

PLATAFORMA DIGITAL PARA APOIO À EXECUÇÃO DE FACHADAS EM EDIFÍCIOS INDUSTRIAIS COM APOIO DE ROBÓTICA E INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

J. Fonseca¹, A. Barreiro¹, P. Oliveira¹, R. Cabral^{1,2}, P. Alves³, D. Martinho³, R. Santos^{1,2}, R. Garcia⁴, N. Ferreira⁵, L. Sanhudo⁶, M. Couceiro⁷, G. Marreiros³, D. Ribeiro^{1,2}

- (1) iBuilt, Instituto Superior de Engenharia, Politécnico do Porto, Porto, Portugal
- (2) CONSTRUCT, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, Portugal
- (3) GECAD, Instituto Superior de Engenharia, Politécnico do Porto, Porto, Portugal
- (4) Garcia Garcia SA, Santo Tirso, Portugal
- (5) Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, Coimbra, Portugal
- (6) BuiltColab, Porto, Portugal
- (7) Ingeniarius, Alfena, Portugal

Resumo

A integração eficaz da robótica em estaleiro enfrenta o desafio crítico da descontinuidade semântica entre o modelo BIM (As-Design) e a dinâmica imprevisível da obra (As-Is). Este trabalho apresenta uma arquitetura de interoperabilidade baseada em sistemas ciberfísicos para a instalação automatizada de fachadas industriais, unificando três Gémeos Digitais (Ativo, Humano e Robô) num ecossistema gerido via *Robot Operating System 2* (ROS2) e *Unity*. A abordagem distingue-se pelo fecho do ciclo de controlo em tempo real: o sistema integra inspeção visual via UAVs, utilizando Deep Learning e Ray Casting para o mapeamento geométrico de anomalias, e uma gestão de segurança preventiva baseada em visão computacional, dados biométricos e redes neurais para a deteção de fadiga humana. Simultaneamente, o controlo do manipulador robótico é otimizado por meio do planeamento cinemático *MoveIt2* e de controladores *Fuzzy-PID*. Esta plataforma valida uma sincronização temporal e espacial robusta, essencial para uma colaboração homem-máquina segura e eficiente.

1. Introdução

A indústria da Arquitetura, Engenharia e Construção (AEC) enfrenta desafios prementes de produtividade e segurança no trabalho, o que impulsiona a busca por soluções baseadas na Construção 5.0. O projeto CRIARTE – Construção com Robótica Inteligente e Arquitetura Revolucionária de Tecnologias Emergentes – propõe o desenvolvimento de um ecossistema tecnológico para a automatização da instalação de painéis *sandwich* em edifícios industriais [1]. Este projeto é desenvolvido por um consórcio multidisciplinar liderado pela Ingeniarius, especializada em robótica, em copromoção com a construtora Garcia Garcia, o laboratório

colaborativo BUILT CoLAB, e as instituições de ensino superior Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP) e Instituto Superior de Engenharia de Coimbra (ISEC). A sinergia entre estas entidades visa unir a experiência prática na construção industrial à investigação avançada em robótica, digitalização e inteligência artificial.

Para suportar esta operação complexa, serão desenvolvidas três plataformas digitais distintas, denominadas gémeos digitais (DT - *Digital Twins*): o DT do Ativo, o DT do Humano e o DT do Robô. Estas plataformas constituirão o núcleo tecnológico do projeto, suportando a digitalização e a integração inteligente dos processos construtivos.

Embora existam abordagens consolidadas de Scan-to-BIM e de gémeos digitais para monitorização de obra, permanece um desafio a integração operacional com robótica de estaleiro: (i) manter coerência geométrica e semântica entre BIM (*As-Design*) e medições (*As-Is*), (ii) converter essa coerência em objetivos acionáveis para o robô (planeamento/controlo), e (iii) fechar o ciclo com atualização do DT e gestão de segurança humano-robô em tempo quase real.

O presente artigo descreve a arquitetura conceptual proposta para estas plataformas, detalhando os *pipelines* de aquisição, pré-processamento e extração de conhecimento previstos. Será dada ênfase à plataforma integradora, que garantirá a interoperabilidade entre os sistemas físicos e virtuais por meio de uma estrutura baseada em *Robot Operating System 2* (ROS2) e *Unity*. Esta arquitetura servirá de base para as fases subsequentes de implementação e de validação técnica.

2. Plataforma Digital do Ativo

A arquitetura da Plataforma Digital do Ativo será organizada em três linhas de monitorização: geométrica, de anomalias e ambiental, como apresentada na Figura 1. O objetivo será alimentar o desenvolvimento e a visualização do DT com dados reais de campo (*As-Is*), permitindo a inspeção automatizada, com suporte a visão computacional (CV – *Computer Vision*).

