



Proposal of Architecture for Multi-Agent Systems with a Mediator Agent Using Object-Centric Process Mining Techniques

Marco Antonio Gomes Silva, Percy Javier Igei Kaneshiro,
Osvaldo Luis Asato and Francisco Yastami Nakamoto

EasyChair preprints are intended for rapid
dissemination of research results and are
integrated with the rest of EasyChair.

October 30, 2024

Proposta de Arquitetura para Sistemas Multiagentes com agente mediador utilizando as técnicas de mineração de processos centradas em objetos

Silva M. A. G*. Kaneshiro P. J. I. **

Asato O. L.*** Nakamoto F. Y.****

* Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo - IFSP
(e-mail: marcoags89@gmail.com).

** Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo - IFSP
(e-mail: percyigei@ifsp.edu.br).

*** Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo - IFSP
(e-mail: asato@ifsp.edu.br)

**** Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo - IFSP
(e-mail: nakamoto@ifsp.edu.br)

Abstract: Due to the increasing complexity of organizational processes, which involve multiple interconnected processes, process mining (PM) has evolved beyond the analysis of isolated processes. Object-centric process mining offers a robust theoretical approach to address these complex scenarios of multiple intelligent and autonomous devices interacting during the process. However, practical examples of these advanced techniques are rare in advanced manufacturing, especially in their runtime implementation. This article explores ongoing efforts to align current practice with the state of the art in the context of object-centric process mining. To achieve these results, we propose an architecture for multi-agent systems that employs process mining as a tool to support runtime process management in advanced manufacturing systems. The current case study focuses on the object-based process flow (agents), considering the use of various interconnected tools and devices, with PM as mediators of the system's needs. Specifically, the architecture utilizes the Object-Centric Event Log 2.0 (OCEL 2.0) concept, which deals with object-centric event logs, to provide a holistic view of system interactions. The first results are presented through the OCEL 2.0 event model pattern, applied in a practical example related to the operation of a piece of equipment. This analysis and demonstration of the architecture model for runtime process mining, based on the Reference Architectural Model Industrie 4.0 (RAMI 4.0) and Unified Namespace (UNS) structures, aim to promote transparency and mediation of process mining throughout the ecosystem.

Resumo: Devido à crescente complexidade dos processos organizacionais, que envolvem múltiplos processos interconectados, a mineração de processos (PM) tem evoluído para além da análise de processos isolados. A mineração de processos centrada em objetos oferece uma abordagem teórica robusta para enfrentar esses cenários complexos de múltiplos dispositivos inteligentes e autônomos interagindo durante o processo. Contudo, exemplos práticos dessas técnicas avançadas são raros na manufatura avançada, especialmente na sua implementação em tempo de execução. Este artigo explora os esforços contínuos para alinhar a prática atual com o estado da arte no contexto da mineração de processos centrada em objetos. Para chegar nestes resultados, propomos uma arquitetura para sistemas multiagentes que emprega a mineração de processos como ferramenta para apoiar a gestão de processos em tempo de execução nos sistemas da manufatura avançada. O estudo de caso atual foca no fluxo de processos baseado em objetos (agentes), considerando o uso de várias ferramentas e dispositivos interconectados, tendo o PM como mediadores das necessidades do sistema. Especificamente, a arquitetura utiliza o conceito *Object-Centric Event Log 2.0* (OCEL 2.0), que trata de logs de eventos centrados em objetos, para fornecer uma visão holística das interações do sistema. Os primeiros resultados são apresentados através do padrão de modelo de eventos OCEL 2.0, aplicado em um exemplo prático relacionado ao funcionamento de um equipamento. Esta análise e demonstração do modelo de arquitetura para mineração de processos em tempo de execução, baseada nas estruturas *Reference Architectural Model Industrie 4.0* (RAMI 4.0) e *Unified Namespace* (UNS), visam promover a transparência e a mediação da mineração de processos em todo o ecossistema.

Keywords: Process Mining, CPS, Agents, Multiagent System.

Palavras-chaves: Mineração de Processo, CPS, Agentes, Sistema Multiagentes.

1. INTRODUÇÃO

A Indústria 4.0 tem revolucionado a forma como as empresas operam, promovendo a integração de tecnologias avançadas para tornar os processos de produção mais eficientes e adaptáveis às demandas do mercado. Nesse contexto, a arquitetura de processo desempenha um papel crucial ao oferecer uma estrutura organizacional que viabiliza a implementação eficaz das técnicas da Indústria 4.0 (Vaidya et al. 2018).

