

# Recuperação Semântica Descentralizada de Documentos Científicos em Redes P2P: um Desenho de Pesquisa

Carlos Giongo, Adriano Fiorese

<sup>1</sup>Centro de Ciências Tecnológicas – Universidade Do Estado de Santa Catarina  
Joinville, SC – Brazil

carlos.giongo@edu.udesc.br, adriano.fiorese@udesc.br

**Abstract.** *This paper presents the research design of an ongoing master's project at UDESC on a decentralized P2P architecture for persistence and semantic retrieval of scientific documents. The approach combines a DHT overlay for peer discovery and baseline routing with a QUIC-based data plane and erasure coding for fault-tolerant storage. On top of that, distributed semantic routing is investigated over approximate neighborhoods, enabling similarity search without a global index under churn. Initial experiments provide evidence of feasibility.*

**Resumo.** *Este artigo apresenta o desenho de um projeto de mestrado em andamento na UDESC sobre uma arquitetura P2P descentralizada para persistência e recuperação semântica de documentos científicos. A proposta combina um overlay DHT para descoberta de pares e roteamento base com um plano de dados em QUIC e erasure coding para armazenamento tolerante a falhas. Sobre essa infraestrutura, investiga-se roteamento semântico distribuído em vizinhanças aproximadas, permitindo busca por similaridade sem índice global sob churn. Experimentos iniciais fornecem evidência de viabilidade.*

## 1. Introdução

A gestão de dados em larga escala tornou-se um requisito para a pesquisa em Sistemas de Informação, impulsionada pelo crescimento exponencial do volume de ativos digitais e pela necessidade de análises de dados [Li and Xiao 2021, Xu et al. 2020]. Tradicionalmente, o modelo Cliente-Servidor (C/S) sustenta essas infraestruturas, com servidores centralizados gerenciando a informação. Contudo, essa centralização cria gargalos e pontos únicos de falha, comprometendo escalabilidade e resiliência [Zhang et al. 2013]. Em contrapartida, as arquiteturas distribuídas, como as redes Peer-to-Peer (P2P), emergem como uma solução ao distribuírem recursos e responsabilidades entre os nós participantes, eliminando a dependência de autoridades centrais e mitigando riscos de censura ou desastres [Li et al. 2003, Zhang et al. 2013].

A introdução de DHTs (Distributed Hash Tables) para a organização e indexação de dados em redes peer-to-peer permitiu avanços significativos na escalabilidade, robustez e eficiência desses sistemas [Papapetrou et al. 2007]. Ao fornecer um espaço de chaves global e abstrato, as DHTs permitem que recursos sejam localizados de forma determinística, garantindo balanceamento de carga e escalabilidade mesmo em ambientes com alta rotatividade de nós (churn), caracterizada pela entrada e saída dinâmica de nós, impactando conectividade, disponibilidade e persistência dos dados [Zhang et al. 2013].

Contudo, a simples distribuição dos dados não é suficiente, tornando-se necessário garantir que a infraestrutura subjacente suporte os requisitos contemporâneos de integridade e disponibilidade, superando as limitações dos sistemas de arquivos tradicionais [Balaji et al. 2018, Qiao et al. 2022]. Esta pesquisa descreve a abordagem de um projeto de mestrado em desenvolvimento na Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC) que investiga uma arquitetura descentralizada para persistência e recuperação semântica de documentos científicos, baseada em overlays DHT.

## 2. Ciência Aberta e repositórios científicos

O paradigma da Ciência Aberta (CA) exige que os objetos de pesquisa, sendo eles dados, publicações e códigos, sejam geridos sob os princípios FAIR (Findable, Accessible, Interoperable, Reusable), visando maximizar reuso e a reprodutibilidade [Wilkinson et al. 2016, Bagstad et al. 2025]. Atualmente, uma parcela significativa dos dados científicos permanece como “dark data”, armazenada em servidores locais com acesso controlado ou em formatos não estruturados, limitando sua descoberta e reutilização [Bozada et al. 2021]. A implementação técnica dos princípios FAIR, especialmente a interoperabilidade e a acessibilidade por máquinas, é importante para transformar esses repositórios em ecossistemas dinâmicos de conhecimento [Soiland-Reyes et al. 2024].