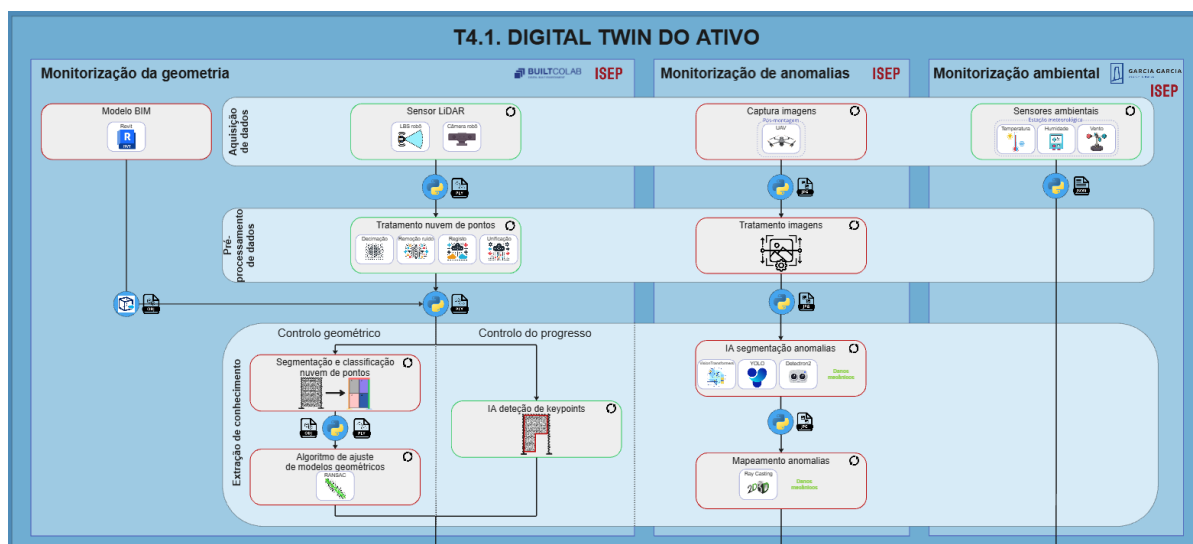


Figura 1: Arquitetura do DT do Ativo

2.1 Monitorização da Geometria

A monitorização da geometria terá como função verificar a conformidade dimensional da obra e o progresso da obra. O processo iniciar-se-á com a aquisição de dados por meio de sensores embarcados no robô manipulador (*Manitou MRT 2260*). Serão utilizados sensores LiDAR Leishen CH64W para medições de alta densidade [2], complementados por câmaras estereoscópicas StereoLabs ZED 2i para a perceção visual e o registo de cor [3].

Todos os dados serão expressos num referencial global único (BIM/obra), mantendo uma árvore de transformações (tf2) entre os elementos-chave, como o mapa, a plataforma robótica, e os respetivos sensores.

O tratamento da nuvem de pontos seguirá um fluxo de pré-processamento rigoroso para garantir a qualidade dos dados. Serão aplicadas técnicas de decimação, como o *voxel downsampling* ou *Poisson Disk Sampling*, seguidas de remoção de ruído para eliminar dados espúrios (por ex., reflexos, poeira).

Para o registo entre a nuvem de pontos capturada e o modelo BIM (*As-Design*), prevê-se explorar métodos clássicos, como o *Iterative Closest Point* (ICP) [4], bem como abordagens baseadas em *Deep Learning* (DL) [5,6], para lidar com cenários de baixa sobreposição (*overlap*). A extração de conhecimento culminará no controlo geométrico e na monitorização do progresso. Neste âmbito, a conformidade será quantificada por meio de métricas, como a distância ponto-para-superfície em relação ao BIM, o desvio angular dos planos e a taxa de cobertura (área observada/área esperada). Estes indicadores permitirão a identificação automática dos painéis montados em tempo real, bem como a deteção de desalinhamentos e lacunas de montagem face às tolerâncias definidas por elemento (painel, estrutura e ligações).

2.2 Monitorização de Anomalias

Este módulo visará à segmentação e ao mapeamento de danos mecânicos nos painéis. A aquisição de dados ocorrerá por meio de Veículos Aéreos Não Tripulados (UAVs - *Unmanned Aerial Vehicles*), garantindo aquisição remota e imagens de alta resolução georreferenciadas.

Para garantir consistência métrica, as imagens provenientes do UAV serão acompanhadas por parâmetros intrínsecos e extrínsecos, permitindo projetar anomalias no referencial do ativo com incerteza associada. A integração com o DT pressupõe que a representação 3D do ativo esteja previamente registada no BIM.