Essa arquitetura, geralmente, envolve a digitalização e a interconexão de sistemas de produção por meio de dispositivos autônomos, dispositivos inteligentes (IoT - Internet of Things), IoS (Internet of Services), computação em nuvem e análise de dados em tempo de execução. Com a adoção de técnicas de manufatura avançada e automação inteligente, os processos de produção tornam-se mais ágeis e eficientes, permitindo uma rápida adaptação às mudanças nas demandas do mercado (Baena et al. 2017).

Dentro deste contexto, os Sistemas Ciber-Físicos (CPS) integram o mundo virtual e físico, permitindo o monitoramento, controle e otimização em tempo de execução de processos físicos, adaptando-se dinamicamente às mudanças no ambiente ou nas necessidades operacionais. Essa integração é facilitada por protocolos de comunicação padronizados e arquiteturas flexíveis, que conectam os CPS a sistemas como SCADAs, MES e ERPs, ampliando sua funcionalidade e permitindo uma gestão mais eficiente dos processos industriais (Peruzzini et al. 2017; Gerbert et al. 2015).

A RAMI 4.0 (Referência Arquitetural para Indústria 4.0) organiza e estrutura os componentes de sistemas de produção, estabelecendo uma hierarquia clara de camadas que facilita a integração e promove uma abordagem holística para processos industriais. Com técnicas como digital twin, a RAMI 4.0 permite a criação de representações virtuais de sistemas físicos para análises em tempo de execução e otimizações de desempenho, enquanto a interoperabilidade assegura a integração eficiente de sistemas heterogêneos e a troca de dados (Wortmann 2020; Schäfer et al. 2021).

Para alcançar integração e eficiência alinhadas à arquitetura RAMI 4.0, é essencial adotar estratégias de gestão e organização de dados como o conceito de Unified Namespace (UNS), que oferece uma abordagem eficaz para consolidar e acessar dados em sistemas complexos e distribuídos. O UNS é crucial na arquitetura de processos, permitindo a construção de sistemas robustos e flexíveis ao utilizar técnicas como mapeamento de nomes, padronização de identificadores e clusterização de núcleo, essenciais para enfrentar os desafios do ambiente empresarial moderno (Bicer et al. 2020; Moretti et al. 2021).

O Protocolo Publish/Subscription (Pub/Sub) é amplamente utilizado em sistemas distribuídos, onde publishers enviam mensagens e subscribers se inscrevem para recebê-las, com um broker intermediário direcionando essas mensagens de forma inteligente com base em critérios de filtro. Na arquitetura de processo, o Pub/Sub facilita a comunicação

assíncrona entre diferentes etapas ou módulos, permitindo que cada etapa, representada por um subscriber, receba apenas as mensagens relevantes à sua área. Isso promove uma arquitetura modular e resiliente, permitindo a evolução independente de cada parte sem necessidade de comunicação direta ou acoplamento rígido, favorecendo adaptações flexíveis a mudanças nos requisitos ou tecnologias (Kaneshiro et al. 2010; Eugster et al. 2003).

A necessidade de uma comunicação flexível e eficiente entre agentes torna a mineração de processos essencial para analisar e entender os processos envolvidos, utilizando inteligência computacional e mineração de dados para identificar melhorias, reduzir inatividade, ajustar fluxos produtivos e prever falhas com base em registros de eventos (van der Aalst et al. 2012). Dividida em descoberta (criação de modelos de processos a partir de dados), verificação de conformidade (comparação de modelos com a realidade) e aprimoramento (correção de modelos existentes), essa disciplina capacita organizações a explorar dados de forma eficiente, oferecer uma compreensão profunda dos processos e tomar decisões baseadas em insights concretos (van der Aalst 2011). No entanto, a abordagem tradicional, que lida com instâncias individuais e eventos únicos, é limitada para processos complexos com múltiplas entidades em mudança, resultando em análises imprecisas e crescente complexidade (van der Aalst 2023; van der Aalst et al. 2020a).

