPF
    - Versão do kernel Linux
    - Diagrama de topologia de rede
    - Arquivo de configuração (redigir informações sensíveis)
    - Trechos de log relevantes
    - Etapas para reproduzir

Documentação Relacionada

- **Guia de Configuração** - Parâmetros de configuração e exemplos
- **Guia de Arquitetura** - Internos do eBPF/XDP e ajuste de desempenho
- **Guia de Monitoramento** - Estatísticas, capacidade e alertas
- **Referência de Métricas** - Métricas Prometheus para solução de problemas
- **Códigos de Causa PFCP** - Códigos de erro PFCP e solução de problemas
- **Guia de Gerenciamento de Regras** - Conceitos de PDR, FAR, QER, URR

- **Guia de Operações** - Arquitetura e visão geral do UPF

OmniUPF Jardim Murado / Redirecionamento Fora de Crédito

Índice

Visão Geral

O recurso Jardim Murado fornece **aplicação nativa de fora de crédito** diretamente no UPF, eliminando a necessidade de sistemas de aplicação externos (listas de endereços MikroTik, regras de mangle, DNAT).

Quando um assinante fica sem crédito, o SMF envia uma Modificação de Sessão PFCP com um FAR contendo `redirect_information`. O OmniUPF intercepta todo o tráfego dessa sessão no espaço do usuário e impõe uma experiência de portal cativo:

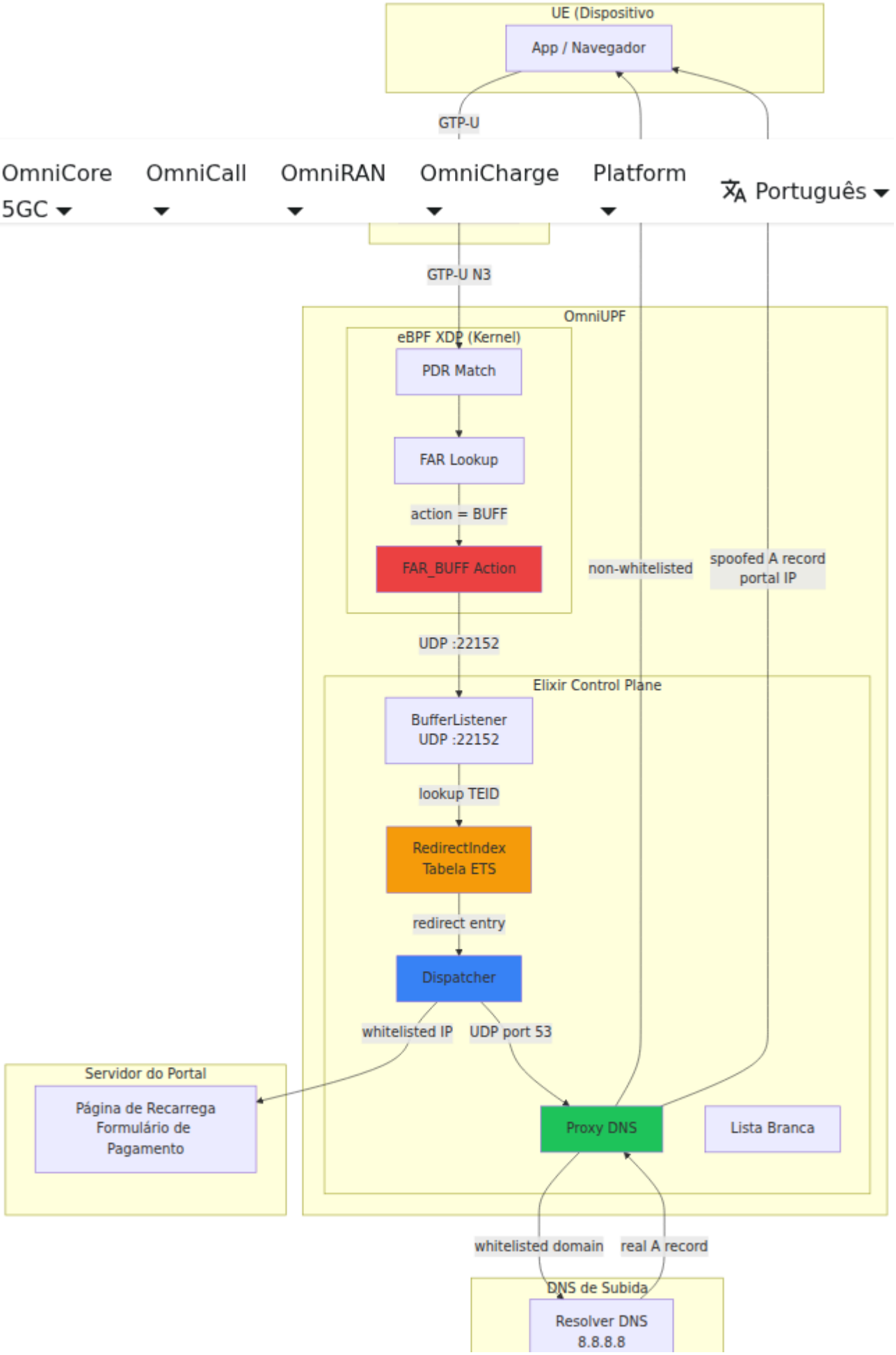
- **Consultas DNS** são falsificadas para retornar o IP do servidor do portal, acionando a detecção de portal cativo em todos os principais dispositivos (Apple, Android, Windows)
- **Tráfego para o portal e IPs na lista branca** (processadores de pagamento, serviços CAPTCHA) é encaminhado normalmente para que o assinante possa recarregar
- **Todo o outro tráfego** é silenciosamente descartado

O assinante vê um prompt de portal cativo e é direcionado para uma página de recarga/pagamento. Assim que o crédito é restaurado, o SMF atualiza o FAR de volta para FORW e o encaminhamento normal é retomado imediatamente.

Pontos de Design Chave

- **Nenhuma alteração no eBPF necessária** -- reutiliza a ação existente `FAR_BUFF` para redirecionar pacotes para o espaço do usuário
- **Redirecionamento por sessão** -- cada sessão pode ter um IP de portal e URL de redirecionamento diferentes, determinados pelo IE `redirect_information` do SMF
- **Lista branca reside no UPF** -- o SMF apenas diz "redirecionar esta sessão"; o UPF decide qual tráfego permitir
- **Intercepção apenas de uplink** -- o FAR de downlink permanece FORW para que as respostas do portal cheguem ao UE através do caminho normal de encapsulamento GTP

Arquitetura


UE (Dispositivo
App / Navegador
GTP-U
GTP-U N3
OmniUPF
eBPF XDP (Kernel)
PDR Match
FAR Lookup
action = BUFF
FAR_BUFF Action
non-whitelisted
spoofed A record
portal IP
UDP :22152
Elixir Control Plane
BufferListener
UDP :22152
lookup TEID
RedirectIndex
Tabela ETS
redirect entry
Dispatcher
whitelisted IP
UDP port 53
Servidor do Portal
Página de Recarrega
Formulário de
Pagamento
Proxy DNS
Lista Branca
whitelisted domain
real A record
DNS de Subida
Resolver DNS
8.8.8.8

Fluxo de Pacotes

1. **UE envia pacote de uplink** (consulta DNS, solicitação HTTP, etc.) via GTP-U para o UPF
2. **Correspondência PDR eBPF** encontra o PDR correspondente, procura o FAR
3. **Ação FAR é BUFF** (substitu��da de FORW quando o redirecionamento está ativo) -- eBPF envia o pacote para o BufferListener na porta UDP 22152
4. **BufferListener** extrai o TEID, verifica a tabela ETS RedirectIndex
5. Se o TEID estiver no RedirectIndex: **Dispatcher** processa o pacote IP interno
6. **Árvore de decisão**:
   - Consulta DNS para domínio não listado: falsificar A record com IP do portal
   - Consulta DNS para domínio listado: encaminhar para o resolvedor real, armazenar IPs resolvidos
   - Tráfego para IP do portal ou IP listado: encaminhar via socket bruto
   - Todo o restante: descartar silenciosamente
7. **Respostas DNS/GTP-U** são enviadas de volta para o UE via o caminho de downlink GTP-U (encapsulado com o TEID DL e enviado para o gNB)

Tratamento de Loopback N9 (Sessão Dual SGW + PGW)

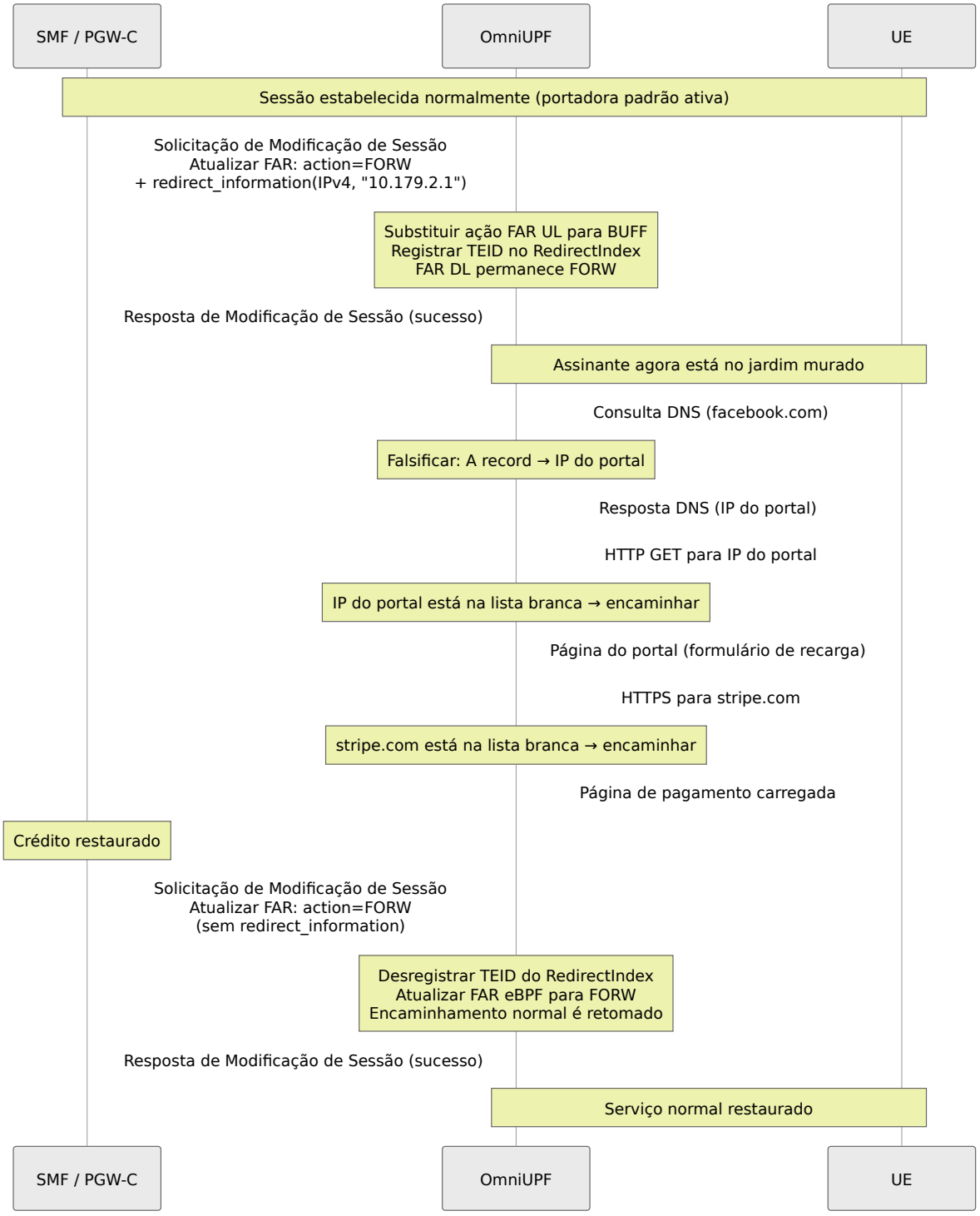
Em implantações EPC 4G, o OmniUPF frequentemente atua como **SGW-U e PGW-U simultaneamente** no mesmo nó. O SGW-C e o PGW-C estabelecem cada um uma sessão PFCP separada. A sessão SGW tem um N9 FAR que encaminha pacotes para o TEID de uplink da sessão PGW (um loopback através da interface N3). A sessão PGW realiza a aplicação real da política do assinante.

Ao ativar um redirecionamento de jardim murado via `POST /v1/walled_garden`, a lógica de ativação detecta automaticamente essa topologia:

1. **TEID(s) da sessão PGW** são identificados a partir dos PDRs de uplink do SEID alvo.
2. O código escaneia todas as sessões PFCP para encontrar uma sessão (a sessão SGW) que tenha um FAR cujo `teid` corresponda a um dos TEIDs de PDR UL do PGW e tenha `outer_header_creation` definido. Esse FAR é o N9 forward FAR apontando para o PGW.
3. **Ambos** os FARs UL do PGW e os FARs UL voltados para gNB do SGW são substituídos por `BUFF` no mapa eBPF. Isso é necessário porque o programa eBPF vê o pacote à medida que chega do eNB com o TEID do SGW, não com o TEID do PGW.
4. Apenas os **PDRs UL voltados para gNB do SGW** são registrados no RedirectIndex (não os PDRs UL do PGW). O TEID do PDR UL do SGW é o que o eBPF verá no pacote de entrada do eNB.
5. Para o **caminho DL** (enviando respostas de volta para o UE), o Dispatcher usa o **FAR DL da sessão SGW** (o FAR que encaminha em direção ao eNB, com `remoteip != n3_address`). Esse FAR contém o TEID atual do eNB e o IP do gNB. O TEID DL é consultado ao vivo a partir do estado da sessão no momento da resposta, não armazenado no momento da ativação — isso lida com o caso em que o TEID do eNB é atribuído por uma Modificação de Sessão subsequente após a ativação do redirecionamento.

Em uma topologia UPF direta (sem SGW, SMF fala diretamente com UPF), apenas os próprios FARs e TEIDs UL da sessão estão envolvidos — o código de detecção do SGW não encontra nada e os PDRs UL da sessão principal são registrados diretamente.

Fluxo de Sinalização PFCP



IEs PFCP Envolvidos

O SMF aciona um redirecionamento incluindo `redirect_information` nos `forwarding_parameters` do FAR:

IE	Descrição
`apply_action`	Definido como FORW pelo SMF (UPF substitui internamente para BUFF)
`redirect_information`	Contém tipo e endereço do redirecionamento
`forwarding_parameters`	Contém o `redirect_information` e `outer_header_creation`

Tipos de Informações de Redirecionamento (por 3GPP TS 29.244 Tabela 8.2.20-1):

Tipo	Valor	Comportamento do UPF
IPv4	0	Use a string de endereço IPv4 fornecida como o IP do portal
IPv6	1	Use a string de endereço IPv6 fornecida como o IP do portal
URL	2	Resolva o nome do host da URL para um IP; use isso como o IP do portal. O caminho da URL não é usado pelo UPF -- ele é armazenado na API apenas para visibilidade. O servidor web do portal é responsável por lidar com qualquer roteamento baseado em caminho.
SIP URI	3	Não suportado atualmente

Detecção de Portal Cativo

O jardim murado aciona **detecção automática de portal cativo** em todas as principais plataformas de dispositivos ao falsificar respostas DNS. Quando um

dispositivo se conecta e tenta verificar a conectividade com a internet, ele consulta domínios bem conhecidos. A resposta DNS falsificada redireciona essas verificações para o IP do portal, que o dispositivo interpreta como um portal cativo.

Domínios de Detecção de Plataforma

Plataforma	Domínio de Detecção	Resposta
Apple (iOS/macOS)	`captive.apple.com`	HTTP 200 com `<HTML><HEAD>&lt` `</HEAD><BODY>Succes`
Android	`connectivitycheck.gstatic.com`	HTTP 204
Windows	`www.msftconnecttest.com`	HTTP 200 com `Microsof`
Samsung	`connectivitycheck.samsung.com`	HTTP 200

Quando esses domínios resolvem para o IP do portal em vez de seus endereços reais, o dispositivo detecta um portal cativo e apresenta a página do portal ao usuário como:

- Uma notificação/pop-up (iOS, Android)
- Um redirecionamento automático do navegador (Windows)

O servidor do portal no IP do portal configurado deve fornecer respostas apropriadas para essas URLs de detecção e, em seguida, redirecionar para a página de recarga/pagamento.

Configuração

A configuração do jardim murado reside no arquivo de configuração em tempo de execução. Em uma instalação de produção (`.deb` package), o arquivo de configuração está em `/etc/omniupf/runtime.exs`. O script de inicialização da

versão (`rel/env.sh`) verifica se este arquivo está presente e, se estiver, define `RELEASE_CONFIG_DIR=/etc/omniupf` para que a versão Erlang o utilize em vez do `config/runtime.exs` incluído. O UPF deve ser reiniciado após alterações na configuração.

```
#
=====================================================================
# Jardim Murado / Redirecionamento Fora de Crédito
#
=====================================================================

# Ativar aplicação de redirecionamento do jardim murado
walled_garden_enabled = true

# IP do servidor do portal (portal cativo / página de recarga)
walled_garden_portal_ip = "10.179.2.1"

# Resolver DNS de subida para consultas de domínio na lista branca
walled_garden_dns_resolver = "8.8.8.8"

# Domínios na lista branca (os assinantes podem acessar esses enquant
redirecionados)
# Suporta curingas: "*.stripe.com" corresponde a "api.stripe.com"
walled_garden_whitelist = [
  "stripe.com",
  "*.stripe.com",
  "js.stripe.com",
  "hcaptcha.com",
  "*.hcaptcha.com",
  "newassets.hcaptcha.com",
]
```

Parâmetros

Parâmetro	Tipo	Requerido	Padrão	
`walled_garden_enabled`	Booleano	Não	`false`	Int par do Qu `re` nos
`walled_garden_portal_ip`	String (IPv4)	Sim (se ativado)	`10.179.2.1`	En cat rec por usa do `re` do res tip rec UR IPv do dir tip hos mo do
`walled_garden_dns_resolver`	String (IPv4)	Não	`8.8.8.8`	Res sub en par bra cor

Parâmetro	Tipo	Requerido	Padrão	
				na env res out fals loc
`walled_garden_whitelist`	Lista de Strings	Não	`[]`	Pac que poc enc jar Ge Lis sin

Gerenciamento de Lista Branca

A lista branca controla quais domínios (e seus IPs resolvidos) os assinantes podem acessar enquanto redirecionados. Isso é configurado no UPF, não no SMF -- o SMF apenas aciona o redirecionamento.