As imagens serão processadas por algoritmos de IA baseados na arquitetura *You Only Look Once* (YOLO), reconhecida por sua eficiência na deteção e segmentação em tempo real. Os modelos serão treinados com *datasets* anotados especificamente para identificar anomalias em painéis *sandwich*.

Após a segmentação 2D, será aplicada a técnica de *Ray Casting* para projetar as máscaras das anomalias diretamente no modelo 3D. O método baseia-se na projeção de raios virtuais. Cada raio é gerado a partir do centro ótico da câmara e orientado segundo a geometria definida pela respetiva pose e parâmetros intrínsecos, atravessando o plano da imagem e prolongando-se no espaço tridimensional até à interseção com a *mesh* do ativo, criando um mapa de danos tridimensional que será posteriormente integrado no DT para visualização e análise de métricas. A figura 2 ilustra o processo descrito.

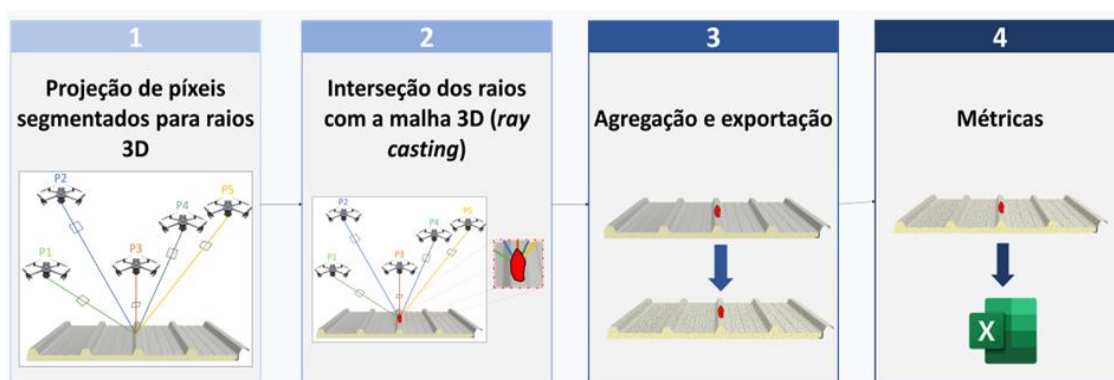


Figura 2: Etapas do mapeamento de danos mecânicos

2.3 Monitorização Ambiental

Para garantir que as operações robóticas decorram em segurança, será implementada uma monitorização ambiental contínua. Os dados serão recolhidos através de uma estação meteorológica *Ecowitt WN90LP* [7], que monitorizará parâmetros como velocidade do vento, precipitação e temperatura.

Serão estabelecidas regras operacionais baseadas num modelo de decisão *Go/Reduce/Stop*, em conformidade com as normas de segurança para robótica industrial e colaborativa, nomeadamente a ISO 10218 [8] e a ISO/TS 15066 [9]. Os limiares de atuação serão definidos através de uma avaliação de risco específica, sendo parametrizados dinamicamente em função da tarefa em execução (e.g., limites mais restritos para a elevação de painéis em altura versus a deslocação no solo). Adicionalmente, serão incorporadas margens de segurança conservadoras para mitigar o impacto de rajadas de vento súbitas ou condições de visibilidade reduzida.

Em termos de arquitetura, o estado operacional será propagado em tempo real via ROS2 para o controlador do robô e para a interface do DT. Para garantir a robustez do sistema, está implementado um mecanismo que permite em caso de perda de comunicação ou violação crítica dos parâmetros, o robô executará autonomamente uma paragem segura.

3. Plataforma Digital do Humano

O DT do Humano tem como objetivo criar uma representação virtual dinâmica do estado fisiológico e contextual dos trabalhadores, visando a prevenção de acidentes e a deteção de fadiga. A Figura 3 ilustra essa arquitetura.

3.1 Aquisição Multimodal de Dados

A aquisição de dados basear-se-á numa rede de sensores *wearable*, mediante consentimento informado. O sistema prevê a utilização de cintas *Polar H10* para a medição da frequência cardíaca e da sua variabilidade (HRV), bem como de pulseiras *Empatica EmbracePlus* para a recolha de atividade eletrodérmica (EDA) e temperatura da pele. A sincronização temporal destes fluxos (via *timestamp* comum) permitirá associar a biometria ao contexto operacional (localização, proximidade ao robô e tarefa), sendo esta correlação essencial para distinguir a fadiga ou stress induzidos pelo esforço físico de situações de risco efetivo (e.g., intrusão em zona de operação).

