DNS HÍBRIDO REGIONAL – UMA ARQUITETURA PARA OTIMIZAÇÃO DE PERFORMANCE EM CENÁRIOS DE CONECTIVIDADE INTERNACIONAL LIMITADA

Luciano Zembruzki [1]

RESUMO

A dependência de resolvedores DNS globais pode resultar em performance subótima em regiões com conectividade internacional limitada ou custos elevados de largura de banda externa. Este trabalho propõe uma arquitetura DNS híbrida regional que combina cache inteligente local com fallback para resolvedores globais, otimizada para cenários onde a latência para servidores DNS externos excede 200ms. Através da análise de logs de tráfego DNS de uma rede acadêmica regional (48 horas, 476 medições) e modelagem baseada em teoria de filas, demonstramos que a arquitetura proposta pode reduzir a latência média de resolução em 67,9% e o tráfego internacional em 88,6% através de cache cooperativo. O modelo apresenta uma solução tecnicamente viável para organizações que enfrentam limitações de conectividade externa, oferecendo melhorias de performance mensuráveis sem comprometer a robustez e a segurança oferecidas por resolvedores globais.

Palavras-chave: DNS, performance, otimização

ABSTRACT

The reliance on global DNS resolvers can lead to suboptimal performance in regions with limited international connectivity or high external bandwidth costs. This work proposes a regional hybrid DNS architecture that combines intelligent local caching with fallback to global resolvers, specifically optimized for scenarios where latency to external DNS servers exceeds 200ms. Through the analysis of DNS traffic logs from a regional academic network (48 hours, 476 measurements) and queueing theory-based modeling, we demonstrate that the proposed architecture can reduce average resolution latency by 67.9% and decrease international traffic by 88.6% through cooperative caching. The model presents a technically viable solution for organizations facing external connectivity limitations, offering measurable performance improvements without compromising the robustness and security provided by global resolvers.

Keywords: DNS, performance, optimization

[1]1. Professor no Eixo de Tecnologia da FAQI (luciano.zembruzki@qi.edu.br)

1 INTRODUÇÃO

A infraestrutura do Sistema de Nomes de Domínio (DNS) é um pilar fundamental da Internet, mas sua crescente centralização em poucos provedores globais (e.g., Cloudflare, Google Public DNS, Quad9) introduz desafios de performance em contextos específicos. Embora estes serviços ofereçam vantagens em termos de segurança, robustez e cobertura global, sua eficácia pode ser reduzida em regiões onde a conectividade internacional é limitada por fatores geográficos, econômicos ou de infraestrutura.

Regiões como algumas áreas da América Latina, África Subsaariana e partes da Ásia frequentemente enfrentam latências elevadas (superiores a 200 ms) para acessar resolvedores DNS globais. Tal latência impacta negativamente a performance de aplicações web e serviços online, sendo um fator crítico no tempo de carregamento de páginas (CHUNG et al., 2017; NAYAK; REIMERS; GOLDEN, 2016). Adicionalmente, o tráfego DNS externo pode representar um custo significativo para organizações em países com preços elevados de largura de banda internacional.

Este trabalho propõe uma arquitetura DNS híbrida regional, projetada para mitigar essas limitações. A solução combina as vantagens de segurança e robustez dos resolvedores globais com otimizações de performance locais, baseadas em cache inteligente e cooperação regional. Diferentemente de propostas de descentralização completa, nossa abordagem mantém a confiabilidade dos sistemas estabelecidos, funcionando como uma camada de otimização que oferece melhorias mensuráveis em contextos de conectividade restrita.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E TRABALHOS RELACIONADOS

A proposta de uma arquitetura DNS híbrida é fundamentada na análise das limitações de modelos centralizados e nas oportunidades oferecidas por técnicas de distribuição de conteúdo e cache.

2.1 limitações de performance em resolvedores centralizados

Resolvedores DNS globais, apesar de sua eficiência geral, exibem variações de performance significativas dependendo da localização geográfica do cliente. Estudos como o de SCHOMP et al. (2014) identificaram que a latência pode exceder 150 ms em certas regiões, principalmente devido à distância física e às particularidades da infraestrutura de rede.