Sintaxe de Padrão

Padrão	Corresponde	Não Corresponde
`stripe.com`	`stripe.com`, `api.stripe.com`, `js.stripe.com`	`evilstripe.com`, `notstripe.com`
`*.stripe.com`	`api.stripe.com`, `js.stripe.com`, `dashboard.stripe.com`	`stripe.com` (exato), `evilstripe.com`
`hcaptcha.com`	`hcaptcha.com`, `newassets.hcaptcha.com`	`evihcaptcha.com`

Os padrões usam **ancoragem de subdomínio**: `stripe.com` corresponde ao domínio em si e a qualquer subdomínio (`foo.stripe.com`), mas não a domínios que apenas contêm a string (`evilstripe.com`). A correspondência é insensível a maiúsculas e minúsculas.

Cache de IP

Quando o proxy DNS encaminha uma consulta para um domínio na lista branca, os endereços IP resolvidos são **automaticamente armazenados em cache** na lista branca. Isso significa:

1. O assinante consulta `api.stripe.com`
2. O proxy DNS encaminha para o resolvedor real, recebe `104.18.7.25`
3. `104.18.7.25` é adicionado ao cache de IPs na lista branca
4. O tráfego HTTP/HTTPS subsequente para `104.18.7.25` é encaminhado (não descartado)

O IP do portal é sempre listado como branco, independentemente da configuração.

Domínios de Lista Branca Recomendados

Para um portal de recarga típico com processamento de pagamento Stripe e hCaptcha:

```
walled_garden_whitelist = [
  # Processador de pagamento
  "stripe.com",
  "*.stripe.com",

  # Serviço CAPTCHA
  "hcaptcha.com",
  "*.hcaptcha.com",

  # Google Fonts (se o portal os usar)
  "fonts.googleapis.com",
  "fonts.gstatic.com",

  # CDN para ativos do portal (se hospedados externamente)
  "cdn.example.com",
]
```

URLs de Redirecionamento por Sessão

Cada sessão PFCP pode ter um **alvo de redirecionamento diferente**. O SMF controla isso através do IE `redirect_information` no FAR:

- **Tipo IPv4**: A string de IP fornecida é analisada e usada como o IP do portal para essa sessão
- **Tipo IPv6**: A string IPv6 fornecida é analisada e usada como o IP do portal para essa sessão
- **Tipo URL**: O nome do host é extraído e resolvido via DNS no momento da criação do FAR. O IP resolvido é usado como o IP do portal. O caminho da URL não é usado pelo UPF -- ele é armazenado apenas para visibilidade da API.

Isso possibilita cenários onde diferentes níveis de assinantes, MVNOs ou planos de serviço redirecionam para diferentes portais:

Sessão	`redirect_information` do SMF	IP do Portal Usado	URL d
Sessão A	`IPv4: 10.179.2.1`	`10.179.2.1`	`10.179.2`
Sessão B	`IPv6: 2001:db8::1`	`2001:db8::1`	`2001:db8`
Sessão C	`URL: https://topup.mvno.com/recharge`	IP Resolvido de `topup.mvno.com`	`https://`

O UPF armazena o IP do portal por sessão e a URL de redirecionamento, que são visíveis através da API.

API

O caminho base para todos os endpoints do jardim murado é `/v1/walled_garden` (sem prefixo `/api`). Esses endpoints são servidos pelo servidor HTTP Phoenix na `api_port` configurada (padrão: 8080).

GET /v1/walled_garden

Retorna todas as sessões de redirecionamento ativas do jardim murado, IPs na lista branca, faixas CIDR em cache e detalhes da sessão.

Resposta:

```
{
  "redirect_count": 2,
  "redirects": [
    {
      "teid": "0x4000",
      "session_seid": 1,
      "portal_ip": "10.179.2.1",
      "redirect_url": null,
      "ue_ip": "10.60.0.1",
      "gnb_ip": "10.179.1.21",
      "dl_teid": "0x5000",
      "far_global_id": 42
    },
    {
      "teid": "0x4001",
      "session_seid": 2,
      "portal_ip": "10.179.2.2",
      "redirect_url": "https://topup.mvno.com",
      "ue_ip": "10.60.0.2",
      "gnb_ip": "10.179.1.21",
      "dl_teid": "0x5001",
      "far_global_id": 43
    }
  ],
  "whitelisted_ips": [
    {"ip": "10.179.2.1", "type": "portal"},
    {"ip": "104.18.7.25", "type": "resolved"},
    {"ip": "104.18.6.25", "type": "resolved"}
  ],
  "whitelisted_cidrs": ["192.168.0.0/24"]
}
```


Campos de Resposta:

Campo	Descrição
`redirect_count`	Número de sessões ativas do jardim murado
`redirects[].teid`	TEID de uplink sendo interceptado (hex)
`redirects[].session_seid`	SEID da sessão PFCP
`redirects[].portal_ip`	IP do portal para esta sessão específica
`redirects[].redirect_url`	URL de redirecionamento do SMF (se tipo URL), ou nulo
`redirects[].ue_ip`	Endereço IP do UE
`redirects[].gnb_ip`	IP do gNB para respostas GTP-U
`redirects[].dl_teid`	TEID de downlink para encapsulamento GTP-U
`redirects[].far_global_id`	ID global interno do FAR
`whitelisted_ips`	Todos os IPs atualmente na lista branca (portal + resoluções DNS em cache)
`whitelisted_cidrs`	Faixas CIDR adicionadas via API da lista branca

POST /v1/walled_garden

Ativa o redirecionamento do jardim murado em uma sessão PFCP existente pelo SEID. Este é o caminho acionado pelo operador/API — o caminho normal é via Modificação de Sessão PFCP com `redirect_information` em um FAR. O caminho da API é útil para testes e para operadores que precisam redirecionar manualmente uma sessão sem a participação do SMF.

Corpo da solicitação:

```
{
  "seid": 1,
  "url": "http://10.179.2.1/"
}
```

Campo	Tipo	Requerido	Descrição
`seid`	Inteiro	Sim	SEID local da sessão PFCP a ser redirecionada
`url`	String	Sim	Alvo de redirecionamento — um endereço IPv4/IPv6 ou uma URL. Se uma URL for fornecida, o nome do host é resolvido e o IP resultante é usado como o IP do portal. A string completa da URL é armazenada para visibilidade da API.

Resposta (200 OK):

```
{
  "status": "redirect activated",
  "info": {
    "seid": 1,
    "sgw_seid": 7,
    "portal_ip": "10.179.2.1",
    "ue_ip": "10.60.0.1",
    "gnb_ip": "10.179.1.21",
    "ul_teids": ["0x4000", "0x4006"]
  }
}
```

O campo `sgw_seid` é não nulo quando um loopback N9 (sessão emparelhada SGW+PGW) foi detectado e seu TEID de uplink também foi BUFF'd. `ul_teids` lista todos os TEIDs de uplink que foram registrados no índice de redirecionamento.

Respostas de erro:

Status	Significado
404	Sessão não encontrada (SEID não corresponde a nenhuma sessão PFCP ativa)
400	Parâmetros obrigatórios ausentes

DELETE /v1/walled_garden/:seid

Desativa o redirecionamento do jardim murado para uma sessão, restaurando o encaminhamento normal. Todos os FARs de uplink para a sessão (incluindo FARs de sessão SGW emparelhados em uma topologia de loopback N9) são definidos de volta para `action=FORW` no mapa eBPF, e os TEIDs são desregistrados do índice de redirecionamento.

Parâmetro de caminho: `:seid` — o SEID local da sessão a ser desativada.

Resposta (200 OK):

```
{"status": "redirect removed", "info": {"seid": 1}}
```

Respostas de erro:

Status	Significado
404	Sessão não encontrada

GET /v1/walled_garden/whitelist

Retorna a lista branca atual: IPs individuais em cache (IP do portal e IPs resolvidos por DNS) e quaisquer faixas CIDR adicionadas via API.

Resposta:

```
{
  "ips": [
    {"ip": "10.179.2.1", "type": "portal"},
    {"ip": "104.18.7.25", "type": "resolved"}
  ],
  "cidrs": ["192.168.100.0/24"]
}
```

POST /v1/walled_garden/whitelist

Adiciona um endereço IP ou faixa CIDR à lista branca em tempo de execução, sem reiniciar o UPF. As alterações são apenas em memória e não persistem entre reinicializações — adicione entradas permanentes a `walled_garden_whitelist` em `runtime.exs`.

Corpo da solicitação (adicionar um IP):

```
{"ip": "203.0.113.10"}
```

Corpo da solicitação (adicionar uma faixa CIDR):

```
{"cidr": "192.168.100.0/24"}
```

Exatamente um de `ip` ou `cidr` deve estar presente. Adicionar uma faixa CIDR significa que qualquer tráfego para IPs dentro dessa faixa é encaminhado pelo dispatcher sem precisar de uma entrada de cache DNS por IP.

Resposta (200 OK — IP adicionado):

```
{"status": "added", "ip": "203.0.113.10"}
```

Resposta (200 OK — CIDR adicionado):

```
{"status": "added", "cidr": "192.168.100.0/24"}
```

Respostas de erro:

Status	Significado
400	IP inválido, CIDR inválido ou campos do corpo ausentes

Métricas Prometheus

Medidas

Métrica: `upf_walled_garden_active_redirects` **Tipo**: Medida **Descrição**: Número de sessões atualmente no estado de redirecionamento do jardim murado

Consultas de exemplo:

```
# Contagem atual de redirecionamentos
upf_walled_garden_active_redirects
```

Contadores

Métrica: `upf_walled_garden_packets_intercepted_total` **Tipo**: Contador **Descrição**: Total de pacotes interceptados pelo jardim murado (todo o tráfego de uplink de sessões redirecionadas)

Métrica: `upf_walled_garden_packets_dropped_total` **Tipo**: Contador **Descrição**: Total de pacotes descartados pelo jardim murado (tráfego não listado, não-DNS)

Métrica: `upf_walled_garden_packets_forwarded_total` **Tipo**: Contador **Rótulos**:

- `dst_ip` - IP de destino do pacote encaminhado **Descrição**: Pacotes encaminhados através do jardim murado para destinos na lista branca. Rotulado pelo IP de destino para visibilidade por destino.

Métrica: `upf_walled_garden_bytes_forwarded_total` **Tipo**: Contador **Rótulos**:

- `dst_ip` - IP de destino do tráfego encaminhado **Descrição**: Bytes encaminhados através do jardim murado por IP de destino. Use isso para identificar quais serviços na lista branca os assinantes acessam enquanto redirecionados.

Métrica: `upf_walled_garden_dns_spoofed_total` **Tipo**: Contador **Rótulos**:

- `domain` - O domínio que foi falsificado **Descrição**: Consultas DNS falsificadas pelo jardim murado. Rotulado pelo domínio consultado.

Métrica: `upf_walled_garden_dns_forwarded_total` **Tipo**: Contador **Rótulos**:

- `domain` - O domínio listado que foi encaminhado **Descrição**: Consultas DNS encaminhadas para o resolvedor real (domínios na lista branca). Rotulado pelo domínio.

Consultas de Exemplo

```
# Sessões ativas do jardim murado
upf_walled_garden_active_redirects

# Taxa de intercepção (pacotes/segundo)
rate(upf_walled_garden_packets_intercepted_total[5m])

# Taxa de descarte (deve ser a maioria dos interceptados)
rate(upf_walled_garden_packets_dropped_total[5m])

# Tráfego encaminhado por destino (bytes/segundo)
sum by (dst_ip)
(rate(upf_walled_garden_bytes_forwarded_total[5m]))

# Top 5 destinos na lista branca por volume de tráfego
topk(5, sum by (dst_ip)
(rate(upf_walled_garden_bytes_forwarded_total[5m])))

# Domínios falsificados mais consultados
topk(10, sum by (domain)
(rate(upf_walled_garden_dns_spoofed_total[5m])))

# Taxa de consulta de domínio listado
sum by (domain) (rate(upf_walled_garden_dns_forwarded_total[5m]))

# Proporção de descartados vs encaminhados
sum(rate(upf_walled_garden_packets_dropped_total[5m]))
  / sum(rate(upf_walled_garden_packets_intercepted_total[5m]))
```

Solução de Problemas

Portal Cativo Não Aparecendo no Dispositivo

Sintomas: Assinante é redirecionado (visível na API), mas o dispositivo não mostra o prompt do portal cativo.

Possíveis causas:

- Servidor do portal não respondendo no IP do portal configurado
- Servidor do portal não lidando com URLs de detecção específicas da plataforma
- Resposta DNS não chegando ao UE (verifique o caminho GTP-U)

Resolução:

1. Verifique se o servidor do portal é acessível: `curl http://<portal_ip>/`
2. Confirme se o portal lida com URLs de detecção (por exemplo, `GET /hotspot-detect.html` para Apple)
3. Verifique `GET /v1/walled_garden` para confirmar que a sessão está registrada
4. Verifique as métricas Prometheus: `upf_walled_garden_dns_spoofed_total` deve estar aumentando
5. Verifique se o caminho GTP-U de downlink está funcionando (FAR DL deve permanecer FORW)

Página de Pagamento Não Carregando

Sintomas: Assinante vê o portal cativo, mas não consegue acessar a página de pagamento (Stripe, etc.).

Possíveis causas:

- Domínio do processador de pagamento não está na lista branca
- Processador de pagamento usando um IP de CDN que não foi armazenado em cache
- Padrão da lista branca não correspondendo corretamente a subdomínios

Resolução:

1. Verifique `GET /v1/walled_garden` — verifique se `whitelisted_ips` inclui os IPs do processador de pagamento
2. Verifique Prometheus: `upf_walled_garden_dns_forwarded_total{domain="stripe.com"}` deve mostrar consultas

3. Adicione domínios ausentes à lista branca (comum: `js.stripe.com`, `m.stripe.network`)
4. Verifique `upf_walled_garden_bytes_forwarded_total` por `dst_ip` para ver qual tráfego está realmente fluindo

Redirecionamento Não Ativando

Sintomas: SMF envia Modificação de Sessão com `redirect_information`, mas o tráfego do assinante não está sendo interceptado.

Possíveis causas:

- `walled_garden_enabled` é `false`
- O IE `redirect_information` está no FAR errado (deve estar no FAR **de uplink**)
- A ação FAR não está sendo substituída por BUFF

Resolução:

1. Verifique a configuração: `walled_garden_enabled = true`
2. Verifique `GET /v1/pfcp_sessions` — observe a ação FAR para a sessão. O FAR de uplink deve mostrar ação `0x04` (BUFF)
3. Verifique `GET /v1/walled_garden` — o TEID da sessão deve aparecer na lista de redirecionamento
4. Verifique os logs do UPF para mensagens `redirect_info` durante a modificação da sessão

Redirecionamento Não Limpando Após Recarregamento

Sintomas: Assinante recarregou, mas o tráfego ainda está sendo interceptado.

Possíveis causas:

- SMF não enviou a Modificação de Sessão para remover o redirecionamento
- Transição BUFF->FORW não está sendo detectada

Resolução:

1. Verifique `GET /v1/walled_garden` — a sessão ainda está listada?
2. Verifique `GET /v1/pfcp_sessions` — verifique se a ação FAR foi atualizada de volta para `0x02` (FORW)
3. Verifique os logs do SMF para confirmar que ele enviou a Modificação de Sessão
4. Verifique os logs do UPF para a mensagem "redirect removed, unregistering walled garden"

TEID de Downlink Errado (Obsoleto Após Modificação de Sessão)

Sintomas: Respostas DNS falsificadas ou tráfego encaminhado não estão chegando ao UE; pacotes GTP-U são enviados para o IP correto do gNB, mas o eNB os descarta como TEID desconhecido.

Causa: Em topologias 4G/SGW+PGW, o TEID do eNB no FAR DL do SGW pode ser zero ou um TEID de espaço reservado no momento em que o redirecionamento do jardim murado é ativado (por exemplo, a troca de `Initial Context Setup` acontece após o Estabelecimento da Sessão). Quando o eNB aloca seu TEID e o envia de volta via Modificação de Sessão, o FAR DL na sessão SGW é atualizado — mas se o Dispatcher tiver armazenado em cache o valor antigo, ele usará o TEID errado.

Resolução: O Dispatcher resolve o TEID DL **ao vivo** no momento da resposta consultando o FAR DL atual da sessão SGW (o FAR com `outer_header_creation` definido e `remoteip != n3_address`). Ele só recorre ao valor armazenado no momento da ativação se a consulta da sessão falhar. Portanto, um TEID obsoleto deve se corrigir assim que a próxima resposta DNS ou encaminhada for enviada. Se você ainda estiver vendo o TEID errado:

1. Verifique `GET /v1/walled_garden` — verifique se `dl_teid` na entrada de redirecionamento parece plausível (não zero).
2. Verifique `GET /v1/pfcp_sessions` — observe as entradas FAR da sessão SGW; o FAR voltado para gNB deve ter o `teid` e `remoteip` atuais.
3. Se a sessão SGW foi excluída (por exemplo, transferência ou liberação), a entrada de redirecionamento permanecerá no RedirectIndex, mas a consulta ao vivo falhará. Nesse caso, use `DELETE`

`/v1/walled_garden/:seid` para limpar a entrada obsoleta e permitir que o SMF reestabeleça.

Portal Retorna 304 Not Modified

Sintomas: O navegador do assinante mostra uma página em branco ou a página do portal cativo carrega uma vez, mas visitas subsequentes aparecem vazias.

Causa: Respostas HTTP 304 (Not Modified) são enviadas quando o navegador tem uma versão em cache da página e o servidor confirma que nada mudou. Para fluxos de portal cativo, alguns servidores web de portal enviam 304 em resposta às solicitações de detecção de plataforma (`/hotspot-detect.html`, `/generate_204`, etc.) se o navegador enviar cabeçalhos `If-Modified-Since` ou `If-None-Match`. Algumas implementações de portal cativo também enviam 304 para a própria página de redirecionamento.

