XIX Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído
ENTAC 2022

Ambiente Construído: Resiliente e Sustentável
Canela, Brasil, 9 a 11 novembro de 2022

Internet das Coisas para Canteiros de Obras e Cadeia Produtiva - rumo aos Gêmeos Digitais

Internet of Things for Construction Sites and the Production Chain – towards the Digital Twins

Gabriel Ribeiro Borges
Universidade São Paulo | São Paulo | Brasil | gab.borges@usp.br
Fabiano Rogerio Corrêa
Universidade São Paulo | São Paulo | Brasil | fabiano.correa@usp.br

Resumo

A indústria da construção tem grande importância na representatividade no PIB global e nos impactos socioambientais. Com os avanços na implementação de tecnologias digitais, visando o aumento de produtividade e eficiência de seus processos, diretrizes de implementação são necessárias. Essa pesquisa investiga os efeitos de aplicação da tecnologia de Internet das Coisas na fase de execução da obra. Através da metodologia de pesquisa-ação é apresentada uma dinâmica de aplicação e visão de evolução para um Gêmeo Digital, demonstrando impactos diretos e indiretos nos ganhos financeiros e otimização de recursos, envolvendo a cadeia produtiva.

Palavras-chave: Internet das Coisas. Gêmeos Digitais. Cadeia Produtiva. Bluetooth Low Energy (BLE). RFID.

Abstract

The construction industry has immense importance due to its representativeness in global GDP and its socio-environmental impacts. With advances in the implementation of digital technologies, aiming for increased productivity and efficiency of its processes, implementation guidelines are necessary. This research investigates the results in productivity and efficiency of the application of the Internet of Things technology during the execution phase of the work. Through the research-action methodology, the application's dynamic and a vision of evolution towards a Digital Twin are presented, demonstrating direct and indirect impacts on financial results and optimization of resources, for the production chain.

Keywords: Internet of Things. Digital Twin. Production Chain. Bluetooth Low Energy (BLE). RFID.

BORGES, G. R.; CORREA, F. R. . Internet das coisas para canteiros de obras e cadeia produtiva - rumo aos gêmeos digitais. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 19., 2022. Anais [...]. Porto Alegre: ANTAC, 2022. Disponível em: https://eventos.antac.org.br/index.php/entac/article/view/2089

INTRODUÇÃO

A consultoria McKinsey identificou nos últimos anos uma enorme capacidade de melhoria na produtividade do setor da construção, o que poderia trazer resultados de aproximadamente US$ 1.6 trilhões [1] em redução de desperdícios e melhor atendimento aos custos e prazos estabelecidos inicialmente.

Considerado um setor extremamente fragmentado, na construção civil inovações são desenvolvidas e implementadas em diferentes níveis e elos da cadeia, muitas vezes através da realização de cooperações e direcionadas por fatores como: complexidade dos projetos, políticas e estratégias entre os envolvidos e a sustentabilidade ambiental [2]. Contudo, a indústria da construção está às margens da disrupção tecnológica, como sugerido pela consultoria McKinsey [3], que apresenta direcionamentos que envolvem diferentes elos da cadeia, trançando estratégias para alcançarem mudanças, como a maior integração e colaboração através da industrialização e digitalização de seus processos.

Diferentes tecnologias e metodologias são pesquisadas e aplicadas nas diferentes fases do projeto. A busca pela melhoria na eficiência do controle da produção desperta o interessa de pesquisas baseadas nos conceitos de “Lean Construction” (Construção Enxuta) e aplicação de técnicas de coletas e análise de dados realizadas manualmente, como o “Last Planner System (LPS)” e “Location-based Management System” (LBMS) [4].

O setor da construção inserido na era digital, tem sido influenciado pelas tecnologias de sensores e gestão de dados, com características de resiliência e segurança e através de simulações e otimizações dos sistemas de Engenharia envolvidos [5]. Desde a simples automatização por planilhas até a utilização de sensores IoT (do acrônimo em inglês, Internet of Things), com integrações com sistemas BIM e técnicas de mineração de dados, pode trazer informações e novos conhecimentos através da utilização desses dados [6].

A aplicação de tecnologias como a IoT, estudada e aplicada em diferentes cenários e casos de uso, tem trazido enormes benefícios ao setor da construção. A sua inserção permite a coleta e análise automatizada de dados, em diferentes níveis, e sua correlação com os elementos rastreados, gerando insights para a tomada de decisão baseada em dados e a previsão de desvios futuros.

Na prática tradicional da construção, as diferentes áreas trabalham em silos fechados, como a de planejamento, que desenvolve seus planejamentos e os fornecem para as áreas de compras e logística [7]. Isso pode gerar desvios durante o fluxo, afetando toda a dinâmica de execução do projeto, tanto no acúmulo de materiais em estoque quanto a disponibilidade dos materiais no momento incorreto. A execução de obras é prejudicada não somente pelos desvios ocorridos, mas pela detecção tardia desses desvios [8].