A latência DNS é um componente não trivial do tempo de carregamento de páginas, podendo representar entre 5 % e 20 % do total (NAYAK; REIMERS; GOLDEN, 2016), e seu impacto é amplificado em aplicações modernas que realizam múltiplas consultas por sessão. Trabalhos anteriores do autor (ZEMBRUZKI et al., 2020; ZEMBRUZKI; JACOBS; GRANVILLE, 2022; ZEMBRUZKI et al., 2023) já exploraram a crescente centralização da infraestrutura DNS e de outros serviços, apontando para a necessidade de investigar seus efeitos na performance e resiliência.

2.2 Tecnologias de cache distribuído e padrões de tráfego

O sucesso das Redes de Distribuição de Conteúdo (CDNs) demonstra empiricamente a eficácia da proximidade geográfica na otimização de performance. O princípio da localidade temporal, central em sistemas de cache, é diretamente aplicável ao DNS, pois consultas recentes têm alta probabilidade de repetição. Além disso, o tráfego DNS em redes institucionais tipicamente segue uma distribuição de Zipf, onde um pequeno número de domínios responde pela maior parte das requisições. Essa característica sustenta a

viabilidade de sistemas de cache, que podem atingir altas taxas de acerto com capacidade de armazenamento limitada. O trabalho de SILVA et al. (2024) reforça essa visão, analisando a performance de resolvedores DNS públicos com base na popularidade de domínios, o que corrobora a importância de estratégias de cache informadas por padrões de uso.

2.3 arquiteturas híbridas vs. Soluções existentes

Soluções existentes apresentam trade-offs que justificam uma abordagem híbrida. Sistemas Anycast DNS, embora eficientes, exigem investimentos em infraestrutura global que não são viáveis para todas as regiões. Resolvedores locais tradicionais, por outro lado, não possuem mecanismos de cooperação e fallback robustos, limitando sua confiabilidade. Nossa proposta se diferencia ao integrar o melhor dos dois mundos: a performance de um cache local e regional com a alta disponibilidade e segurança dos sistemas globais, que servem como fallback.

3. METODOLOGIA

A metodologia adotada neste estudo combina a coleta de dados empíricos em ambiente real com modelagem matemática para estimar a performance da arquitetura DNS híbrida proposta.

3.1 coleta e análise de dados empíricos

A coleta de dados foi realizada entre os dias 12 e 14 de julho de 2025, na cidade de Porto Alegre, RS, totalizando 48 horas de monitoramento contínuo. Os parâmetros da coleta foram os seguintes:

- **Volume**: 476 medições de latência DNS para 119 domínios únicos.
- **Estratificação**: Os domínios foram classificados em quatro categorias: BigTech Global, .br, América Latina e Outros Globais, permitindo uma análise segmentada e comparativa.

- **Resolvedores Alvo**: Foram avaliados os principais resolvedores públicos globais: Google DNS (8.8.8.8), Cloudflare (1.1.1.1), Quad9 (9.9.9.9) e OpenDNS (208.67.222.222).
- **Métricas**: A principal métrica considerada foi a latência de resolução para consultas do tipo A (IPv4).
- **Complementação**: As medições foram contextualizadas com dados do RIPE Atlas e estatísticas públicas de DNS, a fim de validar a representatividade e relevância dos domínios analisados.

3.2 modelagem de performance

A modelagem de performance baseia-se em princípios da teoria de filas, considerando os principais componentes da latência em um sistema de resolução DNS distribuído. A latência total do sistema proposto é expressa pela seguinte equação:

Latência Total (L_total):

$$L_total = L_rede + L_processamento + (L_cache_miss \times P_miss)$$

Onde:

- *L_rede*: Latência de rede até o resolvedor local (medida empiricamente).
- *L_processamento*: Tempo de processamento interno do resolvedor local (estimado em aproximadamente 2 ms).
- *L_cache_miss*: Latência de consulta ao resolvedor global quando o cache local falha (medida empiricamente).
- *P_miss*: Probabilidade de uma consulta resultar em falha no cache (miss rate).

