

Uma Proposta de Arquitetura de Referência de Gêmeo Digital para Sistemas Ciberfísicos em um cenário de Indústria 4.0

Ricardo J. Rabelo, Luciano C. Magalhães, Felipe G. Cabral

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Automação e Sistemas, UFSC, Florianópolis (SC)
ricardo.rabelo@ufsc.br; lcmengmecatronico@gmail.com; felipe.gomes.cabral@ufsc.br

Abstract: One of the main elements of the Industry 4.0 model are the Cyber-Physical Systems (CPS). Given the need for digitization, digital twins (DTs) are considered one of the enabling technologies for real-time emulation of CPS for its observation, simulation, analyses, and decision making. Most works on DTs for CPS do not deal with real shop-floors and are not based on reference architectures, making several problems of scalability and integration not being tackled. This paper presents an initial proposal of a reference architecture and a partial implementation DT for a real CPS implemented as a prototype.

Resumo: Um dos principais elementos da Indústria 4.0 são os Sistemas Ciberfísicos (SCF). Dada a necessidade de digitalização do chão-de-fábrica, gêmeos digitais (GDs) são tidos como uma das tecnologias habilitadoras para emulação em tempo real de SCFs para observações, simulações, análises e tomadas de decisão. A maior parte dos trabalhos sobre GDs para SCFs não cobrem plantas industriais reais e não se baseiam em arquiteturas de referência, fazendo com que inúmeros problemas de escalabilidade e de integração não sejam atacados. Este trabalho apresenta uma proposta inicial de arquitetura de referência e uma instanciação parcial para um SCF real implementado em um protótipo.

Keywords: Digital Twin; Industry 4.0; Service Oriented Architecture; Open Standards.

Palavras-chaves: Gêmeo Digital; Indústria 4.0; Arquitetura Orientada a Serviços; Padrões abertos.

1. INTRODUÇÃO

Indústria 4.0 é um modelo de produção caracterizado por uma intensa digitalização e interconexão de produtos, serviços e sistemas de manufatura smart, em cadeias de valor e modelos de negócios baseados na Internet das Coisas (IoT), Serviços e Pessoas (CAMARINHA-MATOS *et al.*, 2017).

Um dos principais elementos da concretização do modelo de Indústria 4.0 são os Sistemas Ciber-Físicos (SCFs). (COLOMBO *et al.*, 2017) definem um SCF como um ambiente integrado com capacidades computacionais e físicas (como sensoriamento, comunicação e atuação), com ciclos de realimentação onde processos físicos afetam os processos computacionais e vice-versa. Os SCFs podem ter variados graus de autonomia, inteligência e capacidade de comunicação tempo real (LEE *et al.*, 2015).

Dada a necessidade de digitalização e tratamento de dados para melhor suporte a tomadas de decisão, várias tecnologias são tidas como habilitadoras para a Indústria 4.0. Uma delas é de gêmeo digital (GD). Em termos gerais, pode-se dizer que um GD é um modelo computacional que emula em tempo real o comportamento de uma dada entidade física para fins de observações, simulações, análises e tomadas de decisão (ALAM *et al.*, 2017).

Em termos de manufatura, verificou-se que muitos trabalhos mencionam o uso de GDs e de suas potencialidades quando associados a SCFs (COLOMBO *et al.*, 2017; STARK *et al.*,

2019; TAO *et al.*, 2019); porém, são basicamente conceituais. Já os que buscam alguma implementação, fizeram-na de forma apenas simulada, sem conexão efetiva com um SCF real, em ambiente totalmente controlado, sem suporte à atuação no sistema real após uma tomada de decisão, e de forma ad-hoc, não baseado em arquiteturas de referência (ASHTARI *et al.*, 2019; LU *et al.*, 2020; JONES *et al.*, 2020). Além disso, observou-se uma grande variação sobre o que se considera GD em termos de funcionalidades (KRITZINGER *et al.*, 2018; CIMINO *et al.*, 2019; TAO *et al.*, 2019). Após análise da literatura, não foram encontrados trabalhos que mostrassem uma arquitetura de referência e posterior implementação de GDs em ambiente real de SCFs voltados à manufatura.

A transformação de um equipamento real industrial de chão de fábrica em um SCF e sua efetiva virtualização na forma de um GD não é um processo trivial. Envolve a integração de diferentes sistemas, a interoperação de diferentes protocolos de comunicação e formatos, a análise de protocolos com capacidade para transmissão de enormes volumes de dados em tempo real, a construção de *wrappers*, a síntese de dados de instrumentação, de IoT e de redes industriais, entre outros aspectos (SILLER *et al.*, 2018).

Este trabalho apresenta uma contribuição para o problema de construção na questão de desenvolvimento de GDs para SCFs reais. Trata-se de uma pesquisa em andamento, do tipo Pesquisa-Ação, que propõe uma arquitetura e modelo de implementação de GD para uma célula real de manufatura.

O artigo é organizado da seguinte forma. A seção 2 descreve os principais conceitos associados a GDs. A seção 3 apresenta a arquitetura de GD concebida e os principais problemas a serem equacionados. A seção 4 mostra o modelo de implementação e os resultados do protótipo, que também funciona como prova de conceito da arquitetura. Finalmente, a seção 5 resume as conclusões parciais obtidas bem como indica os seus principais próximos passos.

2. GÊMEO DIGITAL

Embora haja várias definições de GD (conforme listado em NEGRI *et al.*, (2017b)), uma das mais referenciadas (voltada para veículos autônomos de exploração espacial da NASA) é dada por GLAESSGEN *et al.*, (2012): um GD é uma simulação integrada, multifísica, multiescala e probabilística de um sistema, que usa modelos físicos e dados para espelhá-lo de forma fidedigna e em tempo real, cuidando de forma preditiva da sua própria permanência no ambiente frente a problemas não previstos no sistema real ou virtual.

Em termos gerais, um GD visa ajudar na redução de custos, melhorar e agilizar o ciclo de testes e de produção de um produto ou processo, reduzir o tempo de introdução de novos produtos, e criar um ambiente virtual no qual todas as fases do produto estejam integradas (GRIEVES, 2014).