Resolução:

1. O UPF encaminha respostas HTTP do servidor do portal de forma transparente — ele não modifica códigos de resposta. O problema está na configuração do servidor web do portal.
2. No servidor do portal, certifique-se de que os endpoints de detecção da plataforma retornem o código de status correto (200, não 304) com o conteúdo do corpo esperado (veja Detecção de Portal Cativo).
3. Configure o servidor do portal para enviar `Cache-Control: no-store` e omitir cabeçalhos `ETag`/`Last-Modified` em endpoints de detecção para que os navegadores não os armazenem em cache.
4. Verifique com: `curl -v -H "If-None-Match: foo" http://<portal_ip>/hotspot-detect.html` — a resposta deve ser 200, não 304.

Encaminhamento de Socket Bruto

Quando o Dispatcher encaminha um pacote para um IP listado, ele usa um **socket bruto** (`IPPROTO_RAW`, número do protocolo 255) através do módulo

`:socket` do Erlang. Um novo socket bruto é aberto por pacote, o pacote IP interno completo (como recebido do eBPF) é enviado com `sendto`, e o socket é imediatamente fechado.

Como isso funciona: O pacote IP interno do payload GTP-U já tem um cabeçalho IP válido com o IP do UE como origem e o IP do servidor de destino como destino. Ao injetar esse pacote via um socket bruto usando `IPPROTO_RAW`, o kernel o roteia com base no IP de destino usando a tabela de roteamento do host. A interface N6 do UPF deve ter uma rota para o servidor do portal/listado para que isso funcione.

Problemas comuns:

Sintoma	Causa Provável	Correção
Encaminhamento falha silenciosamente	`EPERM` — socket bruto requer root ou `CAP_NET_RAW`	Certifique-se de que o OmniUPF seja executado como root ou tenha a capacidade `CAP_NET_RAW`
Pacotes encaminhados, mas nenhuma resposta chega ao UE	Rota N6 para o portal ausente	Adicione rota para a sub-rede do portal no host UPF
`Walled garden: raw socket open failed` nos logs	Capacidade ausente ou restrição do kernel	Verifique o serviço `systemd` `AmbientCapabilities=CAP_NET_RAW`
Encaminhamento funciona, mas UE recebe IP errado como origem	NAT no N6 reescreve origem	Certifique-se de que as respostas do portal para o IP do UE sejam roteadas de volta através do UPF

Verifique os logs do UPF para mensagens `Walled garden forward failed` e `raw socket open failed`. Use as métricas Prometheus `upf_walled_garden_packets_forwarded_total` e `upf_walled_garden_bytes_forwarded_total` para confirmar que o tráfego está fluindo.

Aviso de Alta Cardinalidade para Prometheus

Nota: Os rótulos `dst_ip` e `domain` nas métricas do jardim murado podem produzir alta cardinalidade se muitos destinos ou domínios únicos forem consultados. Em grandes implantações, considere usar regras de gravação para agregar essas métricas:

```
# Regra de gravação para agregar por sub-rede /24 em vez de IPs
individuais
sum by (dst_subnet) (
  label_replace(
    rate(upf_walled_garden_bytes_forwarded_total[5m]),
    "dst_subnet", "$1.0/24", "dst_ip", "(\d+\.\d+\.\d+)\.\d+"
  )
)
```

Guia de Operações da Interface Web

Índice

Visão Geral

A Interface Web OmniUPF fornece um painel de controle abrangente para monitoramento e gerenciamento em tempo real da Função do Plano do Usuário. A interface é construída sobre o Phoenix LiveView e fornece:

- **Visibilidade em tempo real** nas sessões PFCP e conexões PDU ativas
- **Inspeção de regras** para PDR, FAR, QER e URR em todas as sessões
- **Gerenciamento de buffers** para armazenamento de pacotes durante eventos de mobilidade
- **Monitoramento de estatísticas** para processamento de pacotes, rotas e interfaces
- **Rastreamento de capacidade** para uso e limites de mapas eBPF
- **Visualização de logs ao vivo** para solução de problemas

Arquitetura

O painel de controle se comunica com várias instâncias do OmniUPF através de sua API REST para:

- Consultar sessões e associações PFCP
- Inspecionar regras de detecção e encaminhamento de pacotes
- Monitorar buffers de pacotes e seu status
- Acessar estatísticas e métricas de desempenho em tempo real
- Rastrear capacidade e utilização de mapas eBPF

Acessando o Painel de Controle

Acesso Padrão

O painel de controle é acessível via HTTPS no servidor de gerenciamento do OmniUPF:

```
https://<upf-server>:443/
```

Porta Padrão: 443 (HTTPS com certificado autoassinado)

Configuração

O painel de controle requer configuração do host OmniUPF em `config/config.exs`:

Múltiplas instâncias do UPF podem ser configuradas para implantações de múltiplas instâncias:

A configuração `upf_hosts` define quais instâncias do OmniUPF estão disponíveis no menu suspenso do seletor de host em toda a interface.

Navegação

O painel de controle fornece abas de navegação para cada área operacional:

- **Sess��es** - `/sessions` - Sessões e associações PFCP
- **Regras** - `/rules` - Inspeção de regras PDR, FAR, QER, URR
- **Buffers** - `/buffers` - Monitoramento e controle de buffers de pacotes
- **Estatísticas** - `/statistics` - Estatísticas de pacotes, rotas, XDP e interfaces
- **Capacidade** - `/capacity` - Uso e monitoramento de capacidade de mapas eBPF
- **Config** - `/upf_config` - Configuração do UPF e endereços do dataplane
- **Rotas** - `/routes` - Rotas de UE e sessões de protocolo de roteamento (OSPF, BGP)
- **Capacidades XDP** - `/xdp_capabilities` - Suporte ao modo XDP e capacidades de desempenho
- **Logs** - `/logs` - Streaming de logs ao vivo

Visualização de Sessões

URL: `/sessions`

Recursos

A visualização de Sessões exibe todas as sessões PFCP ativas e associações das instâncias do OmniUPF selecionadas.

Resumo de Associações PFCP

Exibe todas as associações PFCP ativas (conexões de controle do SMF/PGW-C):

Coluna	Descrição
Node ID	Identificador do nó SMF ou PGW-C (FQDN ou IP)
Endereço	Endereço IP do SMF/PGW-C para comunicação PFCP
Próximo ID de Sessão	Próximo ID de sessão PFCP disponível para esta associação

Propósito:

- Verificar a conectividade do SMF ao UPF
- Monitorar o número de conexões do plano de controle
- Rastrear a alocação de ID de sessão por associação

Tabela de Sessões Ativas

Exibe todas as sessões PFCP representando sessões PDU ativas de UE:

Coluna	Descrição
Local SEID	Identificador de ponto final de sessão atribuído pelo UPF
Remote SEID	Identificador de ponto final de sessão atribuído pelo SMF
UE IP	Endereço IPv4 ou IPv6 do equipamento do usuário
TEID	Identificador de Ponto de Túnel GTP-U para tráfego de uplink
PDRs	Número de regras de detecção de pacotes na sessão
FARs	Número de regras de ação de encaminhamento na sessão
QERs	Número de regras de aplicação de QoS na sessão
URRs	Número de regras de relatório de uso na sessão
Ações	Botão de expandir para visualizar informações detalhadas da regra

Recursos:

- **Filtrar por IP**: Encontrar sessões para um endereço IP de UE específico
- **Filtrar por TEID**: Encontrar sessões por ID de ponto de túnel
- **Expandir sessão**: Ver detalhes completos em JSON de PDR/FAR/QER/URR
- **Atualização automática**: Atualiza a cada 10 segundos

Visualização de Sessão Expandida:

Quando você clica em "Expandir" em uma sessão, a visualização mostra:

- **Regras de Detecção de Pacotes (PDRs)**: JSON completo com TEID, UE IP, FAR ID, QER ID, filtros SDF

    - **IDs de PDR são clicáveis** - Clique para navegar até a aba Regras e visualizar detalhes completos do PDR
    - PDRs de uplink (TEID ≠ 0) link para consulta de PDR de uplink
    - PDRs de downlink (IPv4) link para consulta de PDR de downlink
    - PDRs de downlink (IPv6) link para consulta de PDR de downlink IPv6
- **Regras de Ação de Encaminhamento (FARs)**: Flags de ação, criação de cabeçalho externo, pontos finais de destino
- **Regras de Aplicação de QoS (QERs)**: MBR, GBR, QFI e outros parâmetros de QoS
- **Regras de Relatório de Uso (URRs)**: Contadores de volume (uplink, downlink, total de bytes)

Visualização expandida de sessão mostrando PDRs, FARs e QERs detalhados para uma sessão específica.

Casos de Uso

Verificar Conectividade de UE:

1. Navegue até a visualização de Sessões
2. Insira o endereço IP da UE no filtro
3. Confirme que a sessão existe com o TEID correto
4. Expanda para verificar a configuração de PDR/FAR

Monitorar Contagem de Sessões:

- Verifique a contagem total de sessões no cabeçalho
- Compare entre várias instâncias do UPF
- Rastreie o crescimento de sessões ao longo do tempo

Solução de Problemas de Sessões:

- Pesquise por um IP de UE ou TEID específico
- Expanda a sessão para inspecionar a configuração da regra
- Verifique os parâmetros de encaminhamento do FAR
- Verifique as configurações de QoS do QER

Atualizações em Tempo Real

A visualização de Sessões atualiza automaticamente a cada 10 segundos. Um indicador de verificação de saúde mostra o status de conectividade do UPF:

- **SAUDÁVEL** (verde): UPF é acessível e respondendo
- **NÃO SAUDÁVEL** (vermelho): UPF não é acessível ou não está respondendo
- **DESCONHECIDO** (cinza): Status de saúde ainda não determinado

Gerenciamento de Regras

URL: `/rules`

A visualização de Regras fornece uma inspeção abrangente de todas as regras de detecção de pacotes, encaminhamento, QoS e relatório de uso em todas as sessões.

Aba PDR - Regras de Detecção de Pacotes

Visualize e inspecione todos os PDRs no UPF com **formulários de consulta** e **navegação clicável**:

PDRs de Uplink (N3 → N6):

- **Formulário de Consulta**: Pesquisar por TEID para visualizar detalhes específicos do PDR de uplink
- **TEID**: ID de ponto de túnel GTP-U do gNB (clicável - navega para consulta)
- **FAR ID**: Regra de ação de encaminhamento associada (clicável - navega para a aba FAR)
- **QER ID**: Regra de aplicação de QoS associada (clicável - navega para a aba QER)
- **URR IDs**: Regras de relatório de uso associadas (clicável - navega para a aba URR)
- **Remoção de Cabeçalho Externo**: Flag de desencapsulação GTP-U
- **Filtros SDF**: Regras de classificação de fluxo de dados de serviço

PDRs de Downlink (N6 → N3):

- **Formulário de Consulta**: Pesquisar por endereço IPv4 da UE para visualizar detalhes específicos do PDR de downlink
- **UE IP**: Endereço IPv4 do equipamento do usuário (exibido nos resultados da consulta)
- **FAR ID**: Regra de ação de encaminhamento associada (clicável - navega para a aba FAR)
- **QER ID**: Regra de aplicação de QoS associada (clicável - navega para a aba QER)
- **URR IDs**: Regras de relatório de uso associadas (clicável - navega para a aba URR)
- **Modo SDF**: Modo de filtro de fluxo de dados de serviço (nenhum, apenas sdf, sdf + padrão)
- **Paginação**: Navegue pelos PDRs com controles de página (padrão 100 por página, máximo 1000)

PDRs de Downlink IPv6:

- A API suporta paginação para PDRs de downlink IPv6
- Mesma estrutura que IPv4, mas indexada por endereços IPv6
- Uma aba completa da UI pode ser adicionada se necessário

Aba FAR - Regras de Ação de Encaminhamento

Visualize todos os FARs com suas ações de encaminhamento e parâmetros:

Recursos:

- **Formulário de Consulta**: Pesquisar por FAR ID para visualizar detalhes específicos do FAR
- **Auto-consulta**: Clicar em FAR IDs dos detalhes do PDR preenche automaticamente a consulta
- **Atualizações em Tempo Real**: O status do FAR reflete o estado atual do buffer

Coluna	Descrição
FAR ID	Identificador único da regra de encaminhamento
Ação	Flags de ação de encaminhamento (FORWARD, DROP, BUFFER, DUPLICATE, NOTIFY)
Buffering	Status atual de buffering (Ativado/Desativado)
Destino	Parâmetros de criação de cabeçalho externo (TEID, endereço IP)

Flags de Ação do FAR:

- **FORWARD (1)**: Encaminhar pacote para o destino
- **DROP (2)**: Descartar pacote
- **BUFFER (4)**: Armazenar pacote no buffer
- **NOTIFY (8)**: Enviar notificação para o plano de controle
- **DUPLICATE (16)**: Duplicar pacote para múltiplos destinos

Alternância de Buffering:

- Clique em "Ativar Buffer" ou "Desativar Buffer" para alternar a flag de buffering
- Útil para solucionar problemas de cenários de transferência
- Altera imediatamente a ação do FAR no mapa eBPF

Aba QER - Regras de Aplicação de QoS

Visualize as regras de QoS aplicadas aos fluxos de tráfego:

Recursos:

- **Navegação Clicável**: Clique em QER IDs dos detalhes do PDR para navegar e destacar QER específico
- **Auto-destaque**: A linha do QER é destacada quando navegada a partir do PDR
- **Paginação**: Navegue pelos QERs com controles de página (padrão 100 por página, máximo 1000)

Coluna	Descrição
QER ID	Identificador único da regra de QoS (clicável quando referenciado a partir dos PDRs)
MBR (Uplink)	Taxa máxima de bits para tráfego de uplink (kbps)
MBR (Downlink)	Taxa máxima de bits para tráfego de downlink (kbps)
GBR (Uplink)	Taxa garantida de bits para tráfego de uplink (kbps)
GBR (Downlink)	Taxa garantida de bits para tráfego de downlink (kbps)
QFI	Identificador de Fluxo de QoS (marcação 5G)

Interpretação de QoS:

- **MBR = 0**: Sem limite de taxa
- **GBR = 0**: Melhor esforço (sem largura de banda garantida)
- **GBR > 0**: Fluxo de taxa garantida (priorizado)

Aba URR - Regras de Relatório de Uso

Visualize regras de rastreamento de uso e contadores de volume:

Recursos:

- **Formulário de Consulta**: Pesquisar por URR ID para encontrar e destacar URR específico
- **Navegação Clicável**: Clique em URR IDs dos detalhes do PDR para navegar e destacar URR específico
- **Auto-destaque**: A linha do URR é destacada em azul quando navegada a partir do PDR ou pesquisada via consulta
- **Paginação**: Navegue pelos URRs com controles de página (padrão 100 por página, máximo 1000)

Coluna	Descrição
URR ID	Identificador único da regra de relatório de uso (clicável quando referenciado a partir dos PDRs)
Volume de Uplink	Bytes enviados da UE para a rede de dados
Volume de Downlink	Bytes enviados da rede de dados para a UE
Volume Total	Total de bytes em ambas as direções
Ações	Botão de excluir para redefinir contadores para este URR

Exibição de Volume:

- Formatado automaticamente (B, KB, MB, GB, TB)
- Contadores em tempo real atualizados a cada atualização
- Usado para cobrança e análises

Filtragem:

- Mostra apenas URRs com volume diferente de zero
- URRs inativos (todos os contadores em 0) são filtrados para desempenho

Casos de Uso

Inspecionar Classificação de Tráfego:

1. Navegue até Regras → aba PDR
2. Pesquise por TEID ou IP da UE específico
3. Verifique se o PDR associa com o FAR e QER corretos

Solução de Problemas de Encaminhamento:

1. Navegue até Regras → aba FAR
2. Localize o FAR ID a partir do PDR da sessão
3. Verifique se a ação é FORWARD (não DROP ou BUFFER)
4. Verifique os parâmetros de criação de cabeçalho externo

Monitorar Aplicação de QoS:

1. Navegue até Regras → aba QER
2. Verifique se os valores de MBR e GBR correspondem à política
3. Verifique a marcação QFI para fluxos 5G

Rastrear Uso de Dados:

1. Navegue até Regras → aba URR
2. Classifique por volume total para encontrar os maiores usuários
3. Monitore o crescimento do volume ao longo do tempo
4. Verifique a integração de cobrança

Gerenciamento de Buffers

URL: `/buffers`

Recursos

A visualização de Buffers exibe buffers de pacotes mantidos pelo UPF durante eventos de mobilidade ou mudanças de caminho.

Estatísticas Totais

O painel exibe estatísticas agregadas de buffers:

- **Total de Pacotes**: Número de pacotes armazenados em todos os FARs
- **Total de Bytes**: Tamanho total de dados armazenados
- **Total de FARs**: Número de FARs com pacotes armazenados
- **Máximo por FAR**: Máximo de pacotes permitidos por FAR
- **Máximo Total**: Máximo total de pacotes armazenados
- **TTL do Pacote**: Tempo de vida para pacotes armazenados (segundos)

Buffers por FAR

Tabela de todos os FARs com pacotes armazenados:

Coluna	Descrição
FAR ID	Identificador da regra de ação de encaminhamento
Contagem de Pacotes	Número de pacotes armazenados para este FAR
Contagem de Bytes	Total de bytes armazenados para este FAR
Pacote Mais Antigo	Timestamp do pacote armazenado mais antigo
Pacote Mais Novo	Timestamp do pacote armazenado mais novo
Ações	Botões de controle de buffer (estilo pílula)

Ações de Controle de Buffer

Para cada FAR com pacotes armazenados, os seguintes botões de estilo pílula estão disponíveis:

Controle de Buffering:

- **Desativar Buffer** (vermelho): Desligar o buffering para este FAR (atualiza a flag de ação do FAR)
- **Ativar Buffer** (roxo): Ligar o buffering para este FAR

Operações de Buffer:

- **Flush** (azul): Repetir todos os pacotes armazenados usando as regras atuais do FAR
- **Limpar** (cinza): Excluir todos os pacotes armazenados sem encaminhamento

Limpar Todos os Buffers:

- Botão vermelho "Limpar Tudo" no cabeçalho
- Limpa buffers para todos os FARs

- Requer confirmação

Casos de Uso

Monitorar Buffering de Transferência:

1. Durante a transferência, verifique se os pacotes estão sendo armazenados
2. Verifique o status de buffering do FAR (deve estar ativado)
3. Monitore a contagem e a idade dos pacotes

Completar Transferência:

1. Após a mudança de caminho, clique em "Flush" para repetir os pacotes armazenados
2. Verifique se os pacotes são encaminhados para o novo caminho
3. Clique em "Desativar Buffer" para parar o buffering

Limpar Buffers Presos:

1. Identifique FARs com pacotes armazenados antigos (verifique o timestamp mais antigo)
2. Clique em "Limpar" para descartar pacotes obsoletos
3. Ou clique em "Desativar Buffer" para evitar mais armazenamento

Solução de Problemas de Overflow de Buffer:

1. Verifique a contagem total de pacotes vs. máximo total
2. Identifique FARs com buffering excessivo
3. Verifique se o SMF enviou modificação de sessão para desativar o buffering
4. Desative manualmente o buffering se o comando do SMF foi perdido

Atualizações em Tempo Real

A visualização de Buffers atualiza automaticamente a cada 5 segundos para mostrar o status atual do buffer.