Para sustentar esses repositórios descentralizados, o uso de DHTs como a Kademlia oferece uma base sólida para a descoberta de pares e roteamento, utilizando métricas XOR para calcular distâncias entre nós [Maymounkov and Mazières 2002, Giatsoglou et al. 2022]. No entanto, a persistência dos dados em redes dinâmicas exige mais do que a simples replicação, que impõe um alto custo de armazenamento (overhead) [Li and Xiao 2021]. Técnicas de Erasure Coding (EC) apresentam-se como uma alternativa superior, permitindo tolerância a falhas com menor redundância de dados em comparação à replicação completa, otimizando o uso do espaço de armazenamento distribuído [Dutta et al. 2008, Balaji et al. 2018]. Adicionalmente, a adoção de protocolos de transporte modernos como o QUIC se torna relevante por conta da eficiência e segurança na transferência desses dados em redes instáveis [Ortega and Monserrat 2020].

## 3. Desafio da recuperação semântica em P2P dinâmico

O principal gargalo técnico abordado nesta pesquisa reside na separação entre a eficiência do lookup exato em DHTs e a necessidade de busca semântica. As DHTs são projetadas para desassociar a localidade semântica da localidade topológica através de hashing consistente (como SHA-1 comumente), espalhando chaves uniformemente para balancear a carga [Zhu and Hu 2007, Zhang et al. 2013]. Embora permita encontrar dados em  $O(\log N)$  saltos, inviabiliza recuperação por similaridade semântica, pois arquivos com conteúdos similares acabam armazenados em nós distantes na rede [Zhu and Hu 2007].

Atualmente, a recuperação densa (dense retrieval) baseada em embeddings (representações vetoriais latentes) é o estado da arte para capturar nuances semânticas de consultas complexas [Giatsoglou et al. 2022]. Entretanto, a maioria das implementações de índices de busca aproximada, como HNSW (Hierarchical Navigable Small World), depende de estruturas centralizadas ou índices globais que não escalam bem em ambientes P2P puros, onde a topologia muda com frequência devido ao churn, podendo causar perda

de dados e degradação de índices locais [Bruch et al. 2024]. O desafio, portanto, é realizar buscas por similaridade em um grafo distribuído sem a necessidade de um coordenador central para manter o índice global. Assim, são investigados mecanismos distribuídos de indexação e roteamento semântico sobre uma infraestrutura P2P baseada em DHT, preservando escalabilidade e tolerância a churn.

#### **4. Desenho da Pesquisa**

Este trabalho adota o paradigma de Design Science Research (DSR) como método de condução da pesquisa, no qual a produção de conhecimento ocorre por meio do projeto, construção e avaliação de artefatos computacionais [Hevner et al. 2004].

Nesse contexto, o artefato proposto consiste em uma arquitetura P2P descentralizada para persistência e recuperação semântica de documentos científicos, incorporando mecanismos de roteamento semântico distribuído e tolerância a falhas.

O objetivo deste projeto de mestrado é investigar uma arquitetura P2P para (i) persistência de documentos científicos com tolerância a falhas e (ii) recuperação semântica com qualidade prática, evitando a dependência de um índice global ou de coordenação central. O problema central é que overlays baseados em DHT são eficientes para lookup exato, porém não preservam proximidade semântica, o que dificulta buscas por similaridade em ambientes dinâmicos. A hipótese geral é que, ao combinar uma infraestrutura de armazenamento e transporte orientada a disponibilidade e eficiência com mecanismos de roteamento/indexação semântica distribuídos, é possível aproximar a efetividade de recuperação de soluções centralizadas mantendo escalabilidade e tolerância a churn.

A avaliação do artefato é conduzida por meio de experimentos controlados, visando analisar sua efetividade e custo sob diferentes condições de operação, como variações de escala, churn e distribuição de carga. Esses experimentos visam validar a solução e evidenciar trade-offs entre efetividade, custo de comunicação e robustez sob churn, contribuindo para o entendimento do design de sistemas de recuperação semântica em redes P2P dinâmicas.