CIMINO *et al.*, (2019) agruparam os artigos sobre GD de acordo com a sua finalidade e observaram oito principais áreas de aplicação: (1) Suporte para gerenciamento de produção; (2) Monitoração e melhoria do processo de produção; (3) Suporte ao ciclo de vida de produtos; (4) Flexibilidade do sistema de produção; (5) Manutenção; (6) Segurança na interação humano-robô; (7) Projeto de máquinas; e (8) Desempenho computacional.

Segundo NEGRI *et al.*, (2017), a área de GD teve grande impulso a partir de 2010 com uma série de pesquisas da NASA e da Força Aérea Americana com experimentos de realidade virtual, focando no espelhamento digital de entidades físicas para apoio da tomada de decisões por meio de análises estatísticas e de engenharia. De acordo com a revisão da literatura realizada, o primeiro trabalho de GD na área da manufatura foi proposto por (LEE *et al.*, 2013), como a contraparte virtual (armazenada em Nuvem) dos recursos de produção no contexto de Indústria 4.0.

De acordo com (KRITZINGER *et al.*, 2018), muitos trabalhos encontrados na literatura não são realmente GDs, pois não há uma comunicação bidirecional entre o GD e o sistema físico. Há três níveis de virtualização de um dado sistema, como ilustrado na Fig. 1:

- Modelo Digital (*Digital Model*) é a simples representação digital de um objeto físico. Não há interação entre os modelos físico e virtual;
- Sombra Digital (*Digital Shadow*) caracteriza-se pela conexão entre os objetos físico e digital, mas de forma apenas unidirecional, com o objeto físico atualizando o objeto digital;
- Gêmeo Digital (*Digital Twin*) caracteriza-se também pela conexão entre os objetos físico e digital, mas de forma bidirecional, com o objeto físico atualizando o objeto digital, e vice-versa.

Um GD pode espelhar um ou vários recursos do ambiente físico, tais como operadores, máquinas, materiais e ambientes (ZHONG *et al.*, 2017). A parte digital é composta por funcionalidades com o propósito de gerenciamento de dados, análise e computação (MONOSTORI *et al.*, 2016).

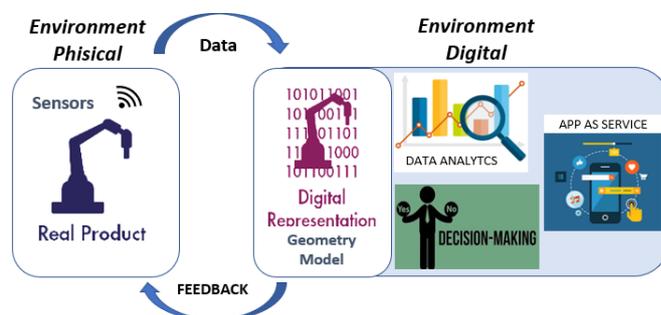


Fig. 1 Modelo genérico de Gêmeo Digital (Fonte: TAO *et al.*, 2018).

2.1 Comunicação em Gêmeos Digitais

Há várias abordagens relacionadas ao processo de comunicação e transmissão de dados entre um SCF real e seu GD. Os protocolos *Fieldbus*, *Modbus*, *Industrial Ethernet* (*Profinet*) vêm sendo os mais empregados no chão de fábrica para a comunicação com sensores, atuadores e controladores em tempo real. Isso pode abranger diferentes protocolos de IoT e uso de redes de sensores sem fio para também espelhar outros elementos de produção, como peças, pessoas, equipamentos de transporte, entre outros (HU *et al.*, 2013).

Já para comunicações e modelagens de mais alto nível, ressaltam-se os protocolos *OPC* (*Open Platform Communications*) e *OPC-UA* (*OPC Unified Architecture*) (LIU *et al.*, 2019), o *MQTT* (*Message Queuing Telemetry Transport*) (KARANJKAR *et al.*, 2019), o *MTCConnect* (*Manufacturing Technology Connect*) baseado em XML (CORONADO *et al.*, 2018), e também o *AutomationML* (*Automation Markup Language*) utilizado para modelagem de SCFs e sistemas de manufatura (BAO *et al.*, 2018).

2.2 Funcionalidades de um Gêmeo Digital

Em termos de funcionalidades de um GD, TAO *et al.* (2018) e CIMINO *et al.* (2019) listam as seguintes:

- Monitoramento em tempo real para atualizar o GD, com informações sobre peças, produtos, operações, máquinas, e todas as entidades que compõem o ambiente físico;
- Análise e previsão do consumo de energia;
- Otimização e atualização inteligente, baseadas na análise de operação do usuário e nos dados do produto e/ou do processo de produção;
- Análise e comportamento de operação do usuário, para detectar e avaliar as operações feitas por ele;
- Manutenção virtual do produto, fazendo uso de realidade virtual ou aumentada, para testes, avaliações e, por fim, para a manutenção real.
- Análise e previsão de falhas para planejamento de manutenção do equipamento e/ou produto;

As funcionalidades de um GD consideram o domínio de aplicação e os aspectos a serem avaliados e visualizados. Assim, pode haver uma variação do nível de detalhamento que uma interface gráfica deve ter bem como o nível de atuação no sistema real (KRITZINGER *et al.*, 2018).

STARK *et al.*, (2019) propuseram um modelo geral de um GD, dividindo suas funcionalidades em duas grandes categorias: *Contexto & Ambiente* abrangem funcionalidades ligadas ao objeto ou processo físico e sua conectividade; e *Comportamento & Capacidade* envolvem a inteligência do modelo digital, a fidelidade 3D do objeto físico, simulações e as interações com usuários.

2.3 Síntese da revisão da literatura de Gêmeos Digitais

O primeiro ponto observado na revisão da literatura foi de que a grande maioria dos trabalhos sobre GD são teóricos, de propostas de modelos, ou apenas na forma de menção de GDs como uma tecnologia promissora para Indústria 4.0.

