



**REVISTA BRASILEIRA DE MECATRÔNICA**  
FACULDADE SENAI DE TECNOLOGIA MECATRÔNICA

**AVANÇO NA SIMULAÇÃO DE SISTEMAS VIRTUAIS: INTEGRAÇÃO DE GÊMEOS DIGITAIS,  
FMI E DPC**

**ADVANCEMENT IN VIRTUAL SYSTEMS SIMULATION: INTEGRATION OF DIGITAL TWINS,  
FMI, AND DPC**

**Nerivaldo Rodrigues da Silva<sup>1, i</sup>**  
**Thiago Tadeu Amici<sup>2, ii</sup>**  
**Daniel Camusso<sup>3, iii</sup>**  
**Ricardo Martinez Vicentini<sup>4, iv</sup>**

Data de submissão: (02/12/2023) Data de aprovação: (04/04/2024)

## RESUMO

Este estudo apresenta uma pesquisa que investiga o uso de gêmeos digitais em conjunto com as ferramentas do *Functional Mock-up Interface* (FMI) e do *Distributed Co-Simulation Protocol* (DPC) para o desenvolvimento de sistemas virtuais avançados em diversos setores industriais. Os gêmeos digitais são modelos virtuais que replicam o comportamento de sistemas físicos, permitindo a observação, previsão e otimização. O FMI e o DPC facilitam a troca de dados entre modelos dinâmicos e a integração de componentes de diferentes domínios, proporcionando uma abordagem eficiente e modular para o desenvolvimento de sistemas complexos. Os resultados obtidos demonstram que essa abordagem reduz os tempos de desenvolvimento, minimiza custos ociosos e acelera o tempo de lançamento no mercado, impulsionando a inovação e a eficiência na indústria. Em suma, a combinação de gêmeos digitais, FMI e DPC oferece um potencial significativo para avançar a simulação, otimização e desenvolvimento de sistemas virtuais de forma mais rápida, precisa e econômica.

**Palavras-chave:** gêmeo digital; FMI; DPC; co-simulação.

## ABSTRACT

---

<sup>1</sup> Engenheiro Mecânico, Pós-graduando em Indústria 4.0 na Faculdade SENAI de Tecnologia Mecatrônica. E-mail: nerivaldo\_silva@yahoo.com.br

<sup>2</sup> Mestre em Automação e Controle de Processos da Faculdade SENAI de Tecnologia Mecatrônica. E-mail: thiago.amici@sp.senai.br

<sup>3</sup> Mestrando e Especialista em Indústria 4.0 e Engenharia automobilística. Docente da Faculdade SENAI de Tecnologia Mecatrônica. e-mail: daniel.camusso@sp.senai.br

<sup>4</sup> Mestre em Engenharia Elétrica, Professor de Educação Superior da Faculdade SENAI de Tecnologia Mecatrônica. E-mail: ricardo.vicentini@sp.senai.br.

This study presents research that investigates the use of digital twins in conjunction with the tools of the Functional Mock-up Interface (FMI) and the Distributed Co-simulation Protocol (DPC) for the development of advanced virtual systems in various industrial sectors. Digital twins are virtual models that replicate the behavior of physical systems, enabling observation, prediction, and optimization. FMI and DPC facilitate the exchange of data between dynamic models and the integration of components from different domains, providing an efficient and modular approach to the development of complex systems. The results obtained demonstrate that this approach reduces development times, minimizes idle costs, and accelerates time-to-market, driving innovation and efficiency in the industry. In summary, the combination of digital twins, FMI, and DPC offers significant potential to advance the simulation, optimization, and development of virtual systems in a faster, more accurate, and cost-effective manner.

**Keywords:** digital twin; FMI; DPC; co-simulation.

## 1 INTRODUÇÃO

Um gêmeo digital é uma representação virtual de um objeto ou processo físico real. Embora o conceito tenha se originado anteriormente, a primeira definição prática de gêmeo digital surgiu da NASA em uma tentativa de melhorar a simulação de modelos físicos de espaçonaves (Glaessgen e Stargel, 2012). Os gêmeos digitais apareceram pela primeira vez no livro *Mirror Worlds* de David Gelernter, em 1991, e foram propostos como o modelo conceitual subjacente ao gerenciamento do ciclo de vida do produto em 2002 por Michael Grieves e Vickers na conferência da *Society of Manufacturing Engineers* em Troy no Michigan.

O conceito de gêmeo digital de Grieves e Vickers (2002) tem várias definições, sendo a frequentemente citada da NASA: "O Gêmeo Digital é uma simulação multiescalar, multiescolha e probabilística integrada de um veículo ou sistema construído que usa os melhores modelos físicos disponíveis, de sensores atualizados etc., para espelhar a vida de seu gêmeo correspondente." Comum a eles é que existe uma entidade digital que representa uma entidade física e a adaptação de ambos os objetos com base em uma troca de dados (Glaessgen e Stargel, 2012; Fuller et al., 2020a).

Para evitar equívocos sobre gêmeos digitais, eles são categorizados por Kritzinger et al. (2018b) em função do seu nível de integração:

- a) **Modelo Digital:** Uma cópia digital de uma entidade física existente ou planejada. Não há troca automatizada de dados entre a cópia digital e a entidade física. Os dados da cópia digital podem ser usados no processo de desenvolvimento da entidade física, mas uma alteração na cópia digital não tem efeito imediato na entidade física.
- b) **Sombra digital:** Uma sombra digital estende a cópia digital por meio de uma troca de dados unidirecional automatizada. A entidade física altera o estado da sombra digital, mas não de outra forma.
- c) **Gêmeo Digital:** O gêmeo digital tem nível total de integração, que é realizado pela troca automatizada de dados entre a entidade física e a cópia digital. Ambos os sistemas afetam um ao outro.

Essas categorias se complementam e podem ser interpretadas como etapas de desenvolvimento de um gêmeo digital. De fato, o desenvolvimento de um gêmeo digital não

consiste apenas na criação da entidade digital, mas também dos elementos envolventes para troca de dados e interfaces para serviços.

