

HERMES: Impacto de Algoritmos de Congestionamento no Processo de Certificação de Origem

Kauã B. Hopfer¹, Gilson S. Junior¹, Luiz C. Camargo¹, Maurício A. Pillon¹

¹ Departamento de Ciência da Computação (DCC)
Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC)

{gilson.sj, kaua.hopfer, lc.camargo}@edu.udesc.br
mauricio.pillon@udesc.br

***Resumo.** O comércio internacional atua como motor da economia global, apoiado em cadeias de suprimentos complexas que exigem a comprovação de origem para o acesso a regimes tarifários preferenciais, em especial no setor automotivo, devido a limitações relacionadas a processos manuais e à ausência de plataformas interoperáveis. Tais limitações agravam o tempo de fiscalização aduaneira e geram custos de sobreestadia no Porto de Entrada. Este artigo apresenta a plataforma HERMES, uma arquitetura descentralizada para a emissão e validação de documentos de origem, baseada no acordo ACE 55. O foco principal deste trabalho é analisar o impacto dos algoritmos de controle de congestionamento TCP, CUBIC e BBR na latência da camada de orquestração da plataforma.*

1. Introdução

O comércio internacional atua como o motor da economia global, apoiado em cadeias de suprimentos cada vez mais complexas e fragmentadas. No setor automotivo, o processo produtivo exige coordenação entre os diversos elos da cadeia para o cumprimento das regras de origem previstas em acordos de livre-comércio [World Customs Organization 2012]. A comprovação da origem de uma mercadoria, consolidada por meio do Declaração de Origem (DO) e, posteriormente, pelo Certificado de Origem (CO), é requisito obrigatório para a aplicação de regimes tarifários preferenciais [World Customs Organization 2006]. Neste cenário há desafios, como a dependência de processos manuais e a ausência de plataformas interoperáveis, suscetíveis a fraudes e à assimetria de informação [Tyagi and Goyal 2021].

Tais desafios impactam diretamente o processo no Porto de Entrada (PoE), em que a incerteza documental leva a verificações extensas. O aumento do tempo de fiscalização retém contêineres e mercadorias além dos prazos de franquia gratuita, gerando custos elevados de sobreestadia (*Demurrage*) e de detenção (*Detention*) [Ahmad et al. 2021]. Apesar de a tecnologia *blockchain* (BC) ter se tornado uma opção em imutabilidade e confiança descentralizada [Bonnet and Teuteberg 2023, Rizzardi et al. 2024, Saari et al. 2022, Yang et al. 2021], a aplicação em cenários reais acarreta desafios de escalabilidade e de desempenho de rede, o que requer mitigação desses desafios.

Nesse contexto, este artigo apresenta a plataforma **HERMES**, uma arquitetura descentralizada para a emissão e validação de declarações de origem baseada nas regras da Associação Latino-Americana de Integração (ALADI). A solução é aplicada ao Acordo de Complementação Econômica 55 (ACE 55), que abrange produtos como automóveis, veículos comerciais, tratores e autopeças. A plataforma utiliza o gerenciador de mensagens RabbitMQ para distribuir requisições de cálculo e de validação em filas processadas por múltiplos trabalhadores independentes. Os valores processados compõem o Índice de Conteúdo Regional (ICR),

que define a porcentagem de regionalidade de uma mercadoria e, portanto, determina se ela recebe regime tarifário preferencial ou não.

Neste trabalho, analisam-se os algoritmos CUBIC e BBR de controle de congestionamento do TCP na comunicação entre componentes distribuídos, visando otimizar a latência da camada de orquestração. A avaliação experimental mostra redução da latência $p99$ de 7.514 ms para 873 ms no cenário de 100kB, e de 5.891 ms para 2.683 ms no cenário de 10MB com o uso do algoritmo BBR, aproximadamente 88% e 54%, respectivamente. O artigo está organizado da seguinte forma: (i) a Seção 2 apresenta a plataforma HERMES; (ii) a Seção 3 detalha o ambiente de experimentos; (iii) a Seção 4 discute os resultados e, finalmente, (iv) a Seção 5 apresenta considerações finais e trabalhos futuros.