##### **4.1. Objetivos e questões de pesquisa**

O objetivo geral é definir e avaliar um desenho arquitetural que sustente o ciclo completo de publicação, persistência e recuperação semântica de documentos científicos em uma rede P2P. Como objetivos específicos, consideram-se: (i) reduzir o custo de redundância de dados mantendo disponibilidade, (ii) reduzir variabilidade e tempo em cenários multi-fonte e (iii) melhorar a efetividade de busca (p.ex., Recall@k) sem exigir manutenção de índice global.

A pesquisa é guiada pelas seguintes questões: (Q1) em operações P2P com reconstrução multi-fonte induzida por técnicas de tolerância a falhas, o uso de um plano de dados com QUIC reduz o tempo agregado e a variabilidade em comparação com configurações baseadas em TCP? (Q2) mecanismos de roteamento semântico distribuído, inspirados em grafos de vizinhança aproximada, aumentam a efetividade de recuperação em relação a baselines descentralizados ingênuos, sem inviabilizar o custo de comunicação? (Q3) estratégias de mitigação de mínimos locais alteram de forma controlável o compromisso entre efetividade e overhead, com overhead contemplando saltos e nós visitados?

## 4.2. Visão da abordagem e componentes do desenho

O desenho proposto organiza-se em dois eixos complementares, conforme a Figura 1. No primeiro eixo (infraestrutura), a rede é estruturada por um overlay DHT para descoberta de pares e roteamento base, com separação entre um plano de controle leve e um plano de dados voltado à transferência de conteúdo e vetores. A persistência é obtida por fragmentação e codificação para tolerância a falhas com erasure coding, reduzindo o custo de redundância em comparação à replicação completa, e permitindo reconstrução mesmo na indisponibilidade parcial de nós. Para tornar a transferência mais estável sob heterogeneidade de enlaces e fontes, o plano de dados utiliza um transporte com multiplexação e melhor suporte a múltiplos fluxos, reduzindo o impacto de variações durante reconstruções multi-fonte.

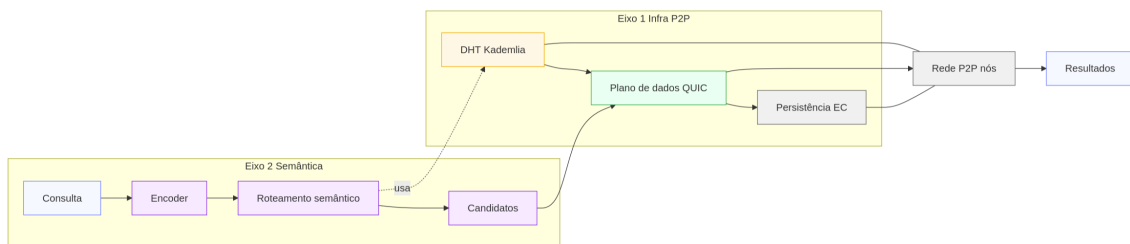


Figura 1. Desenho da infraestrutura simplificada

No segundo eixo (semântica) da Figura 1, aborda-se principalmente sobre a recuperação de documentos. Cada documento é representado por um vetor denso e metadados mínimos para suportar busca por similaridade. Como a DHT não preserva localidade semântica, introduz-se um mecanismo de roteamento semântico distribuído sobre a infraestrutura P2P, explorando vizinhanças aproximadas e navegação gulosa baseada em hill climbing, guiada por similaridade vetorial, sem depender de um índice global. Essa mecânica é melhor representada na Figura 2, onde é demonstrado como os saltos ocorrem de nó em nó em busca da menor distância (melhor local). Para robustez sob churn e popularidade assimétrica, o desenho incorpora ajustes adaptativos para mitigar mínimos locais e hotspots, por exemplo via saltos probabilísticos controlados e seleção de vizinhos com penalização por ocupação.