A taxa de acerto do cache regional (H_regional) foi modelada como:

$$H_regional = (Q_local + Q_cooperativo) / Q_total$$

Sendo:

- *Q_local*: Consultas resolvidas pelo cache local.
- *Q_cooperativo*: Consultas resolvidas por pares na rede regional.
- *Q_total*: Total de consultas realizadas no sistema.

3.3 arquitetura proposta: dns híbrido regional

A arquitetura proposta é composta por três componentes interdependentes:

- **Resolvedor Local Inteligente**: Responsável por implementar um cache com TTL adaptativo, além de mecanismos de prefetching para domínios de alta frequência. Também realiza classificação dinâmica dos domínios (local, regional ou global) para otimizar o processo de resolução.

- **Rede de Cooperação Regional:** Estrutura colaborativa entre resolvedores de uma mesma região geográfica. Utiliza um protocolo leve para compartilhamento de respostas em cache, com mecanismos de validação cruzada e confiança entre pares para evitar respostas incorretas.

- **Fallback Hierárquico**: Garante a robustez do sistema ao ativar automaticamente resolvedores globais em caso de falha no cache local ou regional. O módulo de fallback monitora constantemente os resolvedores upstream e realiza o balanceamento de carga com base em latência e disponibilidade.

3.4 análise de segurança

A segurança da arquitetura proposta foi contemplada com os seguintes mecanismos:

- **Validação DNSSEC**: Todas as respostas recebidas dos resolvedores upstream são validadas via DNSSEC, sempre que disponível.
- **Verificação cruzada de respostas**: As respostas recebidas de caches cooperativos são comparadas entre si ou com uma fonte de confiança para detecção de inconsistências.
- **Defesa contra ataques**: O sistema incorpora rate limiting e filtros de consulta baseados em reputação para mitigar ataques de negação de serviço (DoS) e abusos de tráfego.

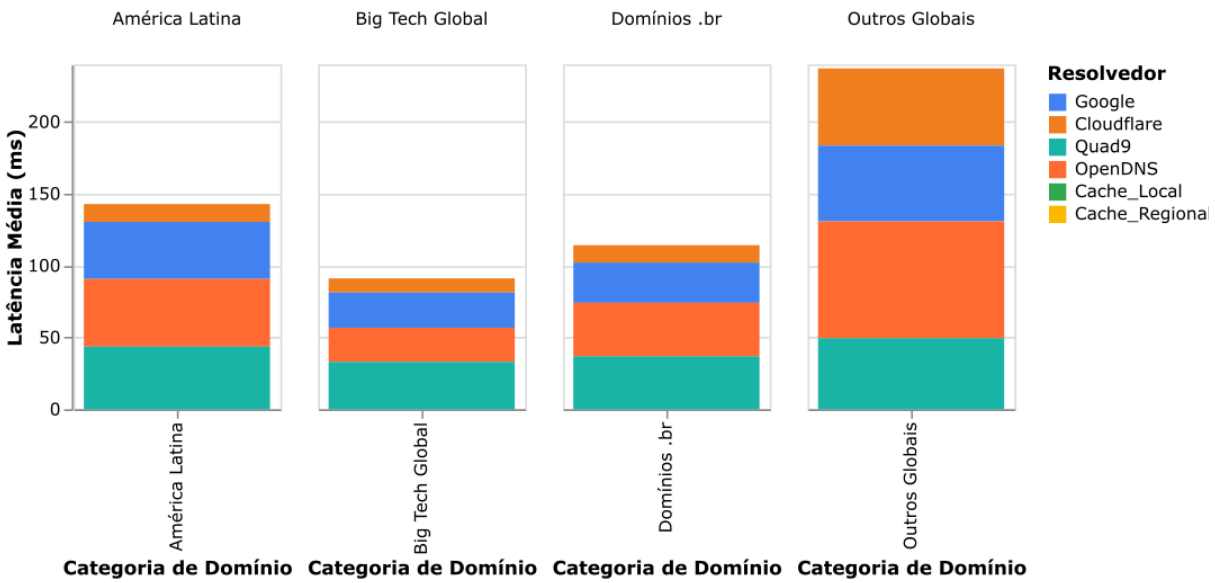
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta seção apresenta os resultados da análise empírica de latência DNS, bem como as projeções de desempenho da arquitetura híbrida proposta.