### 1.1 Problema de pesquisa

No século 20, a engenharia de sistemas orientada a requisitos enfatizava a decomposição de sistemas em subsistemas independentes, cada um projetado e atendido separadamente. Embora essa abordagem valorizasse a definição clara dos requisitos, a especificação precisa e a resistência às mudanças eram difíceis de alcançar, resultando em atrasos e imprevistos. Atualmente, a engenharia de sistemas utiliza modelos interativos e simulações para entender as condições de uso e aprimorar a fidelidade dos modelos durante o desenvolvimento, permitindo a combinação de modelos e sistemas físicos por meio do *Hardware in the Loop* (HiL). Cada disciplina, como engenharia mecânica, engenharia de software e engenharia de sistemas de controle, desenvolve seus próprios modelos para especificar as condições operacionais e interações entre sistemas (Dassault Systèmes, 2022a).

Os gêmeos digitais são uma evolução recente da modelagem digital, onde objetos e sistemas completos são criados pela coleta de dados do mundo real e pela aplicação desses dados ao modelo de Desenho Assistido por Computador (CAD – *Computer-Aided Design*). A constante atualização dos gêmeos virtuais com dados dos objetos reais, por meio da Internet das Coisas (IoT – *Internet of the Things*) e da Internet das Coisas Industrial (IIoT – *Industrial Internet of the Things*), traz uma representação digital precisa do objeto e do ambiente circundante, desbloqueando uma variedade de possibilidades para designers de produtos e fabricantes (Fuller et al., 2020b).

Embora os processos de produção sejam acionados por atuadores e robôs, e o manuseio de peças seja identificado pelos sensores, como podemos conectar esses sistemas físicos em sistemas virtuais de maneira eficiente e eficaz?

### 1.2 Objetivo

Descrever a base conceitual e as ferramentas para criação do *Digital Twin* e sua interface para troca de dados e co-simulação.

### 1.3 Justificativa

Os gêmeos digitais são ferramentas poderosas para projetar, simular e fabricar modelos de CAD, permitindo melhorias na fabricação por meio de modelos analíticos preditivos, análise de big data, inteligência artificial, entre outras tecnologias. Isso permite que engenheiros e tomadores de decisão otimizem as funcionalidades dos objetos reais e os mantenham operando com desempenho máximo, além de possibilitar a automação de processos e melhorias contínuas (Wiens, 2021).

Os ciclos de desenvolvimento de produtos precisam ficar cada vez mais curtos, e a agilidade e a flexibilidade devem ser aumentadas em todo o ecossistema de desenvolvimento e fabricação de produtos para acompanhar as crescentes demandas dos consumidores por produtos inovadores. As tecnologias digitais, incluindo os gêmeos virtuais, podem melhorar drasticamente a eficiência homem-máquina e levar a engenharia, o design, a fabricação, o controle de qualidade, a montagem, a cadeia de suprimentos e outros aspectos relacionados

ao processo de tomada de decisão para o próximo nível de eficiência. Assim, as empresas que implementarem efetivamente gêmeos digitais terão uma vantagem competitiva e devem adicioná-los aos seus planos de transformação digital (Rolle, 2020).

Além disso a grande maioria dos trabalhos acadêmicos encontrados na literatura trata-se da Sombra Digital ou do Modelo Digital, portanto, sem o intercâmbio de dados entre a entidade física e o gêmeo digital.

## 2 METODOLOGIA

Para elaborar este estudo, foi realizada uma pesquisa na plataforma 3DEXPERIENCE e na literatura científica sobre o estado da arte da construção e simulação de gêmeos digitais. Os conceitos fundamentais para compreensão e criação de um modelo foram organizados em um mapeamento conceitual, que pode servir como guia de estudos para iniciantes no assunto. Dessa forma, busca-se proporcionar uma visão abrangente e clara sobre a elaboração de um gêmeo digital, considerando suas diversas aplicações e potenciais benefícios. Além disso, espera-se contribuir para a disseminação de conhecimentos relacionados à Indústria 4.0 e à transformação digital, promovendo o desenvolvimento de soluções mais eficientes e sustentáveis.

## 3 PROJETO ADVANCED CO- SIMULATION OPEN SYSTEM ARCHITECTURE (ACOSAR)

A integração de Gêmeos Digitais, Functional Mock-up Interface (FMI) e Distributed Co-Simulation Protocol (DPC) no contexto do desenvolvimento de sistemas virtuais avançados, destacando o papel fundamental do projeto Advanced Co-Simulation Open System Architecture (ACOSAR) nesse ecossistema. O projeto ACOSAR tem sido crucial na definição de padrões e protocolos que permitem uma interoperabilidade eficiente entre diferentes ferramentas de simulação, incluindo FMI e DPC, facilitando assim a realização de co-simulação em um nível sem precedentes de complexidade e precisão.

Os Gêmeos Digitais, representações virtuais de sistemas físicos, dependem fortemente dessas interfaces e protocolos para simular com precisão o comportamento dinâmico, permitindo a análise, previsão e otimização dos sistemas que representam. Por sua vez, o FMI e o DPC são beneficiados pelos desenvolvimentos promovidos por ACOSAR, adquirindo capacidades ampliadas para a troca de dados e a integração de componentes de simulação em tempo real de diferentes domínios e especialidades.

*Advanced Co-Simulation Open System Architecture (ACOSAR)* é um projeto de pesquisa em Software intensivo em Sistemas e Serviços (SiSS), liderado pelo VIRTUAL VEHICLE em Graz, Áustria. O projeto tem como objetivo desenvolver um sistema consistente e contínuo de desenvolvimento e validação virtual, por meio de uma abordagem modular de co-simulação. O projeto visa fornecer uma *Advanced Co-simulation Interface (ACI)* para integração eficaz e eficiente do sistema em tempo real (RT – *Real Time*), bem como uma metodologia abrangente para integração contínua de sistemas RT durante as fases de verificação, teste e validação dentro dos ciclos de desenvolvimento. Parceiros de comitês de padronização relevantes estão ativamente envolvidos para criar em conjunto soluções e extensões para os padrões existentes. As inovações do projeto ACOSAR permitirão às Pequenas e Médias Empresas (PME) e fornecedores de diferentes domínios concorrerem com as grandes indústrias, resultando em mercados mais competitivos no longo prazo. O projeto revisou vários projetos

de pesquisa, artigos científicos e padrões da indústria em todos os campos relevantes, incluindo o padrão *Functional Mockup Interface* (FMI).

Para permitir a integração eficaz e eficiente do sistema RT, a ACOSAR fornecerá inovações em diferentes níveis. Em primeiro lugar, a ACOSAR centra-se na especificação de uma interface de sistema RT aberta não proprietária, a chamada *Advanced Co-simulation Interface* (ACI) para compartilhar informações relevantes para operação eficiente e segura de sistemas RT, por exemplo, bancadas de teste. Será definida uma arquitetura de comunicação, incluindo protocolo, independente dos sistemas de comunicação utilizados. Uma estrutura funcional para estratégias de acoplamento, transmissão de dados altamente eficiente e suporte ao processamento de dados semânticos complementarará isso (Krammer et al., 2016).