2. HERMES

A arquitetura da plataforma Hermes está organizada em três módulos: **Hermes Agents**, esse módulo é responsável pela interação dos atores da cadeia de suprimentos automotiva, com o módulo **Hermes Cod**, o qual é formado por um conjunto de camadas e componentes responsável pela geração de DO, CO e pelo cálculo do ICR. Já o módulo **Hermes Blockchain** é responsável pelo registro final das transações no Hyperledger Fabric, em uma rede permissionada. Na Figura 1, há mais detalhes da arquitetura da plataforma Hermes, que não foram descritos por questões de espaço neste artigo.

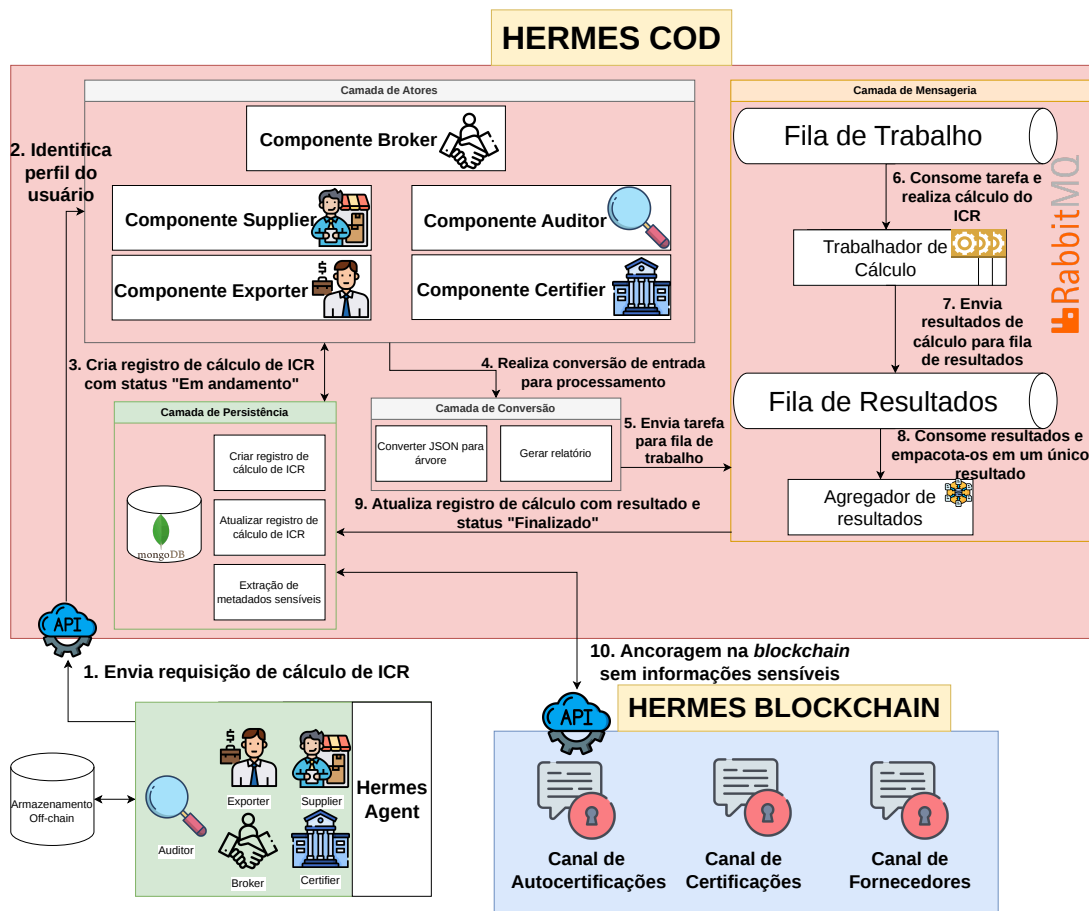


Figura 1. Arquitetura em alto nível da plataforma HERMES.