A mineração de processos centrada em objetos (OCPM) oferece uma abordagem inovadora para superar as limitações das técnicas tradicionais, reconhecendo que muitas ocorrências no mundo real envolvem múltiplas entidades e adotando uma perspectiva centrada em objetos que reflete com maior precisão a realidade dos processos (van der Aalst 2023). Diferente da abordagem centrada em casos, a OCPM considera eventos e artefatos registrados em sistemas de TI, abordando os relacionamentos complexos entre eventos e objetos. Padrões como o OCEL 2.0, que estende o OCEL 1.0, proporcionam uma base robusta para organizar e interpretar dados de processos complexos, garantindo interoperabilidade, escalabilidade e integridade dos dados, além de facilitar análises avançadas, como análise de redes e modelagem preditiva, oferecendo insights mais profundos sobre o desempenho e as ineficiências dos processos (van der Aalst et al. 2020a; van der Aalst et al. 2023).

Em resumo, os sistemas multiagentes e os sistemas ciber-físicos têm revolucionado a operação das empresas na Indústria 4.0, oferecendo novas oportunidades para otimização e adaptação. A arquitetura de sistemas multiagentes é crucial nessa transformação, proporcionando a estrutura para implementar e gerenciar essas tecnologias avançadas. Integrando conceitos como RAMI 4.0, Unified Namespace (UNS), Pub/Sub e mineração de processos, as organizações podem criar ecossistemas de produção inteligentes e resilientes. Este artigo explora esses conceitos e sua relevância para a indústria moderna, estabelecendo a base para a discussão dos modelos de arquitetura no próximo capítulo.

2. MODELOS DE ARQUITETURA

No que se refere à arquitetura, é importante adotar uma abordagem distribuída, pois isso possibilita que todos os agentes estejam no mesmo nível hierárquico, permitindo uma tomada de decisão autônoma, com supervisão de um agente de nível superior apenas quando necessário (Palau et al. 2019).

Em Silva Júnior (2019), foi introduzida uma arquitetura baseada em sistemas multiagentes (SMA), que consistem em múltiplos agentes independentes capazes de se comunicar para alcançar objetivos específicos. Esses agentes são capazes de oferecer serviços, responder a solicitações e iniciar interações, sugerindo compromissos e distribuindo tarefas (Peixoto et al., 2018). Sistemas multiagentes facilitam a tomada de decisões em cenários complexos, promovendo autonomia entre agentes sem exigir supervisão hierárquica. A arquitetura proposta é dividida em três camadas, como ilustrado na Fig. 1.

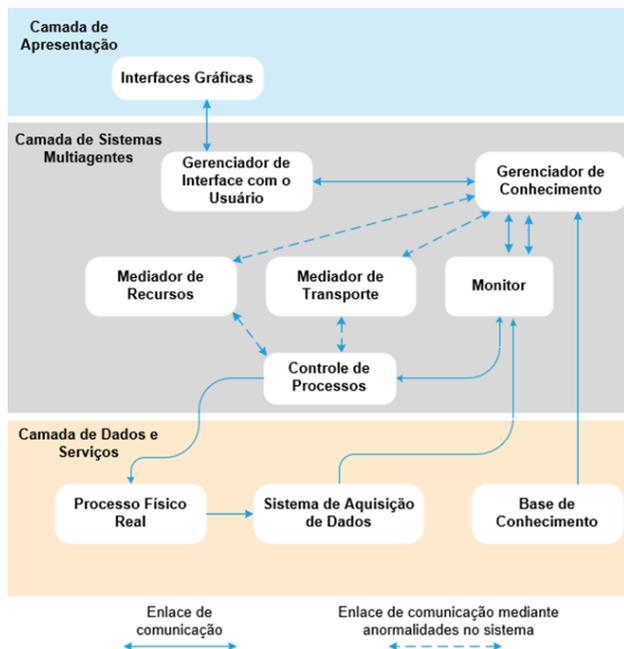


Fig. 1 - Arquitetura de sistemas multiagentes proposta por Silva Júnior (2019).

A Camada de Apresentação inclui interfaces gráficas que permitem aos usuários interagir com a aplicação e acessar funcionalidades. A Camada de Sistemas Multiagentes é composta por vários componentes: o Controle de Processos, supervisiona e gerencia a produção, o Mediator de Recurso, lida com problemas de deadlocks e alocação de recursos, o Mediator de Transporte, resolve disputas no uso de ferramentas de transporte como correias e AGVs (*Autonomous Guided Vehicles*), o Monitor, avalia parâmetros do processo e detecta anomalias, o Gerenciador de Conhecimentos, cuida das bases de dados usadas para controle e dados dos agentes, e o Gerenciador da Interface com o Usuário, gerencia as interfaces gráficas e a interação com usuários e outros sistemas. A Camada de Dados e Serviços abrange o Processo Físico Real, que se refere aos processos de manufatura reais, o Sistema de Aquisição de

Dados, é responsável pela coleta e processamento de dados operacionais, e as Bases de Conhecimento, armazenam as informações sobre o processo.

