

Uma Abordagem Arquitetural para Implementação de Gêmeos Digitais Urbanos em Plataforma de *Living Labs* com Tecnologias Abertas

Fabio Silva Lopes

Universidade Presbiteriana Mackenzie

São Paulo, Brasil

fabio.lopes@mackenzie.br

Ivan Carlos Alcântara de Oliveira

Universidade Presbiteriana Mackenzie

São Paulo, Brasil

ivan.oliveira@mackenzie.br

Álvaro Hibide Clave

Elieder Damasceno Sousa

Universidade Presbiteriana Mackenzie

São Paulo, Brasil

alvaro.claver@mackenzie.br

elieder.sousa@mackenzie.br

Abstract—Living Labs are innovation environments that can promote the co-creation of solutions for smart cities through collaborative experimentation. Digital platforms in these spaces must ensure scalability, security, and interoperability, but face governance and data management challenges, raising multidisciplinary issues in Software Engineering. In this vein, we are proposing an architectural approach that consists of integrating an Urban Digital Twin (UDT) with the Living Labs Platform (LLP), aiming to expand the observability of a university campus context with characteristics similar to a city on a smaller scale. It then discusses the results considering the non-functional requirements that must be met in generalizing the products and services tested on this platform. Emphasis was placed on attention to non-functional requirements and the use of open tools to ensure governance, interoperability, and collaborative innovation. Additionally, this study raises some project challenges not yet investigated.

Keywords—Urban Digital Twin; Living Lab; Non-functional requirements.

Resumo—*Living Labs* são ambientes de inovação que podem promover a co-criação de soluções para cidades inteligentes por meio de experimentação colaborativa. Plataformas digitais desses espaços devem garantir escalabilidade, segurança e interoperabilidade, mas enfrentam desafios de governança e gestão de dados promovendo desafios multidisciplinares em Engenharia de Software. Nesta linha, estamos propondo uma abordagem arquitetural que consiste na integração de um gêmeo digital urbano (UDT) a uma Plataforma de Laboratório Vivo, ou *Living Labs Platform* (LLP), objetivando ampliar as questões de observabilidade do contexto de um campus universitário com características similares a uma cidade em menor escala e discutir os resultados considerando os requisitos não funcionais que devem ser atendidos na generalização dos produtos e serviços testados nessa plataforma. Enfatizou-se a atenção aos requisitos não funcionais e o uso de ferramentas abertas para garantir governança, interoperabilidade e inovação colaborativa. De modo complementar, este estudo levanta alguns desafios do projeto ainda não investigados.

Palavras-chave—Gêmeo Digital Urbano; Laboratório Vivo; Requisitos não funcionais.

I. INTRODUÇÃO

Há uma conexão importante entre os termos Cidades Inteligentes e Sustentabilidade, em evidência na literatura científica [1]. Cidades precisam garantir acesso a recursos de modo sustentável aos seus municípios. Não obstante, as Tecnologias de Informação e Comunicação (TIC) se inserem nesta seara de modo contundente, provendo “inteligência tecnológica” associada a produtos e serviços para a efetividade de muitos anseios da sociedade que vive em grandes aglomerados urbanos.

Com o ritmo acelerado da inovação tecnológica, é possível afirmar que frequentemente surgem novos produtos e serviços voltados para essa temática.

Na realidade brasileira, observa-se uma longa estrada entre a criação e a implantação efetiva das ideias. Vários obstáculos podem ser elencados como impeditivos do uso desses novos recursos nas cidades. Mas a cidade é um sistema complexo e deve considerar uma abordagem sociotécnica para conciliar necessidade e soluções [2].

Cidades são sistemas complexos e caóticos que são impactadas por diversos atores. A estratégia de desenvolvimento da cidade envolve várias esferas urbanas e a implementação dessas estratégias visam a melhoria da qualidade de vida e a satisfação das necessidades do cidadão [3].

Considerando o descrito, não é trivial implementar soluções tecnológicas de modo satisfatório para os vários *stakeholders*, ou seja, qualquer pessoa ou grupo que pode afetar ou ser afetado. A questão se agrava quando não temos casos de sucesso em situações conhecidas como implementações para *early-adopters* [4]. Tecnologias digitais bem governadas podem servir como catalisadores para o desenvolvimento sustentável,

contribuindo para um ambiente urbano mais consciente do meio ambiente e socialmente equitativo.