Complementarmente, sensores LiDAR e câmaras, instalados tanto no robô quanto no estaleiro, monitorizarão, em tempo real, a pose e a localização dos trabalhadores. A deteção de posturas de risco ou de quedas será abordada como um problema de rastreamento (*tracking*) de múltiplas pessoas e de estimação de pose, aplicando-se filtragem de falsos positivos por oclusão e validação cruzada com a cinemática do robô e as zonas de perigo definidas no DT.

Dada a sensibilidade da informação recolhida, o tratamento dos dados respeitará estritos princípios éticos de proporcionalidade, transparência e privacidade. Serão implementados mecanismos de anonimização e controlo de acesso para garantir a conformidade com o Regulamento Geral sobre a Proteção de Dados (RGPD), assegurando que a informação seja utilizada exclusivamente para a segurança ocupacional e não para fins disciplinares ou de avaliação de desempenho individual.

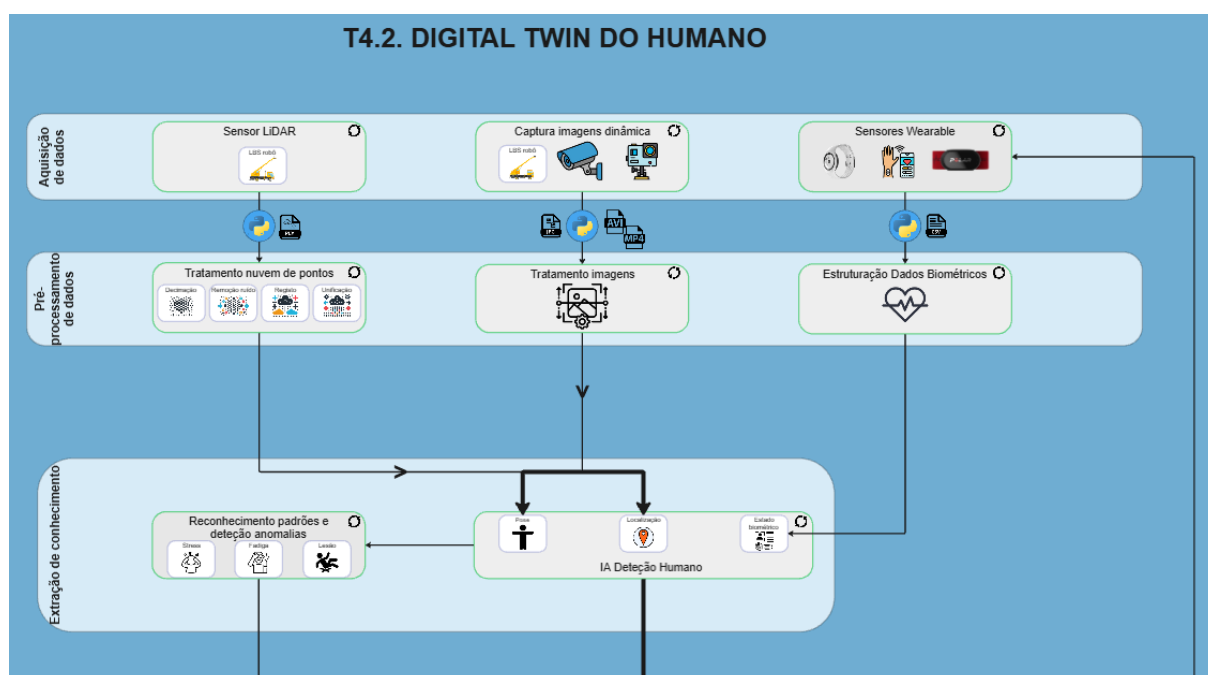


Figura 3: Arquitetura do DT do Humano

3.2 Processamento e Extração de Conhecimento

O fluxo de dados inicia-se com o pré-processamento e a estruturação dos registos biométricos em formato JSON, centralizados num servidor dedicado. A análise basear-se-á, primordialmente, em indicadores do domínio temporal derivados da variabilidade da frequência cardíaca (HRV), como o RMSSD (*Root Mean Square of Successive Differences*) e o SDNN (*Standard Deviation of Normal-to-Normal intervals*), correlacionados com dados de atividade eletrodérmica (EDA).

Para a extração de conhecimento e reconhecimento de padrões associados a stress, fadiga e carga cognitiva, recorrer-se-á a técnicas de *Machine Learning* (e.g., *Random Forest* e *SVM*) e de *Deep Learning* (e.g., redes LSTM). A inferência será realizada sobre janelas temporais deslizantes, privilegiando características (*features*) robustas a artefactos de movimento típicos do trabalho em estaleiro.