Painel de Estatísticas

URL: `/statistics`

Recursos

A visualização de Estatísticas fornece métricas de desempenho em tempo real do datapath do OmniUPF. Para informações detalhadas sobre métricas do Prometheus, consulte a **Referência de Métricas**.

Estatísticas de Pacotes

Contadores agregados de processamento de pacotes:

- **Pacotes RX**: Total de pacotes recebidos em todas as interfaces
- **Pacotes TX**: Total de pacotes transmitidos em todas as interfaces
- **Pacotes Descartados**: Pacotes descartados devido a erros ou políticas
- **Pacotes GTP-U**: Pacotes processados com encapsulação GTP-U

Uso: Monitorar a carga de tráfego geral do UPF e a taxa de queda de pacotes

Estatísticas de Rotas

Métricas de encaminhamento por rota (se disponíveis):

- **Acertos de Rota**: Pacotes correspondidos por cada regra de roteamento
- **Sucesso de Encaminhamento**: Contagem de pacotes encaminhados com sucesso
- **Erros de Encaminhamento**: Tentativas de encaminhamento falhadas

Uso: Identificar rotas ocupadas e erros de encaminhamento

Estatísticas XDP

Métricas de desempenho do eXpress Data Path:

- **XDP Processados**: Total de pacotes processados na camada XDP
- **XDP Passados**: Pacotes enviados para a pilha de rede

- **XDP Descartados**: Pacotes descartados na camada XDP
- **XDP Abortados**: Erros de processamento no programa XDP

Uso: Monitorar o desempenho do XDP e detectar erros de processamento

Causas de Descarte do XDP:

- Formato de pacote inválido
- Falha na consulta de mapa eBPF
- Descartes baseados em políticas
- Exaustão de recursos

Estatísticas de Interface N3/N6

Contadores de tráfego por interface:

Interface N3 (conectividade RAN):

- **RX N3**: Pacotes recebidos do gNB/eNodeB
- **TX N3**: Pacotes transmitidos para gNB/eNodeB

Interface N6 (conectividade da Rede de Dados):

- **RX N6**: Pacotes recebidos da rede de dados (Internet/IMS)
- **TX N6**: Pacotes transmitidos para a rede de dados

Total: Contagem agregada de pacotes através das interfaces

Uso: Monitorar o equilíbrio de tráfego e problemas específicos de interface

Casos de Uso

Monitorar Carga de Tráfego:

1. Verifique as taxas de pacotes RX/TX
2. Verifique se o tráfego está fluindo em ambas as direções
3. Compare o tráfego N3 vs N6 (deve ser aproximadamente igual)

Detectar Quedas de Pacotes:

1. Verifique o contador de pacotes descartados
2. Revise o contador de pacotes descartados do XDP
3. Investigue a causa nos logs se as quedas forem altas

Análise de Desempenho:

1. Monitore a razão de pacotes processados vs. passados
2. Verifique se há abortos do XDP (indica erros)
3. Verifique a distribuição de tráfego das interfaces N3/N6

Planejamento de Capacidade:

1. Rastreie a taxa de pacotes ao longo do tempo
2. Compare com os limites de capacidade do UPF
3. Planeje escalonamento se estiver se aproximando dos limites

Atualizações em Tempo Real

As estatísticas atualizam automaticamente a cada 5 segundos.

Monitoramento de Capacidade

URL: `/capacity`

Recursos

A visualização de Capacidade exibe o uso de mapas eBPF e limites de capacidade para todos os mapas no datapath do UPF.

Tabela de Uso de Mapas eBPF

Tabela de todos os mapas eBPF com informações de uso:

Coluna	Descrição
Nome do Mapa	Nome do mapa eBPF (por exemplo, `uplink_pdr_map`, `far_map`)
Usado	Número de entradas atualmente no mapa
Capacidade	Máximo de entradas permitidas no mapa
Uso	Barra de progresso visual com porcentagem
Tamanho da Chave	Tamanho das chaves do mapa em bytes
Tamanho do Valor	Tamanho dos valores do mapa em bytes

Indicadores de Uso Coloridos

A barra de progresso de uso é colorida com base na utilização:

- **Verde (<50%)**: Operação normal, capacidade ampla
- **Amarelo (50-70%)**: Cuidado, monitorar crescimento
- **Âmbar (70-90%)**: Aviso, planejar aumento de capacidade
- **Vermelho (>90%)**: Crítico, ação imediata necessária

Mapas Críticos para Monitorar

uplink_pdr_map:

- Armazena PDRs de uplink indexados por TEID
- Uma entrada por fluxo de tráfego de uplink
- **Crítico**: A exaustão impede o estabelecimento de novas sessões

downlink_pdr_map / **downlink_pdr_map_ip6**:

- Armazena PDRs de downlink indexados por endereço IP da UE

- Uma entrada por endereço IPv4/IPv6 da UE
- **Crítico**: A exaustão impede o estabelecimento de novas sessões

far_map:

- Armazena regras de ação de encaminhamento indexadas por FAR ID
- Compartilhado entre vários PDRs
- **Alta Prioridade**: Afeta decisões de encaminhamento

qer_map:

- Armazena regras de aplicação de QoS indexadas por QER ID
- **Prioridade Média**: Afeta QoS, mas não conectividade básica

urr_map:

- Armazena regras de relatório de uso indexadas por URR ID
- **Baixa Prioridade**: Afeta cobrança, mas não conectividade

Casos de Uso

Planejamento de Capacidade:

1. Monitore tendências de uso de mapas ao longo do tempo
2. Identifique quais mapas estão crescendo mais rápido
3. Planeje aumentos de capacidade antes de atingir limites

Prevenir Falhas de Estabelecimento de Sessão:

1. Verifique o uso do mapa PDR antes de um aumento esperado de tráfego
2. Aumente a capacidade do mapa se estiver se aproximando dos limites
3. Monitore após o aumento de capacidade para verificar

Solução de Problemas de Falhas de Sessão:

1. Quando o estabelecimento da sessão falhar, verifique a visualização de Capacidade
2. Se os mapas PDR estiverem vermelhos (>90%), a capacidade está esgotada

3. Aumente a capacidade do mapa ou limpe sessões obsoletas

Otimizar Configuração de Mapas:

1. Revise tamanhos de chave e valor
2. Calcule o uso de memória por mapa
3. Otimize tamanhos de mapa com base em padrões de uso reais

Configuração de Capacidade

As capacidades dos mapas eBPF são configuradas na inicialização do UPF no arquivo de configuração do UPF. Valores típicos:

- Implantação pequena: 10.000 - 100.000 entradas por mapa
- Implantação média: 100.000 - 1.000.000 entradas por mapa
- Implantação grande: 1.000.000+ entradas por mapa

Cálculo de Memória:

```
Memória do Mapa = (Tamanho da Chave + Tamanho do Valor) × Capacidade
```

Por exemplo, um mapa PDR com 1 milhão de entradas e valores de 64 bytes usa aproximadamente 64 MB de memória do kernel.

Atualizações em Tempo Real

A visualização de capacidade atualiza automaticamente a cada 10 segundos.

Visualização de Configuração

URL: `/upf_config`

Recursos

A visualização de Configuração exibe parâmetros operacionais do UPF e configuração do dataplane.

Configuração do UPF

Exibe a configuração estática do UPF:

- **Interface PFCP**: Endereço IP e porta para conectividade SMF/PGW-C
- **Interface N3**: Endereço IP para conectividade RAN (gNB/eNodeB)
- **Interface N6**: Endereço IP para conectividade da rede de dados
- **Interface N9**: Endereço IP para comunicação inter-UPF (opcional)
- **Porta da API**: Porta de escuta da API REST
- **Versão**: Versão do software OmniUPF

Configuração do Dataplane (eBPF)

Exibe parâmetros ativos do dataplane em tempo de execução:

- **Endereço N3 Ativo**: Ligação da interface N3 em tempo de execução
- **Endereço N9 Ativo**: Ligação da interface N9 em tempo de execução (se habilitada)

Esses valores refletem a configuração real do datapath eBPF e podem diferir da configuração estática se as interfaces foram alteradas.

Casos de Uso

Verificar Conectividade do UPF:

1. Verifique se o IP da interface N3 corresponde à configuração do gNB
2. Verifique se a interface N6 pode rotear para a rede de dados
3. Confirme se a interface PFCP é acessível a partir do SMF

Solução de Problemas de Problemas de Interface:

1. Compare a configuração estática com os endereços ativos do dataplane

2. Verifique se as interfaces estão vinculadas corretamente
3. Verifique se houve alterações na configuração da interface

Documentação e Auditoria:

1. Registre a configuração do UPF para documentação
2. Verifique se a implantação corresponde às especificações de design
3. Audite as atribuições de interface

Visualização de Rotas

URL: `/routes`

Recursos

A visualização de Rotas fornece monitoramento abrangente das rotas IP do Equipamento do Usuário (UE) e sessões de protocolo de roteamento (OSPF e BGP).

Visão Geral do Status da Rota

O painel exibe estatísticas agregadas de rotas:

- **Status**: Roteamento habilitado ou desabilitado
- **Total de Rotas**: Número total de rotas IP de UE
- **Sincronizado**: Número de rotas sincronizadas com sucesso
- **Falhou**: Número de rotas que falharam ao sincronizar

Rotas IP Ativas de UE

Tabela exibindo todas as rotas IP ativas do Equipamento do Usuário:

Coluna	Descrição
Índice	Número do índice da rota
Endereço IP da UE	Endereço IPv4 ou IPv6 atribuído à UE

Propósito:

- Visualizar todos os endereços IP de UE que têm rotas configuradas
- Verificar a distribuição de rotas para protocolos de roteamento
- Monitorar o status de sincronização de rotas

Vizinhos OSPF

Tabela de vizinhos do protocolo OSPF (Open Shortest Path First):

Coluna	Descrição
Neighbor ID	Identificador do roteador OSPF
Endereço	Endereço IP do vizinho OSPF
Interface	Interface usada para a adjacência OSPF
Estado	Estado da adjacência OSPF (Completo, Inicial, etc.)
Prioridade	Valor de prioridade OSPF
Tempo de Atividade	Duração que o vizinho está ativo
Tempo de Morte	Tempo até que o vizinho seja considerado morto

Estados OSPF:

- **Completo** (verde): Totalmente adjacente e trocando informações de roteamento
- **Outros estados** (amarelo): Adjacência em formação ou incompleta

Pares BGP

Tabela de pares BGP (Border Gateway Protocol):

Coluna	Descrição
Neighbor IP	Endereço IP do par BGP
ASN	Número do Sistema Autônomo do par
Estado	Estado da sessão BGP (Estabelecido, Ocioso, etc.)
Up/Down	Duração do estado atual
Prefixos Recebidos	Número de prefixos de rota recebidos do par
Msg Enviadas	Total de mensagens BGP enviadas ao par
Msg Recebidas	Total de mensagens BGP recebidas do par

Estados BGP:

- **Estabelecido** (verde): Sessão BGP ativa, trocando rotas
- **Outros estados** (vermelho): Sessão inativa ou em estabelecimento

O cabeçalho também exibe o ID do Roteador BGP local e ASN quando o BGP está configurado.

Rotas Redistribuídas OSPF

Tabela mostrando LSAs Externas OSPF (Link State Advertisements) para rotas de UE redistribuídas:

Coluna	Descrição
Link State ID	Identificador LSA (tipicamente o endereço da rede)
Máscara	Máscara de rede para a rota
Roteador Anunciante	ID do roteador que anuncia esta rota externa
Tipo de Métrica	Tipo de métrica externa OSPF (E1 ou E2)
Métrica	Métrica de custo OSPF para a rota
Idade	Tempo desde que a LSA foi originada (segundos)
Seq Number	Número de sequência da LSA para versionamento

Propósito:

- Verificar se as rotas de UE estão sendo redistribuídas no OSPF
- Monitorar qual roteador está anunciando rotas externas
- Rastrear a idade e atualizações da LSA

Ações de Controle de Rotas

Botão Sincronizar Rotas:

- Aciona manualmente a sincronização de rotas para o FRR (Free Range Routing)
- Força a atualização do protocolo de roteamento com as rotas atuais de UE
- Útil após alterações de configuração ou para recuperar de falhas de sincronização

Botão Atualizar:

- Atualiza manualmente todas as informações de rotas

- Atualiza vizinhos OSPF, pares BGP e tabelas de rotas

Casos de Uso

Monitorar Saúde do Protocolo de Roteamento:

1. Navegue até a visualização de Rotas
2. Verifique os estados dos vizinhos OSPF (deve ser "Completo")
3. Verifique se os pares BGP estão "Estabelecidos"
4. Confirme o número esperado de vizinhos/pares

Verificar Distribuição de Rotas de UE:

1. Verifique a tabela de Rotas IP Ativas de UE para uma UE específica
2. Role até a seção de Rotas Redistribuídas OSPF
3. Verifique se a rota de UE aparece nas LSAs externas
4. Confirme se o roteador anunciante corresponde ao UPF esperado

Solução de Problemas de Problemas de Sincronização de Rotas:

1. Verifique os contadores Sincronizados vs. Falhados na visão geral do status
2. Se as rotas estiverem falhando, clique no botão "Sincronizar Rotas"
3. Monitore mensagens de erro na faixa vermelha se a sincronização falhar
4. Verifique mensagens de erro OSPF/BGP nas seções respectivas

Verificar Implantação Multi-UPF:

1. Selecione diferentes instâncias do UPF no menu suspenso
2. Compare contagens de rotas entre instâncias
3. Verifique se os vizinhos OSPF se veem
4. Verifique relacionamentos de peering BGP

Monitorar Escalonamento de Rotas:

1. Rastreie a contagem total de rotas à medida que as sessões de UE aumentam
2. Verifique se as rotas estão sendo distribuídas para os protocolos de roteamento

3. Monitore o crescimento da contagem de LSA OSPF
4. Verifique a contagem de prefixos BGP recebidos pelos pares

Atualizações em Tempo Real

A visualização de Rotas atualiza automaticamente a cada 10 segundos para mostrar o status atual do protocolo de roteamento e as rotas de UE.

Integração de Roteamento

A visualização de Rotas se integra ao FRR (Free Range Routing) em execução no UPF:

- **OSPF**: As rotas são redistribuídas como LSAs Externas do Tipo 2
- **BGP**: As rotas são anunciadas para pares BGP configurados
- **Mecanismo de Sincronização**: Chamadas da API REST acionam comandos vtysh para atualizar o FRR

Visualização de Capacidades XDP

URL: `/xdp_capabilities`

Recursos

A visualização de Capacidades XDP exibe suporte ao modo eXpress Data Path (XDP), capacidades de desempenho e cálculos de throughput para o dataplane do UPF.

Configuração da Interface

Exibe informações sobre a interface de rede e o driver:

Campo	Descrição
Nome da Interface	Interface de rede usada para XDP (por exemplo, eth0, ens1f0)
Driver	Nome do driver de rede (por exemplo, i40e, ixgbe, virtio_net)
Versão do Driver	String da versão do driver
Modo Atual	Modo XDP ativo (DRV, SKB ou NENHUM)
Contagem de Múltiplas Filas	Número de pares de filas NIC para processamento paralelo

Modos XDP

A visualização exibe todos os modos XDP com seu status de suporte e características de desempenho:

XDP_DRV (Modo do Driver):

- **Desempenho**: ~5-10 Mpps (milhões de pacotes por segundo)
- **Descrição**: Suporte nativo ao XDP no driver, maior desempenho
- **Requer**: Driver NIC com suporte nativo ao XDP (i40e, ixgbe, mlx5, etc.)
- **Status**: Suportado se o driver tiver ganchos XDP
- **Indicador**: Marca de verificação verde (✓) se suportado, X vermelho (✗) se não

XDP_SKB (Modo Genérico):

- **Desempenho**: ~1-2 Mpps
- **Descrição**: Modo de fallback usando a pilha de rede do kernel
- **Requer**: Qualquer interface de rede
- **Status**: Sempre suportado
- **Indicador**: Marca de verificação verde (✓)

Indicador de Modo Atual:

- Ponto azul ao lado do modo XDP atualmente ativo
- Mostra qual modo está realmente em uso

Razões para Modos Não Suportados:

- Se um modo não for suportado, o campo "Razão" explica o porquê
- Razões comuns: driver sem suporte ao XDP, incompatibilidade de tipo de interface

Visualização de Capacidades XDP mostrando configuração da interface, modos suportados e o calculador interativo de throughput Mpps

Recomendações

A visualização exibe um banner de recomendação colorido com base na configuração atual:

Verde (Ótimo):

- "✓ Ótimo: Modo XDP_DRV ativado com suporte nativo do driver"
- O modo de maior desempenho está ativo

Amarelo (Aviso):

- "⚠ Considere atualizar para o modo XDP_DRV para melhor desempenho"
- Executando em modo genérico quando o modo do driver está disponível
- "⚠ Aviso: XDP_DRV não suportado por este driver"
- Limitações de hardware impedem desempenho ideal

Azul (Informativo):

- Informações gerais sobre a configuração do XDP

Calculadora de Desempenho Mpps

Calculadora interativa para converter taxa de pacotes (Mpps) em throughput (Gbps):

Parâmetros de Entrada

Taxa de Pacotes (Mpps):

- Faixa: 0,1 - 100 Mpps
- Padrão: Máximo de Mpps para o modo XDP atual
- Representa milhões de pacotes processados por segundo

Tamanho Médio do Pacote (bytes):