As plataformas digitais podem melhorar o acesso a moradias populares, agilizar a entrega de serviços públicos e empoderar os cidadãos a participar da formulação de políticas [5]. Nesse contexto, o conceito de *Living Lab* ganha notoriedade, pois constituem uma abordagem para estudos em cidades inteligentes. Esses espaços geralmente são projetados para refletir o ambiente real em que as tecnologias serão usadas, permitindo que as soluções sejam aprimoradas com base no feedback dos usuários e das partes interessadas [6].

Com dados coletados de sensores *Internet of Thing* (IoT) distribuídos em pontos estratégicos da cidade e analisados por algoritmos e modelos de Inteligência Artificial (IA), as administrações municipais podem prever e mitigar problemas antes que ocorram, planejar melhorias na infraestrutura e garantir a eficiência energética, promovendo uma urbanização sustentável e resiliente.

É dispendioso e complexo implementar ou desenvolver provas de conceito de projetos em condições reais. Os experimentos em menor escala, direcionados a um campus universitário, permitem testar produtos em um ambiente controlado, que podem ser replicados posteriormente para cidades reais. Nesse sentido, a implantação de *Minimum Viable Product* (MVP) de TIC's previamente experimentadas em ambientes com essas características contribuem para a generalização do modelo a ser replicado em cidades maiores, antecipando a visibilidade de problemas que podem vir a ocorrer em situações reais.

Considerando os aspectos até aqui levantados, surge o seguinte problema de pesquisa: Plataformas de *Living Lab* (LLP - *Living Labs Platform*) podem ser gerenciadas por meio de Gêmeos Digitais Urbanos (UDT - *Urban Digital Twins*), fazendo uso de ferramentas *Open-Source* para prover subsídios e validar atributos de qualidade como escalabilidade, disponibilidade, segurança, entre outros? Assim, este estudo tem como objetivo apresentar o estado atual de maturidade de um *Living Lab* implementado em um campus universitário contendo uma camada de UDT como base para discussão sobre a viabilidade de avaliação dos requisitos não funcionais relevantes para cidades reais.

II. Living Labs Platform (LLP)

Nesta seção, é apresentada a organização geral da plataforma digital para *Living Labs* do campus universitário, com destaque para a criação da *Virtual Private Cloud* (VPC), suas *Virtual Machines* (VMs), sendo duas públicas e uma privada, bem como as ferramentas *Open-Source* utilizadas para a sua implementação. Os elementos descritos nesta seção estão alinhados a [7].

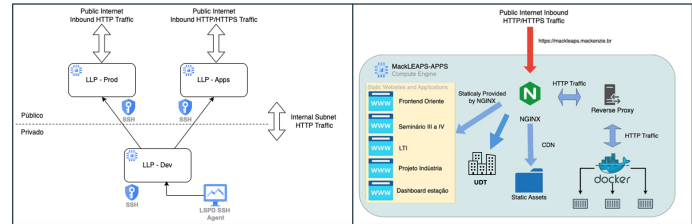


Fig. 1. Visão Geral da Organização da VPC - LLP (à esquerda) e Artefatos da LLP-Apps com o UDT (à direita).

A. Gêmeo Digital Urbano - UDT

Na arquitetura proposta, o Gêmeo Digital Urbano é um componente integrado à LLP. Considerou-se que as funcionalidades do UDT são ofertadas como *Software as a Service* (SaaS). Portanto, há uma integração de serviços da Plataforma e o UDT, de modo a ampliar a oferta de funcionalidades disponíveis no LLP. O UDT em fase de implementação atende os padrões da CityGML 3.0 da *Open Geospatial Consortium* (OGC) [8] que garantem independência de tecnologia. Assim, a LLP ganha robustez para adotar mecanismos para gestão de dados, interoperabilidade, visualização e governança dos ativos de dados providos pelos diversos projetos que são integrados à Plataforma.

B. VPC (Virtual Private Cloud)

A LLP conta com 3 VMs (Prod, Apps e Dev), integradas em uma VPC, como apresentado na Figura 1 (à esquerda).