O processo de treino e validação dos modelos envolverá rotulagem supervisionada em ambiente controlado. Será dada prioridade à minimização da taxa de falsos positivos, avaliando o desempenho por meio de métricas de precisão, a fim de mitigar o impacto operacional de alertas excessivos. Caso sejam detetadas anomalias fisiológicas ou situações de perigo iminente, o sistema enviará alertas em tempo real ao gestor de obra através de dispositivos de Realidade Aumentada (RA), como o Microsoft HoloLens 2, permitindo uma atuação preventiva imediata.

4 Plataforma Digital do Robô

A Plataforma Digital do Robô terá como finalidade simular, monitorizar e otimizar, em tempo real, o desempenho do *Manitou*. A Figura 4 ilustra essa arquitetura.

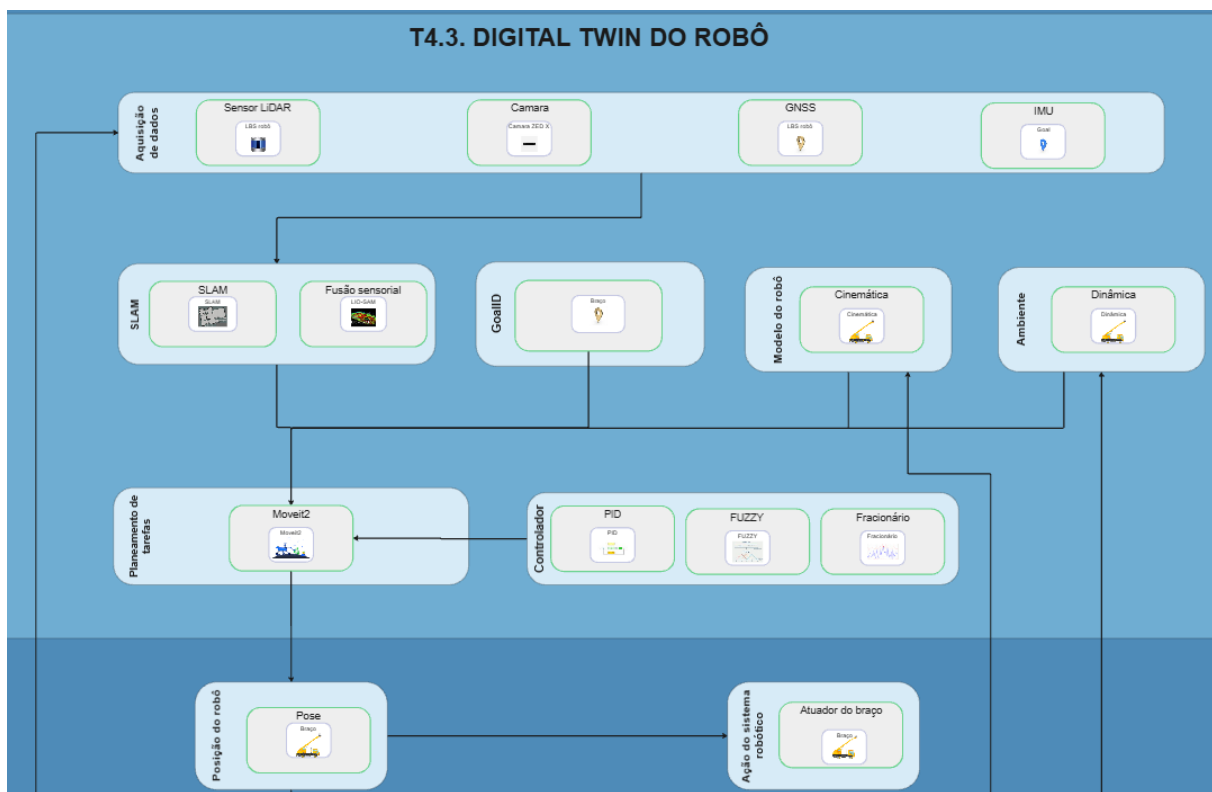


Figura 4: Arquitetura do DT do Robô

4.1 Arquitetura Modular

A arquitetura proposta será composta por sete camadas interligadas: Aquisição de Dados, SLAM, Gestão de Objetivos (*Goal ID*), Modelo do Robô, Ambiente, Planeamento de Tarefas e Controlador. A Gestão de Objetivos mapeará entidades do BIM/DT (ID de painel, pontos de preensão, sequência de montagem, tolerâncias) para objetivos robóticos parametrizados (poses alvo, restrições de orientação, janelas de aproximação e condições de segurança), garantindo rastreabilidade entre decisão e execução.