A figura 1 mostra os principais aspectos do sistema.

Figura 1- Sistema de comunicação e interface em tempo real.



Fonte: Krammer, et al. (2016).

## 4 MAPA CONCEITUAL E FERRAMENTAS UTILIZADAS NA CONSTRUÇÃO DO GÊMEO DIGITAL

### 4.1 Modelica

A modelagem e simulação de sistemas dinâmicos desempenham um papel fundamental na Engenharia, permitindo o projeto, análise, controle e otimização de sistemas. À medida que os projetos de simulação se tornam mais complexos, a metodologia de modelagem e as ferramentas de software se tornam essenciais para o sucesso. A modelagem orientada a objetos e a modelagem física são abordagens importantes nesse contexto.

O Modelica é uma linguagem orientada a objetos que permite a modelagem de sistemas físicos grandes e complexos, com múltiplos domínios, como mecatrônica automotiva, aeroespacial e robótica. A linguagem utiliza equações gerais para descrever os fenômenos físicos, permitindo que as ferramentas gerem automaticamente código eficiente. Isso reduz o esforço de modelagem e facilita a reutilização de componentes.

A importância da modelagem e simulação aumenta à medida que os engenheiros lidam com sistemas compostos por componentes de diferentes domínios. As ferramentas atuais muitas vezes não são eficientes para tratar de modelos multidomínio, enquanto o Modelica aborda essa lacuna, permitindo a modelagem de sistemas de acordo com a maneira como são concebidos e construídos na realidade (Modelica Association, 2019).

O Modelica é uma linguagem de modelagem declarativa, onde o usuário descreve as propriedades físicas e o comportamento dos componentes, deixando que as ferramentas de

simulação resolvam as equações usando algoritmos apropriados. Existem várias ferramentas de simulação disponíveis, como *Dynamic Modeling Laboratory* (Dymola), OpenModelica e JModelica, sendo amplamente utilizado em indústrias como automotiva, aeroespacial, energética e médica.

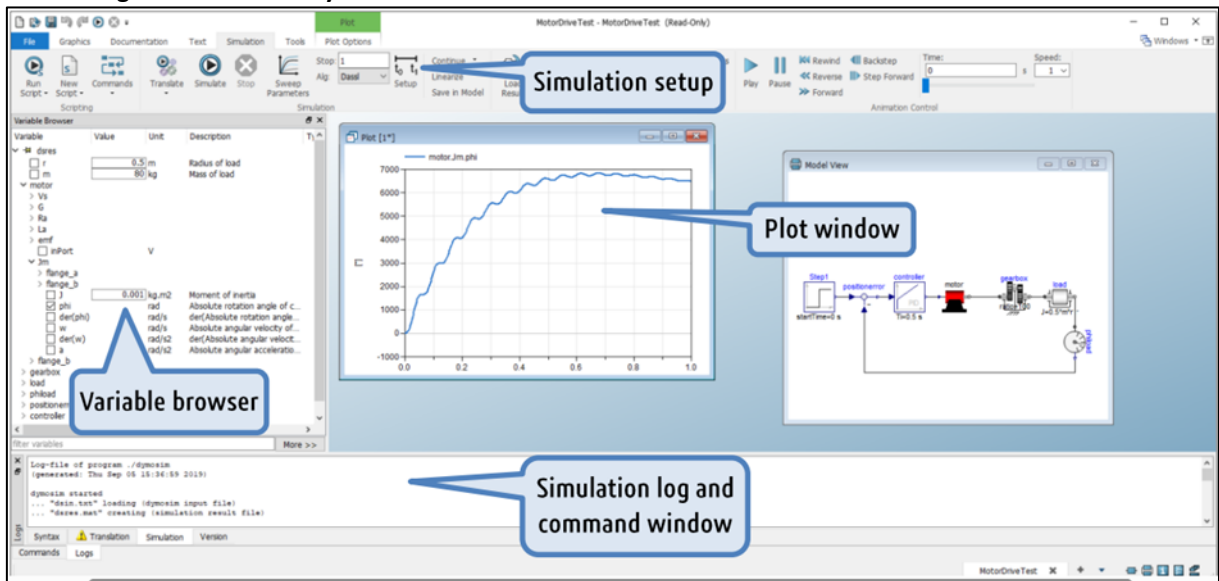
## 4.2 Dymola

O Dymola é uma ferramenta de modelagem e simulação física que utiliza a linguagem Modelica para definir modelos. Ele é amplamente utilizado em vários setores, como automotivo, aeroespacial e energia. O Dymola oferece recursos avançados, como composição hierárquica de modelos, bibliotecas reutilizáveis e suporte ao padrão FMI. Com uma abordagem baseada em equações e orientação a objetos, o Dymola simplifica a construção de modelos e acelera o tempo de desenvolvimento, resultando em maior reutilização entre projetos.

Uma das principais vantagens do Dymola é sua capacidade de lidar com modelos complexos em diversas áreas de engenharia. Ele permite a composição gráfica de modelos, possui bibliotecas abrangentes para diferentes domínios e oferece uma interface aberta para integração com outras linguagens de programação. Além disso, o Dymola suporta a simulação em tempo real em uma variedade de plataformas, proporcionando resultados mais precisos e relevantes.

Com o Dymola, os usuários têm acesso a um conjunto de ferramentas completo, desde a criação do modelo até a simulação e análise dos resultados. Através do uso da linguagem Modelica, eles podem criar bibliotecas personalizadas e estender as existentes, melhorando a reutilização e reduzindo os esforços de manutenção. No geral, o Dymola é uma ferramenta para o design de sistemas físicos complexos, fornecendo uma solução eficiente e robusta para a modelagem e simulação de sistemas físicos. A arquitetura geral do Dymola inclui um editor gráfico para a composição de modelos usando modelos Modelica armazenados em arquivos, um tradutor para equações Modelica gerando código C para simulação e a possibilidade de exportar o código usando o FMI para plataformas Matlab/Simulink e para o *hardware-in-the-loop* (Dassault Systèmes, 2022b). A figura 2 apresenta a tela do software: acima o ícone do setup da simulação (simulation setup), esquerda o navegador das variáveis do sistema (simulation browser), no centro a plotagem do resultado da simulação (plot window) e a direita o modelo gráfico do teste de um motor elétrico utilizando os componentes da biblioteca do Modelica, controlador, motor, redutor, massa de inércia e o retorno para controle do sistema.