O segundo ponto observado foi de que também a grande maioria dos trabalhos trata de Sombra Digital ou Modelo Digital; portanto, sem o intercâmbio de dados entre a entidade física e o GD. Dado isso, são trabalhos que não exploram certas potencialidades de um GD relativas à atuação no sistema real após análises inteligentes no modelo virtual, como também detectado por CIMINO *et al.*, (2019).

O terceiro ponto, corroborado em TAO *et al.* (2018) e CIMINO *et al.* (2019), é que mesmo em trabalhos em GD o elemento virtualizado é apenas uma máquina, ou seja, um sistema simples, sem uma visão mais abrangente de um sistema de produção.

O quarto ponto é que a grande maioria dos trabalhos de GD em manufatura são apenas simulados, não conectados a um sistema real. Como mencionado na seção 1, isso significa uma simplificação de complexos aspectos de integração e interoperabilidade, projeto de infraestrutura de comunicações, entre vários outros. Ainda, simulam somente equipamentos, não incluindo, por exemplo, ações de operadores.

O quinto ponto é que há alguns softwares comerciais de GD no mercado disponibilizados por grandes empresas, mas são caros, fechados para modificações, e de difícil integração com outros sistemas, o que dificulta inclusive a adoção de GDs por pequenas e médias empresas.

O sexto e último ponto se refere a arquiteturas de GD. Apesar de haver alguns trabalhos que listam quais seriam as funcionalidades na direção de um sistema “completo” de GD, não se encontrou trabalhos com propostas concretas de arquiteturas e de alguma metodologia que ajude arquitetos de sistemas e profissionais de automação na definição de modelos de implementação para GDs com SCFs reais.

3. ARQUITETURA DE REFERÊNCIA DE GÊMEO DIGITAL PARA MANUFATURA 4.0

3.1 Requisitos gerais de projeto de um Gêmeo Digital

Considerando o modelo de referência ISA-95 de automação

industrial¹, tem-se que os níveis 0-1-2 estão ligados ao SCF real. Já os níveis 3 e 4 atuam como sistemas-clientes, tanto do SCF, como do GD. Embora o GD atue de forma simbiótica e como imagem virtual do SCF físico, o GD pode ser visto também como um cliente do SCF (Fig. 2).

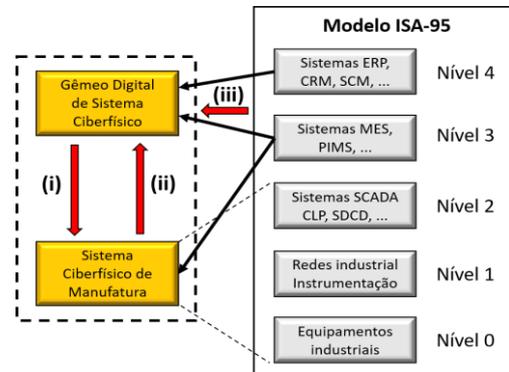


Fig. 2 Gêmeo Digital e Sistema Ciberfísico no modelo ISA-95 (Fonte: Autores).

Todos esses níveis, processos, sistemas e entidades fabris atuam em um ciclo PDCA. Em termos gerais, o nível 4 planeja (*Plan*), os níveis 0-1-2 (e assim o SCF) executa (*Do*), o nível 3 averigua (*Check*), e os níveis 1-2-3-4 atuam no ajuste (*Act*) do sistema real SCF no caso de desvios no plano.

Dependendo dos objetivos da empresa para com o GD e da organização física dos equipamentos industriais no seu chão de fábrica, um SCF pode representar mais de um equipamento, e um GD pode tanto virtualizar mais de um SCF como interagir com outros sistemas ou até mesmo com outros GDs para se propiciar uma visualização mais ampla.

Dado que um GD deve emular em tempo real exatamente o que se passa no ambiente do SCF, vários aspectos devem ser considerados e ponderados quando de um projeto real de implementação dado o objetivo essencial de cada ator, indicados nas posições (i), (ii) e (iii) na Fig. 2 (BEVILACQUA *et al.*, 2020; JONES *et al.*, 2020; LEE *et al.*, 2013; SCHROEDER *et al.*, 2016; TAO *et al.*, 2019; ZHANG *et al.*, 2016; ZHENG *et al.*, 2019; RABELO *et al.*, 2019; STARK *et al.*, (2019), AGOSTINO *et al.*, 2020):

Relacionado a (i), ao ator GD interessa essencialmente coletar informações do SCF bem como enviar informações e comandos para este. Para tal, deve-se considerar:

- *O que coletar do SCF?* Um SCF pode gerar milhares de dados. Mas quais são realmente necessários para o GD?
- *Quando coletar?* Qual é a frequência de coleta de milhares de dados em tempo real que os *gateways* e protocolos de comunicação suportam? Qual é a capacidade mínima de espelhamento que o GD pode ter consoante ao que o SCF é capaz de gerar, de atualizar e de enviar?
- *Como coletar?* O fluxo de recebimento será contínuo, usar *buffer* e *batches*, ou se deverá armazenar os dados recebidos inicialmente em um banco de dados?

¹ <https://www.iso.org/standards-and-publications/isa-standards/isa-standards-committees/isa95>

- *Onde armazenar os dados coletados?* Ao longo do tempo haverá uma quantidade gigantesca de dados armazenados no ambiente do GD. Deverão ser armazenados em arquivos ou bancos de dados locais, ou em Nuvem?
- *Como armazenar os dados coletados?* Há algum esquema de dados de referência a ser instanciado no modelo do GD? Os dados deverão ser sempre mantidos ou deverão ser “limpos” frequentemente? Todos ou apenas alguns?
- *Quando e como atuar no SCF?* Conforme as análises realizadas no ambiente do GD, é necessário atuar fisicamente no SCF. Ainda, de acordo com a gravidade da situação e de quão crítico é o SCF sob virtualização, a atuação deve ser imediata, de execução em tempo real. Porém, uma atuação no sistema físico tem inúmeras implicações, pode incorretamente se sobrepor à função de sistemas supervisórios locais, e há situações onde isso não é realmente necessário ou mesmo não autorizado. Quais são as situações passíveis de atuação no SCF? Quais são as restrições de governança / *compliance* de permissão para uma atuação? Quais e como definir as restrições de tempo real para quando da necessidade de atuações imediatas?