Na camada de aquisição, serão integrados dados provenientes de LiDAR, câmaras, GNSS e IMU. A camada de SLAM fundirá estes dados para estimar a posição do robô e mapear o

ambiente envolvente. A perceção alimentará um *planning scene* atualizado (obstáculos estáticos do BIM e obstáculos dinâmicos detetados), permitindo replaneamento quando existirem desvios *As-Is* relevantes.

4.2 Planeamento e Controlo

A camada de planeamento utilizará o *framework* MoveIt2 para calcular trajetórias livres de colisões, com base no mapa gerado e nos objetivos definidos [12]. A integração com MoveIt2 será suportada por um modelo cinemático/colisão do conjunto (manipulador + ferramenta), e por interfaces ROS2 para execução de trajetórias com monitorização online (erro de seguimento, saturação hidráulica e limites de segurança).

Ao nível do controlo, serão exploradas estratégias avançadas para garantir a precisão do manipulador hidráulico. Como linha de base, será implementado um controlo de posição, velocidade e aceleração, adequado a atuadores hidráulicos e compatível com requisitos de segurança. Outros controlos alternativos serão avaliados apenas se demonstrarem ganhos mensuráveis em precisão, robustez a perturbações e estabilidade, sob restrições de tempo real e fiabilidade. Para além do controlo do tipo *Proportional-Integral-Derivative controller* (PID) clássico, está prevista a implementação de controladores Fuzzy-PID, que combinam a lógica difusa para lidar com incertezas, e controladores PID de ordem fracionária, que oferecem maior flexibilidade na modelação de sistemas complexos e não lineares. Adicionalmente, serão investigadas abordagens de controlo preditivo (MPC) baseadas em DL para antecipar o comportamento dinâmico do sistema. (PID) clássico, está prevista a implementação de controladores Fuzzy-PID, que combinam a lógica difusa para lidar com incertezas, e controladores PID de ordem fracionária, que oferecem maior flexibilidade na modelação de sistemas complexos e não lineares. Adicionalmente, serão investigadas abordagens de controlo preditivo (MPC) baseadas em DL para antecipar o comportamento dinâmico do sistema.

5. Plataforma Digital Integradora

A plataforma digital integradora funcionará como o núcleo de interoperabilidade, assegurando a comunicação entre os três DTs (Ativo, Humano e Robô). A Figura 5 ilustra a arquitetura global do DT.

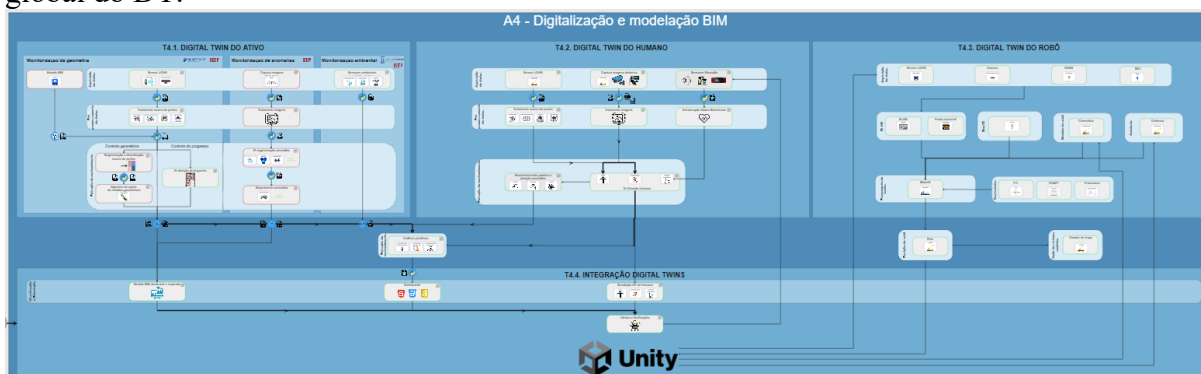


Figura 5: Arquitetura global do DT

5.1 Middleware e Comunicação

O sistema utilizará o ROS2 como *middleware* de comunicação unificado [13]. Todos os módulos publicarão os seus dados (geometria, biometria, telemetria) sob a forma de tópicos ROS2 normalizados, garantindo a troca de informações em tempo real e a sincronização temporal entre os diferentes agentes. A comunicação ROS2 será parametrizada com políticas de *QoS* por tipo de *stream* e com sincronização temporal dos nós. *Streams* intensivos (nuvens de pontos, imagens) serão publicados com taxa controlada e/ou compressão, garantindo latência compatível com operação em estaleiro. A Figura 6 ilustra a comunicação implementada entre os agentes do DT, nomeadamente, Ativo, Humano e Robô.