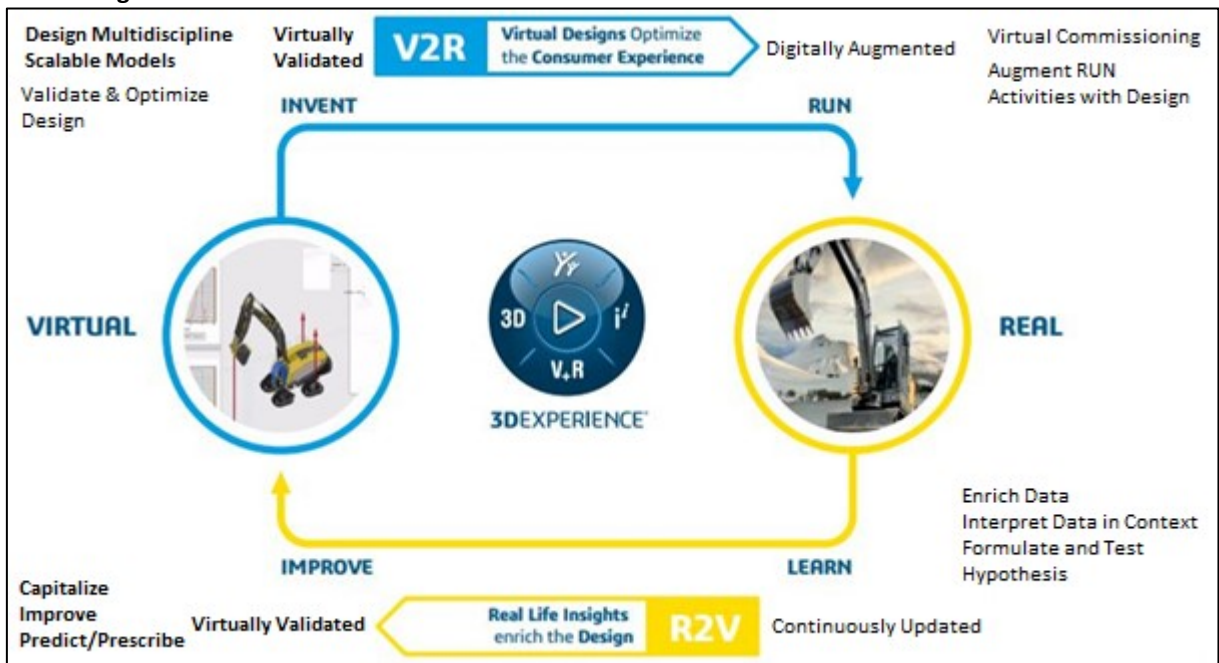
Figura 2- Software Dymola.



Fonte: Dassault Systèmes (2021b).

*Virtual Twin Experience* é um modelo virtual executável de um sistema físico que traz aprendizado e experiências tiradas dos processos do mundo “real” para atualizar o modelo de gêmeo digital. Alcançar essa capacidade de circuito fechado é a plena realização dos benefícios a serem obtidos com a convergência dos mundos virtual e real (Dassault Systèmes, 2021). A Figura 3 apresenta um modelo virtual/real elaborado com a plataforma 3DEXPERIENCE e seu ciclo de desenvolvimento, invenção, modelo virtual, comissionamento virtual, otimização e validação do produto.

Figura 3 – Modelo Real e Virtual



Fonte: Dassault Systèmes (2021b).

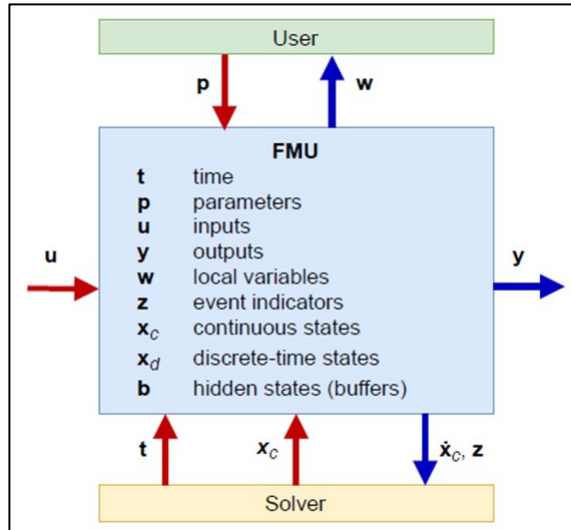
### 4.3 Funcional Mock-Up Interface (FMI)

O FMI é um padrão adotado pela indústria para a exportação e importação de modelos de simulação. As versões anteriores, FMI 1.0 e FMI 2.0, têm sido amplamente utilizadas por mais de 160 ferramentas de simulação. No entanto, para atender às necessidades de novos casos de uso, foi desenvolvida a versão FMI 3.0. Esta nova versão introduz recursos aprimorados, como a capacidade de exportar as Unidades de Controle Eletrônico virtual (vECUs – *virtual Electronic Control Unit*) como FMUs, terminais, relógios, tipos de variáveis adicionais e uma nova interface para programação agendada de execução.

O FMI 3.0 também fornece uma API chamada *Synchronous Clocks* para lidar com eventos de forma mais flexível. Essa API permite que as FMUs comuniquem informações detalhadas sobre o tempo e a causa dos eventos ao importador, garantindo um momento preciso para a ocorrência dos eventos. Além disso, essa versão do FMI é especialmente relevante para o campo de aprendizado de máquina e inteligência artificial, pois permite a interação entre modelos de IA e ferramentas estabelecidas de modelagem e simulação. O FMI 3.0 define três tipos de interface principais: Co-Simulação, Troca de Modelo e Execução Programada, cada um adequado para diferentes propósitos de simulação.

Na interface *Model Exchange*, um modelo de simulação é exposto como uma Equação Diferencial Ordinária (ODE - *Ordinary Differential Equation*) híbrida para um solucionador de um importador. O modelo é descrito por equações diferenciais, algébricas e discretas, além de eventos de tempo, estado e etapa. O importador é responsável por avançar o tempo, computar variáveis de estado, manipular eventos e realizar outras operações de simulação. A figura 4 ilustra o fluxo de dados para a Troca de Modelo no FMI 3.0.