Existe um acesso direto à internet pública via *Domain Name System* (DNS), disponível apenas para as LLPs Prod e Apps. A terceira rede, LLP-Dev, é acessível apenas dentro da sub-rede privada. O acesso entre as LLPs é feito via *Securit Socket Shell* (SSH) com o auxílio do agente SSH para o gerenciamento das chaves. A conexão é iniciada pelo endereço *lspd*, que atua como intermediário para a LLP-Dev, permitindo o acesso às demais máquinas virtuais. Assim, para acessar o SSH o endereço usado é *lspd.dominio.br*.

O proxy reverso é utilizado para encaminhar as requisições *Hypertext Transfer Protocol* (HTTP) para o *container* correto e, apesar de existir somente um domínio, permite hospedar diversas aplicações.

Já a *Content Delivery Network* (CDN), configurada junto a Nginx (<https://nginx.org/en/>), se responsabiliza por entregar partes estáticas de aplicativos dinâmicos de forma rápida e otimizada facilitando a configuração do *proxy* reverso.

A LLP-Dev é utilizada para desenvolvimento das aplicações até estarem estáveis para disponibilizar na LLP-Apps, além da LLP-Dev funcionar como um espelho para as LLPs Prod/Apps.

O Gêmeo Digital Urbano está instalado na LLP-Apps (Figura 1 - à direita) como serviço disponível para outras aplicações.

C. NGINX

Nginx (<https://nginx.org/en/>) é um servidor web de código aberto com boa performance, que também atua como *proxy* reverso e balanceador de carga.

A VM LLP-Apps (Figura 1, à direita) direciona todas as requisições para a porta 80 do Nginx. Isso ocorre porque o subdomínio utilizado é parte do domínio do campus universitário e o servidor DNS desse campus encaminha as requisições para a VM correta.

Na LLP-Apps, Nginx é utilizado para servir aplicações (sites) estáticos bem como para *proxy* reverso.

Entre as Aplicações da LLP-Apps, o RabbitMQ (<https://www.rabbitmq.com/>) foi instalado como gerenciador de fila no pipeline de dados, fazendo a etapa de ingestão de dados de sensores.

D. Armazenamento de Dados

Implementou-se um *Datalake* [9] na LLP-Apps para atender as aplicações em regime de armazenamento compartilhado, um serviço de catálogo foi adotado, considerando a abordagem de *Data Spaces* [10] integrada ao UDT. Desta forma, todo o armazenamento é catalogado em conformidade com o CityGML, nos diversos repositórios de armazenamento em bancos de dados como o PostgreSQL e MongoDB, de *raw-data* e *datasets* pré-processados para atender modelos analíticos e *dashboards*.

E. Observabilidade em LLP + UDT

As aplicações da plataforma dispostas em *containers* Docker que permitem empacotar produtos de software e dependências de modo leve e portátil. No LLP são usadas duas formas de gerenciar contêineres com a ferramentas Swarm: 1) execução de contêineres individualmente ou 2) uso do Compose para configurar uma pilha com dois ou mais contêineres.

O Swarm é o modo para orquestração padrão do Docker, que permite criar, replicar e atualizar serviços para garantir alta escalabilidade. Para facilitar o gerenciamento do *cluster* Docker, é usada a ferramenta Portainer, e para alcançar uma observabilidade eficiente, faz-se o uso da aplicação Kuma implantada como SaaS no LLP-Apps.

Com o intuito de implementar um UDT, equipamentos do campus foram representados em uma visualização gráfica em 2D, sobre um mapa base OpenStreetMap via Leaflet.js acionado por intermédio da biblioteca Folium para Python. Esses resultados podem ser apresentados via *browser* por meio da biblioteca Streamlit. Neste cenário, as visualizações podem ser obtidas conforme a configuração do projeto que se deseja observar. O software Kuma Uptime foi implantado no monitoramento para gerar alertas a valores limites (*threshold*) que podem ser configurados e exibidos no UDT. Além da visualização



Fig. 2. Visualização 2D de um campus universitário e suas duas estações meteorológicas

em mapas, o software Grafana foi utilizado para apresentar *dashboards* com dados sobre cada sensor. A Figura 2 ilustra uma representação do campus universitário e a localização de dois sensores meteorológicos.