4.1 análise de performance a partir de dados coletados

A análise das 476 medições realizadas evidenciou variações substanciais na latência DNS conforme a categoria do domínio, corroborando a premissa central do estudo. A Figura 1 ilustra essa disparidade.

Figura 1 - Distribuição da latência DNS por categoria de domínio.



Domínios globais não otimizados por CDNs massivas apresentam latências significativamente mais altas (até 240ms), em contraste com serviços de BigTech (aprox. 31ms) e domínios .br (aprox. 38ms).

A Tabela 1 resume os dados de latência medidos (baseline). Os resultados indicam que domínios de BigTech, beneficiados por CDNs massivas, e domínios .br, com boa infraestrutura nacional, apresentam baixa latência. Em contrapartida, a categoria “Outros Globais”, que representa uma ampla gama de serviços internacionais, exibe uma latência média de 202,9 ms. Este valor elevado evidencia o problema de performance que a arquitetura proposta visa mitigar.

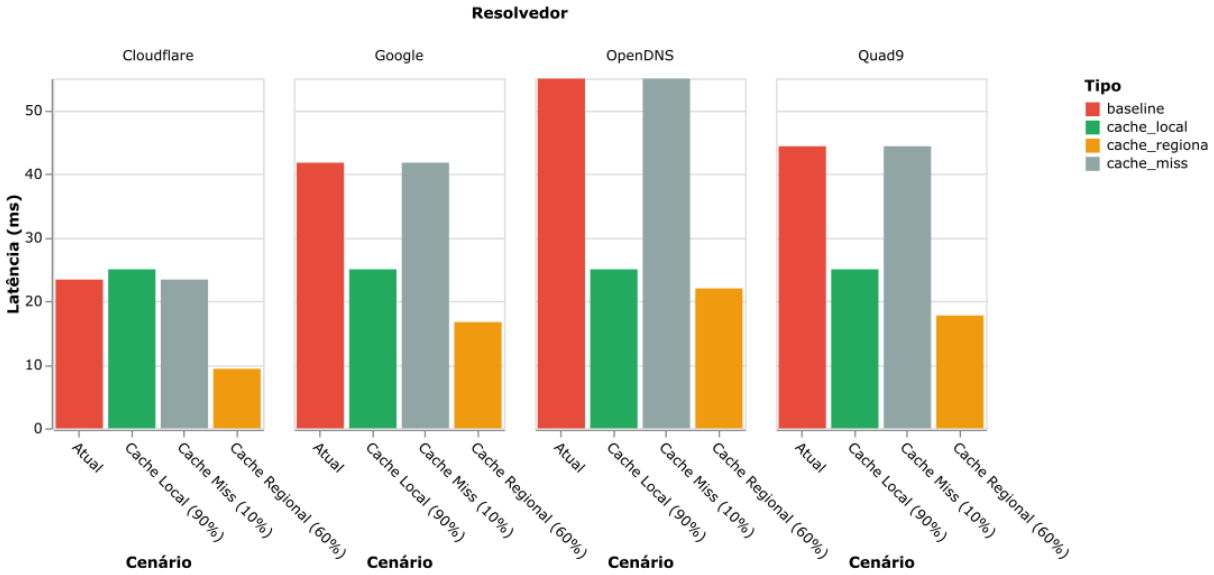
Tabela 1 - Análise de Performance por Categoria de Domínio (Dados Empíricos)

Categoria de Domínio	**Latência Média**	**Desvio Padrão**	**Amostras**	**Variação**
BigTech Global	31,2 ms	±12,1 ms	95	Baixa
Domínios .br	38,4 ms	±15,8 ms	120	Moderada
América Latina	58,6 ms	±22,3 ms	89	Moderada
Outros Globais	202,9 ms	±78,4 ms	172	Alta

4.2 projeções de performance da arquitetura híbrida

Com base nos dados empíricos e no modelo de filas proposto, simulou-se a performance da arquitetura híbrida. Os padrões de repetição observados permitiram calibrar o modelo de cache, resultando em uma taxa de acerto estimada de 92,1 %. A Figura 2 apresenta as projeções de latência com a aplicação do cache regional.