- Faixa: 64 - 9000 bytes
- Padrão: 1200 bytes (pacote GTP típico)
- Inclui pacote completo com encapsulação GTP

Botões de Predefinição Rápida:

- **64B (mínimo)**: Tamanho mínimo do quadro Ethernet
- **128B**: Pacotes pequenos
- **256B**: Plano de controle ou sinalização

- **512B**: Pacotes de tamanho médio
- **1024B**: Pacotes grandes
- **1518B (máximo)**: Tamanho máximo do quadro Ethernet sem quadros jumbo

Resultados do Cálculo

Throughput Total (Gbps):

- Throughput de taxa de fio incluindo todos os cabeçalhos
- Fórmula: `Gbps = Mpps × Packet_Size × 8 / 1000`
- Inclui cabeçalhos GTP, UDP, IP e Ethernet

Taxa de Dados do Usuário (Gbps):

- Throughput real da carga útil do usuário
- Exclui ~50 bytes de sobrecarga de encapsulação GTP
- Fórmula: `Gbps = Mpps × (Packet_Size - 50) / 1000`

Taxa de Pacotes:

- Exibe Mpps e pacotes/segundo com separador de milhar
- Exemplo: 10 Mpps = 10.000.000 pacotes/segundo

Exibição da Fórmula:

- Mostra a decomposição do cálculo passo a passo
- Exemplo: `10 Mpps × 1200 bytes × 8 bits/byte ÷ 1000 = 96 Gbps`

Compreendendo Mpps

A visualização inclui uma seção de explicação cobrindo:

O que é Mpps:

- Milhões de Pacotes por Segundo
- Métrica chave para desempenho de processamento de pacotes
- Independente do tamanho do pacote

Relação com Throughput:

- Mesma Mpps com pacotes maiores = maior Gbps
- Mesma Mpps com pacotes menores = menor Gbps
- Throughput depende tanto da taxa quanto do tamanho do pacote

Sobrecarga de Encapsulação GTP:

- Cabeçalho Ethernet: 14 bytes
- Cabeçalho IP: 20 bytes (IPv4) ou 40 bytes (IPv6)
- Cabeçalho UDP: 8 bytes
- Cabeçalho GTP: 8 bytes (mínimo)
- Sobrecarga total típica: ~50 bytes por pacote

Casos de Uso

Avaliar Desempenho do XDP:

1. Navegue até a visualização de Capacidades XDP
2. Verifique o modo XDP atual (deve ser DRV para melhor desempenho)
3. Observe a faixa de desempenho Mpps
4. Revise o banner de recomendação

Calcular Throughput Esperado:

1. Insira a taxa de pacotes esperada em Mpps
2. Insira o tamanho médio do pacote para seu perfil de tráfego
3. Revise o throughput calculado em Gbps
4. Compare com a capacidade do link ou requisitos de desempenho

Otimizar Configuração do XDP:

1. Verifique se o modo XDP_DRV é suportado, mas não está ativo
2. Revise a versão do driver e a compatibilidade
3. Siga a recomendação para atualizar para o modo do driver, se disponível
4. Verifique se a contagem de múltiplas filas corresponde aos núcleos da CPU

Planejamento de Capacidade:

1. Use a calculadora para determinar Mpps necessário para throughput alvo
2. Compare com as capacidades do modo XDP atual
3. Determine se é necessária atualização de hardware
4. Planeje seleção de interface e driver para novas implantações

Solução de Problemas de Problemas de Desempenho:

1. Verifique se o modo XDP é DRV, não SKB
2. Verifique a versão do driver para problemas de desempenho conhecidos
3. Verifique se a contagem de múltiplas filas é suficiente
4. Calcule se o modo atual suporta o throughput necessário

Dicas de Otimização de Desempenho

Modo do Driver (XDP_DRV):

- Use NICs com suporte nativo ao XDP (Intel i40e/ixgbe, Mellanox mlx5)
- Atualize os drivers NIC para a versão mais recente
- Ative múltiplas filas (RSS) para processamento paralelo
- Ajuste os tamanhos do buffer de anel NIC

Modo Genérico (XDP_SKB):

- Aceitável para desenvolvimento e teste
- Não recomendado para produção de alto throughput
- Considere atualização de hardware para implantações de produção

Configuração de Múltiplas Filas:

- O número de filas deve corresponder ou exceder a contagem de núcleos da CPU
- Permite processamento paralelo de pacotes entre núcleos
- Distribui carga via RSS (Receive Side Scaling)

Atualizações em Tempo Real

A visualização de Capacidades XDP atualiza a cada 30 segundos para atualizar o status da interface e informações de modo.

Visualizador de Logs

URL: `/logs`

Recursos

Visualize os logs da aplicação OmniUPF em tempo real a partir do painel de controle.

Recursos:

- Streaming de logs ao vivo via Phoenix LiveView
- Atualizações em tempo real à medida que os logs são gerados
- Histórico de logs rolável
- Útil para solução de problemas durante sessões ativas

Níveis de Log

Os logs do OmniUPF usam níveis padrão do Elixir Logger:

- **DEBUG**: Informações diagnósticas detalhadas
- **INFO**: Mensagens informativas gerais (padrão)
- **WARNING**: Mensagens de aviso para problemas não críticos
- **ERROR**: Mensagens de erro para falhas

Casos de Uso

Solução de Problemas de Estabelecimento de Sessão:

1. Abra a visualização de Logs
2. Inicie o estabelecimento de sessão a partir do SMF

3. Observe os logs de mensagens PFCP e quaisquer erros

Monitorar Comunicação PFCP:

1. Visualize mensagens de configuração de associação PFCP
2. Acompanhe a criação/modificação/exclusão de sessões
3. Verifique mensagens de heartbeat

Depurar Problemas de Encaminhamento:

1. Procure por erros de processamento de pacotes
2. Verifique logs de operação do mapa eBPF
3. Identifique problemas de configuração de FAR/PDR

Melhores Práticas

Diretrizes Operacionais

Monitoramento:

- Verifique regularmente a visualização de Capacidade para evitar exaustão de mapas
- Monitore Estatísticas para padrões de tráfego incomuns ou quedas
- Rastreie o crescimento da contagem de sessões ao longo do tempo
- Fique atento a erros de processamento do XDP

Gerenciamento de Buffers:

- Monitore buffers durante cenários de transferência
- Limpe buffers presos se os pacotes ultrapassarem o TTL
- Verifique se o buffering está desativado após a conclusão da transferência
- Use "Flush" em vez de "Clear" para evitar perda de pacotes

Gerenciamento de Sessões:

- Use filtros para localizar rapidamente sessões específicas de UE
- Expanda sessões para verificar a configuração da regra

- Compare sessões entre várias instâncias do UPF
- Verifique o indicador de saúde antes de solucionar problemas

Solução de Problemas:

- Use Logs para depuração em tempo real
- Verifique a visualização de Sessões para verificar a conectividade da UE
- Verifique a configuração de Regras para fluxos de tráfego
- Monitore Estatísticas para quedas de pacotes ou erros de encaminhamento

Desempenho

- A atualização automática do painel é de 5-10 segundos, dependendo da visualização
- Listas grandes de sessões podem levar tempo para carregar
- A visualização de regras filtra por entradas ativas (volumes diferentes de zero para URRs)
- As operações de buffer são executadas imediatamente no UPF selecionado

Documentação Relacionada

- **Guia de Gerenciamento de Regras** - Configuração de PDR, FAR, QER, URR
- **Guia de Monitoramento** - Estatísticas, métricas e planejamento de capacidade
- **Referência de Métricas** - Referência completa de métricas do Prometheus
- **Códigos de Causa PFCP** - Códigos de erro PFCP e diagnósticos de sessão
- **Documentação da API** - Referência da API REST e paginação
- **Guia de Rotas** - Detalhes sobre roteamento de UE e integração FRR
- **Guia de Modos XDP** - Documentação detalhada sobre modos XDP e informações eBPF
- **Guia de Solução de Problemas** - Problemas comuns e diagnósticos
- **Guia de Operações do UPF** - Operações gerais do UPF e arquitetura

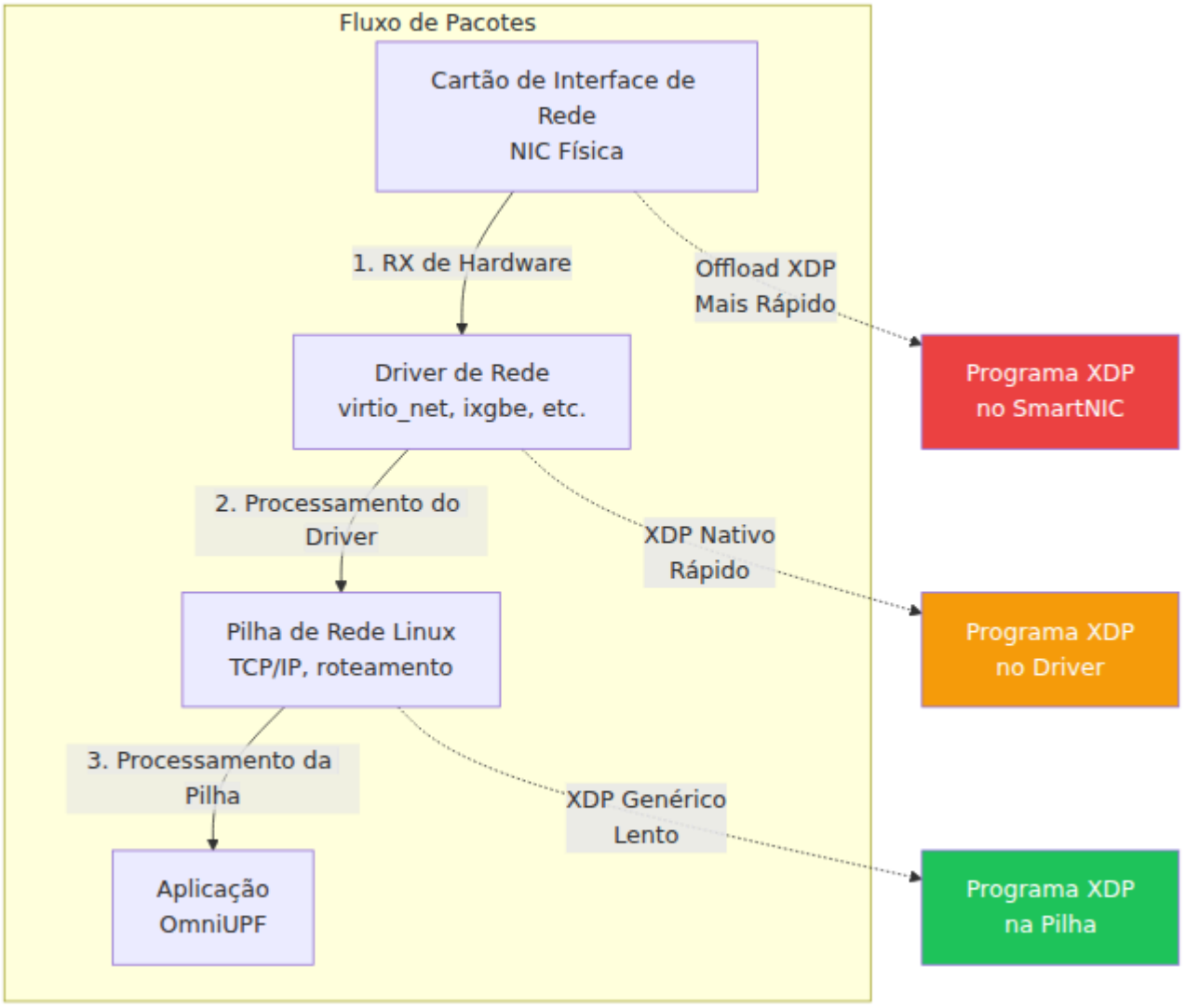
Modos de Anexação XDP para OmniUPF

Índice

Visão Geral

OmniUPF utiliza **XDP (eXpress Data Path)** para processamento de pacotes de alto desempenho. O XDP é uma tecnologia do kernel Linux que permite que programas de processamento de pacotes (eBPF) sejam executados no ponto mais cedo possível na pilha de rede, proporcionando latência em nível de microssegundos e milhões de pacotes por segundo de throughput.

O modo de anexação XDP determina **onde** no caminho do pacote o programa eBPF é executado:



Escolher o modo XDP correto impacta significativamente o desempenho do OmniUPF e determina se você pode alcançar um processamento de pacotes em nível de produção.

Comparação de Modos XDP

Aspecto	Modo Genérico	Modo Nativo	Modo Offload
Ponto de Anexação	Pilha de rede Linux	Driver de rede	Hardware NIC
Desempenho	~1-2 Mpps	~5-10 Mpps	~10-40 Mpps
Latência	~100 µs	~10 µs	~1 µs
Uso de CPU	Alto	Médio	Baixo
Requisitos de NIC	Qualquer NIC	Driver compatível com XDP	SmartNIC com suporte a XDP
Suporte a Hipervisores	Todos os hipervisores	A maioria (requer multi-queue)	Raro (PCI passthrough)
Caso de Uso	Testes, desenvolvimento	**Produção (recomendado)**	Sites de borda de alto throughput
Configuração	`xdp_attach_mode: generic`	`xdp_attach_mode: native`	`xdp_attach_mode offload`

Recomendação: Use **modo nativo** para implantações em produção. O modo genérico é adequado apenas para testes.

Modo Genérico (Padrão)

Descrição

O XDP genérico executa o programa eBPF na pilha de rede Linux **após** o driver ter processado o pacote. Este é o modo XDP mais lento, mas funciona com

qualquer interface de rede.

Características de Desempenho

- **Throughput**: ~1-2 milhões de pacotes por segundo (Mpps)
- **Latência**: ~100 microssegundos por pacote
- **Sobrecarga de CPU**: Alta (pacote copiado para a pilha do kernel antes do XDP)

Quando Usar

- **Apenas desenvolvimento e testes**
- **Ambientes de laboratório** onde o desempenho não importa
- **Implantação inicial** para verificar a funcionalidade antes de otimizar

Configuração

```
# config.yaml
interface_name: [eth0]
xdp_attach_mode: generic  # Modo padrão
```

Aviso: O modo genérico **não é adequado para produção**. Ele causará gargalos em altas taxas de pacotes e desperdiçará recursos de CPU.

Modo Nativo (Recomendado para Produção)

Descrição

O XDP nativo executa o programa eBPF **dentro do driver de rede**, antes que os pacotes cheguem à pilha de rede Linux. Isso fornece desempenho próximo ao hardware, mantendo a flexibilidade em nível de kernel.

Características de Desempenho

- **Throughput**: ~5-10 milhões de pacotes por segundo (Mpps) por núcleo
- **Latência**: ~10 microssegundos por pacote
- **Sobrecarga de CPU**: Baixa (pacote processado no nível do driver)
- **Escalonamento**: Escalonamento linear com núcleos de CPU e filas de NIC

Quando Usar

- **Implantações em produção** (recomendado)
- **Redes de grau de transportadora** que requerem alto throughput
- **Cenários de computação em borda** com requisitos de desempenho
- **Qualquer implantação** onde o desempenho importa

Requisitos do Driver NIC

O XDP nativo requer um driver de rede com suporte a XDP. A maioria das NICs modernas suporta XDP nativo:

NICs Físicas (bare metal):

- Intel: `ixgbe` (10G), `i40e` (40G), `ice` (100G)
- Broadcom: `bnxt_en`
- Mellanox: `mlx4_en`, `mlx5_core`
- Netronome: `nfp` (com suporte a offload)
- Marvell: `mvneta`, `mvpp2`

NICs Virtuais (hipervisores):

- VirtIO: `virtio_net` (KVM, Proxmox, OpenStack) ✓
- VMware: `vmxnet3` ✓
- Microsoft: `hv_netvsc` (Hyper-V) ✓
- Amazon: `ena` (AWS) ✓
- SR-IOV: `ixgbevf`, `i40evf` (PCI passthrough) ✓

Nota: O VirtualBox **não** suporta XDP nativo (use apenas o modo genérico).

Configuração

```
# config.yaml
interface_name: [eth0]
xdp_attach_mode: native
```

Requisito de Multi-Queue: Para desempenho ideal, habilite multi-queue em NICs virtuais (veja a seção do Proxmox abaixo).

Modo Offload (SmartNIC)

Descrição

O Offload XDP executa o programa eBPF **diretamente no hardware da NIC** (SmartNIC), contornando completamente a CPU para o processamento de pacotes. Isso fornece o desempenho mais alto, mas requer hardware especializado.

Características de Desempenho

- **Throughput**: ~10-40 milhões de pacotes por segundo (Mpps)
- **Latência**: ~1 microssegundo por pacote
- **Sobrecarga de CPU**: Quase zero (processamento na NIC)

Quando Usar

- **Implantações de ultra-alto throughput** (10G+ por instância de UPF)
- **Sites de borda** com aceleração de hardware
- **Implantações sensíveis a custo** (reduzir requisitos de CPU)

Requisitos de Hardware

Apenas as SmartNICs Netronome Agilio atualmente suportam offload XDP:

- Netronome Agilio CX 10G/25G/40G/100G

Nota: O modo offload requer **bare metal** ou **PCI passthrough** - não disponível em configurações padrão de VM.

