SISTEMA DE MAPEAMENTO 3D COM SENSOR LIDAR LIVOX MID-360

Gabrielle Alves, Aureo Guilherme Dobrikopf, Douglas Wildgrube Bertol

INTRODUÇÃO

Em cenários internos, a Localização e Mapeamento Simultâneos (*Simultaneous Localization and Mapping* - SLAM) destaca-se como pilar fundamental para a estimação de estados (Yue et al., 2024). A adoção de sensores LiDAR (*Light Detection And Ranging*) consolidou-se por sua exatidão geométrica e capacidade de captar detalhes sob amplo campo de visão (Shan; Englot, 2018). Neste contexto, o sensor Livox Mid-360 supera limitações clássicas dos sensores mecânicos, como o campo de visão restrito e os pontos cegos, ao empregar uma varredura não-repetitiva, conferindo alta estabilidade na extração de feições do ambiente (Vizzo et al., 2023; Felix et al., 2026). Contudo, em trajetórias de longa escala, como corredores com alta repetitividade estrutural, arquiteturas baseadas estritamente em odometria geométrica (sem o suporte de dados inerciais provenientes de uma IMU - *Inertial Measurement Unit*) são suscetíveis à progressiva acumulação de leves desvios de estimação. Assim, o objetivo deste trabalho é desenvolver e avaliar uma arquitetura de mapeamento tridimensional, contrastando o desempenho da odometria puramente geométrica de tempo real (*frontend*) com a otimização global baseada em grafos de fatores (*backend*) para a correção estrutural do ambiente.

DESENVOLVIMENTO

A arquitetura proposta divide o processamento da nuvem de pontos em dois módulos sincronizados. O *frontend* atua utilizando o algoritmo KISS-ICP (Vizzo et al., 2023), uma abordagem puramente geométrica de registro ponto a ponto que não utiliza dados de IMU para correção de distorções de movimento ou estimação contínua. Para refinar a trajetória e contornar a deriva angular natural resultante dessa ausência de restrições inerciais, o *backend* implementa o *Pose Graph Optimization* (PGO) utilizando a biblioteca GTSAM e o algoritmo iSAM2 (Kaess et al., 2011, Dellaert, 2012). Neste grafo, as poses estimadas figuram como nós, enquanto as medições sensoriais operam como fatores de restrição matemática entre eles. Ao revisitar áreas previamente mapeadas, o algoritmo detecta fechamentos de ciclo (*loop closures*), disparando a otimização matemática (focada em minimizar o erro acumulado nas restrições espaciais) para reajustar as restrições e corrigir retroativamente a trajetória no grafo global.

RESULTADOS

A avaliação foi conduzida mapeando um corredor caracterizado por sua geometria contínua. O *frontend* demonstrou robustez na construção da nuvem de pontos, contudo, acumulou um desvio angular ao longo do eixo longitudinal. Medições revelaram que, ao longo dos aproximadamente 30m de comprimento e 4m de largura do corredor, a odometria sofreu uma leve inclinação. Como evidenciado na Figura 2, o erro da trajetória do robô atingiu o pico de aproximadamente 12cm. Contudo, devido à projeção desse desvio ao longo da distância, o acúmulo resultou em um deslocamento lateral de 60cm na extremidade final da planta. Ao submeter a trajetória ao *backend*, a detecção de *loop closure* reajustou a tensão matemática do grafo e corrigiu a deriva da odometria. Além de mitigar a distorção angular e realinhar as paredes da estrutura, a consolidação do mapa pelo GTSAM eliminou ruídos e bordas de sobreposição evidentes na nuvem inicial (Figura 1), e viabilizou a filtragem espacial, entregando um mapa computacionalmente mais leve e eficiente sem perder os detalhes arquitetônicos cruciais. A ação garantiu, assim, a linearidade e a coerência topológica do mapa 3D final.