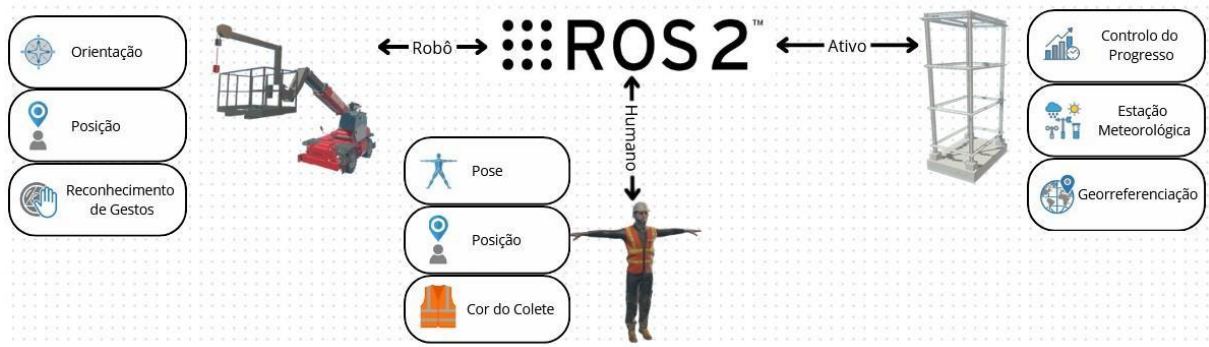


Figura 6: Comunicação dos agentes do DT

5.2 Visualização e Interação

A interface de visualização e controlo será desenvolvida no *game engine* Unity [14]. A integração entre o ROS2 e o Unity será assegurada pelo ROS-TCP Connector. Essa comunicação bidirecional é realizada via um endpoint dedicado no lado ROS2, mantendo o Unity como cliente de visualização/interação. Isso permite reduzir o acoplamento entre ambos os ecossistemas, melhorando a robustez e facilitando testes e reprodução. Esta arquitetura permitirá que o ambiente Unity funcione como um nó ROS2, visualizando, de forma imersiva e centralizada, o estado do estaleiro, do robô e dos trabalhadores. Deste modo, a interface suporta camadas de informação (e.g., estado do robô, progresso geométrico, alertas de segurança, anomalias) e mecanismos de playback (*rosbag*) para auditoria e análise pós-evento. A Figura 7 ilustra o modelo do estaleiro com os agentes do DT no ambiente do Unity.



Figura 7: Visualização do DT no Unity

6. Conclusões

O presente artigo apresenta a arquitetura conceptual das plataformas digitais desenvolvidas no âmbito do projeto CRIARTE, propondo uma solução disruptiva para a automatização da execução de fachadas em edifícios industriais. A abordagem descrita distingue-se pelo seu carácter holístico, superando a visão tradicional de sistemas isolados ao integrar, numa única infraestrutura lógica, os três pilares fundamentais do estaleiro: o Ativo (edifício), o Humano (trabalhador) e o Robô (equipamento).

A principal contribuição tecnológica deste trabalho reside na definição de um ecossistema de interoperabilidade total, suportado pelo *middleware* ROS2 e pelo motor de visualização *Unity*. Esta arquitetura permitirá ultrapassar um dos maiores obstáculos da Construção 5.0: a fragmentação de dados. Ao unificar a telemetria robótica, a monitorização biométrica e o mapeamento geométrico num barramento de comunicação comum, o sistema proposto viabilizará uma tomada de decisão em tempo real, baseada numa representação digital integrada, fidedigna e continuamente atualizada do ativo.

A validação será estruturada em ensaios incrementais (simulação → ambiente controlado → obra), com protocolos repetíveis para: (i) registo geométrico BIM↔As-Is (erro e tempo de convergência), (ii) deteção/segmentação de anomalias (precisão/*recall* por tipo de dano), e (iii) desempenho do ciclo DT-robô (latência ponta-a-ponta e taxa de replaneamento).

Do ponto de vista da segurança e saúde no trabalho, o modelo proposto introduz uma mudança de paradigma, transitando de uma segurança reativa para uma segurança preventiva e colaborativa. A integração inovadora de dados fisiológicos (*stress* e fadiga) no ciclo de controlo do estaleiro permitirá que o sistema atue proactivamente, alertando o trabalhador ou o gestor da obra ou ainda interrompendo o robô antes da ocorrência de um acidente, garantindo uma simbiose segura entre homem e máquina.