Configuração

```
# config.yaml
interface_name: [eth0]
xdp_attach_mode: offload
```

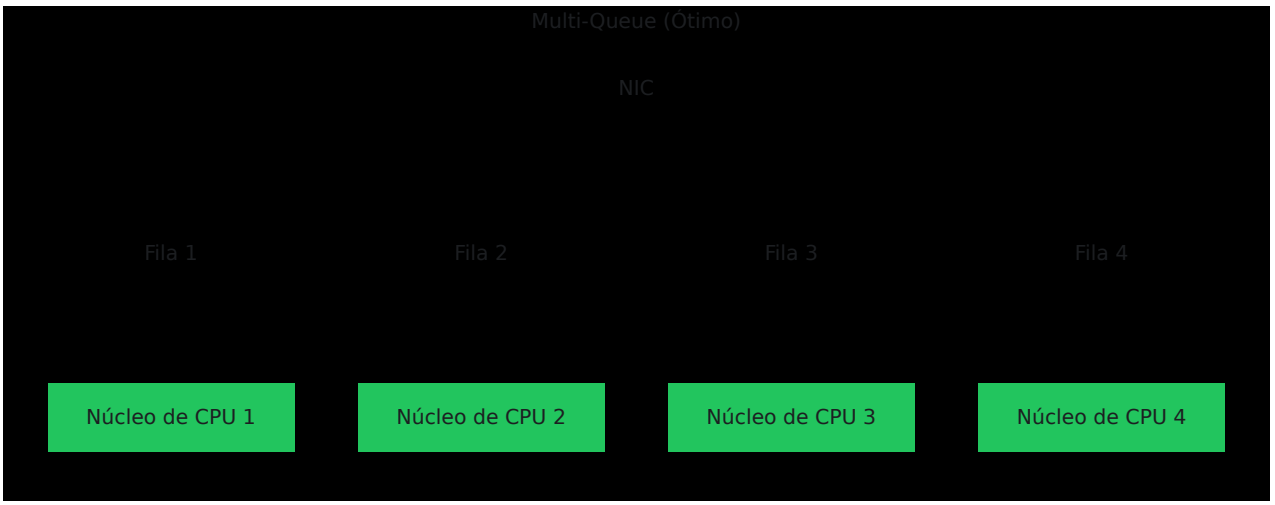
Habilitando XDP Nativo no Proxmox VE

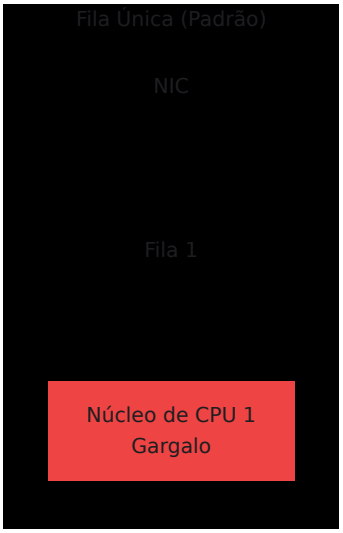
O Proxmox VE utiliza dispositivos de rede **VirtIO** para VMs, que suportam XDP nativo através do driver `virtio_net`. No entanto, você deve habilitar **multi-queue** para desempenho ideal.

Passo 1: Compreendendo o Requisito

Por que Multi-Queue Importa:

- **Fila única** (padrão): Todo o tráfego de rede processado por um núcleo de CPU → gargalo
- **Multi-queue**: Tráfego distribuído entre múltiplos núcleos de CPU → escalonamento linear





Passo 2: Habilitar Multi-Queue no Proxmox

Opção A: Através da Interface Web do Proxmox

1. **Desligue completamente a VM** (não apenas reinicie)
    - Selecione sua VM na interface web do Proxmox
    - Clique em **Desligar**
2. **Edite o Dispositivo de Rede**
    - Vá para a aba **Hardware**
    - Clique no seu dispositivo de rede (por exemplo, `net0`)
    - Clique em **Editar**
3. **Defina Multi-Queue**

- Encontre o campo **"Multiqueue"**
- Defina para **8** (ou corresponda à sua contagem de vCPU, máximo 16)
- Clique em **OK**

4. **Inicie a VM**
   - Clique em **Iniciar**

Opção B: Através da Linha de Comando do Proxmox

```
# SSH no seu host Proxmox

# Encontre o ID da sua VM
qm list

# Defina multi-queue (substitua XXX pelo seu ID da VM)
qm set XXX -net0 virtio=XX:XX:XX:XX:XX:XX,bridge=vmbr0,queues=8

# Exemplo para a VM 191 com MAC BC:24:11:1D:BA:00
qm set 191 -net0 virtio=BC:24:11:1D:BA:00,bridge=vmbr0,queues=8

# Desligue a VM
qm shutdown XXX

# Aguarde o desligamento, depois inicie
qm start XXX
```

Recomendações de Contagem de Filas:

- **4 filas**: Mínimo para produção (bom para VMs de 2-4 vCPU)
- **8 filas**: Recomendado para a maioria das implantações (4-8 vCPU)
- **16 filas**: Máximo para alto desempenho (8+ vCPU)

Passo 3: Verificar Multi-Queue Dentro da VM

Após a reinicialização da VM, faça SSH na VM e verifique:

```
# Verifique a configuração da fila
ethtool -l eth0

# Saída esperada:
# Parâmetros de canal para eth0:
# Combinado:    8        <-- Deve corresponder ao seu valor
configurado

# Conte as filas reais
ls -1d /sys/class/net/eth0/queues/rx-* | wc -l
ls -1d /sys/class/net/eth0/queues/tx-* | wc -l

# Ambos devem mostrar 8 (ou seu valor configurado)
```

Passo 4: Habilitar XDP Nativo no OmniUPF

Edite a configuração do OmniUPF:

```
# Edite o arquivo de configuração
sudo nano /config.yaml
```

Altere o modo XDP:

```
# Antes
xdp_attach_mode: generic

# Depois
xdp_attach_mode: native
```

Reinicie o OmniUPF:

```
sudo systemctl restart omniupf
```

Passo 5: Verificar se o XDP Nativo Está Ativo

Verifique os logs:

```
# Veja os logs de inicialização
journalctl -u omniupf --since "1 minuto atrás" | grep -i
"xdp\|attach"

# Saída esperada:
# xdp_attach_mode:native
# XDPAttachMode:native
# Programa XDP anexado à iface "eth0" (índice 2)
```

Verifique via API:

```
# Consultar configuração
curl -s http://localhost:8080/api/v1/config | grep xdp_attach_mode

# Saída esperada:
# "xdp_attach_mode": "native",
```

Problemas Comuns no Proxmox

Problema: "Falha ao anexar o programa XDP"

Solução:

- Verifique se o multi-queue está habilitado (`ethtool -l eth0`)
- Verifique a versão do kernel: `uname -r` (deve ser ≥ 5.15)
- Certifique-se de que o driver VirtIO está carregado: `lsmod | grep virtio_net`

Problema: Apenas 1 fila apesar da configuração

Solução:

- A VM deve estar **totalmente desligada** (não reiniciada) para alterações na fila
- Use `qm shutdown XXX && sleep 5 && qm start XXX`
- Verifique na configuração do Proxmox: `grep net0 /etc/pve/qemu-server/XXX.conf`

Problema: Desempenho não melhora com o modo nativo

Solução:

- Verifique o pinning de CPU (evite superposição)
- Monitore `top` - o uso da CPU deve se espalhar entre os núcleos
- Verifique as estatísticas do XDP: `curl http://localhost:8080/api/v1/xdp_stats`

Habilitando XDP Nativo em Outros Hipervisores

VMware ESXi / vSphere

O VMware usa o driver `vmxnet3`, que suporta XDP nativo.

Requisitos:

- ESXi 6.7 ou posterior
- versão do driver vmxnet3 1.4.16+ na VM
- versão de hardware da VM 14 ou posterior

Habilitar Multi-Queue:

1. **Desligue a VM**
2. **Edite as configurações da VM**:
    - Clique com o botão direito na VM → Editar Configurações
    - Adaptador de Rede → Avançado
    - Defina **Receive Side Scaling** como **Habilitado**
3. **Edite o arquivo .vmx** (opcional, para mais filas):

```
ethernet0.pnicFeatures = "4"
ethernet0.multiqueue = "8"
```

4. **Inicie a VM e verifique**:

```
ethtool -l ens192  # Verifique a contagem de filas
```

Configure o OmniUPF:

```
interface_name: [ens192]  # O VMware geralmente usa ens192
xdp_attach_mode: native
```

KVM / libvirt (Raw)

Habilitar Multi-Queue via virsh:

```
# Edite a configuração da VM
virsh edit seu-nome-de-vm
```

Adicione à seção do interface de rede:

```
<interface type='network'>
  <source network='default'/>
  <model type='virtio'/>
  <driver name='vhost' queues='8'/>
</interface>
```

Reinicie a VM e verifique:

```
ethtool -l eth0
```

Microsoft Hyper-V

O Hyper-V usa o driver `hv_netvsc`, que suporta XDP nativo.

Requisitos:

- Windows Server 2016 ou posterior
- Linux Integration Services 4.3+ na VM
- VM de Geração 2

Habilitar Multi-Queue:

PowerShell no host Hyper-V:

```
# Definir VMQ (Virtual Machine Queue) - multi-queue do Hyper-V
Set-VMNetworkAdapter -VMName "SuaVM" -VrssEnabled $true -
VmmqEnabled $true
```

Configure o OmniUPF:

```
interface_name: [eth0]
xdp_attach_mode: native
```

VirtualBox

Aviso: O VirtualBox **NÃO** suporta XDP nativo.

Razão: Os drivers de rede do VirtualBox (e1000, virtio-net) não implementam ganchos XDP.

Solução alternativa: Use apenas o modo genérico:

```
xdp_attach_mode: generic  # Única opção para VirtualBox
```

Verificando o Modo XDP

Após configurar o XDP nativo, verifique se está funcionando corretamente:

1. Verifique os Logs do OmniUPF

```
# Veja os logs recentes
journalctl -u omniupf --since "5 minutos atrás" | grep -i xdp

# Procure por:
# ✓ "xdp_attach_mode:native"
# ✓ "Programa XDP anexado à iface"
# ✗ "Falha ao anexar" ou "retornando ao genérico"
```

2. Verifique via API

```
# Consultar o endpoint de configuração
curl -s http://localhost:8080/api/v1/config | jq .xdp_attach_mode

# Saída esperada:
# "native"
```

3. Verifique as Estatísticas do XDP

```
# Veja as estatísticas de processamento do XDP
curl -s http://localhost:8080/api/v1/xdp_stats | jq

# Saída de exemplo:
{
  "xdp_aborted": 0,      # Deve ser 0 (erros)
  "xdp_drop": 1234,      # Pacotes descartados
  "xdp_pass": 5678,      # Passou para a pilha
  "xdp_redirect": 9012,  # Pacotes redirecionados
  "xdp_tx": 3456         # Pacotes transmitidos
}
```

4. Verifique o Suporte do Driver

```
# Verifique se o driver suporta XDP
ethtool -i eth0 | grep driver

# Para Proxmox/KVM: Deve mostrar "virtio_net"
# Para VMware: Deve mostrar "vmxnet3"
# Para Hyper-V: Deve mostrar "hv_netvsc"
```

5. Teste de Desempenho

Compare o processamento de pacotes antes e depois:

```
# Monitore a taxa de pacotes
watch -n 1 'curl -s http://localhost:8080/api/v1/packet_stats | jq
.rx_packets'

# Modo genérico: ~1-2 Mpps
# Modo nativo: ~5-10 Mpps (melhoria de 5-10x)
```

Resolvendo Problemas com XDP

Problema: "Falha ao anexar o programa XDP" na Inicialização

Sintomas:

```
Erro: falha ao anexar o programa XDP à interface eth0
```

Diagnóstico:

1. **Verifique o suporte do driver**:

```
ethtool -i eth0 | grep driver

# Se o driver não for virtio_net/vmxnet3/hv_netvsc, o XDP
nativo não funcionará
```

2. **Verifique a versão do kernel**:

```
uname -r

# Deve ser >= 5.15 para suporte confiável ao XDP
```

3. **Verifique se há programas XDP existentes**:

```
ip link show eth0 | grep xdp

# Se outro programa XDP estiver anexado, descarregue-o primeiro
ip link set dev eth0 xdp off
```

Solução:

- Atualize o kernel para 5.15+ se mais antigo
- Certifique-se de que o driver virtio_net está carregado: `modprobe virtio_net`
- Retorne ao modo genérico se o driver não suportar XDP nativo

---

Problema: Modo Nativo Retorna ao Genérico

Sintomas:

```
Aviso: retornando ao modo XDP genérico
```

Diagnóstico:

Verifique `dmesg` para erros do driver:

```
dmesg | grep -i xdp | tail -20
```

Causas comuns:

1. **Driver não suporta XDP nativo**:
   - Drivers do VirtualBox (sem suporte a XDP nativo)
   - Drivers de NIC mais antigos
2. **Multi-queue não habilitado**:
   - Verifique: `ethtool -l eth0`
   - Deve mostrar > 1 fila combinada
3. **Suporte XDP no kernel desabilitado**:

```
# Verifique se o XDP está habilitado no kernel
grep XDP /boot/config-$(uname -r)

# Deve mostrar:
# CONFIG_XDP_SOCKETS=y
# CONFIG_BPF=y
```

Solução:

- Habilite multi-queue (veja a seção do Proxmox)
- Atualize para um driver suportado
- Recompile o kernel com suporte a XDP, se necessário

Problema: Desempenho Não Melhora com o Modo Nativo

Sintomas: Modo nativo habilitado, mas a taxa de pacotes é a mesma do modo genérico

Diagnóstico:

1. **Verifique a distribuição do multi-queue**:

```
# Verifique as estatísticas por fila
ethtool -S eth0 | grep rx_queue

# O tráfego deve ser distribuído entre múltiplas filas
```

2. **Verifique a utilização da CPU**:

```
# Monitore o uso da CPU por núcleo
mpstat -P ALL 1

# Deve-se ver carga distribuída entre múltiplas CPUs
```

3. **Verifique se o XDP está realmente rodando no modo nativo**:

```
# Verifique bpftool (se disponível)
sudo bpftool net list

# Deve mostrar XDP anexado à interface
```

Solução:

- Aumente a contagem de filas (8-16 filas)
- Habilite o pinning de CPU para evitar migração de núcleo
- Verifique a superposição de CPU no hipervisor

Problema: Programa XDP Abortado (xdp_aborted > 0)

Sintomas:

```
curl http://localhost:8080/api/v1/xdp_stats
{
  "xdp_aborted": 1234,  # Não zero indica erros
  ...
}
```

Diagnóstico:

XDP abortado significa que o programa eBPF encontrou um erro durante a execução.

1. **Verifique os logs do verificador eBPF**:

   ```
   dmesg | grep -i bpf | tail -20
   ```

2. **Verifique os limites de tamanho do mapa**:

   ```
   # Os mapas eBPF podem estar cheios
   curl http://localhost:8080/api/v1/map_info

   # Procure mapas com 100% de capacidade
   ```

Solução:

- Aumente os tamanhos dos mapas eBPF na configuração
- Verifique pacotes corrompidos que causam erros no eBPF
- Verifique se o suporte eBPF do kernel Linux está completo

Problema: Multi-Queue Não Funciona no Proxmox

Sintomas: `ethtool -l eth0` mostra apenas 1 fila apesar da configuração

Diagnóstico:

1. **Verifique a configuração da VM do Proxmox**:

```
# No host Proxmox
grep net0 /etc/pve/qemu-server/YOUR_VM_ID.conf

# Deve mostrar: queues=8
```

2. **Verifique se a VM estava totalmente desligada**:

```
# No host Proxmox
qm status YOUR_VM_ID

# Deve mostrar "status: stopped" antes de iniciar
```

Solução:

```
# No host Proxmox
# Desligue a força e reinicie
qm shutdown YOUR_VM_ID
sleep 10
qm start YOUR_VM_ID

# Então verifique dentro da VM
ethtool -l eth0
```

Importante: Alterações na contagem de filas requerem um **desligamento completo da VM**, não apenas uma reinicialização de dentro da VM.

Problema: Permissão Negada ao Anexar XDP

Sintomas:

```
Erro: permissão negada ao anexar o programa XDP
```

Diagnóstico:

As operações XDP requerem as capacidades `CAP_NET_ADMIN` e `CAP_SYS_ADMIN`.

Solução:

1. **Execute o OmniUPF como root** (ou com capacidades):

   ```
   sudo systemctl restart omniupf
   ```

2. **Se estiver usando systemd**, verifique se o arquivo de serviço tem capacidades:

   ```
   # /lib/systemd/system/omniupf.service
   [Service]
   CapabilityBoundingSet=CAP_NET_ADMIN CAP_SYS_ADMIN CAP_NET_RAW
   AmbientCapabilities=CAP_NET_ADMIN CAP_SYS_ADMIN CAP_NET_RAW
   ```

3. **Se estiver usando Docker**, execute com `--privileged`:

   ```
   docker run --privileged -v /sys/fs/bpf:/sys/fs/bpf ...
   ```

Resumo do Impacto no Desempenho

Comparação de desempenho no mundo real para o processamento de pacotes do OmniUPF:

Cenário	Modo Genérico	Modo Nativo	Melhoria
Taxa de Pacotes	1.5 Mpps	8.2 Mpps	**5.5x mais rápido**
Latência	95 µs	12 µs	**8x menor**
Uso de CPU (1 Gbps)	85% (1 núcleo)	15% (distribuído)	**5x mais eficiente**
Throughput Máximo	~1.2 Gbps	~10 Gbps	**8x maior**

Recomendação: Sempre use **modo nativo** com **multi-queue habilitado** para implantações em produção.

Recomendações de Hardware para XDP

⚠ **IMPORTANTE: Antes de comprar qualquer hardware, consulte o suporte da Omnitouch para confirmar que é 100% compatível com sua configuração e requisitos de implantação específicos.**

NICs Conhecidas que Suportam XDP Nativo

Estas NICs foram verificadas para suportar o modo XDP nativo com OmniUPF:

NICs Intel (Recomendadas para Bare Metal)

Modelo	Velocidade	Driver	Suporte a XDP	Notas
Intel X520	10GbE	ixgbe	Nativo ✓	Comprovada, amplamente disponível, bom preço/desempenho
Intel X710	10/40GbE	i40e	Nativo ✓	Excelente suporte a multi-queue
Intel E810	100GbE	ice	Nativo ✓	Última geração, melhor desempenho
Intel i350	1GbE	igb	Nativo ✓ (kernel 5.10+)	Bom para necessidades de largura de banda mais baixa

NICs Mellanox/NVIDIA (Alto Desempenho)

Modelo	Velocidade	Driver	Suporte a XDP	Notas
ConnectX-4	25/50/100GbE	mlx5	Nativo ✓	Alto throughput, bom para computação em borda
ConnectX-5	25/50/100GbE	mlx5	Nativo ✓	Excelente desempenho, aceleração de hardware
ConnectX-6	50/100/200GbE	mlx5	Nativo ✓	Última geração, melhor para ultra-alto throughput
BlueField-2	100/200GbE	mlx5	Nativo ✓	SmartNIC com capacidades de DPU

NICs Broadcom

Modelo	Velocidade	Driver	Suporte a XDP	Notas
Série BCM57xxx	10/25/50GbE	bnxt_en	Nativo ✓	Comum em servidores Dell/HP

NICs Virtuais (Implantações de VM)

Plataforma	Tipo de NIC	Driver	Suporte a XDP	Multi-Queue	N
Proxmox/KVM	VirtIO	virtio_net	Nativo ✓	Sim (configurável)	**Melh VMs**
VMware ESXi	vmxnet3	vmxnet3	Nativo ✓	Sim	Requ 6.7+
Hyper-V	NIC Sintética	hv_netvsc	Nativo ✓	Sim	Wind Serve 2016
AWS	ENA	ena	Nativo ✓	Sim	Instâ meta
VirtualBox	Qualquer	vários	Apenas genérico	Não	Não recon para produ

NICs com Suporte a Offload de Hardware

Offload XDP verdadeiro (eBPF roda na NIC):

Fornecedor	Modelo	Velocidade	Notas
Netronome	Agilio CX 10G	10GbE	Apenas suporte a offload XDP confirmado
Netronome	Agilio CX 25G	25GbE	Requer firmware especial
Netronome	Agilio CX 40G	40GbE	Muito caro (~$2,500-5,000)
Netronome	Agilio CX 100G	100GbE	Apenas para empresas

Nota: NICs de offload de hardware são raras, caras e requerem implantação bare metal. A maioria das implantações deve usar XDP nativo em vez disso.