Relacionado a (ii), e no contexto de GD, ao ator *SCF* interessa essencialmente lhe enviar informações. Para tal, deve-se considerar:

- *O que enviar ao GD?* O que o GD precisa ter de dados e que o SCF não tem? Há como o operador introduzi-los? Há a necessidade de síntese de dados diferentes para o então envio? Quais são as restrições de uso de dados em função do modelo de governança / *compliance*, de LGPD, e de segurança da empresa?
- *Quando enviar?* Qual é a frequência de coleta de milhares de dados do SCF em tempo real que os *gateways* e protocolos de comunicação desejados ou implantados suportam? Como lidar com dados contínuos e discretos, analógicos e digitais, de eventos síncronos e assíncronos, e seus diferentes tempos de atualizações nos sistemas locais?
- *Como enviar?* O fluxo de envio será tipo de canal aberto, *streaming*; ou deverá usar *buffer* e *batches* por conta da infraestrutura de rede existente; ou se deverá armazenar os dados todos inicialmente em um banco de dados? Como lidar com a perda de conexões e de dados?
- *Onde armazenar os dados enviados?* Ao longo do tempo haverá uma quantidade gigantesca de dados armazenados no sistema local. Deverão ser armazenados em arquivos ou bancos de dados locais, ou em Nuvem?
- *Como armazenar os dados enviados?* Há algum esquema de dados de referência no SCF a ser instanciado? Os dados deverão ser sempre mantidos ou deverão ser limpos frequentemente? Todos ou apenas alguns?

Relacionado a (iii), ao ator *Clientes* interessa essencialmente: visualizar a operação do SCF através do seu GD; acessar variados tipos de informações do GD; e acessar informações do SCF. Para tal, deve-se considerar:

- *O que e como virtualizar o modelo do SCF?* O que considerar e como modelar o espelhamento do SCF?
- *O que armazenar?* Considerando os diferentes módulos da arquitetura de referência e assim das possibilidades de

acesso externo, quais são as informações que devem ser armazenadas para as demandas dos diversos Clientes?

- *O que visualizar?* Quais elementos do CSF devem ser efetivamente visualizados e mostrados seus movimentos ou mudanças de estados?
- *O que analisar e simular?* O que analisar ao longo da operação/visualização do SCF? O que gerar de indicadores de desempenho e KPIs para gestão? Quais eventos ou problemas deverão ser foco de atenção e análise? Quais serão as técnicas e bases para diagnóstico de problemas, suas descrições, predições e prescrições? Quais problemas ou eventos deverão ser levados a nível de simulação para maior embasamento das análises preditiva e prescritiva?
- *Onde, quando e como atuar?* Derivado da análise do GD e de ações sobre sua gestão geral, ações devem ser tomadas em termos de atuação no SCF. Consoante cada decisão, quais elementos deverão sofrer atuação do GD? A atuação deverá ser necessariamente imediata? O que deve ser exatamente e permitido ser feito em termos de atuação? Quem (pessoas e sistemas) devem ser comunicados sobre cada atuação e seus efeitos?

3.2 A Arquitetura proposta

Considerando-se os inúmeros aspectos descritos na seção anterior e adotando-se uma abordagem indutiva, analisaram-se as funcionalidades e várias arquiteturas de SCFs e de GDs propostas na literatura (algumas para outras áreas que não a manufatura), em mais particular as referenciadas neste artigo. Foi feita uma compilação, generalização, adaptação para a manufatura, e extensão de aspectos não encontrados na literatura. Como resultado, é proposta uma arquitetura inicial de referência de GDs para SCFs de manufatura que congrega também aspectos de indústria 4.0 (Fig. 3).

A Figura 3 também mostra o enquadramento da arquitetura proposta na ainda preliminar norma ISO-23247 para GDs², que separa um ambiente de GD em quatro camadas básicas: usuários do GD (*User*); funcionalidades e serviços do GD (*Digital Twin Platform*); coleta de dados e controle do SCF (*DC&DC - Data Collection & Device Control*); e entidades de chão-de-fábrica (*PM - Physical Manufacturing*).

Do lado do SCF, a arquitetura é baseada na proposta de SILLER *et al.* (2018), na qual, basicamente, há um “encapsulamento” (*wrapper*) orientado a serviços que faz a ponte entre o SCF e o ambiente externo, transformando o SCF em um *provedor de serviços* (funcionalidades). Este encapsulamento fornece uma camada padrão de comunicações, encobrindo as particularidades de TIC de cada SCF, equivalente ao conceito de VMD (*Virtual Manufacturing Device*) da norma ISO 9506-2:2003 MAP/MMS. Perante o modelo de referência arquitetural para Indústria 4.0 RAMI 4.0 (SCHWEICHHART, 2015), pode-se fazer uma analogia deste encapsulamento com o *administration shell*. Ele representa uma entidade que gerencia o SCF bem como o faz se tornar uma entidade de fraco acoplamento e independente na arquitetura geral de controle, confinando e definindo claramente as responsabilidades do dado SCF.

² <https://www.iso.org/standard/75066.html>

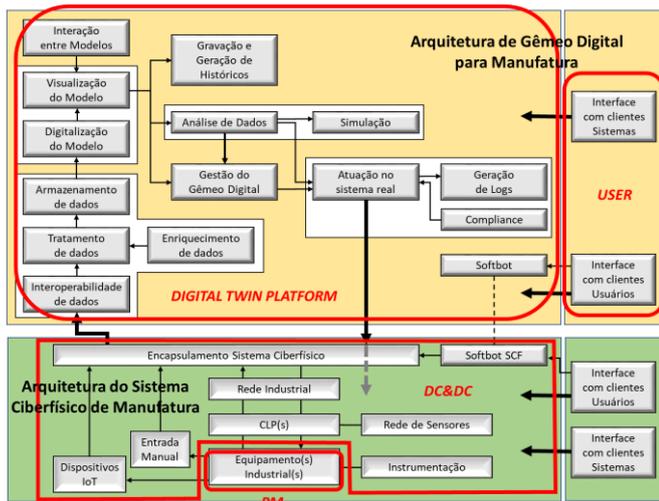


Fig. 3 Arquitetura de Referência de GD (Fonte: Autores).