Figura 4 - Fluxo para troca de dados entre os modelos FMU



Fonte: Junghanns, et al. (2021)

### 4.4 Distributed Co-simulation Protocol (DPC)

A modelagem e simulação desempenham um papel crucial no desenvolvimento de dispositivos técnicos e máquinas. No entanto, a integração de diferentes sistemas de tempo real e ambientes de simulação é um desafio que afeta setores como a indústria automotiva. De acordo com Krammer, Marko e Benedikt (2016), "atualmente, não existe um protocolo



padronizado para troca de dados e controle de co-simulação", o que torna essa questão ainda mais complexa.

Nesse contexto, o Protocolo de Co-Simulação Distribuída (DCP - *Distributed Co-Simulation Protocol*) surge como uma solução, enfatizando o acoplamento de sistemas em tempo real e não em tempo real. Sua especificação promove a interoperabilidade, integração, compatibilidade, comunicação e economia, facilitando a implantação de abordagens de co-simulação em diferentes ambientes e empresas.

O DCP difere do FMI existente, sendo projetado para suportar a co-simulação entre sistemas distribuídos em tempo real e não em tempo real. Isso permite a integração de sistemas mistos, como configurações de hardware e modelos digitais. O DCP é compatível com uma variedade de sistemas, desde placas microcontroladoras até computadores pessoais, ou sistemas operacionais de tempo real, e suporta diversos protocolos de transporte. Além dos benefícios técnicos, o DCP contribui para a redução do tempo de desenvolvimento, diminuição dos custos computacionais e aceleração do tempo de lançamento no mercado, (Krammer et al., 2018).

A especificação aberta do DCP promove uma comunidade ativa que busca disseminar o padrão em diferentes domínios de aplicação, criando oportunidades de negócios e incentivando a colaboração entre empresas. Com a adoção do DCP, espera-se avanços significativos na integração de sistemas de tempo real e na facilitação da co-simulação, o que impulsionará o desenvolvimento de soluções avançadas para a eletrificação, veículos automatizados e conectados na indústria automotiva, bem como em outros setores que dependem de simulações complexas.

#### **4.4.1 Descrição da Arquitetura**

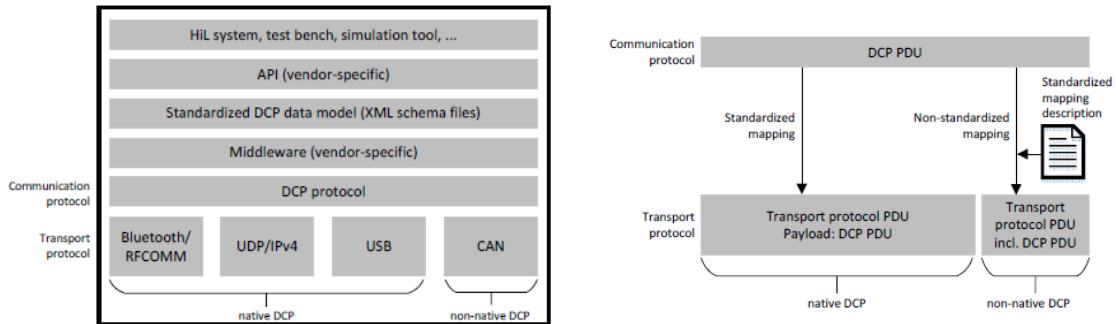
A arquitetura do protocolo DCP é composta por entidades, incluindo mestres e escravos. O papel do mestre é orquestrar e configurar os escravos para atender a um cenário específico de co-simulação. Por sua vez, cada escravo representa um subsistema dentro do cenário de co-simulação, podendo ser um sistema HiL, uma bancada de testes, uma ferramenta de simulação ou outro tipo de sistema. A descrição de cada escravo é fornecida por um arquivo XML chamado de descrição do escravo DCP, que contém informações sobre suas entradas, parâmetros, saídas e suas capacidades, como protocolos de transporte suportados e recursos DCP disponíveis. Para a troca de informações entre as entidades, são utilizadas as Unidades de Dados de Protocolo (PDUs – *Protocol Data Units*).

Uma implementação típica do DCP envolve o uso de uma API para conectar o subsistema ao modelo de dados DCP, a partir do qual as PDUs são construídas e enviadas para o mestre ou outros escravos. Dependendo do protocolo de transporte, essas PDUs podem ser mapeadas diretamente na carga útil do protocolo ou por meio de uma descrição de mapeamento padronizada. É importante ressaltar que o protocolo DCP define apenas o comportamento observável externamente pelos escravos e como as informações relacionadas ao DCP são incorporadas ao protocolo de transporte, sem especificar qualquer arquitetura de software dentro de um mestre ou escravo.

A Figura 5 apresenta uma visão geral de uma implementação típica do DCP. Uma API é usada para conectar o subsistema ao modelo de dados DCP. A partir desse modelo de dados, as PDUs são construídas. Eles são enviados para o mestre ou outros escravos. Para esta tarefa, um middleware adicional pode ser usado.

Dependendo do protocolo de transporte, essas PDUs são mapeadas diretamente na carga útil do protocolo de transporte ou uma descrição de mapeamento padronizada é usada. Isso também é mostrado na Figura 5. Observe que isso descreve uma implementação típica. O protocolo DCP apenas define o comportamento que é observável de fora dos escravos e como as informações relacionadas ao DCP aparecem no protocolo de transporte. O protocolo DCP não especifica nenhum tipo de arquitetura de software dentro de um mestre ou escravo.

**Figura 5 - Arquitetura DPC Mestre/ Escravo e Mapa do DPC**



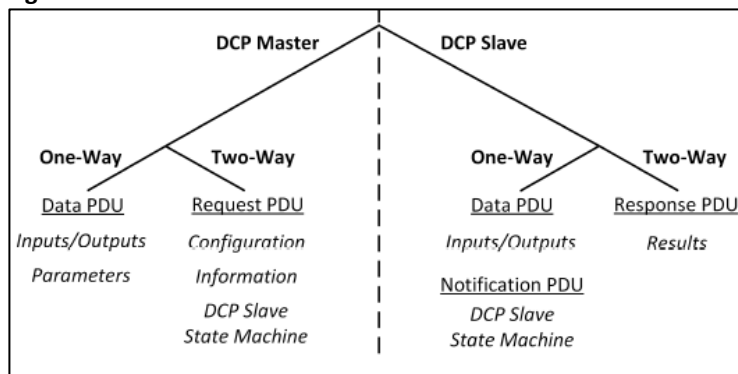
Fonte: Krammer, et al. (2018)

#### 4.4.2 Protocolo de comunicação

Em sua essência, o DCP é operado por uma máquina de estado discreto. O principal objetivo do projeto dessa máquina de estado é garantir a operação segura e confiável de sistemas em tempo real e não em tempo real. O DCP permite que vários escravos DCP operem juntos em um ambiente de rede para executar um cenário de co-simulação.