Configurações Testadas

Estas configurações foram verificadas com OmniUPF em produção:

Opção de Orçamento (1-10 Gbps)

- **NIC**: Intel X520 (10GbE de porta dupla)
- **Modo**: XDP Nativo
- **Throughput**: ~8-10 Gbps por instância de UPF
- **Custo**: ~$100-200 (usado/refurbished)

Faixa Intermediária (10-50 Gbps)

- **NIC**: Intel X710 (40GbE) ou Mellanox ConnectX-4 (25GbE)
- **Modo**: XDP Nativo
- **Throughput**: ~25-40 Gbps por instância de UPF
- **Custo**: ~$300-800

Alto Desempenho (50-100+ Gbps)

- **NIC**: Mellanox ConnectX-5/6 (100GbE)
- **Modo**: XDP Nativo
- **Throughput**: ~80-100 Gbps por instância de UPF
- **Custo**: ~$1,000-2,500

Implantações de VM (Proxmox/KVM)

- **NIC**: VirtIO com 8-16 filas
- **Modo**: XDP Nativo
- **Throughput**: ~5-10 Gbps por instância de UPF
- **Custo**: Sem custo adicional de hardware

O Que NÃO Comprar

Evite estes para implantações de produção do OmniUPF:

NIC/Plataforma	Razão	Alternativa
NICs Realtek	Sem suporte a XDP, drivers Linux ruins	Intel i350 ou melhor
VirtualBox	Sem suporte a XDP nativo	Migre para Proxmox/KVM
NICs de consumo	Suporte limitado a filas, não confiáveis	Intel/Mellanox de servidor
NICs muito antigas (<2014)	Sem suporte a driver XDP	Intel X520 ou mais recente

Lista de Verificação Pré-Compra

Antes de comprar hardware, verifique:

1. □ **Suporte do Driver**: Verifique se o driver Linux suporta XDP

```
# Em sistema semelhante
modinfo <driver_name> | grep -i xdp
```

2. **Versão do Kernel**: Certifique-se de que o kernel ≥ 5.15 para suporte confiável ao XDP

```
uname -r
```

3. **Multi-Queue**: Verifique se a NIC suporta múltiplas filas (RSS/VMDq)

4. **Largura de Banda PCI**: Certifique-se de que o slot PCIe tem faixas suficientes

   - 10GbE: PCIe 2.0 x4 mínimo
   - 40GbE: PCIe 3.0 x8 mínimo
   - 100GbE: PCIe 3.0 x16 ou PCIe 4.0 x8

5. **Tipo de Implantação**:

   - Bare metal: NIC física necessária
   - VM: Suporte a VirtIO ou SR-IOV necessário
   - Contêiner: Configuração da NIC do host herdada

⚠ **Não compre hardware com base apenas neste guia - sempre confirme com o suporte da Omnitouch primeiro!**

Recursos Adicionais

- **Guia de Configuração**: CONFIGURATION.md - Referência completa de configuração
- **Guia de Resolução de Problemas**: TROUBLESHOOTING.md - Diagnóstico abrangente de problemas
- **Guia de Arquitetura**: ARCHITECTURE.md - Detalhes da arquitetura eBPF e XDP

- **Guia de Monitoramento**: MONITORING.md - Monitoramento de desempenho e estatísticas

---

Referência Rápida

Configuração XDP Nativa no Proxmox (TL;DR)

```
# No host Proxmox:
qm set <VM_ID> -net0 virtio=<MAC>,bridge=vmbr0,queues=8
qm shutdown <VM_ID> && sleep 10 && qm start <VM_ID>

# Dentro da VM:
ethtool -l eth0  # Verifique 8 filas
sudo nano /etc/omniupf/config.yaml  # Defina: xdp_attach_mode:
native
sudo systemctl restart omniupf
journalctl -u omniupf --since "1 min ago" | grep xdp  # Verifique
o modo nativo
```

Verifique se o Modo XDP Está Ativo

```
# Verifique a configuração
curl -s http://localhost:8080/api/v1/config | grep xdp_attach_mode

# Verifique as estatísticas
curl -s http://localhost:8080/api/v1/xdp_stats | jq

# Verifique as filas
ethtool -l eth0
```

Documentação da API OmniUPF

Visão Geral

A API OmniUPF fornece uma interface RESTful abrangente para gerenciar e monitorar a Função de Plano do Usuário baseada em eBPF. A API permite controle em tempo real e observabilidade de todos os componentes do UPF.

Capacidades da API

Gerenciamento de Sessões:

- **Sessões PFCP**: Consultar sessões ativas, visualizar detalhes da sessão, filtrar por IP do UE ou TEID
- **Associações PFCP**: Monitorar associações e status dos nós do plano de controle

Regras de Tráfego:

- **Regras de Detecção de Pacotes (PDR)**: Inspecionar classificadores de tráfego de uplink e downlink (IPv4/IPv6)
- **Regras de Ação de Encaminhamento (FAR)**: Visualizar políticas de encaminhamento, buffer e descarte
- **Regras de Aplicação de QoS (QER)**: Monitorar limitação de taxa e políticas de QoS
- **Regras de Relatório de Uso (URR)**: Rastrear contadores de volume de dados por sessão

Bufferização de Pacotes:

- **Status do Buffer**: Visualizar pacotes armazenados por FAR (`GET /buffer`, `GET /buffer/:far_id`)

- **Operações de Buffer**: Limpar ou esvaziar pacotes armazenados (`POST /buffer/:far_id/flush`, `DELETE /buffer/:far_id`, `DELETE /buffer`)
- **Controle de Bufferização**: Acionamento manual de notificação (`POST /buffer/:far_id/notify`)
- **Status de Notificação**: Visualizar estado da notificação DLDR (`GET /buffer/notifications`)

Monitoramento e Estatísticas:

- **Estatísticas de Pacotes**: Contadores de pacotes em tempo real por protocolo (GTP, IP, TCP, UDP, ICMP, ARP)
- **Estatísticas XDP**: Métricas de desempenho do datapath (passar, descartar, redirecionar, abortar)
- **Estatísticas da Interface N3/N6**: Distribuição de tráfego da RAN e da Rede de Dados
- **Estatísticas de Rota**: Desempenho de lookup FIB (acertos de cache, buscas, erros)

Gerenciamento de Rotas:

- **Rotas do UE**: Consultar tabela de roteamento de IP do UE para gNB (`GET /routes`)
- **Integração FRR**: Sincronizar rotas com o daemon Free Range Routing (`POST /routes/sync`)
- **Sessões de Roteamento**: Visualizar sessões de protocolo de roteamento (`GET /routing/sessions`)
- **Banco de Dados OSPF**: Consultar banco de dados de rotas externas OSPF (`GET /ospf/database/external`)

Configuração:

- **Configuração do UPF**: Recuperar e editar configuração (`GET /config`, `POST /config`)
- **Configuração do Dataplane**: Consultar configuração específica do dataplane (`GET /dataplane_config`)
- **Capacidades XDP**: Consultar suporte ao modo XDP e capacidades da interface (`GET /xdp_capabilities`)

- **Capacidade do Mapa eBPF**: Monitorar utilização de recursos e capacidade (`GET /map_info`)

Integração com a Web UI

A Web UI do OmniUPF é construída sobre esta API e fornece um painel interativo para toda a funcionalidade da API. Consulte o Guia da Web UI para capturas de tela e exemplos de uso.

Documentação da API Swagger

A API está totalmente documentada usando a especificação **OpenAPI 3.0 (Swagger)**. A interface interativa do Swagger fornece:

- Documentação completa dos endpoints com esquemas de solicitação/resposta
- Funcionalidade de teste para testar chamadas da API diretamente do navegador
- Definições de esquema para todos os modelos de dados
- Códigos de status HTTP e respostas de erro

Interface interativa do Swagger mostrando os endpoints da API OmniUPF com documentação detalhada.

Acessando a UI do Swagger

A documentação do Swagger está disponível em:

```
http://<upf-host>:8080/swagger/index.html
```

Por exemplo: `http://10.98.0.20:8080/swagger/index.html`

Caminho Base da API

Todos os endpoints da API são prefixados com:

```
/api/v1
```

Recursos da API

Paginação

A API OmniUPF suporta paginação para endpoints que retornam grandes conjuntos de dados. A paginação previne timeouts e reduz o uso de memória ao consultar milhares de sessões, PDRs ou URRs.

Estilos de Paginação Suportados:

1. **Paginação baseada em página** (recomendada):
   - `page`: Número da página (começando de 1)
   - `page_size`: Itens por página (padrão: 100, máximo: 1000)
2. **Paginação baseada em offset**:
   - `offset`: Número de itens a serem pulados
   - `limit`: Número de itens a serem retornados (máx: 1000)

Exemplos de Solicitações:

```
# Baseada em página: Obter a segunda página com 50 itens por
página
GET /api/v1/pfcp_sessions?page=2&page_size=50

# Baseada em offset: Pular os primeiros 100 itens, retornar os
próximos 50
GET /api/v1/pfcp_sessions?offset=100&limit=50

# Comportamento padrão (sem parâmetros de paginação): Primeiros
100 itens
GET /api/v1/pfcp_sessions
```

Formato de Resposta:

```
&#123;
  "data": [
    &#123; /* objeto de sessão */ &#125;,
    &#123; /* objeto de sessão */ &#125;,
    ...
  ],
  "pagination": &#123;
    "total": 5432,
    "page": 2,
    "page_size": 50,
    "total_pages": 109
  &#125;
&#125;
```

Endpoints Paginação:

- `/api/v1/pfcp_sessions` - Lista de sessões PFCP
- `/api/v1/pfcp_associations` - Lista de associações PFCP
- `/api/v1/routes` - Rotas de IP do UE
- `/api/v1/uplink_pdr_map` - PDRs de uplink (informações básicas)
- `/api/v1/uplink_pdr_map/full` - PDRs de uplink com detalhes completos do filtro SDF
- `/api/v1/downlink_pdr_map` - PDRs de downlink IPv4 (informações básicas)

- `/api/v1/downlink_pdr_map/full` - PDRs de downlink IPv4 com detalhes completos do filtro SDF
- `/api/v1/downlink_pdr_map_ip6` - PDRs de downlink IPv6 (informações básicas)
- `/api/v1/downlink_pdr_map_ip6/full` - PDRs de downlink IPv6 com detalhes completos do filtro SDF
- `/api/v1/far_map` - Regras de Ação de Encaminhamento
- `/api/v1/qer_map` - Regras de Aplicação de QoS
- `/api/v1/urr_map` - Regras de Relatório de Uso

Endpoints de Gerenciamento de Buffer:

- `GET /api/v1/buffer` - Listar todos os buffers FAR com estatísticas
- `GET /api/v1/buffer/:far_id` - Obter status do buffer para FAR específico
- `GET /api/v1/buffer/notifications` - Listar status de notificação DLDR
- `DELETE /api/v1/buffer` - Limpar todos os pacotes armazenados
- `DELETE /api/v1/buffer/:far_id` - Limpar buffer para FAR específico
- `POST /api/v1/buffer/:far_id/flush` - Esvaziar (reproduzir) pacotes armazenados
- `POST /api/v1/buffer/:far_id/notify` - Enviar manualmente notificação DLDR

Endpoints de Configuração:

- `GET /api/v1/config` - Obter configuração atual do UPF
- `POST /api/v1/config` - Atualizar configuração do UPF (campos editáveis em tempo de execução)
- `GET /api/v1/dataplane_config` - Obter configuração específica do dataplane

Endpoints de Integração de Roteamento:

- `GET /api/v1/routes` - Listar rotas do UE
- `POST /api/v1/routes/sync` - Acionar sincronização de rotas com FRR
- `GET /api/v1/routing/sessions` - Obter sessões de protocolo de roteamento

- `GET /api/v1/ospf/database/external` - Obter banco de dados LSA externo OSPF

Melhores Práticas:

- Use `page_size=100` para exibição na Web UI
- Use `page_size=1000` para exportações em massa (limite máximo)
- Consulte `pagination.total_pages` para determinar a contagem de iterações
- Aumente `page_size` para melhor desempenho da API (menos solicitações)

Suporte a CORS

O Compartilhamento de Recursos de Origem Cruzada (CORS) está habilitado por padrão para todos os endpoints da API, permitindo que a Web UI e aplicativos de terceiros consumam a API de diferentes origens.

Métricas do Prometheus

Além da API REST, o OmniUPF expõe métricas do Prometheus no endpoint `/metrics` (porta padrão `:9090`).

As métricas fornecem:

- Contadores de mensagens PFCP e latência por par
- Estatísticas de pacotes por tipo de protocolo
- Veredictos de ação XDP
- Estatísticas de buffer
- Utilização da capacidade do mapa eBPF
- Rastreamento de volume URR

Consulte a Referência de Métricas para documentação completa.

Documentação Relacionada

- **Guia da Web UI** - Painel interativo construído sobre esta API
- **Referência de Métricas** - Documentação de métricas do Prometheus
- **Códigos de Causa PFCP** - Códigos de erro PFCP e solução de problemas
- **Guia de Gerenciamento de Regras** - Configuração de PDR, FAR, QER, URR
- **Guia de Gerenciamento de Rotas** - Integração FRR e roteamento do UE
- **Guia de Monitoramento** - Monitoramento de estatísticas e planejamento de capacidade
- **Guia de Configuração** - Opções de configuração do UPF
- **Swagger UI** - Documentação interativa da API (substitua `localhost` pelo seu host UPF)

Gerenciamento de Rota UE

> **Documentação Relacionada**:
>
> - Documentação da API - Referência completa da API incluindo endpoints de gerenciamento de rota
> - Guia de Operações - Operações e monitoramento da interface web

Visão Geral

O UPF (Função de Plano do Usuário) integra-se com **FRR (Free Range Routing)** para gerenciar dinamicamente as rotas IP do Equipamento do Usuário (UE). Essa integração garante que, à medida que as sessões de UE são estabelecidas ou encerradas, a infraestrutura de roteamento se adapte automaticamente para refletir a topologia atual da rede.

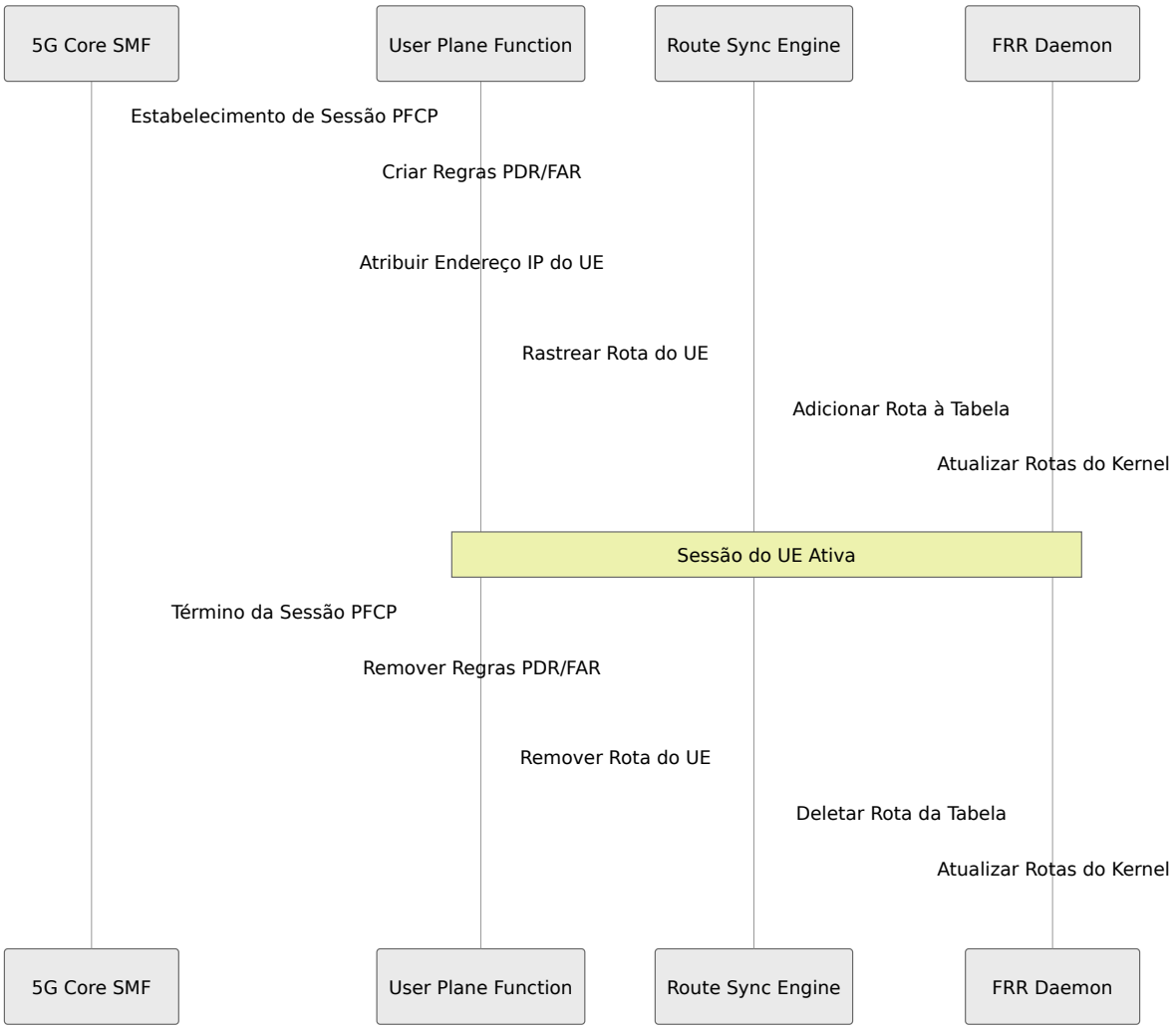
O que é FRR?