Este encapsulamento centraliza, via interfaces apropriadas, a interação com usuários finais e com outros sistemas-clientes. SILLER *et al.* (2018) propõem um nível ainda superior, chamado *manager*, que incorpora os aspectos de autonomia e inteligência de decisões, autogerenciamento, entre outros, de um SCF “4.0”, incluindo a coordenação de ações que envolvem uma cooperação (horizontal) com outros SCFs.

Um SCF pode incorporar diversos equipamentos, dispositivos industriais e instrumentações, que podem se comunicar entre si via diferentes protocolos e tipos de redes. Dados podem ser obtidos via dispositivos IoT e não apenas via CLPs. Além disso, em sistemas legados e em instalações de pequenas empresas, muitos dados acabam por ser inseridos manualmente por operadores.

Do lado do GD, a arquitetura proposta incorpora contribuições de vários autores e estende alguns aspectos. A arquitetura proposta de GD tem os seguintes módulos:

- Interoperabilidade de dados: lida com as diferenças de protocolos, formatos, significados dos dados recebidos *in natura* pelo SCF;
- Tratamento de dados: lida com as inúmeras adaptações e sínteses de dados em função do que o GD espera receber;
- Enriquecimento de dados: trata do adição de dados extras aos providos pelo SCF (por exemplo, de desenho da fábrica, de produtos, de dados do chão de fábrica, mas não providos pelo SCF);
- Armazenamento de dados: responsável por armazenar de forma consolidada todos os dados necessários para o GD, em determinado formato e tipo de repositório digital;
- Digitalização do modelo: trata da criação do modelo digital do GD (normalmente no formato nativo do software gráfico) como base para posterior visualização;
- Interação entre modelos: trata do adição de dados providos por outros SCFs para uma representação gráfica mais abrangente e fidedigna do real ambiente no qual o GD do SCF em questão está inserido bem como de base para ambientes de GDs colaborativos;
- Visualização: trata da visualização gráfica do GD;

- Gravação e geração de históricos: lida com a gravação da visualização gráfica (ou seja, de toda a operação do SCF), de alguns cenários-referência, ou de situações de problemas e com uma respectiva geração de históricos;
- Análise de Dados: faz diagnósticos e análises descritivas, preditivas e prescritivas sobre problemas em questão ou previstos de ocorrerem em se mantendo o estado atual do SCF. Tais análises podem gerar informações de apoio ao GD para sua própria otimização, que por sua vez podem ser usadas pelo seu módulo de Gestão;
- Simulação: apoio a análises preditivas e prescritivas na simulação de cenários de tomadas de decisão;
- Gestão do Gêmeo Digital: trata de manter o GD em funcionamento, monitorar variáveis críticas do SCF (energia, desgastes, entre outras) em ciclos de averiguação ou em tempo real, gerar *dashboards*, mensagens e estatísticas de apoio aos gestores gerais do SCF, e determinar atuações físicas no SCF;
- Atuação no sistema real: trata de agir no SCF para alterar seu estado em função de tomadas de decisão no GD. Esta ação se dá na forma de mensagem, que pode conter dados e/ou comandos. Preservando-se a independência do CPS pelo seu encapsulamento, o *default* é que toda mensagem de atuação chegue ao encapsulamento (“gestor” do SCF) e este então pode realizar alguma análise prévia (já que o GD é apenas mais um dos clientes do SCF no ambiente de produção) antes de repassar a mensagem aos níveis abaixo. Todavia, conforme a gravidade da situação, a mensagem de atuação deve chegar diretamente à rede industrial, sensor(es) ou CLP, para imediata execução.
- Compliance: uma atuação deve considerar o modelo de governança / *compliance* em vigor, garantindo que somente as atuações previstas podem ser executadas em situações previstas, seguindo-se protocolos previstos, e por pessoas autorizadas.
- Geração de logs: trata do registro de todas as ações de atuação no SCF originadas do GD, para fins de auditoria, controles, etc.
- Softbot: interage com o usuário, respondendo perguntas ou enviando proativamente informações a ele sobre o GD (qualquer um dos módulos) assim como executando ações agendadas ou autonomamente. Pode ainda se comunicar com o softbot eventualmente implantado no SCF.

Em termos gerais, todos esses módulos podem ser acessados diretamente por aplicações-cliente (e.g. MES, logística, ERP) para acessarem dados, e por usuários que necessitem visualizar o GD, dependendo dos direitos de acesso.

4. IMPLEMENTAÇÃO DO GÊMEO DIGITAL

O modelo de implementação adota uma abordagem *bottom-up*, onde o GD é criado a partir de um SCF previamente implementado, sendo capaz de representar virtualmente o sistema físico e realizar atuações a partir das informações coletadas, ao invés de um cenário hipotético e ótimo. Isto implica em ter que interoperar com os sistemas e TICs legadas utilizadas.

Considerando a arquitetura de referência proposta no capítulo anterior, a implementação realizada corresponde a uma instanciação em estágio inicial e parcial, derivada para a planta de montagem didática da *FESTO* instalada no Departamento de Automação e Sistemas da UFSC (Fig. 4). Isso significa que o GD virtualiza a planta toda, e não apenas uma das suas estações de trabalho.



Fig. 4 Planta didática MPS da FESTO da UFSC (Fonte: Autores).