Diferentes tecnologias tem sido utilizadas para coleta de dados de características diversas, como: aquisição automatizada de dados de localização das equipes de trabalho para o controle da produção, análises dos dados de rastreamento em tempo

real, utilizando-se da tecnologia de BLE (do acrônimo em inglês, Bluetooth Low Energy) para a coleta de dados, correlacionando suas localizações e tempo de permanência nos locais [9]; localização interna de recursos utilizando-se a tecnologia de RFID (do acrônimo em inglês, Radio Frequency Identification) [10], controle de estoques de materiais, através das tecnologias de RFID e WSN (do acrônimo em inglês de Wireless Sensor Network) [11], coleta de dados de forma mais abrangente em ambientes internos, gerando as informações relacionadas à posição e localização dos itens rastreados [12], utilização de dispositivos vestíveis [13], e correlações de informações com tecnologias de imagem e laser scanners [9].

O envolvimento da cadeia produtiva é de total importância, possibilitando a otimização dos processos e geração de dados e informações para melhores controles de distribuição e produção, apoiando a análise do ciclo de vida dos empreendimentos e seus impactos [14].

Portanto, esse artigo tem como objetivo apresentar as tecnologias de IoT aplicadas para a coleta de dados na construção civil, que buscam trazer maior visibilidade sobre índices de produtividade da mão-de-obra e eficiência de processos. Através do desenvolvimento de uma pesquisa-ação, traz resultados concretos sobre a redução de consumo e custos através aplicação das tecnologias, demonstrando sua efetividade utilizando-se de índices de produtividade e eficiência de processos.

O artigo propõe, ainda, a correlação com o conceito de Gêmeo Digital (DT – do acrônimo em inglês, Digital Twin) e a “Digital Twin Capabilities Periodic Table” [15], apresentando diferentes camadas para implementação do Gêmeo Digital e a aplicação específica de cada camada a casos de uso específicos.

Existem um grande potencial para aplicação das tecnologias IoT e conceitos de DT, como a inserção de diferentes sensores e controles, gerando dados e informações dos elementos e pessoas identificadas, relacionando à saúde e segurança dos trabalhadores [16] ou, ainda, a simulação da logística de transporte e a predição de riscos e maior eficiência, através da coordenação da cadeia de distribuição para construção modular [17]. Outras aplicações, considerando diferentes tipologias e casos de usos, podem exigir outras tecnologias, tanto de coleta quanto de transmissão de dados, como tecnologias de longa distância trazendo informações do controle de materiais, equipamentos e equipes no setor da construção [18].

Uma proposta de fluxo de aplicação no conceito de implementação é apresentada para um Projeto Piloto, apresentando um cenário de aplicação de tecnologias de coleta automatizada de dados e trazendo informações para gestão da obra e acompanhamento da execução. Concluindo sobre benefícios para a gestão da obra e a cadeia produtiva, uma visão de antecipações de desvios relacionados a prazos e custos, e tomadas de ações baseadas na previsibilidade de demandas e desvios. Além de diretrizes de continuidade da pesquisa para aprofundamentos em questões específicas.

METODOLOGIA

A metodologia adotada na pesquisa foi a da pesquisa-ação [19]. Foi proposta uma sequência de atividades, apresentada na Figura 1, levando em consideração a avaliação de cenários de aplicação das tecnologias e o amadurecimento e conhecimento pregresso sobre suas aplicações. O agente externo participante dessa pesquisa-ação, aqui chamado de Empresa A, é caracterizado como uma empresa de grande porte, sendo a ação executada em um empreendimento residencial, multi-pavimentos de torre única, localizado na zona sul da cidade de São Paulo.

Para realização das ações relacionadas ao Projeto Piloto, o engenheiro responsável pela área de Qualidade e Desenvolvimento Tecnológico da Empresa A liderou a gestão do projeto e a orientação da equipe participante (mestre, encarregados, almoxarife, apontador etc.) na implementação e validações periódicas realizadas.