Em Souza et al. (2021), a arquitetura de sistemas multiagentes foi baseada nessa estrutura, mas para integrar o SCADA com o PM, foram feitas atualizações na arquitetura proposta em Silva Júnior (2019), adicionando também o padrão de comunicação Publish/Subscribe. Na nova arquitetura, o sistema de aquisição de dados e controle de processo foi consolidado na camada de dados e serviço, denominada SCADA. O monitor de sistemas multiagentes apresentado em Silva Júnior (2019) foi modificado por Souza et al. (2021), tornando-se o agente minerador de processos, que agora analisa registros de eventos do processo. A Fig. 2 ilustra a arquitetura proposta por Souza et al. (2021).

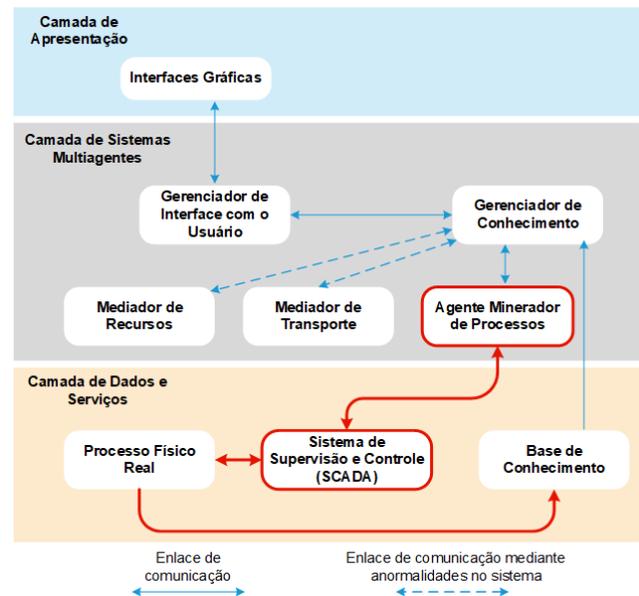


Fig. 2 - Arquitetura de sistemas multiagentes proposta por Souza et al. (2021).

Em Neves et al. (2021), um PDP foi simulado e validado virtualmente, representando as características reais do planejamento da produção, utilizando a arquitetura distribuída proposta por Silva Júnior (2019). Em Souza et al. (2021), a arquitetura de Silva Júnior (2019) foi atualizada para incluir o SCADA e o PM, e uma avaliação de uma tarefa específica do processo foi realizada, baseada no estudo de Neves et al. (2021), utilizando a ferramenta de descoberta do PM.

Ocorre que a aplicação do PM realizado por Souza et al. (2021), não explora o uso da PM em tempo de execução, assim como na arquitetura de Silva Júnior (2019), não temos informações de como os componentes do sistema são localizados, desta forma, o novo modelo de arquitetura tem como objetivo melhorar a forma de integração e localização dos ativos do sistema, como também demonstrar como a mineração de processos centrada em objetos, pode ser utilizada como mediação do sistema em tempo de execução.

3. PROPOSTA DE ARQUITETURA SISTEMA MULTIAGENTES

A arquitetura deste estudo foi desenvolvida com base nos conceitos de Silva Júnior (2019) e Souza et al. (2021). A validação do modelo ocorreu em um ambiente virtual, refletindo suas características hierárquicas e heterárquicas, seguindo padrões como o IEC 62264 e RAMI 4.0. Isso permite a integração de interfaces de sistemas produtivos, possibilitando capacidades distribuídas e colaborativas, bem como flexibilidade e adaptação Neves et al. (2021).

Para utilizar a mineração de processos em tempo de execução e permitir a localização transparente de sistemas e ativos do processo, foi necessário ajustar a arquitetura original de agentes proposta por Silva Júnior (2019) e Souza et al. (2021).

A comunicação entre os sistemas foi realizada através do padrão Publish/Subscribe, permitindo a troca assíncrona de eventos. Esse modelo possibilita que os eventos sejam distribuídos de forma indireta aos interessados, facilitando a expansão do sistema (Kaneshiro et al. 2010; Eugster et al. 2003).