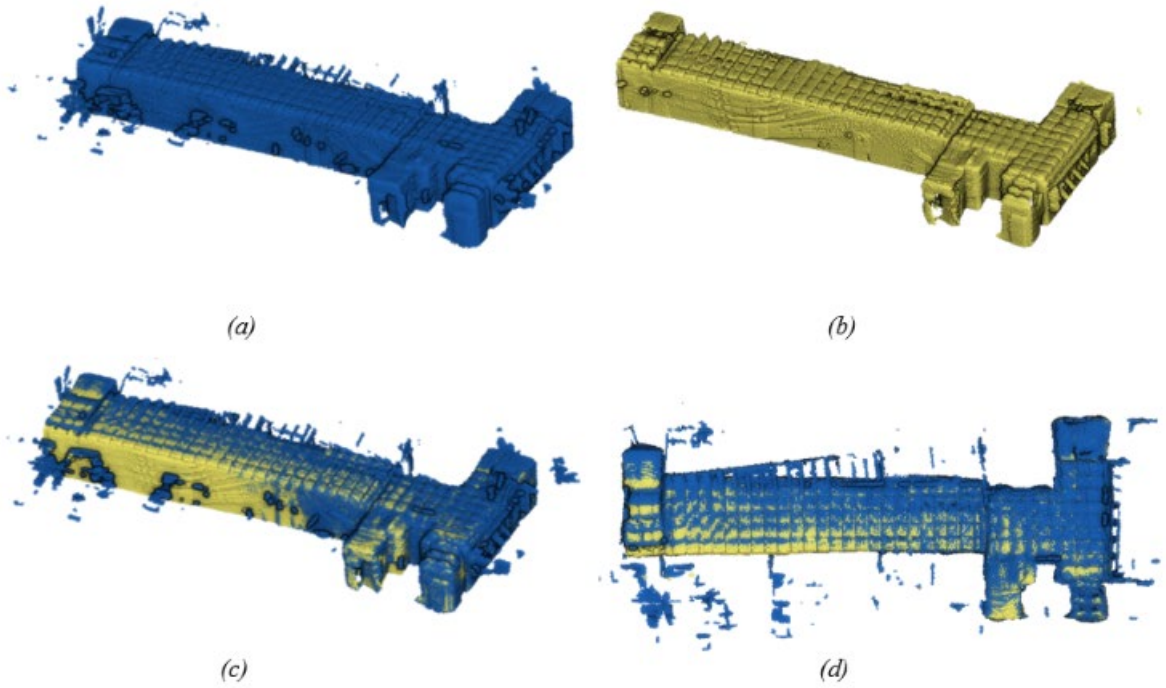
CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados atestam que, embora a odometria puramente geométrica (KISS-ICP) seja computacionalmente leve e competente em escala local (Vizzo et al., 2023), ela pode acumular pequenos desvios estruturais ao longo de infraestruturas extensas e com escassez de feições geométricas distintas. Nesses ambientes, ocorre o fenômeno da degenerescência geométrica: como as superfícies do corredor são contínuas e repetitivas, o algoritmo de registro não encontra restrições suficientes, fazendo com que a estimativa de translação "escorregue" ao longo da estrutura. Essa limitação de mapeamento é agravada pela ausência do suporte físico de uma IMU, que seria capaz de ancorar tais ambiguidades espaciais. A integração de um *backend* baseado em grafos de fatores provou-se valiosa para refinar a precisão arquitetônica. O sucesso da correção demonstra que a otimização global do GTSAM oferece uma solução robusta capaz de relaxar as distorções espaciais residuais da odometria cega, garantindo que o mapa tridimensional entregue à plataforma robótica seja estruturalmente coerente para tarefas de navegação. Em aplicações industriais reais, como o patrulhamento autônomo em fábricas, mesmo desvios centimétricos comprometem o planejamento de rotas e elevam o risco de colisões, o que torna a otimização global uma etapa indispensável na robótica móvel.

Palavras-chave: liDAR de estado sólido; SLAM; mapeamento 3D; odometria geométrica; otimização de trajetória.