O DCP introduz o conceito de PDUs, que são trocados entre o escravo DCP e o mestre DCP em um cenário de co-simulação. Uma vez que o DCP não cobre apenas a troca de dados de simulação (entradas/saídas e parâmetros), mas também a configuração (a configuração de entradas/saídas) e controle (por exemplo, comandos de partida e parada) do cenário de co-simulação, é necessária a introdução de diferentes famílias de PDU. A Figura 6 mostra a taxonomia das famílias de PDU, que são suportadas pelo protocolo de comunicação DCP.

**Figura 6 - Taxonomia Família DCP PDU**



Fonte: Krammer, et al. (2018)

## 5 CASOS DE SOLUÇÕES OBITIDAS COM O GÊMEO DIGITAL

Segundo Dassault Systèmes (2021) a realização de uma experiência Virtual Twin, tornará o sistema de produção flexível e proativo, e mudará o jogo, além de ser um catalisador para elevar as operações industriais de todos os tamanhos envolvendo quatro componentes distintos: colaboração, modelagem, otimização e desempenho. A colaboração consiste na reunião das diferentes partes interessadas na organização de fabricação para resolver as necessidades e metas do projeto. Diversos departamentos, como engenharia de projeto, engenharia de fabricação, garantia de qualidade, vendas, aquisição e gerenciamento, podem contribuir para a criação de um sistema unificado.

A modelagem é o processo inicial da digitalização, envolvendo a criação de representações precisas de máquinas, processos e fluxos de trabalho. A precisão é crucial e deve ser mantida ao longo do projeto. Mudanças emergenciais ou *ad hoc* nos equipamentos, ou processos, devem ser refletidas nos modelos, facilitando a realização de testes e soluções virtuais antes da implementação real.

A otimização é a fase em que as alterações são testadas virtualmente para reduzir gargalos de produção e melhorar a eficiência. É nessa etapa que as mudanças de planejamento se transformam em experiências "e se", com iterações em tempo real, abrangendo desde ciclos de equipamentos até tempos de trabalho e estudo de movimento.

O desempenho é o objetivo final do gêmeo digital, representando a implementação real dos novos processos e procedimentos desenvolvidos na fábrica virtual. Com uma experiência Virtual Twin bem-sucedida, as mudanças de produção são rápidas, sem problemas e o tempo de inatividade é minimizado. Sensores equipados nos equipamentos fornecem dados em tempo real ao gêmeo virtual para validar os resultados e estabelecer uma nova linha de base para melhorias futuras. A seguir são apresentados dois casos de uso dessa tecnologia:

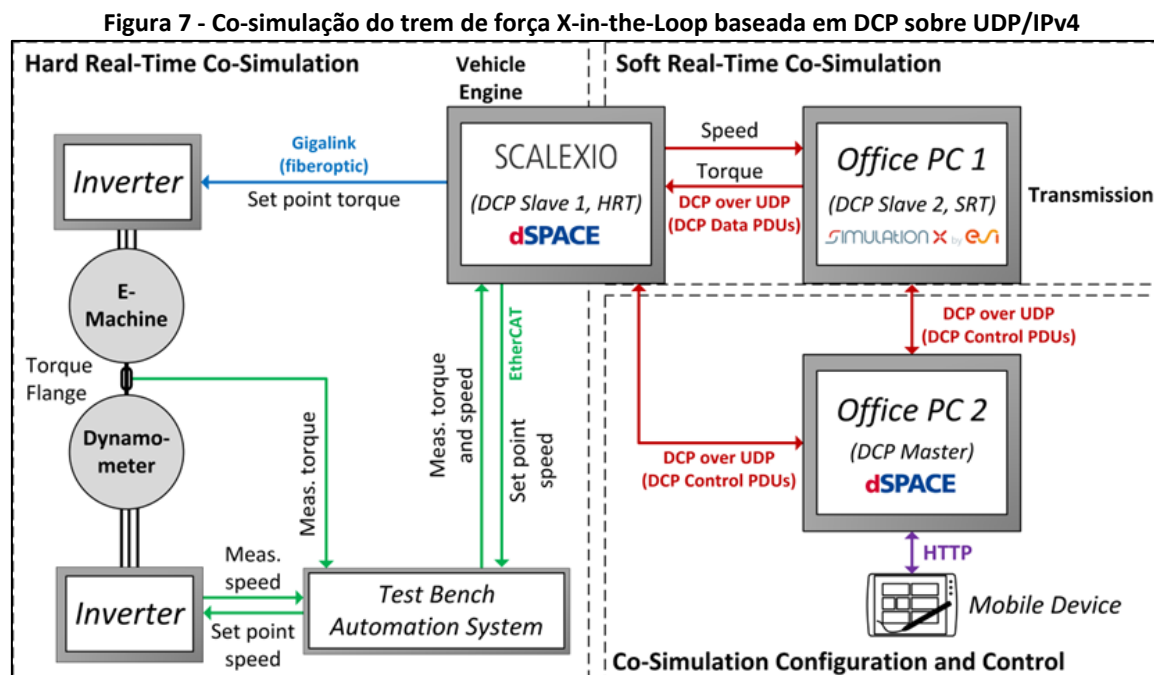
### 5.1 Simulação virtual do processo de numa célula de trabalho robótica antes da implantação física dos equipamentos.

Na indústria, a empresa *CenterLine (Windsor) Limited*, especializada em tecnologia e automação industrial, enfrentou o desafio de otimizar seus projetos de células de trabalho robótica por meio de simulação digital antes da implantação física dos equipamentos no chão de fábrica. Para solucionar esse desafio, a empresa decidiu implementar o software DELMIA na plataforma 3DEXPERIENCE da Dassault Systèmes. Com a utilização do DELMIA, a CenterLine conseguiu simular virtualmente produtos, processos e operações de fábrica, permitindo a otimização dos movimentos do robô, o layout da fábrica, o fluxo de material e a ergonomia. Os resultados obtidos foram significativos: desde a implementação do DELMIA em cada célula de trabalho robótica, a empresa conseguiu reduzir os problemas relacionados a ferramentas e retrabalho em até 90%, além de reduzir o tempo de programação no chão de fábrica em até 75%. Esses resultados permitiram que a CenterLine entregasse soluções dentro do prazo e do orçamento, ao mesmo tempo em que aprimorava a experiência dos clientes e mantinha a competitividade empresarial. Marc Levesque, Diretor de Marketing Corporativo da CenterLine (Windsor) Limited, enfatizou a importância de fornecer sistemas que tornem os clientes competitivos e mantenham a produção em andamento (Dassault Systèmes, 2021).