Para a localização transparente de dispositivos e o crescimento do middleware, foi adotada a metodologia de Unified Namespace (UNS), integrando diferentes fontes de dados, ativos e sistemas em uma estrutura organizacional única, que pode ser replicada para regiões específicas a fim de promover performance no sistema (Kaneshiro et al. 2010). Isso possibilita a interoperabilidade e alto desempenho do processo, distribuindo a estrutura organizacional de acordo com cada necessidade regional de operação.

Na nova arquitetura de sistemas multiagentes apresentada na Fig. 3, na camada de sistemas multiagentes, o objeto de Controle de Processos e Monitor foi substituído pelo sistema SCADA. Este sistema atua como supervisor e gestor do processo, reunindo dados de sensores, instrumentos, controladores e recursos essenciais para o funcionamento do processo em tempo de execução. Além disso, o SCADA, o Gerenciador de Conhecimento, e o Mediador, podem gerenciar registros de eventos no formato compatível com o OCEL 2.0, usado pelo sistema de Mineração de Processos (van der Aalst et al. 2021). Para garantir que nenhum dado crucial seja perdido, foram adicionados links de conexão com o Sistema de Aquisição de Dados e o Gerenciador de Conhecimento. Estes sistemas são conhecidos por garantir a robustez e segurança na coleta dos dados. Os agentes autônomos do sistema, contidos na área denominada Processo Físico Real, podem acessar o conhecimento necessário para suas atividades a partir do Gerenciador de Conhecimento, por meio de uma conexão direta.

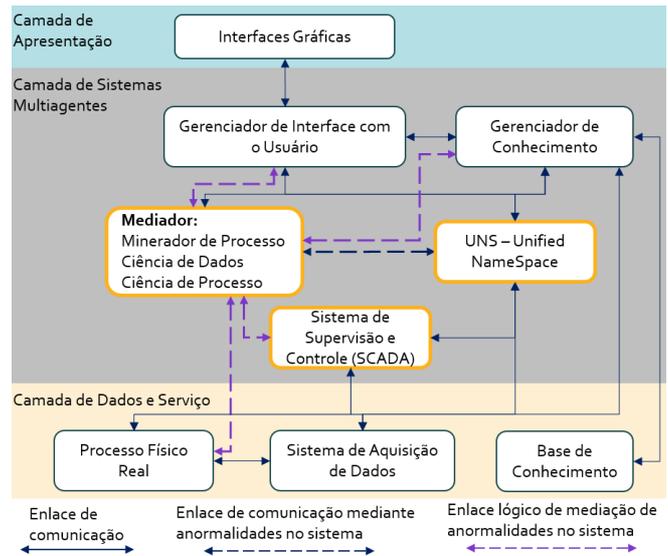


Fig. 3 - Nova arquitetura SMA proposta, baseada em Silva Júnior (2019) e Souza et al. (2021).

O Minerador de Processos desempenha um papel central no sistema, respondendo às solicitações do Gerenciador de Interface com o Usuário para iniciar atividades, do Gerenciador de Conhecimento para acessar logs de eventos, dos agentes autônomos do sistema e do sistema SCADA para coordenar a execução dos processos. Essas interações são representadas pelo enlace lógico na Fig. 3. Tudo isso está conectado ao Unified Namespace (UNS) que trabalha como um roteador de acesso a informações necessárias para os ativos do sistema. Para a integração de novos agentes ou sistemas, é essencial que eles notifiquem o Mediador Minerador de Processos e solicitem a assinatura dos tópicos relevantes, conforme mostrado na Fig. 4.

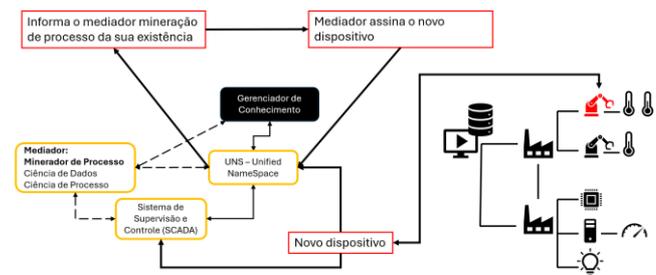


Fig. 4 - Fluxo de adição de novo ativo no sistema.

Quando o ativo já é parte do sistema, para solicitar uma mediação, também é necessário realizar uma solicitação ao mediador dentro de uma estrutura previamente definida, conforme ilustrado na Fig. 5. Através desta estrutura, como o ativo já está inscrito pelo Mediador, ao realizar a requisição de mediação, esta é enviada através do protocolo Publish/Subscribe, processada pelo Mediador e retornada da mesma forma ao solicitante, conforme ilustrado na Fig. 6. Esta metodologia de trabalho, garante um nível de interação altamente eficiente dentro do sistema mediador, devido as ações serem executadas e processadas exclusivamente quando necessárias.