Nota-se que a arquitetura depende da distribuição de tarefas entre múltiplos trabalhadores, de forma a assegurar a redundância no processamento, além da eficiência de comunicação entre o orquestrador e os nós de cálculo, o que é identificado como um possível gargalo.

3. Análise Experimental

A avaliação da plataforma HERMES concentrou-se na análise de desempenho da camada de orquestração sob diferentes condições de tráfego e algoritmos de transporte, visando quantificar o impacto da infraestrutura de rede. Os experimentos foram conduzidos no agregado Baía da Babitonga, localizado no Laboratório de Processamento Paralelo e Distribuído (LabP2D), utilizando quatro nós homogêneos equipados com processadores Intel Core i7-13700K (24 núcleos), 64 GB de RAM DDR5 e interconexão 1 Gbit Ethernet.

Para mitigar interferências de hardware e assegurar o isolamento de recursos, a topologia foi segregada em instâncias dedicadas para emulação de carga, orquestração HERMES COD, mensageria via RabbitMQ e a execução consolidada de trabalhadores e agregador. A metodologia dos experimentos consistiu na execução de três cenários de carga, baseados no tamanho do *payload*: **P**, com arquivos de entrada de 100kB, **M** com 1MB e **G** com 10MB. Para cada cenário, foram comparados os algoritmos de controle de congestionamento TCP CUBIC e BBR. A carga de trabalho envolveu 1000 requisições totais em cada ciclo de execução, com concorrência de 100 req/s nos cenários P e M e de 5 req/s no cenário G, devido às limitações de recursos do RabbitMQ. Os experimentos foram executados 10 vezes por cenário.

4. Discussão de Resultados

A análise dos resultados demonstra que a eficiência da plataforma HERMES é sensível à escolha do algoritmo de controle de congestionamento, como ilustrado nas Figuras 2, 3 e 4. O cenário **P** apresenta a maior disparidade de desempenho, cujo algoritmo CUBIC apresentou maior instabilidade, dada pela latência p_{99} de aproximadamente 7.514 ms em relação aos 873 ms do BBR. Isso demonstra que o BBR foi mais eficaz em gerenciar o enfileiramento de mensagens curtas de alta frequência.

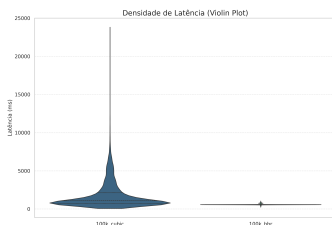


Figura 2. Cenário P (100 kB)

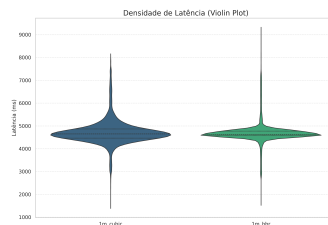


Figura 3. Cenário M (1 MB)

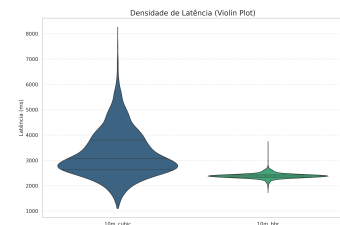


Figura 4. Cenário G (10 MB)

O cenário **M** apresentou uma aparente convergência entre os protocolos, com medianas semelhantes, apesar de os extremos do BBR serem mais altos do que os do CUBIC. Isso sugere que a rede deixou de ser o gargalo, para que o próprio enlace físico de 1 Gb/s limitasse a capacidade de processamento. Nessa situação de saturação, o comportamento de *probing* do BBR introduz picos de latência nos extremos superiores, enquanto o CUBIC, já recuado por sua natureza reativa, apresenta distribuição mais contida.