De modo complementar, os prédios e ruas do campus também estão representados no modelo e contribuindo para estudos de fluxo de pessoas.

III. REQUISITOS NÃO FUNCIONAIS

A arquitetura supra descrita foi implementada nas dependências do campus universitário que possui características similares a uma pequena cidade. O campus recebe em torno de 25 mil alunos diariamente. Possui prédios, ruas, serviços comerciais, serviço médico, áreas esportivas, banheiros e áreas verdes. As ruas são utilizadas para locomoção de pedestres, mas, eventualmente circulam carros convencionais e carros elétricos para serviços de limpeza ou transporte de pessoas.

A concepção da plataforma permite criar facilidades para a implantação dos experimentos em uma arquitetura integrada, supervisionada por pesquisadores das áreas de computação e engenharia. Além disso, os dados dos projetos são mantidos no *Datalake* com uma camada de *Data Space* implementada. Nesta perspectiva, os produtos em estágio MVP podem evoluir para atender *Smart Cities* reais. Contudo, os requisitos não funcionais devem ser observados em todas as etapas do processo de desenvolvimento de aplicações computacionais. No cenário apresentado, observa-se que, embora os requisitos não funcionais (RNF) sejam estabelecidos nas fases iniciais dos projetos, o ambiente experimental dos LLP's pode ser insuficiente para uma avaliação plena desses requisitos.

A infraestrutura de nuvem pode ser determinante para escalabilidade, mas alguns desafios dos RNF podem ser preponderantes quando escalamos dispositivos físicos como sensores e equipamentos de conectividade. Autores sugerem o uso de

catálogos para ajudar na elicitação e especificação de RNF [11], mas a validação permanece em aberto.

Outro ponto a ser destacado está na questão da sustentabilidade dos projetos. RNF podem impactar em questões econômicas, ambientais e tecnológicas.

Sendo assim, os produtos são testados do ponto de vista funcional, mas as condições propostas podem ser insuficientes para gerar comprovação dos RNF. Ademais, no contexto de *Smart Cities*, outros requisitos não funcionais podem ser importantes de serem analisados, como destacado em [12].

IV. CONCLUSÕES

A integração de dados de estudos sobre cidades inteligentes e sustentáveis pode ajudar a identificar as soluções mais adequadas para cada contexto urbano. A LLP apresentada neste trabalho tem proporcionado facilidades para pesquisadores no sentido de experimentar MVPs em ambientes de menor escala, de modo integrado, em regime de compartilhamento de recursos, inclusive, permitindo enriquecimento de *datasets* a partir de dados de projetos já existentes na plataforma.

A plataforma conta com três VMs (LLPs). Nas LLPs públicas, Apps e Prod, há um balanceamento das aplicações implantadas e usadas no campus universitário. Na LLP-Dev, privada, ocorre o desenvolvimento e testes das aplicações em construção, além de ser um espelho para as duas outras VMs. O UDT implementado na LLP-Apps integrou visualização de artefatos a mecanismos de governança de dados. A aplicação Kuma de Observabilidade gera alertas, acompanham *thresholds* estabelecidos e permitirão criar simulações nas próximas etapas do projeto.

Considerando o problema de pesquisa e a implantação do LLP + UDT com ferramentas *open source*, é possível inferir que há potencial para prover experimentos relativos à qualidade aqui destacados. A adoção de padrões como o CityGML permite melhor gestão dos ativos de dados, compartilhamento entre projetos com as devidas autorizações e interoperabilidade viável. No momento atual, estamos implementando um projeto relativo a patrimônio histórico, que compartilha dados com outro projeto relacionado com inspeção estrutural de edificações. Em ambos os casos, o UDT compartilha dados em LoD 4 (*Level of Detail*) em nuvem de pontos produzida por *scanner* 3D gerados originalmente para o Patrimônio, também utilizado para inspeção de trincas. Todos estes dados estão georeferenciados, e podem ser observados como um *layer* adicional ao mapa base do UDT.

Outros projetos estão em processo de implantação na plataforma e os RNF variam conforme as aplicações. Este fato dificulta a generalização de resultados e a validação nos ambientes experimentais, motivando a continuidade deste projeto na perspectiva da validação da plataforma, bem como,

na criação de interfaces mais intuitivas para a implantação de novos projetos.