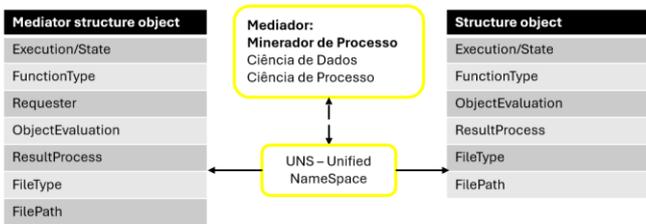


Fig. 5 - Estrutura de troca de informações com o Mediator Minerador de Processo.

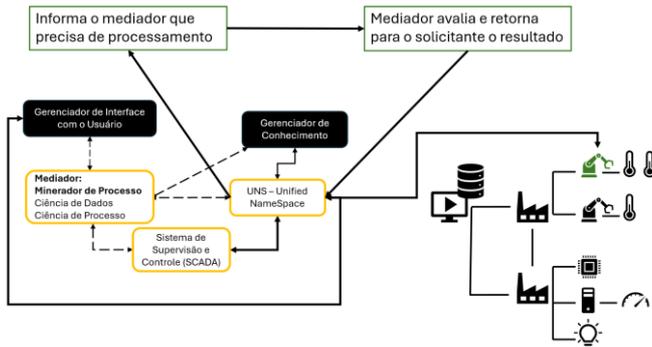


Fig. 6 - Fluxo de requisição de uma mediação de ativo no sistema.

4. VALIDAÇÃO DA ARQUITETURA

Para validar a arquitetura proposta, utilizamos a Mineração de Processos (MP) em tempo de execução juntamente com o SCADA, que atuou como gerenciador do processo. A integração entre os sistemas foi realizada através do protocolo Publish/Subscribe em um middleware, utilizando a estrutura do Unified Namespace (UNS). Na fase inicial, estabelecemos um gerenciamento objetivo baseado na operação de uma máquina de bebidas quentes. O estudo de caso utilizou o software SCADA Elipse E3, para simular as operações dos ativos. Em vez de interagir diretamente com os equipamentos, os dados foram gerados artificialmente por meio de programação, criando um ambiente virtual para a simulação. A aplicação desenvolvida simula e gerencia as operações de máquinas e ordens, conforme ilustrado na Fig. 7. Essa simulação permitiu validar, em tempo de execução, as técnicas de mineração de dados aplicadas. Para essa validação, foram registradas máquinas com diferentes estruturas, permitindo verificar a conformidade das ordens.

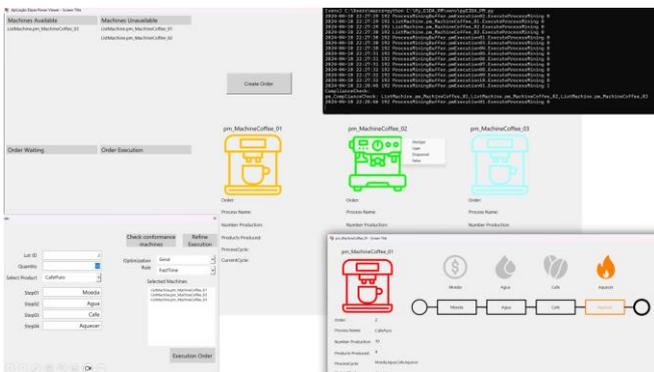


Fig. 7 - Visualização do sistema modelado no SCADA.

O Mediator Minerador de Processos foi desenvolvido em Python, utilizando a biblioteca de Mineração de Processos PM4PY. Este sistema foi projetado em conformidade com o padrão OCEL 2.0, o que possibilita uma análise detalhada e precisa dos registros de eventos (Berti et al. 2023). Além disso, o Mediator Minerador de Processos faz uso da biblioteca SQLite para acessar os logs centrados em objetos, garantindo um gerenciamento eficiente e organizado dos dados. Para a assinatura de dados seguindo o protocolo Publish/Subscribe, incorpora a biblioteca Paho-MQTT, oferecendo suporte completo ao MQTT 5.0, o que facilita a integração e comunicação em ambientes distribuídos.