Figura 1: Proposta de Sequência de Atividades para implementação de Tecnologia IoT



Fonte: o autor

Cada atividade da sequência possui processos e características específicas, descritas abaixo:

1. Definições de Projeto: análise da tipologia do empreendimento e características das coletas de dados.
2. Definição da Prova de Conceito (PoC, acrônimo do inglês “Proof of Concept”) ou Projeto Piloto: decisão para implementação como uma PoC ou Projeto Piloto, relacionados à experiência na aplicação da tecnologia no cenário proposto (ambientes, processos, tipologias, materiais etc.), sendo uma PoC para um cenário totalmente novo ou um Projeto Piloto em cenário usual;
3. Definição dos equipamentos: definição e/ou adequação da tecnologia conforme cenário de aplicação (módulos de coleta e transmissão dos dados);
4. Implementação: instalação dos dispositivos, testes e treinamento das equipes, acompanhamento inicial local e posteriormente remoto;

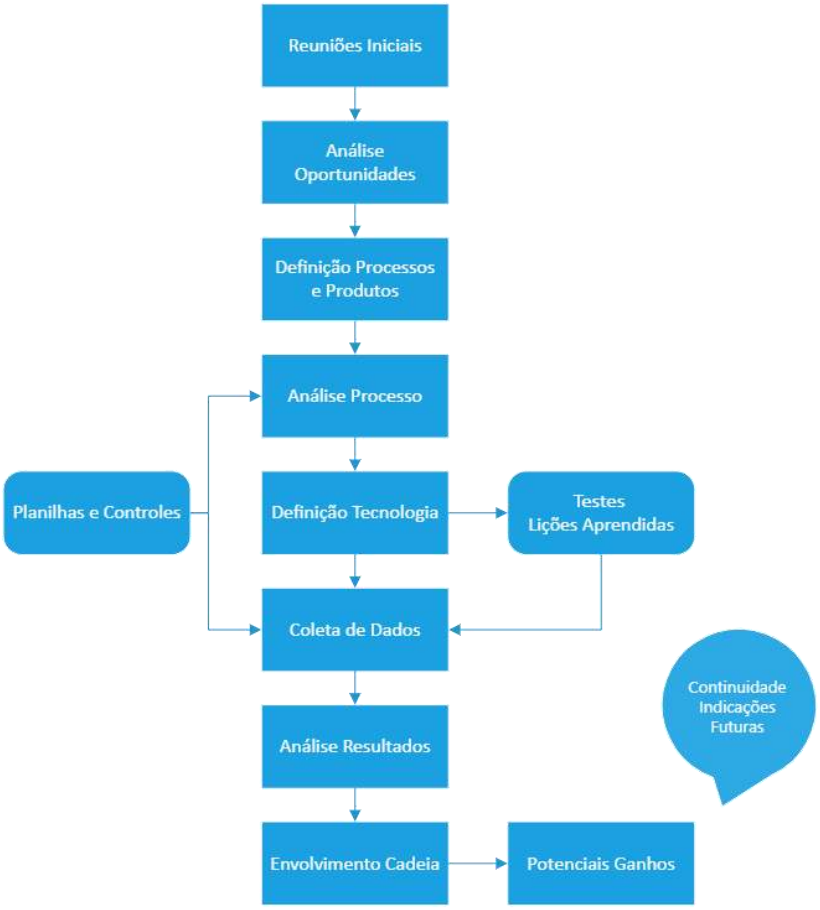
5. Validação: análise dos dados coletados e apresentação dos resultados e adequações em processos ou tecnologia aplicada;
6. Escala: realização de melhorias identificadas nas fases anteriores e continuidade no mesmo projeto, possível expansão dos controles (itens ou elementos rastreados) ou implementação em outros projetos.

PESQUISA-AÇÃO

A seguir, descreve-se a implementação da tecnologia de IoT na construção de um empreendimento da Empresa A, caracterizado anteriormente.

Durante a realização da pesquisa-ação foram realizados processos paralelos e interativos às fases de realização da sequência de atividades, apresentando-se na Figura 2 um exemplo de iteração nas atividades realizadas para coleta e análise dos dados.

Figura 2: Fluxo de atividades e iterações durante o desenvolvimento da pesquisa-ação



Fonte: o autor.

DEFINIÇÕES DE PROJETO

Para definição das características de medição, foram escolhidos os processos considerados mais críticos para as fases de execução desse empreendimento: execução dos revestimentos de argamassa e cerâmicos, com os materiais e equipes de execução sendo monitorados.

Os seguintes materiais foram definidos:

- Pisos:
    - Terraço – Porcelanato Mineral – 60 x 60cm;
    - Cozinha – Porcelanato Silos – 60 x 60cm;
    - Banhos – Porcelanato Cetim – 60 x 60cm;
- Parede Cozinha/Banho – Porcelanato Cetim – 30 x 60cm;
- Argamassa ACIII.

Foram definidas tecnologias específicas para rastreamentos dos diferentes materiais e características, considerando-se o fluxo de distribuição e logística interna, equipamentos de transporte horizontal e vertical, além de possíveis interferências devido cenários e materiais.