## 5.2 Co-simulação e Validação *X-In-The-Loop* de um trem de força com sistema híbrido, motor a combustão e motor elétrico.

Neste caso de uso, o foco está no projeto de um sistema baseado em *X-in-the-Loop* de co-simulação para um trem de força híbrido. Essa abordagem é descrita nos estudos de Xia et al. (2017), Andert et al. (2016) e Klein et al. (2017). O objetivo é permitir uma transição suave entre componentes virtuais e reais durante o processo de desenvolvimento. A co-simulação do trem de força fornece um ambiente virtual que suporta o desenvolvimento de funções, testes de componentes e calibração em diferentes fases do processo de desenvolvimento baseado em modelo. Além disso, esse caso de uso oferece a possibilidade de proteger a propriedade intelectual.

O sistema geral foi implementado com base em interfaces padronizadas, seguindo as especificações do FMI e DCP. Ele inclui modelos de motor de combustão, transmissão de dupla embreagem, sistema elétrico, dinâmica do veículo, ambiente, motorista e as unidades de controle eletrônicas suaves associadas, denominadas *soft ECUs* (*Electronic Control Units*). O motor elétrico é integrado fisicamente à bancada de testes. A configuração desse caso de uso é ilustrada na Figura 7.



O inversor fornece o torque desejado para o motor elétrico, enquanto a velocidade de rotação é controlada pelo sistema de automação da bancada de testes utilizando o dinamômetro. O torque medido do motor elétrico é retroalimentado para os modelos de simulação, que são executados em duas plataformas de *hardware* diferentes, acopladas por meio do DCP: um simulador em tempo real denominado dSPACE SCALEXIO (DCP Slave 1) e um *Personal Computer* (PC) de escritório (Office PC 1, DCP Slave 2) com o SimulationX rodando no modo de operação soft real-time.

A interface e a comunicação em tempo real entre o dSPACE SCALEXIO e o SimulationX (por meio de DCP *Data* PDUs) foram implementadas de acordo com a especificação do DCP,

o que reduz consideravelmente o esforço de comissionamento. A configuração e o controle do cenário de co-simulação são realizados por um dispositivo móvel, como um tablet, que se conecta a outro PC de escritório (Office PC 2) por meio do protocolo HTTP. Esse segundo PC do escritório atua como um servidor *back-end* para dispositivos móveis e é responsável pela tradução das mensagens do protocolo HTTP para as PDUs de controle do DCP e vice-versa. Dessa forma, é possível configurar e iniciar o cenário de co-simulação com o simples toque de um botão no dispositivo móvel. Esse caso de uso é liderado pela dSPACE GmbH, RWTH Aachen University e ESI ITI GmbH.

Os modelos utilizados nesse caso de uso foram desenvolvidos com ferramentas de simulação de última geração, como GT-POWER, SimulationX, dSPACE ASM e MATLAB/Simulink. Com essa configuração, a integração do motor elétrico como parte do trem de força híbrido pode ser testada em circuito fechado com um veículo virtual em diversos cenários. Em uma fase inicial de desenvolvimento, a configuração pode ser feita em um cenário virtual completo, onde um modelo do motor elétrico é utilizado. Esse modelo, juntamente com o modelo do motor de combustão e o ASM, é simulado na plataforma de simulação baseada em PC dSPACE VEOS. Dessa forma, é possível estabelecer o acoplamento entre o VEOS e o SimulationX usando a interface DCP, sem a necessidade de acoplar a bancada de testes. Em uma fase posterior de desenvolvimento, essa mesma interface também pode ser utilizada para outros propósitos, como o acoplamento bidirecional com bancadas de teste (Andert et al., 2016).

## 6 CONCLUSÃO

Nesta pesquisa, exploramos o impacto dos gêmeos digitais, o FMI e o DPC na simulação e integração de sistemas. Concluímos que os gêmeos digitais são essenciais para o desenvolvimento de dispositivos técnicos e máquinas, permitindo testes virtuais e melhorias contínuas.

O FMI facilita a integração de modelos e ferramentas de simulação, acelerando o desenvolvimento de modelos digitais.

O DPC desempenha um papel crucial na comunicação entre sistemas em tempo real e não em tempo real.

Em conjunto, essas tecnologias oferecem abordagens abrangentes e eficientes para o desenvolvimento e aprimoramento de sistemas industriais. Elas necessitam ser mais pesquisadas e debatidas para que possamos ter mais cases interessantes, principalmente no Brasil.

A pesquisa demonstra que a incorporação do ACOSAR na implementação das ferramentas FMI e DPC proporciona um avanço significativo na modularidade, escalabilidade e eficácia da co-simulação. Essa abordagem integrada não apenas otimiza os tempos de desenvolvimento e minimiza custos ociosos, mas também acelera o lançamento de produtos no mercado, impulsionando inovação e eficiência em vários setores industriais. Em resumo, o ACOSAR emerge como uma peça-chave na promoção do desenvolvimento e da aplicação de sistemas virtuais avançados, permitindo simulações mais rápidas, precisas e econômicas.

## REFERÊNCIAS

ANDERT, J.; BARCHANSKI, A.; HEINRICH, R. Distributed co-simulation of a hybrid-electric powertrain using FMI and DCP. **SAE International Journal of Passenger Cars—Electronic and Electrical Systems**, v. 9, n. 2, p. 568-577, 2016.

DASSAULT SYSTÈMES. Beyond Digital Twin: Small and medium-sized manufacturers enjoy big-enterprise benefits and ROI with Virtual Twin Experience on the cloud. 2021. Disponível em: <https://discover.3ds.com/sites/default/files/2021-01/Cloud-digital-twin-ebook-en.pdf>. Acesso em: 17 maio 2023.

DASSAULT SYSTÈMES. Model based systems engineering. 2022a. Disponível em: <https://ifwe.3ds.com/solutions/model-based-systems-engineering>. Acesso em: 17 maio 2022.