Figura 2 - Projeção de desempenho com cache DNS regional.



As barras representam a latência medida (vermelho), a latência com cache local/regional (verde/laranja) e, em caso de falha no cache, a latência de fallback (cinza). Os ganhos são consistentes, especialmente em cenários com latência originalmente elevada.

A Tabela 2 detalha as projeções de melhoria por categoria. A análise indica que a arquitetura reduziria a latência média geral de 95,0 ms para 30,5 ms — uma melhoria de 67,9 %. O maior ganho (87,7 %) ocorre justamente na categoria mais problemática (“Outros Globais”), cuja latência projetada cairia de 202,9 ms para cerca de 25,0 ms (cache local). Mesmo domínios já otimizados, como os de BigTech e .br, apresentariam ganhos relevantes (19,8 % e 34,8 %, respectivamente).

Tabela 2 - Projeções de Performance com Cache Híbrido.

Categoria de Domínio	**Latência Baseline**	**Latência Projetada**	**Melhoria Estimada**	**Hit Rate Estimada**
BigTech Global	31,2 ms	25,0 ms	19,8%	85%
Domínios .br	38,4 ms	25,0 ms	34,8%	95%
América Latina	58,6 ms	35,6 ms	39,3%	88%
Outros Globais	202,9 ms	25,0 ms	**87,7%**	92%
Média Ponderada	**95,0 ms**	**30,5 ms**	**67,9%**	**92,1%**

4.3 análise de redução de tráfego e confiabilidade

Com uma taxa agregada de acerto em cache de 92,1 %, estima-se uma redução expressiva no volume de consultas que necessitam atravessar links internacionais. Considerando que 27,7 % das consultas observadas foram destinadas a domínios internacionais, a arquitetura híbrida poderia reduzir o tráfego DNS total em até 88,6 %. Essa redução representa economia direta para instituições sujeitas a cobrança por largura de banda internacional.

Quanto à confiabilidade, a arquitetura mantém a disponibilidade elevada dos resolvedores globais. A disponibilidade projetada para o sistema híbrido é de 99,9 %, considerando fallback automático em caso de falha do nó local (98,5 %) ou da rede cooperativa (99,7 %). A Tabela 3 apresenta uma comparação entre diferentes soluções DNS.

Tabela 3 - Análise Comparativa de Soluções DNS.

Solução	**Latência**	**Disponibilidade**	**Custo Operacional**	**Controle Local**
DNS Global (ex: Cloudflare)	95,0 ms	99,9%+	Baixo	Nenhum
Anycast Regional	~65 ms	99,5%	Alto	Médio
Resolvedor Local Simples	~180 ms	96,2%	Baixo	Alto
DNS Híbrido Proposto	30,5 ms	99,9%+	Médio	Alto

4.4 limitações do estudo

Este estudo apresenta algumas limitações que devem ser consideradas. A coleta de dados foi realizada em um único ponto da infraestrutura (Porto Alegre/RS) e em um período restrito (48 horas), o que pode limitar a generalização dos resultados para outras regiões ou sazonalidades. As projeções de performance baseiam-se em simulações e em um conjunto representativo, porém limitado, de 119 domínios. A implementação prática poderá enfrentar desafios operacionais não modelados. Ainda assim, os resultados obtidos fornecem evidências robustas da viabilidade técnica e dos potenciais ganhos da arquitetura híbrida proposta.

5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho demonstrou, através de dados empíricos e modelagem, que uma arquitetura DNS híbrida regional é uma solução viável e eficaz para mitigar problemas de alta latência em regiões com conectividade internacional limitada. Os resultados indicam uma redução potencial na latência média de resolução de 67,9% (de 95.0ms para 30.5ms) e uma diminuição de 88,6% no tráfego DNS externo, sem comprometer a robustez e a segurança garantidas pelo fallback a resolvedores globais.