Em termos de trabalhos futuros, as atividades do consórcio focar-se-ão na transição da arquitetura conceptual para a implementação física. As próximas fases contemplarão o desenvolvimento dos algoritmos de fusão sensorial e controlo avançado, seguidos de uma rigorosa validação experimental em ambiente controlado e, posteriormente, em obra. Serão avaliados indicadores-chave de desempenho (KPIs), como a precisão do registo geométrico, a latência da comunicação ROS2-Unity e a eficácia dos modelos de IA na segmentação de anomalias, com o objetivo de validar o sistema como uma ferramenta robusta para a digitalização e a industrialização do setor da construção.

Agradecimentos

Os autores agradecem o financiamento obtido no âmbito do projeto CRIARTE – Construção com Robótica Inteligente e Arquitetura Revolucionária de Tecnologias Emergentes (Ref^o COMPETE2030-FEDER-01192200), cofinanciado pelo Programa COMPETE 2030 e pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER). Os autores agradecem igualmente o apoio da unidade de investigação UIDB/04708/2020 (DOI: 10.54499/UIDB/04708/2020) e do financiamento programático - UIDP/04708/2020 (DOI: 10.54499/UIDP/04708/2020), atribuídos ao CONSTRUCT - Instituto de I&D em Estruturas e Construções – financiados por fundos nacionais através da FCT/MCTES (PIDDAC).

Referências

- [1] Ferreira, S. C. G. (2024). *Paredes Divisórias: Abordagem Inovadora em Painel Sandwich* (Doctoral dissertation, Universidade de Aveiro (Portugal)).
- [2] Luo, J., Li, S., Gui, L., & Zhong, S. (2023, September). Segment Matching Localization Method with Semi-Dynamic Object Removal based on Prior Map. In *2023 IEEE 7th Information Technology and Mechatronics Engineering Engineering Conference (ITOEC)* (Vol. 7, pp. 2031-2039). IEEE.
- [3] Abdelsalam, A., Mansour, M., Porras, J., & Happonen, A. (2024). Depth accuracy analysis of the ZED 2i Stereo Camera in an indoor Environment. *Robotics and Autonomous Systems*, 179, 104753.
- [4] Zhang, Z. (2021). Iterative closest point (ICP). In *Computer vision: a reference guide* (pp. 718-720). Cham: Springer International Publishing.
- [5] Aoki, Y., Goforth, H., Srivatsan, R. A., & Lucey, S. (2019). Pointnetlk: Robust & efficient point cloud registration using pointnet. In *Proceedings of the IEEE/CVF conference on computer vision and pattern recognition* (pp. 7163-7172).
- [6] Shendryk, Y. (2022). Fusing GEDI with earth observation data for large area aboveground biomass mapping. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 115, 103108.
- [7] Ecowitt. (2024). *WN90LP Weather Station with RS485 Interface and Modbus Protocol: Manual*. <https://oss.ecowitt.net/uploads/20241017/WN90LP%20Manual.pdf>
- [8] Rosenstrauch, M. J., & Krüger, J. (2017, April). Safe human-robot-collaboration-introduction and experiment using ISO/TS 15066. In *2017 3rd International conference on control, automation and robotics (ICCAR)* (pp. 740-744). IEEE.
- [9] Chemweno, P., Pintelon, L., & Decre, W. (2020). Orienting safety assurance with outcomes of hazard analysis and risk assessment: A review of the ISO 15066 standard for collaborative robot systems. *Safety Science*, 129, 104832.
- [10] García-Domínguez, D., Echevarría, M., Hernández-Vicente, A., Hernando, D., Lázaro, J., Garatachea, N., & Bailon, R. Estimation of Ventilatory Thresholds from the Ecg-Derived Respiratory Rate and Heart Rate Variability of the Polar H10. *Available at SSRN 4974241*.
- [11] Wang, H. M., & Huang, S. C. (2012). SDNN/RMSSD as a surrogate for LF/HF: a revised investigation. *Modelling and Simulation in Engineering*, 2012(1), 931943.
- [12] Marino Gammazza, G. (2024). *Automatic Sorting with Manipulator using Moveit2 and ROS2* (Doctoral dissertation, Politecnico di Torino).
- [13] Maruyama, Y., Kato, S., & Azumi, T. (2016, October). Exploring the performance of ROS2. In *Proceedings of the 13th international conference on embedded software* (pp. 1-10).
- [14] Singh, M., Kapukotuwa, J., Gouveia, E. L. S., Fuenmayor, E., Qiao, Y., Murry, N., & Devine, D. (2024). Unity and ROS as a digital and communication layer for digital twin application: Case study of robotic arm in a smart manufacturing cell. *Sensors*, 24(17), 5680.