Figura 2. Mecânica de roteamento com base em uma requisição

## 4.3. Estratégia de avaliação

A avaliação é planejada para isolar e, em seguida, integrar os dois eixos do projeto. No eixo de infraestrutura, mede-se o impacto do transporte e da persistência tolerante a falhas nas operações de publicação e recuperação, incluindo reconstrução multi-fonte. No eixo de recuperação, avalia-se a efetividade e o custo do roteamento semântico distribuído. Por fim, realiza-se uma avaliação ponta a ponta, cobrindo publicação, persistência, consulta e reconstrução.

As métricas mínimas incluem efetividade (por exemplo, Recall@k), custo de busca (saltos e fração de nós visitados por consulta), latência e variabilidade em publicação e recuperação, custo de reconstrução (tempo agregado e número de fontes contatadas) e distribuição de carga por nó. Os cenários variam escala, níveis de churn, assimetria de recursos e vieses de popularidade. Como baselines, consideram-se uma solução baseada apenas em lookup exato (sem roteamento semântico), estratégias descentralizadas simples (exploração aleatória ou vizinhança não semântica) e variações do plano de dados para transferência (TCP vs QUIC).

## **5. Situação atual e resultados iniciais**

O projeto já dispõe de evidências iniciais nos dois eixos, obtidas por protótipos e avaliações controladas. No eixo de infraestrutura, foi implementado um protótipo com overlay DHT, separação entre controle e dados, persistência via erasure coding e transferência no plano de dados. Em experimentos com corpus de documentos científicos distribuído em 100 pares lógicos, observou-se que o uso de QUIC no plano de dados reduziu o tempo agregado de operações de publicação e recuperação em comparação com configurações baseadas em TCP, com ganhos mais evidentes em cenários de reconstrução multi-fonte.

No eixo de recuperação, foi investigado um mecanismo de roteamento semântico distribuído inspirado em grafos de vizinhança aproximada, combinando navegação gulosa e ajustes para mitigar mínimos locais e hotspots. Em avaliação sobre o Open-RAG-Bench [Vectara 2023], a abordagem atingiu Recall@20 de 83,6%, superando baselines descentralizados simples e mantendo comportamento compatível com crescimento logarítmico.

Parte dessas evidências está descrita em artigos do projeto atualmente em processo de avaliação/publicação.

## **6. Próximos passos e limitações**

A etapa seguinte do projeto é integrar os dois eixos no fluxo ponta a ponta, conectando publicação e persistência tolerante a falhas com o roteamento semântico distribuído para consultas, de modo a medir efetividade e custo no ciclo completo. Em paralelo, pretende-se consolidar políticas de controle de carga e parâmetros operacionais, como por exemplo, limites de exploração, regras de saltos adaptativos e parâmetros de redundância/fragmentação por meio de análise de sensibilidade.

As limitações e riscos considerados no desenho incluem: (i) degradação de vizinhanças semânticas sob churn elevado, (ii) formação de hotspots por popularidade de conteúdos ou consultas, (iii) aumento de overhead de rede para sustentar efetividade sem índice global, e (iv) custos de manutenção/atualização dos vetores e estruturas locais ao longo do tempo. O desenho de pesquisa incorpora esses riscos como parte do plano de avaliação, visando caracterizar explicitamente os trade-offs entre efetividade, custo de comunicação, variabilidade e robustez em cenários dinâmicos.

## **Agradecimentos**

Os autores gostariam de agradecer à UDESC pelo suporte financeiro por meio da bolsa PROMOP/UDESC, bem como ao apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES), para a realização do trabalho.