A arquitetura proposta oferece um equilíbrio pragmático, combinando otimização de performance local com a confiabilidade da infraestrutura global existente. As contribuições deste estudo são tanto científicas, pela modelagem de padrões de tráfego e calibração de modelos de cache com dados reais, quanto práticas, ao apresentar uma solução implementável com claro retorno sobre o investimento para instituições afetadas.

5.1 trabalhos futuros

A validação completa desta proposta requer os seguintes passos:

- **Implementação e Validação (6-12 meses)**: Desenvolver um protótipo funcional e implantá-lo em um projeto piloto, por exemplo, em uma rede multi-institucional, para validar as projeções de performance com tráfego real e em maior escala.
- **Otimizações Avançadas (12-18 meses)**: Investigar o uso de algoritmos de machine learning para predição de consultas (prefetching inteligente) e otimizar os protocolos de cooperação, incluindo a integração com padrões emergentes como DoH (DNS over HTTPS) e DoT (DNS over TLS).

- **Escalabilidade e Governança (18-24 meses)**: Desenvolver um modelo de governança para a operação de redes cooperativas multi-organizacionais e analisar o impacto em escala nacional.

5.2 contribuições

Este trabalho oferece contribuições científicas, práticas e sociais.

- **Científicas**: Apresenta uma modelagem empírica de padrões de uso de DNS em uma rede acadêmica brasileira, uma arquitetura híbrida que une sistemas centralizados e distribuídos, e a calibração de modelos de cache com dados reais.
- **Práticas**: Oferece uma solução implementável para redução de custos operacionais e melhoria de performance, mantendo a robustez do sistema.
- **Sociais**: Contribui para a melhoria da qualidade da Internet em regiões sub-atendidas, fortalecendo a autonomia tecnológica regional e reduzindo a dependência de infraestruturas centralizadas.

6. AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Núcleo de Estudos e Fomento Acadêmico da Qualidade e Inovação (NEFAQI) e às FAQI que forneceram a infraestrutura e o apoio para a realização deste estudo.

REFERÊNCIAS

CHUNG, T.; LEVIN, D.; LEGOUT, A.; KAAFER, M. A.; DABBOUS, W. **On the locality of internet traffic: a view from backbone and access networks.** *Computer Communications*, v. 108, p. 69–83, 2017.

NAYAK, A.; REIMERS, I.; GOLDEN, R. **The impact of DNS on web browse performance.** *ACM SIGMETRICS Performance Evaluation Review*, v. 44, n. 1, p. 421–422, 2016.

SCHOMP, K.; CALLAHAN, T.; RABINOVICH, M.; ALLMAN, M. **On measuring the client-side DNS infrastructure.** In: *INTERNET MEASUREMENT CONFERENCE*, 2014, Vancouver. p. 77–90.

SILVA, M. A.; FRANCO, M. F.; SCHEID, E. J.; ZEMBRUZKI, L.; GRANVILLE, L. Z. **PerfResolv: a geo-distributed approach for performance analysis of public DNS resolvers based on domain popularity.** In: *INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCED INFORMATION NETWORKING AND APPLICATIONS (AINA)*, 2024, Kitakyushu.p. 35–47.

ZEMBRUZKI, L.; JACOBS, A. S.; LANDTRETER, G. S.; GRANVILLE, L. Z.; MOURA, G. C. M. **dnstracker: measuring centralization of DNS infrastructure in the wild.** In: *IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ADVANCED INFORMATION NETWORKING AND APPLICATIONS (AINA)*, 2020, Caserta. p. 871–882.

ZEMBRUZKI, L.; JACOBS, A. S.; GRANVILLE, L. Z. **On the consolidation of the internet domain name system.** In: *IEEE GLOBAL COMMUNICATIONS CONFERENCE (GLOBECOM)*, 2022, Rio de Janeiro.p. 2122–2127.

ZEMBRUZKI, L.; JACOBS, A. S.; PFITSCHER, R. J.; GRANVILLE, L. Z. **Examining the centralization of email industry: a landscape analysis for IPv4 and IPv6.** In: *IEEE/IFIP NETWORK OPERATIONS AND MANAGEMENT SYMPOSIUM (NOMS)*, 2023, Miami. p. 1–6.