FRR (Free Range Routing) é um robusto conjunto de protocolos de roteamento de código aberto para plataformas Linux e Unix. Ele implementa vários protocolos de roteamento, incluindo BGP, OSPF, RIP e outros. Em nossa implantação, o FRR atua como o daemon de roteamento que mantém a tabela de roteamento do kernel e pode redistribuir rotas para outros elementos da rede.

Arquitetura

Como Funciona a Sincronização de Rotas

Ciclo de Vida da Rota



Sincronização Automática

O UPF mantém um registro interno de todos os endereços IP de UE ativos. Quando habilitado, o sistema de sincronização de rotas:

1. **Monitora Sessões de UE**: Rastreia todas as sessões PFCP ativas e seus endereços IP de UE associados
2. **Mantém Lista de Rotas**: Mantém uma lista atualizada de rotas que precisam estar na tabela de roteamento

3. **Sincroniza com FRR**: Envia automaticamente atualizações de rotas para o daemon FRR via sua API
4. **Lida com Falhas**: Rastreia o status de sincronização (sincronizado/falhou) para cada rota e tenta novamente conforme necessário

Configuração do FRR

Configuração

O FRR é implantado e configurado usando **templates Ansible** para estabelecer os parâmetros básicos de roteamento. Você define a configuração do FRR uma vez como um **template Jinja2** em seu playbook Ansible, e o Ansible a propaga automaticamente para todas as suas instâncias de UPF durante a implantação.

Um template típico de configuração Jinja2 do FRR inclui:

```
frr version 7.2.1
frr defaults traditional
hostname pgw02
log syslog informational
service integrated-vtysh-config
!
ip route {{ hostvars[inventory_hostname]['ansible_default_ipv4']
['gateway'] }}/32 {{ ansible_default_ipv4['interface'] }}
!
interface {{ ansible_default_ipv4['interface'] }}
 ip address ospf router-id {{hostvars[inventory_hostname]
['ansible_host']}}
 ip ospf authentication null
!
router ospf
 ospf router-id {{hostvars[inventory_hostname]['ansible_host']}}
 redistribute static
 network {{ hostvars[inventory_hostname]['ansible_default_ipv4']
['network'] }}/{{ mask_cidr }} area 0
 area 0 authentication message-digest
!
line vty
!
end
```

Modelo de Implantação:

1. **Defina Uma Vez**: Crie o template Jinja2 do FRR em seu papel Ansible (por exemplo, `roles/frr/templates/frr.conf.j2`)
2. **Configure Parâmetros**: Defina variáveis em seu inventário Ansible para cada host UPF
3. **Implante em Todos os Lugares**: Execute o playbook Ansible para implantar a configuração do FRR em todos os nós UPF
4. **Personalização Automática**: O Ansible usa variáveis específicas do host (endereços IP, IDs de roteador, etc.) para personalizar a configuração do FRR de cada UPF

Parâmetros Personalizáveis no template Jinja2:

- **Parâmetros OSPF**: ID do Roteador, configuração de área, métodos de autenticação, anúncios de rede
- **Configuração BGP**: ASN, relacionamentos de vizinhança, políticas de rota, comunidades
- **Redistribuição de Rotas**: Quais rotas redistribuir (por exemplo, `redistribute static` para rotas de UE)
- **Filtragem de Rotas**: Mapas de rota, listas de prefixo, listas de acesso
- **Configurações de Interface**: Parâmetros de interface OSPF/BGP

Integração UPF: Uma vez que a configuração básica do FRR é implantada em cada instância de UPF, o UPF adiciona dinamicamente endereços IP de UE como **rotas de host** (/32 para IPv4, /128 para IPv6) através da interface vtysh do FRR com base nas sessões PFCP ativas. Essas rotas são então:

1. **Adicionadas como rotas estáticas do FRR** pelo mecanismo de sincronização de rotas do UPF (via vtysh)
2. **Capturadas pelo FRR** através da diretiva `redistribute static`
3. **Anunciadas para protocolos de roteamento** (OSPF, BGP) de acordo com sua configuração do FRR
4. **Propagadas para a rede** para que o tráfego de UE possa ser roteado para esta instância de UPF

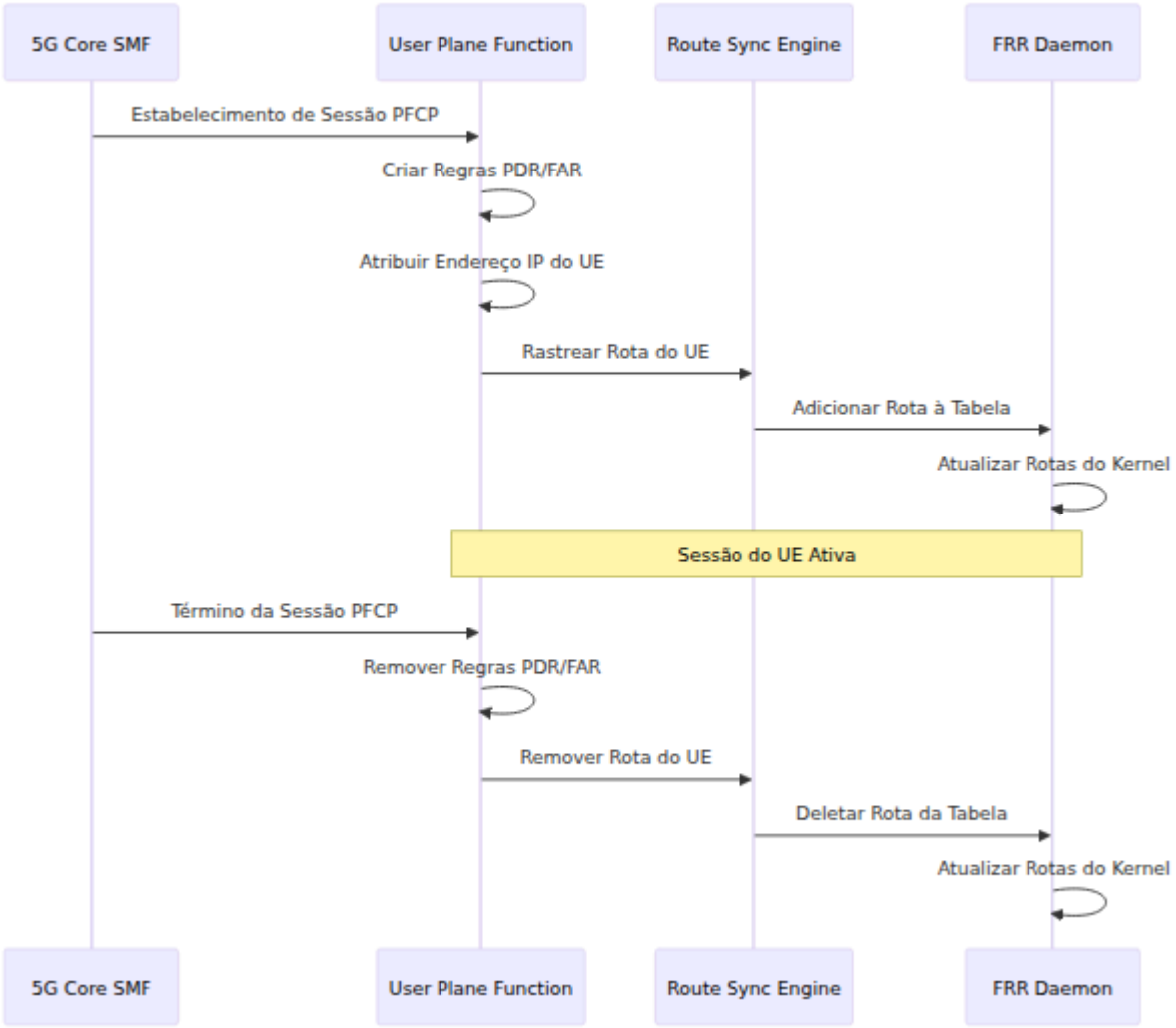
> **Importante**: O UPF adiciona rotas através da interface vtysh do FRR, tornando-as rotas estáticas do FRR (não rotas do kernel). Você deve usar `redistribute static` em sua configuração OSPF/BGP, não `redistribute kernel`.

Pontos-chave:

- **Defina Uma Vez, Implemente em Todos os Lugares**: Defina o template Jinja2 do FRR uma vez no Ansible, e ele será automaticamente implantado em todas as instâncias de UPF
- **Ansible gerencia configuração estática**: O template Jinja2 configura todos os parâmetros do protocolo de roteamento (áreas OSPF, vizinhos BGP, autenticação, políticas de rota, etc.)
- **UPF gerencia rotas dinâmicas**: Cada instância de UPF gerencia dinamicamente apenas as rotas IP /32 do UE com base em suas sessões PFCP ativas

- **Anúncio automático de rotas**: O FRR em cada UPF redistribui automaticamente as rotas locais de UE de acordo com suas políticas configuradas
- **Gerenciamento centralizado**: Atualize o template Ansible e execute novamente o playbook para alterar a configuração de roteamento em todos os UPFs simultaneamente

Anúncio de Rotas



Monitoramento e Gerenciamento

Integração com a Interface Web

O Painel de Controle do UPF fornece uma página de **Rotas** que exibe:

- **Status da Rota**: Se a sincronização de rotas está habilitada ou desabilitada
- **Total de Rotas**: Número de endereços IP de UE sendo rastreados
- **Estatísticas de Sincronização**: Contagem de rotas sincronizadas com sucesso e quaisquer falhas
- **Rotas Ativas**: Lista em tempo real de todos os endereços IP de UE atualmente na tabela de roteamento
- **Vizinhos OSPF**: Status ao vivo das adjacências OSPF com detalhes dos vizinhos
- **Pares BGP**: Status da sessão BGP e estatísticas de prefixo (quando configurado)
- **Rotas Redistribuídas OSPF**: Visão completa dos LSAs externos mostrando como as rotas de UE são anunciadas

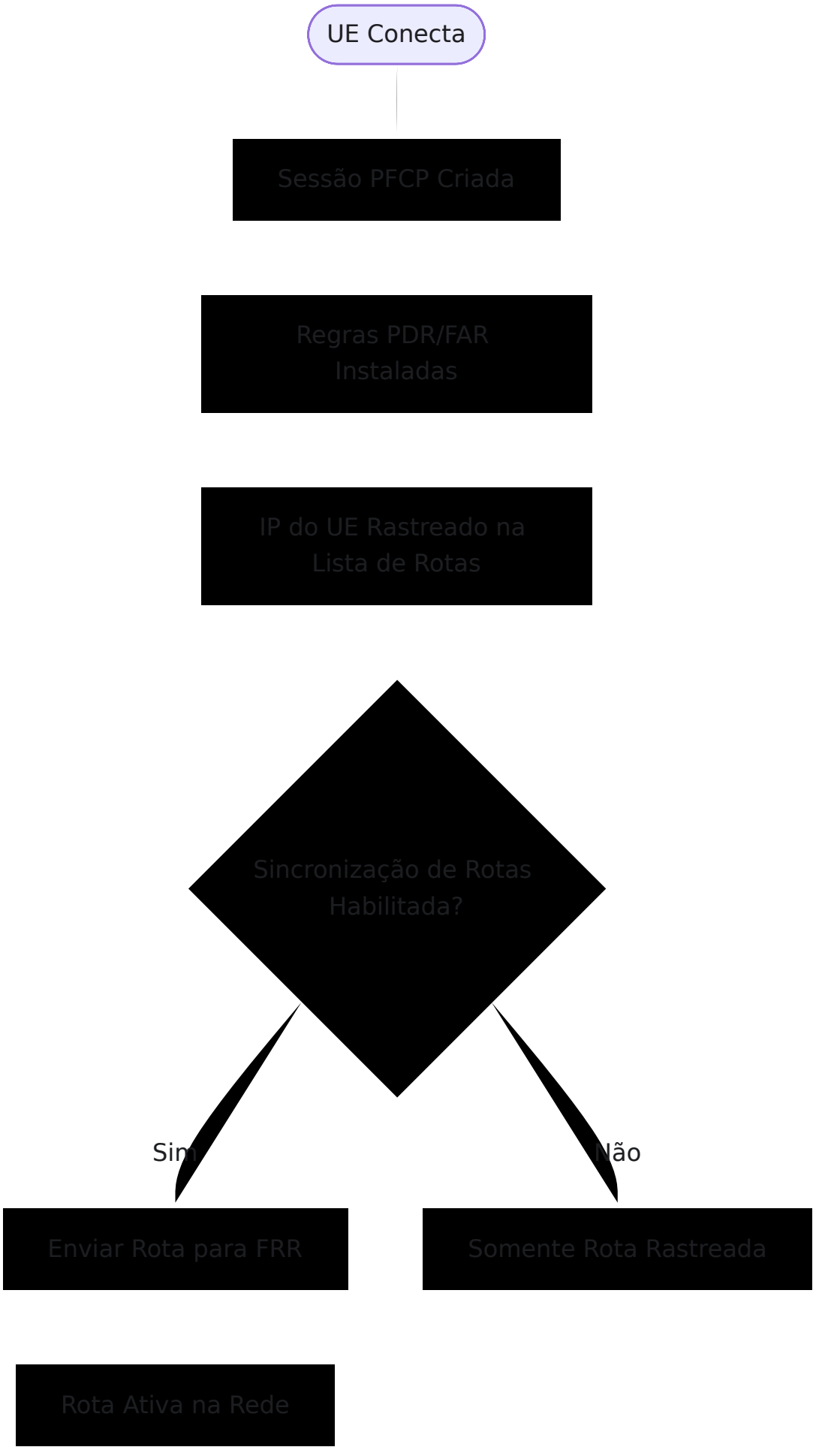
A página de Rotas fornece visibilidade abrangente sobre a sincronização de rotas de UE, vizinhos de protocolos de roteamento e anúncios de rotas redistribuídas.

Operação de Sincronização Manual

Os administradores podem acionar uma sincronização manual de rotas através da interface web usando o botão **Sincronizar Rotas**. Esta operação:

1. Lê novamente a lista atual de sessões de UE ativas do UPF
2. Compara com a tabela de roteamento do FRR
3. Adiciona quaisquer rotas ausentes
4. Remove quaisquer rotas obsoletas
5. Retorna estatísticas de sincronização atualizadas

Fluxo de Rotas


UE Conecta
Sessão PFCP Criada
Regras PDR/FAR Instaladas
IP do UE Rastreado na Lista de Rotas
Sincronização de Rotas Habilitada?
Sim
Não
Enviar Rota para FRR
Somente Rota Rastreada
Rota Ativa na Rede

Benefícios

- **Provisionamento Sem Toque**: As rotas são gerenciadas automaticamente sem intervenção manual
- **Adaptação Dinâmica**: O roteamento da rede se adapta em tempo real à mobilidade do UE e mudanças de sessão
- **Escalabilidade**: Suporta milhares de rotas de UE simultâneas
- **Resiliência**: Operações de sincronização com falha são rastreadas e podem ser tentadas novamente
- **Visibilidade**: Visibilidade total sobre o status da rota através da interface web

Detalhes Técnicos

Endpoints da API

O UPF expõe os seguintes endpoints de gerenciamento de rotas:

- `GET /api/v1/routes` - Lista todas as rotas de UE rastreadas sem sincronização
- `POST /api/v1/routes/sync` - Sincroniza rotas com o FRR e retorna lista atualizada
- `GET /api/v1/route_stats` - Obtém estatísticas detalhadas de roteamento
- `GET /api/v1/routing/sessions` - Obtém sessões de protocolo de roteamento (vizinhos OSPF, pares BGP)
- `GET /api/v1/ospf/database/external` - Obtém o banco de dados OSPF AS-External LSA (rotas redistribuídas)

> **Veja Também**: Documentação da API - Gerenciamento de Rotas para detalhes completos dos endpoints e exemplos

Formato de Rota

As rotas são armazenadas e gerenciadas como endereços IP simples (por exemplo, `100.64.18.5`). O daemon de roteamento lida com todos os detalhes da entrada de rota, incluindo:

- Prefixo/máscara de destino
- Gateway/próximo salto
- Vinculação de interface

- Métrica e distância administrativa

Suporte a IPv6

O gerenciador de rotas suporta endereços de UE tanto IPv4 quanto IPv6:

Tipo de Endereço	Comprimento do Prefixo	Exemplo
IPv4	/32	`100.64.18.5/32`
IPv6	/128	`2001:db8::1/128`

Para IPv6, certifique-se de que sua configuração do FRR inclua a redistribuição OSPFv3 ou BGP IPv6 apropriada:

```
router ospf6
 redistribute static
```

ou para BGP:

```
router bgp <asn>
 address-family ipv6 unicast
  redistribute static
```

Verificação do FRR

Banco de Dados OSPF LSA Externo

Você pode verificar se as rotas de UE estão sendo redistribuídas corretamente no OSPF examinando o Banco de Dados de Estado de Link OSPF do FRR. LSAs externas (Tipo 5) mostram rotas que foram injetadas no OSPF a partir de fontes externas.

Banco de dados OSPF do FRR mostrando LSAs externas incluindo a rota de UE 100.64.18.5/32 sendo anunciada como uma rota E2 (Tipo Externo 2).

No exemplo acima, você pode ver:

- **Network LSA (10.98.0.20)**: O próprio anúncio de rede do UPF
- **Router LSA (192.168.1.1)**: Anúncio do roteador OSPF
- **LSAs Externas**: Incluindo a rota de UE `100.64.18.5` redistribuída no OSPF com métrica tipo E2 (Tipo Externo 2)

Essa verificação confirma que:

1. O UPF está rastreando com sucesso o endereço IP do UE
2. O mecanismo de sincronização de rotas enviou a rota para o FRR
3. O FRR redistribuiu a rota no OSPF
4. Os vizinhos OSPF estão recebendo os anúncios de rota