## Referências

- Bagstad, K. J., Balbi, S., Adamo, G., Athanasiadis, I. N., Affinito, F., Willcock, S., Magrath, A., Hayashi, K., Harmáčková, Z. V., Niamir, A., Smets, B., Buchhorn, M., Drakou, E. G., Alfieri, A., Edens, B., Morales, L. G., Ágnes Vári, Sanz, M.-J., and Villa, F. (2025). Interoperability for ecosystem service assessments: Why, how, who, and for whom? *Ecosystem Services*, 72:101705.
- Balaji, S. B., Krishnan, M. N., Vajha, M., et al. (2018). Erasure coding for distributed storage: an overview. *Science China Information Sciences*, 61(10):100301.
- Bozada, T., Borden, J., Workman, J., Del Cid, M., Malinowski, J., and Luechtefeld, T. (2021). Sysrev: A fair platform for data curation and systematic evidence review. *Frontiers in Artificial Intelligence*, Volume 4 - 2021.
- Bruch, S., Nardini, F. M., Rulli, C., and Venturini, R. (2024). Efficient inverted indexes for approximate retrieval over learned sparse representations. In *Proceedings of the 47th International ACM SIGIR Conference on Research and Development in Information Retrieval*, SIGIR '24, page 152–162, New York, NY, USA. Association for Computing Machinery.
- Dutta, P., Guerraoui, R., and Levy, R. R. (2008). Optimistic erasure-coded distributed storage. In *Proceedings of the 22nd International Symposium on Distributed Computing*, DISC '08, page 182–196, Berlin, Heidelberg. Springer-Verlag.
- Giatsoglou, N., Krasanakis, E., Papadopoulou, S., and Kompatsiaris, I. (2022). A graph diffusion scheme for decentralized content search based on personalized pagerank. In *2022 IEEE 42nd International Conference on Distributed Computing Systems Workshops (ICDCSW)*, pages 53–59.
- Hevner, A. R., March, S. T., Park, J., and Ram, S. (2004). Design science in information systems research. *MIS Quarterly*, 28(1):75–105.
- Li, J., Loo, B. T., Hellerstein, J. M., Kaashoek, M. F., Karger, D. R., and Morris, R. (2003). On the feasibility of peer-to-peer web indexing and search. In Kaashoek, M. F. and Stoica, I., editors, *Peer-to-Peer Systems II*, pages 207–215, Berlin, Heidelberg. Springer Berlin Heidelberg.
- Li, Z. and Xiao, C. (2021). Er-store: A hybrid storage mechanism with erasure coding and replication in distributed database systems. *Scientific Programming*, 2021(1):9910942.
- Maymounkov, P. and Mazières, D. (2002). Kademlia: A peer-to-peer information system based on the xor metric. In Druschel, P., Kaashoek, F., and Rowstron, A., editors, *Peer-to-Peer Systems*, pages 53–65, Berlin, Heidelberg. Springer Berlin Heidelberg.
- Ortega, V. and Monserrat, J. F. (2020). Semantic distributed data for vehicular networks using the inter-planetary file system. *Sensors*, 20(22).
- Papapetrou, O., Siberski, W., Balke, W.-T., and Nejd, W. (2007). Dhts over peer clusters for distributed information retrieval. In *21st International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA '07)*, pages 84–93.
- Qiao, Y., Zhang, M., Zhou, Y., Kong, X., Zhang, H., Xu, M., Bi, J., and Wang, J. (2022). Netec: Accelerating erasure coding reconstruction with in-network aggregation. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 33(10):2571–2583.

- Soiland-Reyes, S., Goble, C., and Groth, P. (2024). Evaluating FAIR digital object and linked data as distributed object systems. *PeerJ Computer Science*, 10:e1781.
- Vectara (2023). Open-rag-bench dataset. [https://huggingface.co/datasets/vectara/open\\_ragbench](https://huggingface.co/datasets/vectara/open_ragbench). Accessed: 2025-12-05.
- Wilkinson, M. D., Dumontier, M., Aalbersberg, I. J., et al. (2016). The FAIR guiding principles for scientific data management and stewardship. *Scientific Data*, 3(1):160018.
- Xu, B., Huang, J., Qin, X., and Cao, Q. (2020). Traffic-aware erasure-coded archival schemes for in-memory stores. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 31(12):2938–2953.
- Zhang, H., Wen, Y., Xie, H., and Yu, N. (2013). *Distributed Hash Table: Theory, Platforms and Applications*. SpringerBriefs in Computer Science. Springer New York, New York, NY.
- Zhu, Y. and Hu, Y. (2007). Efficient semantic search on dht overlays. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, 67(5):604–616.