Abaixo no Quadro 1 é apresentado o resumo com tecnologias e critérios utilizados:

Quadro 1: Resumo das tecnologias e critérios utilizados

Tecnologia	Aplicação	Critério de Medição	Resultado Esperado	Colaboradores Envolvidos
RFID	Revestimento Cerâmico	Comparativo planejado e realizado	Redução de consumo e perdas	Equipe obra: almoxarife e encarregados
BLE	Ensacados	Adequação logística – identificação de carrinhos padronizados com 20 sacos / carrinho	Inventário automatizado: considerando transferência do depósito ao local de execução	Equipe obra: almoxarife, encarregados e serventes
BLE	Pessoas	Acesso aos locais de execução e tempo de permanência	Dados de permanência	Equipe obra: almoxarife / apontador
Wi-Fi	Conectividade	Tempo de conexão sem perda de sinal	Conexões em posições específicas	Equipe ConnectData
Rede 3G	Conectividade complementar	Conexões durante perda de sinal e volume de dados transferidos	Redução de tempo de transferência dos dados	Equipe ConnectData

Fonte: o autor.

Foram avaliadas as possibilidades de realização de controle com maior acurácia e digitalização dos processos, inicialmente controlados manualmente (formulários e planilhas). Para rastreamento das equipes foi definida a tecnologia de BLE, inserida nos capacetes dos colaboradores, necessitando de uma estrutura mínima, considerando-se tanto custo quanto dimensão e a capacidade de conectar diferentes elementos, utilizada para o rastreamento em tempo real [20]. Considerando esse critério, definiu-se o rastreamento dos ensacados utilizando-se a mesma tecnologia, no entanto, de forma conjunta, identificando-se os carrinhos de transporte horizontal e

padronizando-se o processo de retirada do material do armazenamento, com quantidades fixas para transporte.

Para o controle dos revestimentos cerâmicos foram utilizadas as tags de RFID. As especificações dos materiais eram cadastradas nas tags, lidas pelas antenas, gerando informações que são acessadas pelas equipes do canteiro de obras através do sistema de informação [21].

Tanto as etiquetas de RFID quanto os componentes BLE enviavam seus dados para um mesmo leitor. Esse dispositivo permitia a centralização dos dados, conectando por módulos das duas tecnologias, diferenciando-se de outros dispositivos de mercado. Essa solução, do fornecedor de tecnologia ConnectData, foi desenvolvida de forma modular, adequando-se às diferentes tecnologias de captura e transmissão de dados, possibilitando a coleta de dados tanto dos materiais identificados com a tecnologia de RFID, quanto dos carrinhos e pessoas com a tecnologia de BLE.

O fornecedor dos revestimentos cerâmicos, envolvido no projeto, reconheceu o valor da utilização da tecnologia nos seus processos, principalmente no rastreamento dos lotes de produção e localização dentro do empreendimento.

PROJETO PILOTO

A partir das definições e escolha da tecnologia, levando em consideração o conhecimento e aplicações anteriores, foi definido o Projeto Piloto. Os equipamentos foram montados com módulos das tecnologias de coleta de dados e de conectividade definidas como mais adequadas, conforme apresentados no Quadro 1, considerando operadoras de telefonias móveis de melhor cobertura na região e o não atendimento total da rede interna de dados nos locais de instalação dos equipamentos.

IMPLEMENTAÇÃO

Os sensores foram instalados nos locais pré-estabelecidos, possibilitando a coleta de dados dos materiais e equipes. Houve a conscientização de toda equipe sobre a aplicação da tecnologia e seus benefícios.

As equipes diretamente envolvidas foram devidamente orientadas sobre a adequação dos processos logísticos e importância de utilização dos capacetes com as tags BLE.

Para identificação dos revestimentos cerâmicos, como acordado inicialmente entre as partes, foram inseridas as identificações com RFID na própria indústria.

A operação foi presencialmente acompanhada durante uma semana, avaliando necessidades de direcionamentos ou desvios, direcionando adequações nos processos, quando necessário.

VALIDAÇÃO

Os períodos de coleta de dados e geração de relatórios foram acordados entre as partes, definidos como dois ciclos completos de execução para os materiais e serviços (pavimentos 9 e 10).

Para o Fornecedor B, foram compartilhados os dados segregados, considerando-se que o sistema não foi contratado para o acesso automático.

ESCALA

A partir da validação dos relatórios e informações por parte da Empresa A, considerando os resultados alcançados na redução de desperdícios e na otimização do uso de materiais e mão-de-obra, a aplicação da tecnologia entrou em processo de contratação para outros empreendimentos, no fluxo de suprimentos, sendo considerada nos orçamentos de empreendimentos futuros.

RESULTADOS

A coleta e análise dos dados trouxe resultados expressivos aos processos monitorados e à gestão da obra, tanto em relação à redução de custos quanto eficiência de processos.