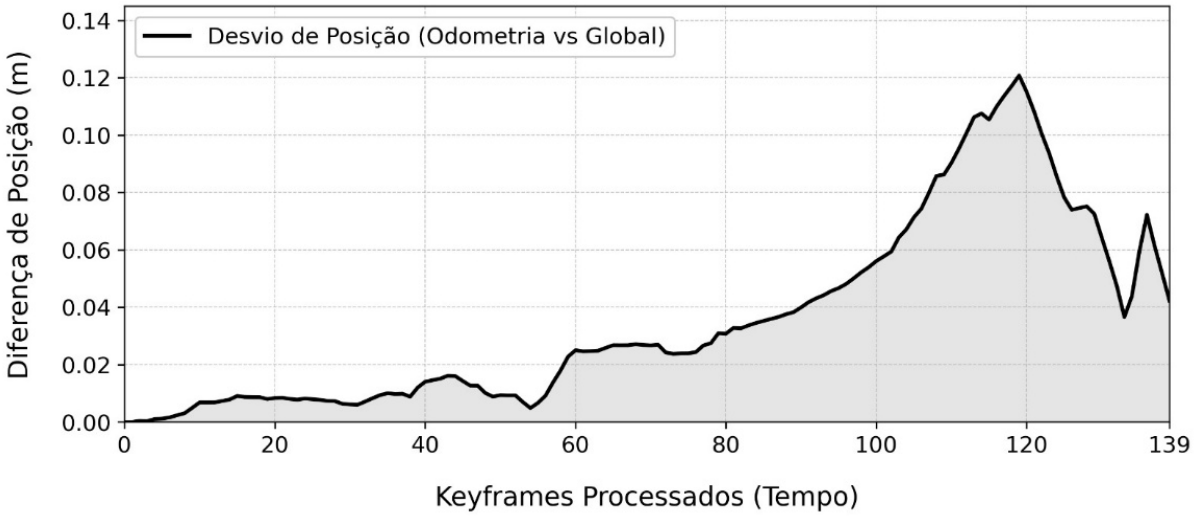
ANEXOS

Figura 1. *Comparação topológica da nuvem de pontos: (a) Odometria pura do KISS-ICP (azul) evidenciando ruídos; (b) Otimização global via GTSAM (amarelo); (c) e (d) Sobreposição das nuvens (lateral e superior) evidenciando o desvio angular acumulado nas extremidades.*



Fonte: Elaborado pela autora (2026).

Figura 2. *Evolução da diferença de posição da odometria em relação à trajetória global otimizada ao longo do processamento dos keyframes.*



Fonte: Elaborado pela autora (2026).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

DELLAERT, Frank. **Factor graphs and GTSAM**: A hands-on introduction. In: . [s.n.], 2012. Disponível em: https://api.semanticscholar.org/CorpusID:131215724.

FELIX, Doumegna Mawuto Koudjo et al. Understanding LIDAR variability: A dataset and comparative study featuring dome-shaped, solid-state, and spinning LIDARs. **IEEE Robotics and Automation Letters**, v. 11, n. 1, p. 570–577, 2026.

GRISETTI, Giorgio et al. A tutorial on graph-based SLAM. **IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine**, v. 2, n. 4, p. 31–43, 2010.

KAESS, Michael et al. ISAM2: Incremental smoothing and mapping with fluid relinearization and incremental variable reordering. In: 2011 **IEEE International Conference on Robotics and Automation**. [S.l.: s.n.], 2011. p. 3281–3288.

SHAN, Tixiao; ENGLOT, Brendan. LEGO-LOAM: Lightweight and ground-optimized LIDAR odometry and mapping on variable terrain. **2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)**, p. 4758–4765, 2018.

VIZZO, Ignacio et al. KISS-ICP: In defense of point-to-point ICP simple, accurate, and robust registration if done the right way. **IEEE Robotics and Automation Letters**, PP, p. 1–8, 02 2023.