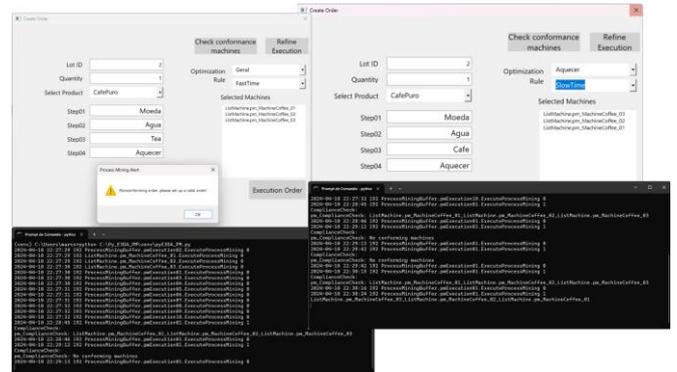


Fig. 8 - Visualização de verificação de conformidade e refinamento da ordem no SCADA via PM.

O sistema começa avaliando e ativando os ativos em um cenário conhecido recente do processo. Logs são gerados para documentar a atividade do Mediator Minerador de Processos, exibindo os ativos reconhecidos e seus estados de solicitação atuais. Paralelamente, o SCADA é responsável por gerenciar os ativos operacionais do processo, incluindo as máquinas que estão disponíveis ou indisponíveis e as ordens que estão em execução ou aguardando processamento, conforme ilustrado na Fig. 7. Neste exemplo, as ordens são inseridas através do sistema SCADA, onde é possível visualizar, selecionar e configurar as ordens, conforme mostrado nas Fig. 7 e Fig. 8. O Mediator Minerador de Processos (PM) permite verificar a conformidade das ordens com os eventos registrados, protegendo o sistema contra a execução de ordens incorretas, ilustrado na Fig. 8. O sistema otimiza o processo com base nos logs de eventos registrados, como a velocidade de execução, demonstrado na Fig. 8. As ordens são executadas nas máquinas disponíveis; em caso de falha de uma máquina, a ordem retorna ao estado de espera, aguardando que outra máquina compatível com seus requisitos fique disponível. O processo é continuamente monitorado e visualizado no SCADA, onde as máquinas executam as tarefas de acordo com o fluxo de entrada de ordens no sistema.

5. CONCLUSÕES

Para assegurar um alto nível de eficiência em toda a cadeia de processos do negócio, é essencial utilizar adequadamente as ferramentas propostas pelos conceitos da Indústria 4.0 e RAMI 4.0, juntamente com os demais conceitos apresentados neste artigo. Acredita-se que o conjunto de técnicas