Para a realização dos cálculos relacionados aos custos de materiais, foram utilizados como parâmetros os índices fornecidos pela Empresa A, apresentados na Tabela 1:

Tabela 1: Índices adotados para realização das análises dos materiais

Material	Custo (m² ou kg)	Quantidade m²/caixa e kg/saco
(P1) Piso Terraço – Porcelanato Mineral (60x60cm)	44.73	1.44
(P2) Piso Cozinha – Porcelanato Silos (60x60cm)	39.96	1.44
(P3) Piso Banhos – Porcelanato Cetim (60x60cm)	32.79	1.44
(P4) Parede - Cozinha/Banho – Porcelanato Cetim (30x60cm)	26.37	1.44
(A1) Argamassa ACIII	0.94	20

Fonte: o autor.

A economia foi calculada de forma incremental, a partir do consumo nos pavimentos, correlacionadas aos índices adotados e parametrizados no Sistema ConnectData, demonstrando a redução futura de consumo e redução do desperdício.

A partir dos resultados dos rastreamentos automatizados realizados e coleta de dados do consumo real em campo, foram realizadas as ponderações apresentadas na Tabela 2, trazendo como exemplo o Pavimento 9, considerando o comparativo das variações entre os consumos e custos projetados e reais.

Tabela 2: Resultados comparativos de consumos e custos projetados e reais – Pavimento 9

Material	Pavimento 9						
	Planejado			Realizado		Economia	
	Caixas ou Sacos	(m² ou kg)	Custo	Caixas ou Sacos	Custo Real	Custo	%
P1	88	126.72	R$ 5,668.19	42	R$ 2,705.27	R$ 2,962.92	52%
P2	20	28.80	R$ 1,150.85	11	R$ 632.97	R$ 517.88	45%
P3	20	28.80	R$ 944.35	12	R$ 566.61	R$ 377.74	40%
P4	155	223.20	R$ 5,885.78	94.5	R$ 3,588.43	R$ 2,297.35	39%
A1	152	3,040	R$ 2,847.14	116	R$ 2,180.80	R$ 666.34	23%

Fonte: o autor.

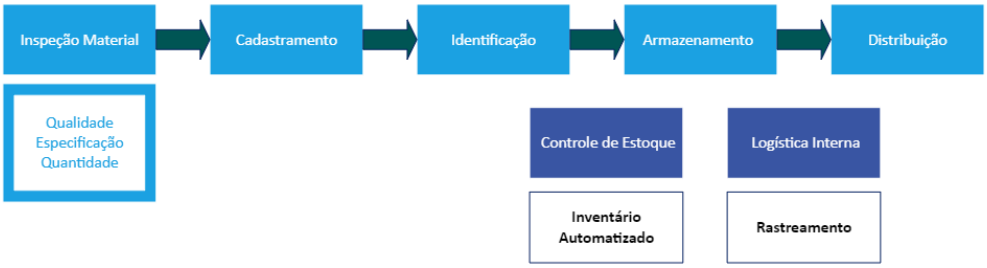
Os resultados apresentaram um potencial de redução de consumo, comparativamente aos índices utilizados para análise e a redução potencial de custos, de até R$ 163.733,00, para os serviços de execução de revestimento cerâmico, extrapolando-se os resultados obtidos no Pavimento 9. Na média geral das medições realizadas em todos os pavimentos os resultados apresentaram um potencial de 30% de redução de consumo e custos sobre os materiais monitorados.

A partir dos resultados do rastreamento e acompanhamento de produtividade realizados pela plataforma, foi possível "antecipar" desvios, fornecendo à Empresa A dados confiáveis para a tomada de decisão e direcionamento de ações para correção de processos e orientação das equipes.

A integração e envolvimento da cadeia produtiva, se tornou uma diretriz para próximas etapas de desenvolvimento. Uma estrutura de comunicação que considera a evolução de comunicação entre sistemas-sistemas, sistemas-humanos e humanos-sistemas, automatizando de forma complete ou parcial traz grandes benefícios [22]. Nessa pesquisa chamamos essa estrutura de semi-automatização da cadeia produtiva, levando em consideração que o Fornecedor B não consumiu os dados de forma automatizada.

Resultados do envolvimento do Fornecedor B foram principalmente relacionados à otimização dos processos. A Figura 3 apresenta um esquema do processo usual da obra, das etapas de inspeção, cadastramento, identificação, armazenamento e distribuição para o consumo.