O processo de montagem da planta é dividido em seis etapas sequenciais, executadas respectivamente por seis estações de trabalho, cada qual com seu CLP:

- 1) **Distribuição:** visa disponibilizar as peças principais para as demais bancadas. As peças podem ser metálicas ou de resina, sendo que as de resina podem ser vermelhas ou pretas, dispostas em qualquer posição e ordem. A bancada tem um armazenamento de peças, alimentado por um operador, e equipado com um sensor ótico de barreira que indica se há peças disponíveis. Se houver uma peça disponível, um cilindro linear de dupla ação pneumático é acionado, disponibilizando a peça para o módulo trocador, equipado com um braço pneumático giratório com ventosa de sucção. O braço pneumático transfere a peça para a etapa/estação de teste;
- 2) **Teste:** testa a altura da peça com o auxílio de um sensor analógico. Caso a altura da peça esteja correta, ela segue para a próxima estação; caso contrário, é descartada;
- 3) **Separação:** testa a posição da peça. A partir de um sensor difuso, a profundidade da peça e sua posição são aferidas. Caso a peça esteja na posição correta, ela é encaminhada para a bancada seguinte. Caso contrário, a peça é descartada em uma esteira auxiliar;
- 4) **Manipulação:** a peça principal é transportada para um determinado ponto da esteira onde é travada e aguarda o posicionamento de uma tampa provida por um atuador pneumático por sucção. Uma vez que a tampa tenha sido posicionada sobre a peça, ela segue para a próxima etapa;
- 5) **Prensa:** nesta etapa, toda a manipulação é feita de forma pneumática. A peça é travada em um atuador que a conduz para uma prensa. Essa prensa finaliza o encaixe da tampa na peça principal, completando a montagem do produto e conduzindo-o para a etapa final;
- 6) **Classificação:** Essa etapa classifica os produtos de acordo com o material (metal ou resina) e, se o produto for de resina, com base na cor (vermelho ou preto). Para tanto, conta com um sensor de presença, um sensor indutivo, e

um sensor reflexivo. O produto segue para o depósito adequado de acordo com a classificação.

A instanciação inicial e parcial da arquitetura de referência foi feita como ilustrado na Fig. 5. Os módulos em cinza são os que foram de alguma forma lidados nesta implementação.

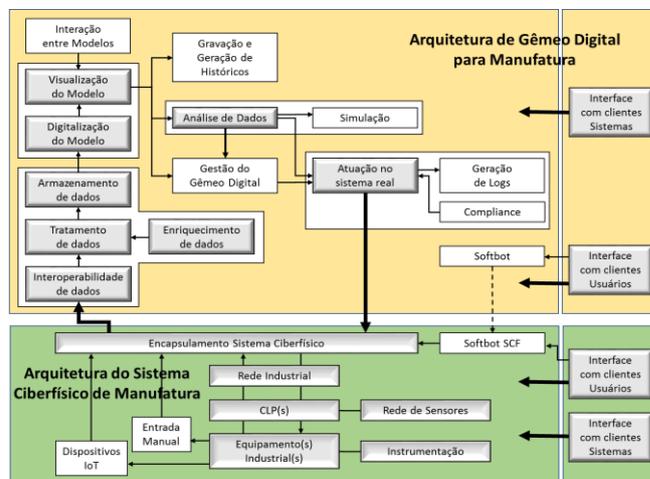


Fig. 5 Fluxo geral de implementação do Gêmeo Digital (Fonte: Autores).

Por ser uma arquitetura de referência, conceitual, em termos de implementação não necessariamente deve haver um sistema computacional individual específico correspondente para cada um dos seus módulos. Dependendo da configuração inicial do sistema, é possível que alguns módulos estejam previamente já implementados.

Os *equipamentos industriais* referem-se às estações do MPS e seu conjunto de instrumentações. Aqui deve-se ater ao mapeamento de dados para coleta de informações dos sensores e atuadores. Ao total, foram mapeadas 135 variáveis dos sensores e atuadores das 6 estações.

As estações do MPS estão equipadas com CLPs Siemens S7-1200, conectados entre si via rede industrial *Profinet* e protocolo TCP/IP, com Interfaces Homem-Máquina (IHMs).

Junto ao MPS, o software *TIA (Totally Integrated Automation) Portal*, também da Siemens, centraliza as comunicações entre o MPS e o ambiente externo, e incorpora várias funcionalidades, como a programação da planta (pelo programador), configurações gerais, gerenciamento, sistema supervisório (SCADA), comissionamento, e IHM do MPS. Todo esse conjunto está conectado a um *switch* que, por sua vez, é conectado a um roteador, que distribui o sinal em uma rede local sem fios, permitindo que se estabeleça comunicação com o MPS.

Neste ambiente há um módulo *servidor OPC*, que, ao ser habilitado no supervisório (*WinCC*), permite a troca de dados com outras aplicações-cliente que possuam interface OPC. O módulo disponibiliza *tags*, i.e., as variáveis dos sensores, atuadores e memórias internas dos CLPs do MPS. Um *Serviço de Gateway* lida com chamadas *Win32 COM/DCOM* usadas por uma biblioteca da linguagem *Python* (chamada *OpenOPC*), que permite a conexão cliente/servidor OPC.

Portanto, na arquitetura considerada neste artigo, o TIA Portal faz o papel do *Encapsulamento do SCF* na arquitetura geral de referência, e permite um interfaceamento com aplicações externas e com usuários.

No protótipo implementado, o envio dos dados do SCF para o GD não é feito diretamente. Conforme salientado na seção 3.1, uma análise da capacidade de transmissão de dados e desempenho precisou ser executada, pois se lidou com atualizações em tempo real de 135 *tags*, gerando-se dezenas de milhares de dados. O valor de todas as *tags* de todos CLPs e seus respectivos *time stamps* foram armazenados em tempo real em um banco de dados local *Mongodb* ao longo da execução de um certo programa de produção de montagem. Conceitualmente, em relação à arquitetura do SCF, pode-se dizer que esta parte está também compreendida pelo *Encapsulamento*.

Dado o uso dessa abordagem de integração intermediária via um banco de dados e do envio não direto dos dados ao GD, utilizou-se o *pattern* de comunicação *polling*, onde o GD faz uma consulta periódica ao banco de dados (configurada para ser feita a cada 2 segundos). Portanto, o SCF não envia os dados para o GD, mas sim o GD é quem dispara o processo de coleta de dados junto ao (banco de dados do) SCF.