empregadas deve focar nos logs de eventos dos objetos e na gestão destes e dos processos. Por esses motivos, a mineração de processos centrada em objetos emerge como uma solução promissora para atender a essas demandas. A análise avançada dos dados possibilita conferir ao processo fabril autonomia, adaptabilidade e interoperabilidade, capacitando as indústrias a se adequarem aos requisitos da digitalização industrial e a se beneficiarem das vantagens que ela oferece. Atualmente, a pesquisa está avançando para uma nova fase de desenvolvimento de modelos aplicados a um estudo de caso em manufatura avançada, a fim de reforçar a validação da arquitetura e do conceito de agente minerador de processos proposto.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES e Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo (IFSP) pelo apoio concedido para a realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- Baena, F., Guarin, A., Mora, J., Sauza, J., and Retat, S. (2017). Learning Factory: The Path to Industry 4.0. *Procedia Manufacturing*, 73-80.
- Bicer, M., and Du, X. (2020). A Unified Namespace Management for Distributed Storage Systems. *IEEE Access*, 8, 12356-12366.
- Berti A., van Zelst S., Schuster D. (2023). PM4Py: A process mining library for Python. Elsevier.
- Eugster, P. T., Felber, P. A., Guerraoui, R., and Kermarrec, A.-M. (2003). The Many Faces of Publish/Subscribe. *ACM computing surveys (CSUR)*, pp. 114–131.
- Gerbert, P., hinderer, H., and Engel, P. (2015). "Industrial technology 4.0: opportunities and challenges of digital transformation." *International Labour Organization*.
- Kaneshiro, P., Cugnasca, C., Garcia, J., and Miyagi, P. (2010). Modelagem de sistema de controle distribuído em edifícios inteligentes através da rede de Petri colorida. *IEEE América Latina*, 589-596.
- Moretti S, Tran VDT, Mehl F, Ibberson M, Pagni M (2021). MetaNetX/MNXref: unified namespace for metabolites and biochemical reactions in the context of metabolic models. *Nucleic Acids Res.* 2021 Jan 8;49(D1): D570-D574. doi: 10.1093/nar/gkaa992. PMID: 33156326; PMCID: PMC7778905.
- Neves C. C. B., D. de Carvalho Oliveira, Asato O. L., Kaneshiro P. J. I. and Nakamoto F. Y. (2021). "Planejamento Dinâmico da Produção e a Capacidade Funcional do Sistema Produtivo," 2021 14th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON), São Paulo, Brazil, 2021, pp. 1482-1489, doi: 10.1109/INDUSCON51756.2021.9529713.
- Palau, A. S., Dhada, M. H., and Parlikad, A. K. (2019). Multi-agent system architectures for collaborative prognostics. pp. 2999-3013.
- Peixoto, J. A., and Pereira, L. M. (2018). Indústria 4.0 na auto-organização dos sistemas produtivos. *Revista Eletrônica Científica da UERGS*, 525-538.
- Peruzzini, M., Grandi, F., and Pellicciari, M. (2017). Benchmarking of Tools for User Experience Analysis in Industry 4.0. *Procedia Manufacturing*, 806-813.
- Reference Architecture Model Industrie 4.0 (RAMI 4.0) (2018). Acesso em: 07/03/2022. Disponível em: <https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/EN/Downloads/Publikation/rami40-an-introduction.html>.
- Schäfer, W., and Zimmermann, A. (2021). Towards a Cloud-native Reference Architecture for Industry 4.0: A Service-Oriented Extension of RAMI 4.0. In *Proceedings of the 2021 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*.
- Silva Junior, I. C. (2019). Proposta de arquitetura de multiagentes para a execução do comissionamento virtual de sistemas de manufatura avançada. São Paulo, SP, Brasil.
- Souza L. P. de Souza, Kaneshiro P. J. I., Asato O. L. and Nakamoto F. Y. (2021). "Proposta de Agente autônomo utilizando as técnicas de mineração de processos em uma Arquitetura Virtual baseada em Sistemas Multiagentes," 2021 14th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON), São Paulo, Brazil, 2021, pp. 702-709, doi: 10.1109/INDUSCON51756.2021.9529912.
- Vaidya, S., Prashant, A., and Santosh, B. (2018). *Industry 4.0 - A Glimpse*.
- van der Aalst, W. (2011). *Process Mining - Discovery, Conformance and Enhancement of Business Processes*. Schleiden: Springer.
- van der Aalst, W., Adriansyah, A., Medeiros, A. A., Arcier, F., Baier, T., Blickle, T., and Wynn, M. (2012). *The Process Mining Manifesto - IEEE Task Force on Process Mining. BPM 2011 Workshops, Part I, LNBIP 99*, Springer-Verlag, 169–194.
- van der Aalst W.M.P. and A. Berti (2020a). Discovering Object-Centric Petri Nets. *Fundamenta Informaticae*, 175(1-4):1–40, 2020.
- van der Aalst, W.M.P., Ghahfarokhi A.F., Park G., and Berti A. (2020b). OCEL Standard. <https://www.ocel-standard.org/1.0/>, 2020.
- van der Aalst, W.M.P., Ghahfarokhi A.F., Park G., and Berti A. (2021). OCEL: A Standard for Object-Centric Event Logs. In L. Bellatreche, M. Dumas, and P. Karras, editors, *New Trends in Database and Information Systems (Short Papers ADBIS 2021)*, volume 1450 of *Communications in Computer and Information Science*, pages 169– 175. Springer-Verlag, Berlin, 2021.
- van der Aalst W.M.P., Berti A., Koren I., Adams J. N., Park G., Knopp B., Graves N., Rafiei M., Liß L., Unterberg L. T. G., Zhang Y., Schwanen C., and Pegoraro M. (2023). OCEL (Object-Centric Event Log) 2.0 Specification. <https://www.ocel-standard.org/>, 2023
- van der Aalst, W.M.P. (2023). Object-Centric Process Mining: Unraveling the Fabric of Real Processes. *Mathematics* 2023, 11, 2691. <https://doi.org/10.3390/math11122691>
- Wortmann, F., ET AL. (2020). A reference architecture model for flexible and adaptive production environments. *Procedia CIRP*, 93, 422-427.