Figura 3: Fluxo Inicial

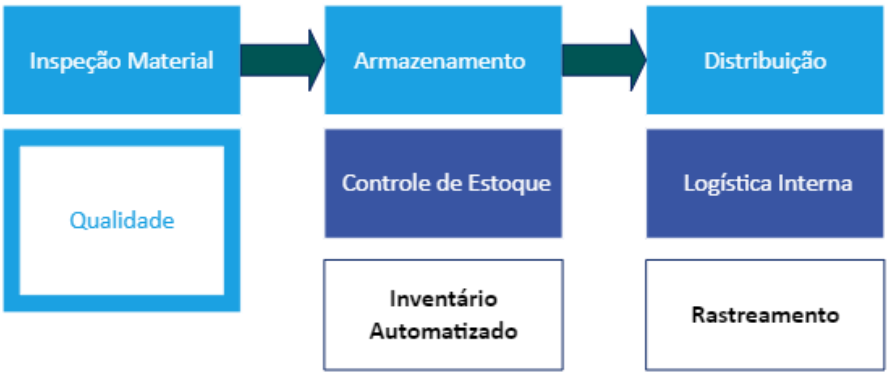


Fonte: o autor.

Através do envolvimento do Fornecedor B, para implementação, pela distribuição do material identificado com a tecnologia, as atividades relacionadas de inspeção consideraram o atendimento às diretrizes de qualidade, conforme requisitos do Sistema de Gestão da Qualidade da Empresa A.

Com isso, duas atividades foram eliminadas dos processos da obra, resumindo o fluxo ao esquema apresentado na Figura 4.

Figura 4: Fluxo Final



Fonte: o autor.

Os benefícios foram claros em relação à alocação de equipes para os controles iniciais e a eficiência na geração dos acompanhamentos de estoques e logística interna, distribuição e consumo.

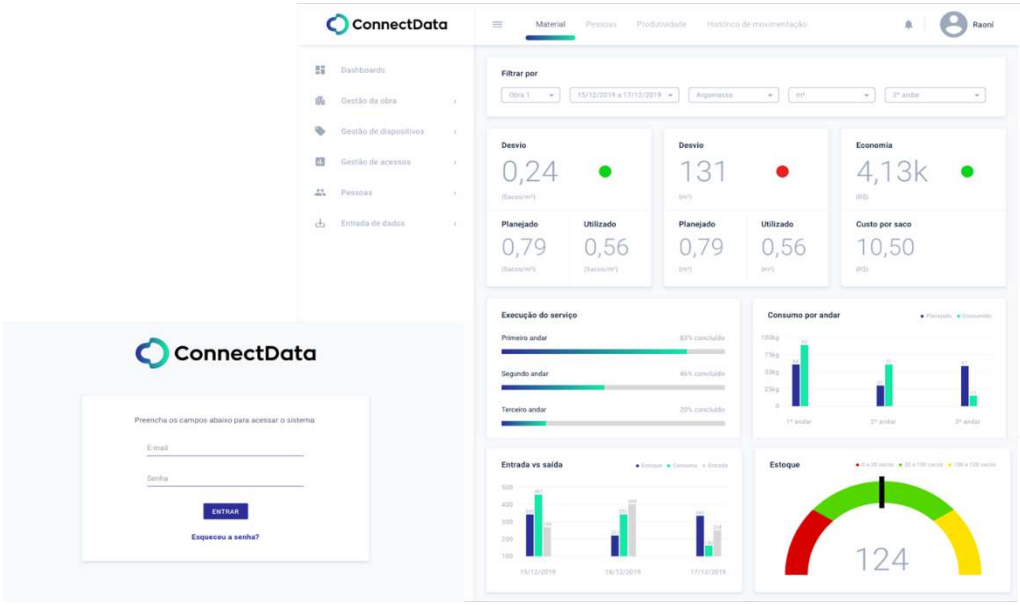
ANÁLISE EVOLUTIVA IOT – DT

Para o conceito e desenho de um modelo evolutivo, do monitoramento do canteiro de obras através da IoT para um DT, iniciando-se da aplicação da tecnologia IoT em um cenário específico até a geração de um DT para a fase de execução de obras, foram consideradas as camadas ou funcionalidades de aplicação apresentadas pelo "Digital Twin Consortium", que propõe diferentes capacidades, definidas como a habilidade de realizar certas ações ou entregas [7], em relação aos sistemas de coleta, análise de dados, integrações e camadas de segurança, como apresentado abaixo:

1. Serviços de Dados:
    a. Aquisição e inserção de dados – aquisição de dados dos próprios sensores e correlação com dados históricos de orçamento e planejamento;
    b. Processamento em tempo real – coleta e gestão dos dados e input no sistema para análise imediata;
    c. Agregação de dados – centralização e consulta dos dados brutos de forma ordenada.
2. Integração
    a. Não realizado na etapa de Projeto Piloto (considerações nas conclusões).
3. Inteligência
    a. Alertas e Notificações – geração de mensagens automáticas a partir de análises e diretrizes parametrizadas no sistema, pela correlação com os dados coletados automaticamente (no Projeto Piloto, sobre os níveis de estoque e desvios de custos e prazos);
    b. Análise de dados – análise dos dados coletados e correlação com dados dos processos, usando de regras matemáticas para geração dos resultados e conclusões de atendimento ou não-atendimento aos critérios pré-estabelecidos;