Para tal, foi desenvolvido um módulo que se comunica com o servidor OPC do SCF por meio do serviço *OpenOPC Gateway*, que acessa e armazena no ambiente computacional do GD os dados coletados. Este módulo representa conceitualmente os módulos *interoperabilidade*, *tratamento* e *armazenamento de dados* da arquitetura de referência do GD.

Os dados foram preparados para poderem ser lidos pelo software de visualização gráfica utilizado, o *Plant Simulation*, da Siemens, na sua versão *trial*, bastante limitada em termos do que se pode visualizar de movimentos no SCF.

Para implementar o módulo *Análise de dados* da arquitetura de referência, foi desenvolvido um programa simples cujo objetivo (a nível de análise e gestão) era o de verificar o número de peças produzidas no SCF e interromper a produção assim que um determinado número de produtos fosse finalizado. A partir do momento que este número fosse atingido, a planta deveria parar a operação já a partir da primeira estação do MPS, a de *distribuição*; ou seja, o GD deveria atuar no SCF real. Para tal, esse programa fez uso da *tag* de contagem de peças e acionou o protocolo de interrupção da referida estação a partir da interface gráfica do GD, o que foi realizado com sucesso nas baterias de testes realizadas para a avaliação inicial do trabalho.

A Fig. 6 mostra algumas das interfaces envolvidas no processo descrito. A Fig. 6a mostra uma das interfaces do *TIA Portal* que permite o acesso às várias estações do MPS. A Fig. 6b mostra uma parte do programa no GD (em *Python*) que acessa o banco de dados do SCF pelo protocolo OPC. A Fig. 6c mostra uma parte do programa do acesso aos valores das *tags* das várias estações do MPS. A Fig. 6d mostra a interface de visualização gráfica do GD. Na Fig. 6e a interface desenvolvida, acoplada à anterior, para o gestor humano poder atuar no sistema real a partir de decisões tomadas (no caso, relacionada ao número de peças

produzidas) é apresentada. Nesta interface pode-se perceber o estado de algumas *tags* da estação de distribuição, onde a *tag* *GV_B_Stop_1* estava no estado *false* durante a operação e passou ao estado *true* depois de ativada pelo GD.

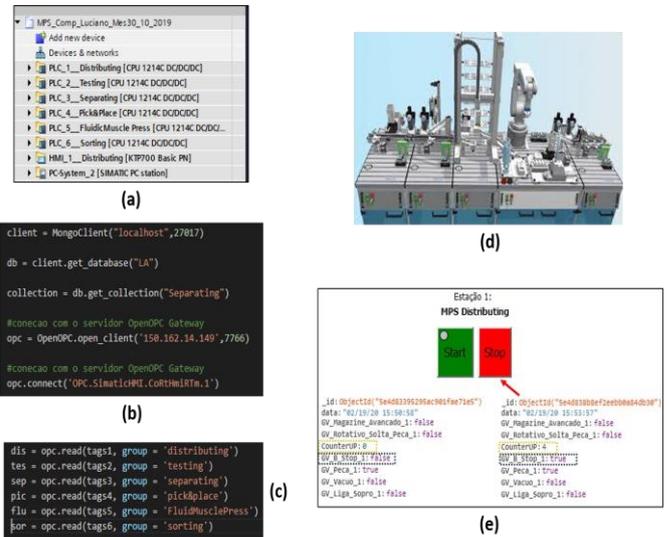


Fig. 6 Interfaces envolvidas com o Gêmeo Digital (Fonte: Autores).

Do ponto de vista de *deployment* da implementação, o TIA Portal está instalado em um computador, enquanto o cliente OPC, o banco de dados, e o GD estão em outro computador.

5. CONCLUSÕES

Este artigo apresentou o resultado de uma pesquisa em andamento, que corresponde a uma proposta inicial de arquitetura de referência de GD para SCF de manufatura em um contexto de Indústria 4.0. A arquitetura do SCF tenta lidar com sistemas legados, o que a torna mais fácil para a adoção por pequenas e médias empresas.

Uma das contribuições deste artigo é a implementação prática da arquitetura de GD proposta, uma vez que a maior parte dos trabalhos de GD se trata de sombra digital e ainda de forma simulada. Com isso, muitos problemas de integração não são lidos, incluindo a natural limitação de tecnologias e protocolos para o envio em tempo real de dados do SCF para o GD, e vice-versa.

Este trabalho mostrou também uma instanciação parcial da arquitetura de referência de GD, como uma prova de conceito. A implementação de todos os módulos da arquitetura de referência é complexa e longa. Cada módulo envolve abordagens e técnicas diferentes, em que alguns aspectos estão relacionados a áreas de pesquisa com pontos em aberto. A isso inclui-se aspectos não funcionais, de qualidade de serviço, como desempenho, robustez e segurança computacional. Por outro lado, dada a visão globalmente coerente propiciada pela arquitetura de referência, a evolução do projeto do GD pode ser escalada de forma mais consistente.

Os próximos passos deste trabalho se referem a melhorias na visualização gráfica dos movimentos nas estações do MPS no

GD, e a implementação de parte do módulo de análise de dados para uma melhor atuação.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi parcialmente financiado pela CAPES, no âmbito do projeto PrInt CAPES-UFSC “Automação 4.0”.