AGRADECIMENTOS

Esta pesquisa foi realizada com o apoio do Fundo Mack-Pesquisa através do processo nº 2024.FCI.SPP.0005, e implementada nas dependências do Laboratório MackLeaps.

REFERÊNCIAS

- [1] I. Bouzguenda, C. Alalouch, and N. Fava, "Towards smart sustainable cities: A review of the role digital citizen participation could play in advancing social sustainability," *Sustainable Cities and Society*, vol. 50, p. 101627, Oct. 2019. [Online]. Available: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2210670718322881>
- [2] A. Akande, P. Cabral, and S. Casteleyn, "Understanding the sharing economy and its implication on sustainability in smart cities," *Journal of Cleaner Production*, vol. 277, p. 124077, Dec. 2020. [Online]. Available: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0959652620341226>
- [3] A. Bussador, K. R. D. F. Zara, J. C. Padilha, and M. D. Matrakas, "Relações entre Estratégias e Serviços Públicos em Cidades Inteligentes: caso de Foz do Iguaçu," in *Anais do XVIII Congresso Latino-Americano de Software Livre e Tecnologias Abertas (Latinoware 2021)*. Brasil: Sociedade Brasileira de Computação - SBC, Oct. 2021, pp. 16–23. [Online]. Available: <https://sol.sbc.org.br/index.php/latinoware/article/view/19900>
- [4] O. Dedehayir, R. J. Ortt, C. Riverola, and F. Miralles, "Innovators and early adopters in the diffusion of innovations: A literature review," *International Journal of Innovation Management*, vol. 21, no. 8, pp. 1–27, 2017, acesso em: 8 out. 2025. [Online]. Available: <https://ideas.repec.org/a/wwsi/ijimxx/v21y2017i08ns1363919617400102.html>
- [5] M. C. Weiss, R. C. Bernardes, and F. L. Consoni, "Cidades inteligentes: casos e perspectivas para as cidades brasileiras," *Revista tecnológica da Fatec Americana*, pp. 1–13, 2017. [Online]. Available: <https://fatec.edu.br/revista/index.php/RTecFatecAM/article/view/137/126>
- [6] T. Omotayo, B. Awuzie, S. Ajayi, A. Moghayed, and O. Oyeyipo, "A Systems Thinking Model for Transitioning Smart Campuses to Cities," *Frontiers in Built Environment*, vol. 7, p. 755424, Oct. 2021. [Online]. Available: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fbuilt.2021.755424/full>
- [7] D. Gerber, N. McGlashan, S. Breslav, and A. Khan, "Living lab digital twin: Case study of the development of a research-oriented digital twin in a lead platinum academic building," in *2025 Annual Modeling and Simulation Conference (ANNSIM)*, 2025, pp. 1–11.
- [8] OGC, *CityGML - OGC City Geography Markup Language*, 2021. [Online]. Available: <https://www.ogc.org/standards/citygml/>
- [9] S. Azzabi, Z. Alfughi, and A. Ouda, "Data lakes: A survey of concepts and architectures," *Computers*, vol. 13, no. 7, p. 183, 2024, acesso em: 8 out. 2025. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2073-431X/13/7/183>
- [10] IDSA, *Dataspace Protocol*, 2025. [Online]. Available: <https://internationaldataspaces.org/>
- [11] I. S. Brito, A. Moreira, and J. Araújo, "Handling Nonfunctional Requirements for Smart Cities," *Proceedings - 2020 CIBSE*, 2020. [Online]. Available: https://cibse2020.ppgia.pucpr.br/images/artigos/9/S09_P2.pdf
- [12] A. P. Barbosa, P. Malcher, and R. P. D. Santos, "Um Catálogo de Requisitos Não Funcionais para Sistemas de Informação em Cidades Inteligentes sob a Perspectiva de Ecossistemas Digitais - Resumo Estendido - CTDSI/CTCCSI 2023," in *Anais Estendidos do XIX Simpósio Brasileiro de Sistemas de Informação (SBSI 2023)*. Brasil: Sociedade Brasileira de Computação (SBC), May 2023, pp. 01–03. [Online]. Available: https://sol.sbc.org.br/index.php/sbsi_estendido/article/view/24580