4. UX
    a. Visualização básica – demonstração das informações geradas a partir dos dados coletados e suas correlações com parâmetros iniciais, através de dashboards e tabelas;
    b. Monitoramento em tempo real – apresentação virtual da interação dos elementos físicos, sensores e informações geradas, continuamente ou em um curto espaço de tempo. Nesse cenário, o sistema apresentava tanto painel de controle dos sensores instalados, seu funcionamento em relação à coleta e transmissão dos dados, e os dados coletados pelos sensores e sua correlação com os parâmetros inseridos no sistema para correlação (níveis e controles de estoque, movimentação – pessoas e materiais – pelos pontos de controle);
    c. Dashboards – interfaces gráficas de visualização amigável de análise das diretrizes de controle (processos, materiais e equipes). A Figura 5 apresenta um exemplo de dashboard gerado pelo Sistema ConnectData, não tendo a pretensão de detalhar os itens ou informações, apenas demonstrar o "*layout*" da página e formato de entrega das informações.

Figura 5: Exemplo de Apresentação de Informações (Dashboard gerado)



Fonte: Telas de acesso e dashboards do Sistema ConnectData

5. Gestão
    a. Gestão dos dispositivos – painel de controle de funcionalidade dos sensores instalados, conectividade e transmissão dos dados;
    b. Conexões – conexões de dados e pessoas, conforme permissões, gravadas e arquivadas no sistema, proporcionando a rastreabilidade das atividades e informações.
6. Confiabilidade e Segurança
    a. Encriptação – capacidade de encriptar os dados para proteção;

b. Resiliência – sensores resilientes em relação à carga, com bateria interna, suportando instabilidades da rede elétrica, também em relação ao armazenamento e transmissão dados coletados, possuindo a capacidade de armazenamento interno e manutenção dos dados em caso de não-conectividade, evitando-se a perdas. Os dados são prontamente enviados ao servidor, assim que recuperada a conectividade ou manualmente (ação da equipe) com outra rede fixa ou móvel, quando necessário.

CONCLUSÕES E ESTUDOS FUTUROS

Uma tecnologia que traga visibilidade sobre os fluxos da produção da obra e compartilhe informações, trazendo confiabilidade na comunicação, pode evitar desvios e trazer melhor dinâmica na utilização desses materiais e giro contínuo do estoque, sem acúmulos desnecessários. Portanto, através da aplicação de tecnologias que tragam informações em tempo real, ou o quanto antes, apresenta grandes benefícios para mitigação de riscos aos contratos.

Durante a realização dessa pesquisa-ação, desafios de implementação foram sendo superados em cada etapa de desenvolvimento descrita no Fluxo de Implementação, tanto em relação ao alinhamento estratégico das empresas envolvidas quanto de orientação à correta utilização da tecnologia e, ainda, envolvimento da cadeia produtiva contornando as limitações de utilização da plataforma e quebras e fornecimento.

Essa pesquisa demonstrou grande evolução tecnológica a partir da possibilidade de aplicação de um único equipamento que centralizasse diversos tipos de tecnologias de captura, de diferentes características, para análise e controle. Através da modularização do hardware para a captura de dados e sua transmissão à rede e possibilitou a redução de infraestrutura e custos na aplicação de diferentes tecnologias para os controles propostos, diferenciando-se das pesquisas anteriores onde tecnologias únicas eram aplicadas para cada tipo de análise.

Os resultados apresentados nessa pesquisa de, em média, 30% de redução de consumo e de redução de custos de até R$ 163.733,00, demonstram grande potencial na aplicação dessas tecnologias para o rastreamento automatizado e a previsão sobre os desvios futuros, para uma decisão baseada em dados.

Através da maior visibilidade dos dados e informações é possível corrigir erros nos indicadores e índices, que carregam desvios históricos, e ter uma visão de quais processos são realmente mais produtivos ou necessitam maior atenção pela ineficiência.

A sugestão de um modelo evolutivo da aplicação de IoT para um conceito de um DT, durante a fase de execução de obras, demonstra caminhos de aplicações primárias e início de desenvolvimentos através de um arcabouço tecnológico reduzido, com implementações parciais e evolutivas que agregam valor na análise em tempo real para antecipação de desvios. Ainda, a possibilidade de integração com a cadeia de

fornecimento. O principal ponto de evolução detectado para uma automatização das informações e maior adequação a um modelo de DT vem da implementação da camada de Integração (item 2 – Análise Evolutiva) que ocorrerá na Fase de Escala (item 6 – Fluxo de Implementação Evolutiva).