REFERÊNCIAS

- ALAM, M.; SADDIK, A. (2017). C2PS: A digital twin architecture reference model for the cloud-based cyber-physical systems. *IEEE Access*, v. 5, p. 2050-2062.
- AGOSTINO, I.; BRODA, E.; FRAZZON, E. M.; FREITAG, M. (2020). Using a Digital Twin for Production Planning and Control in Industry 4.0. Em *Scheduling in Industry 4.0 and Cloud Manufacturing*, Eds. B. Sokolov, D. Ivanov, A. Dolgui, Springer, p. 39-60.
- ASHTARI, B.; JUNG, T.; LINDEMANN, B.; SAHLAB, N.; JAZDI, N.; SCHLOEGL, W. An architecture of an Intelligent Digital Twin in a Cyber-Physical Production System. *Automatisierungstechnik*, v. 67, n. 9, p. 762–782, 2019.
- BAO, J.; GUO, D.; LI, J.; ZHANG, J. (2019). The modelling and operations for the digital twin in the context of manufacturing. *Enterprise Information Systems*, v. 13 (4), Taylor & Francis.
- CAMARINHA-MATOS, L.M., FORNASIERO, R., AFSARMANESH, H. (2017). Collaborative Networks as a Core Enabler of Industry 4.0. *Anais 18th Working Conference on Virtual Enterprises*, Springer, p. 3-17.
- BEVILACQUA, M., BOTTANI, E., CIARAPICA, F. E. (2020). Digital twin reference model development to prevent operators’ risk in process plants. *Sustainability*, v. 12 (3), p. 1-17.
- CIMINO, C.; NEGRI, E.; FUMAGALLI, L. (2019). Review of digital twin applications in manufacturing. *Computers in Industry*, v. 113, p. 103-130.
- COLOMBO, A. W., KARNOUSKOS, S., KAYNAK, O. (2017). Industrial Cyberphysical Systems: A Backbone of the Fourth Industrial Revolution. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, v.11, p. 6-16.
- CORONADO, P., LYNN, R., LOUHICHI, W. (2018). Part data integration in the Shop Floor Digital Twin: Mobile and cloud technologies to enable a manufacturing execution system. *Journal of Manufacturing Systems*, v. 48, p. 25-33.
- GLAESSGEN, E. H.; STARGEL, D. S. (2012). The digital twin paradigm for future NASA and U.S. Air force vehicles. *53rd Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*.
- GRIEVES, M. (2014). Digital Twin: Manufacturing Excellence Through Virtual Factory Replication, White paper, *Florida Institute of Technology*, v. 1, p. 1-7
- HU, T., LI, P., ZHANG, C. (2013). Design and application of a real-time industrial Ethernet protocol under Linux using RTAI. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, v. 26 (5), p. 429-439.
- JONES, D., SNIDER, C., NASSEHI, A. (2020). Characterising the Digital Twin: A systematic literature review. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, n. 9.
- KARANJKAR, N., JOGLEKAR, A., MOHANTY, S. (2018). Digital twin for energy optimization in an SMT-PCB assembly line. *Anais IEEE International Conference on Internet of Things and Intelligence Systems*.
- KRITZINGER, W., KARNER, M., TRAAR, G. (2018). Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. *IFAC PapersOnLine*, v. 15 (11), p. 1016-1022.
- LEE, J., LAPIRA, E., BAGHERI, B. (2013) Recent advances and trends in predictive manufacturing systems in big data environment. *Manufacturing Letters*, p. 38-41.
- LEE, J.; BAGHERI, B.; KAO, H. A. (2015). A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems, *Manufacturing Letters*.
- LIU, Q., ZHANG, H., LENG, J. (2019). Digital twin-driven rapid individualised designing of automated flow-shop manufacturing system. *International Journal of Production Research*, v. 57 (12), p. 3903–3919.
- LU, Y.; Liu, C.; Wang, I. K.; Huang, H. Digital Twin-driven smart manufacturing: Connotation, reference model, applications and research issues. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, v. 61, n. August 2019, p. 101837, 2020.
- MONOSTORI, L., KADA, B., BAUERNHANSL, Cyber-physical systems in manufacturing. *CIRP Annals*, v. 65 (2) p. 621–641, 2016.
- NEGRI, E.; FUMAGALLI, L.; MACCHI, M. A Review of the Roles of Digital Twin in CPS Production Systems. *Procedia Manufacturing*, v. 11, p. 939–948, 2017.
- RABELO, R. J.; ZAMBIAZI, S. P.; ROMERO, D. (2019). Collaborative Softbots: Enhancing Operational Excellence in Systems of Cyber-Physical Systems. *Anais 20th IFIP Working Conference on Virtual Enterprises*, Springer, p. 55-68.
- SCHWEICHHART, K. (2015). Reference Architectural Model Industrie 4.0 (RAMI 4.0). https://ec.europa.eu/futurium/en/system/files/ged/a2-schweichhart-reference_architectural_model_industrie_4.0_rami_4.0.pdf. Acessado em 22 05 2020.
- SCHROEDER, G., STEINMETZ, N., PEREIRA, C. E. (2016). Digital Twin Data Modeling with AutomationML and Communication Methodology for Data Exchange. *IFAC-PapersOnLine*, v. 49 (30), p.12-17.
- SILLER, H.; ROMERO, D.; RABELO, R. J. (2018). Advanced CPS Service Oriented Architecture for Smart Injection Molding and Molds 4.0. *Anais IEEE International Conference on Intelligent Systems*, p. 1-10.
- STARK, R.; FRESEMANN, C.; LINDOW, K. (2019). Development and operation of Digital Twins for technical systems and services. *CIRP Annals*, v. 68, p. 129–132.
- TAO, F.; CHEHG, J.; QI, Q.; ZHANG, M. (2018). Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data. *Int. Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 94 (9-12), p. 3563-3576.
- TAO, F.; CHEHG, J.; QI, Q.; ZHANG, M. (2019). Digital Twins and Cyber-Physical Systems toward Smart Manufacturing and Industry 4.0: Correlation and Comparison. *Engineering*, v. 5 (4), p. 653-661.
- ZHANG, J.; GAO, L.; QIN, W. (2016) Big-data-driven operation analysis and decision-making methodology in intelligent workshop. *Computer Integrated Manufacturing*, 22(5), p. 1221–1229.
- ZHENG, Y.; YANG, S.; CHENG, H. (2019). An application framework of digital twin and its case study. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, v. 10 (3), p. 1141–1153.
- ZHONG, R. Y., XU, X., KLOTZ, E. (2017). Intelligent Manufacturing in the Context of Industry 4.0: A Review. *Engineering*, v. 3 (5), p. 616-630.