Por fim, o cenário **G** demonstrou o desempenho superior do BBR, com p_{99} de aproximadamente 2.683 ms, contra 5.891 ms do CUBIC. Este comportamento é atribuído à necessidade de múltiplos pacotes TCP para o transporte de um único *payload* de 10 MB, o que resulta em fluxos de comunicação mais extensos. A natureza reativa do CUBIC, que reduz a taxa de transmissão em cerca de 30% ao detectar a perda de um pacote, introduz latências elevadas em cada requisição sob condições de congestionamento [Ha et al. 2008]. O BBR, em contrapartida, modela a largura de banda de gargalo e o RTT mínimo do enlace, operando próximo à

capacidade nominal da rede sem sobrecarregar os *buffers* [Cardwell et al. 2017]. Essa abordagem minimiza a necessidade de retransmissões e mantém a estabilidade dos fluxos, resultando em latências menores.

5. Considerações finais e trabalhos futuros

Este trabalho apresentou uma visão geral da plataforma HERMES para a emissão e validação de declarações de origem, conforme o acordo ACE 55. A arquitetura da plataforma foi validada sob a perspectiva de infraestrutura de rede, demonstrando que o processamento distribuído requer otimização na camada de transporte para mitigar gargalos. Os resultados demonstraram que o algoritmo BBR é superior ao CUBIC na redução de latências em cenários de saturação de *buffer*. Como trabalhos futuros, planeja-se analisar métricas de desempenho relevantes à BC e realizar testes com dados reais de autoridades certificadoras, para simulação de cenários reais.

Agradecimentos

Este trabalho é apoiado financeiramente pela Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina (FAPESC), BECOMEX Consultoria Ltda.z, Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC) e Laboratório de Processamento Paralelo e Distribuído (LabP2D).

Referências

- Ahmad, R. W., Hasan, H., Jayaraman, R., Salah, K., and Omar, M. (2021). Blockchain applications and architectures for port operations and logistics management. *Research in Transportation Business Management*, 41:100620.
- Bonnet, S. and Teuteberg, F. (2023). Impact of blockchain and distributed ledger technology for the management of the intellectual property life cycle: A multiple case study analysis. *Computers in Industry*, 144:103789.
- Cardwell, N., Cheng, Y., Gunn, C. S., Yeganeh, S. H., and Jacobson, V. (2017). Bbr: congestion-based congestion control. *Commun. ACM*, 60(2):58–66.
- Ha, S., Rhee, I., and Xu, L. (2008). Cubic: a new tcp-friendly high-speed tcp variant. *SIGOPS Oper. Syst. Rev.*, 42(5):64–74.
- Rizzardi, A., Sicari, S., Cevallos M., J. F., and Coen-Porisini, A. (2024). Iot-driven blockchain to manage the healthcare supply chain and protect medical records. *Future Generation Computer Systems*, 161:415–431.
- Saari, A., Vimpari, J., and Junnila, S. (2022). Blockchain in real estate: Recent developments and empirical applications. *Land Use Policy*, 121:106334.
- Tyagi, N. and Goyal, M. (2021). Blockchain-based smart contract for issuance of country of origin certificate for indian customs exports clearance. *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, 35.
- World Customs Organization (2006). International convention on the simplification and harmonization of customs procedures (as amended) – revised kyoto convention. specific annex k: Rules of origin. Accessed: 2025-11-10.
- World Customs Organization (2012). *Rules of Origin - Handbook*. World Customs Organization (WCO), Brussels. Available from: World Customs Organization.
- Yang, X., Li, M., Yu, H., Wang, M., Xu, D., and Sun, C. (2021). A trusted blockchain-based traceability system for fruit and vegetable agricultural products. *IEEE Access*, 9:36282–36293.