REFERÊNCIAS

[1] McKinsey. Reinventing construction through a productivity revolution. McKinsey & Company (2017). (https://www.mckinsey.com/business-functions/operations/our-insights/reinventing-construction-through-a-productivity-revolution) Acesso em: 06 jun. 2022

[2] OZORHON, B.; ORAL, K. Drivers of Innovation in Construction Projects. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 143, n. 4, p. 04016118, 1 abr. 2017.

[3] McKinsey. The next normal in construction: How disruption is reshaping the world's largest ecosystem, McKinsey & Company (2020).

[4] ZHAO, J. et al. Real-time resource tracking for analyzing value-adding time in construction. **Automation in Construction**, v. 104, p. 52–65, 1 ago. 2019.

[5] PAN, Y.; ZHANG, L. A BIM-data mining integrated digital twin framework for advanced project management. **Automation in Construction**, v. 124, p. 103564, 2021.

[6] BOJE, C. et al. Towards a semantic Construction Digital Twin: Directions for future research. **Automation in Construction**, v. 114, p. 103179, 2020.

[7] ARBULU, R.; KOERCKEL, A.; ESPANA, F. **Linking Production-Level Workflow with Materials Supply**. Em: 13TH ANNUAL CONFERENCE OF THE INTERNATIONAL GROUP FOR LEAN CONSTRUCTION. 2005. Disponível em: <https://www.iglc.net/papers/Details/365>. Acesso em: 5 jun. 2022

[8] CASINI, M. Chapter 9 - Advanced site management tools and methods. Em: CASINI, M. (Ed.). **Construction 4.0**. Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering. [s.l.] Woodhead Publishing, 2022. p. 471–521.

[9] ZHAO, L. et al. Digital-Twin-Based Evaluation of Nearly Zero-Energy Building for Existing Buildings Based on Scan-to-BIM. **ADVANCES IN CIVIL ENGINEERING**, v. 2021, 9 abr. 2021

[10] FANG, Y.; CHO, Y. K.; CHEN, J. A framework for real-time pro-active safety assistance for mobile crane lifting operations. **Automation in Construction**, v. 72, p. 367–379, 2016.

[11] SHIN, T.-H. et al. A service-oriented integrated information framework for RFID/WSN-based intelligent construction supply chain management. **Automation in Construction**, Selected papers from the 26th ISARC 2009. v. 20, n. 6, p. 706–715, 1 out. 2011.

[12] LI, C. T.; CHENG, J. C. P.; CHEN, K. Top 10 technologies for indoor positioning on construction sites. **Automation in Construction**, v. 118, p. 103309, 1 out. 2020.

[13] CASINI, M. Chapter 9 - Advanced site management tools and methods. Em: CASINI, M. (Ed.). **Construction 4.0**. Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering. [s.l.] Woodhead Publishing, 2022. p. 471–521.

[14] BOJE, C. et al. Towards a semantic Construction Digital Twin: Directions for future research. **Automation in Construction**, v. 114, p. 103179, 2020.

[15] Pieter van Schalkwyk (XMPro). Digital Twin Capabilities Periodic Table. Digital Twin Consortium (2022).

[16] HOU, L. et al. Literature Review of Digital Twins Applications in Construction Workforce Safety. **Applied Sciences**, v. 11, n. 1, p. 339, jan. 2021.

[17] LEE, D.; LEE, S. Digital Twin for Supply Chain Coordination in Modular Construction. **Applied Sciences**, v. 11, n. 13, p. 5909, jan. 2021.

[18] TEIZER, J. et al. Construction resource efficiency improvement by Long Range Wide Area Network tracking and monitoring. **Automation in Construction**, v. 116, p. 103245, 2020.

[19] TRIPP, D. Action research: a methodological introduction. p. 21, (2005).

[20] PARK, J.; KIM, K.; CHO, Y. K. Framework of Automated Construction-Safety Monitoring Using Cloud-Enabled BIM and BLE Mobile Tracking Sensors. **Journal of Construction Engineering and Management**, v. 143, n. 2, p. 05016019, fev. 2017.

[21] AKANMU, A.; ANUMBA, C.; MESSNER, J. SCENARIOS FOR CYBER-PHYSICAL SYSTEMS INTEGRATION IN CONSTRUCTION. p. 21, [s.d.].

[22] DAVE, B. et al. Opportunities for enhanced lean construction management using Internet of Things standards. **Automation in Construction**, v. 61, p. 86–97, 2016.