DASSAULT SYSTÈMES. What is Dymola - extract from the Dymola user manual, Volume 1. 2022b. Disponível em: <https://www.3ds.com/fileadmin/PRODUCTS/CATIA/DYMOLA/PDF/What-is-Dymola>. Acesso em: 14 dez. 2022.

FULLER, Aidan et al. Digital twin: enabling technologies, challenges and open research. **IEEE Access**, v. 8, p. 108952-108971, 2020a.

FULLER, J. D. et al. Cyber-physical digital twin model for advanced manufacturing. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 56, p. 238-250, 2020b.

GLAESSGEN, E. H.; STARGEL, D. S. The digital twin paradigm for future NASA and U.S. Air force vehicles. *In*: STRUCTURES, STRUCTURAL DYNAMICS AND MATERIALS CONFERENCE, 53., 2012.

GRIEVES, M.; VICKERS, J. Digital Twin: mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems. *In*: HAWAII INTERNATIONAL CONFERENCE ON SYSTEM SCIENCES, 35. **Proceedings ...** 2002.

JUNGHANNS, A. et al. The Functional Mock-up Interface 3.0 - new features enabling new applications. *In*: Sjölund, M. et al. (Eds.). PROCEEDINGS OF THE LINKÖPING ELECTRONIC CONFERENCE, 14., v. 181, pp. 17-26., **Anais...** Linköping, Sweden, September 20-24, 2021.

KRAMMER, A. et al. The Distributed Co-simulation protocol for the integration of real-time systems and simulation environments. *In*: COMPUTER SIMULATION CONFERENCE, 50., **Anais...** Society for Computer Simulation International, San Diego, CA, USA, Article 1, p. 1–14, 2018. Disponível em: <https://www.modelica.org/documents/ModelingAndSimulationInEngineeringUsingModelica.pdf>. Acesso em: 29 jan. 2023.

KRAMMER, M.; MARKO, N. C.; BENEDIKT, M. Interfacing Real-Time Systems for Advanced Co-Simulation - The ACOSAR Approach. **Paper presented at STAF 2016** (Software

Technologies Applications and Foundations), Wien, Austria, 8 p, 2016. Disponível em: <https://graz.elsevierpure.com/en/publications/interfacing-real-time-systems-for-advanced-co-simulation-the-acos>. Acesso em: 30 mai. 2023.

KLEIN, S. *et. al.* Engine in the loop: closed loop test bench control with real-time simulation. **SAE International Journal of Commercial Vehicles**, v. 10, n. 1, pp. 95–105. 2017. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/313846737\\_Engine\\_in\\_the\\_Loop\\_Closed\\_Loop\\_Test\\_Bench\\_Control\\_with\\_Real-Time\\_Simulation](https://www.researchgate.net/publication/313846737_Engine_in_the_Loop_Closed_Loop_Test_Bench_Control_with_Real-Time_Simulation) . Acesso em: 30 maio 2023.

KRITZINGER, W.; BARATA, J.; SNODGRASS, S. Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication. **Procedia Manufacturing**, v. 21, p. 628-635, 2018a.

KRITZINGER, W.; KARNER, M.; TRAAR, G. **Digital Twin in manufacturing**: A categorical literature review and classification. IFAC PapersOnLine, v. 15, n. 11, p. 1016-1022, 2018b.

MODELICA ASSOCIATION. The functional mock-up interface 3.0 new features enabling new applications. Modeling and Simulation in Engineering Using Modelica. [S.l.]: Modelica Association, 2019.

ROLLE, R.; MARTUCCI, V.; GODOY, E. Architecture for Digital Twin implementation focusing on Industry 4.0. **IEEE Latin America Transactions**, v. 18, n. 05, p. 889-898, 2020. DOI: 10.1109/TLA.2020.9082917. 30 mai. 2023

WIENS, M. et al. The Potential of FMI for the Development of Digital Twins for Large Modular Multi-Domain Systems. *In*: PROCEEDINGS INTERNATIONAL MODELICA CONFERENCE, 14., September 20-24, 2021, Linköping, Sweden. **Anais...** DOI: 10.3384/ecp21181235. 30 mai. 2023.

XIA, F. *et. al.* Crank angle resolved real-time engine modeling for hil based component testing. *In*: SAE CHINA CONGRESS & EXHIBITION SHANGHAI, 19., Shanghai, 24 Oct 2017. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/320830724\\_Crank\\_Angle\\_Resolved\\_Real-Time\\_Engine\\_Modeling\\_for\\_HiL\\_Based\\_Component\\_Testing](https://www.researchgate.net/publication/320830724_Crank_Angle_Resolved_Real-Time_Engine_Modeling_for_HiL_Based_Component_Testing) . Acesso em: 30 maio 2023.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador, a todos os professores e colaboradores do SENAI que direta ou indiretamente contribuíram para o meu aprendizado. A minha esposa que me incentivou e entendeu a minha ausência nos sábados de aula.

## Sobre os autores:

---

### <sup>i</sup> Nerivaldo Rodrigues da Silva

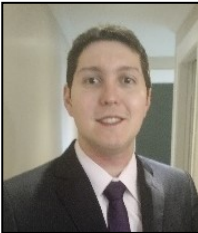


Doutor em Engenharia Mecânica pela Universidade Estadual de Campinas (2018). Mestre em Engenharia Mecânica pela Universidade Estadual de Campinas (2006), graduado em Engenharia Industrial pela Universidade Santa Cecília (1986). Especializações: Engenharia de Segurança do Trabalho, Projeto, Manufatura e Análise de Engenharia CAD, CAE e CAM e Indústria 4.0. Professor do ensino superior da Universidade Santa Cecília. Tem experiência na área de Engenharia Mecânica, Automobilística, Motores Propulsores Marítimos, Equipamentos para Petróleo e Projeto e Simulação Cinemática de equipamentos e testes de performance.

Endereço para acessar este CV: <http://lattes.cnpq.br/6034738643387507>

ORCID :<https://orcid.org/0000-0001-8784-7586>

### <sup>ii</sup> Thiago Tadeu Amici



Ministra aulas na pós-graduação de Indústria 4.0 nas modalidades presencial e EAD, no MBA de Gestão de Projetos aplicados a inovação em Indústria 4.0 e nas graduações em Engenharia de Controle e Automação, em Tecnologia em Mecatrônica e Tecnologia em Análise e Desenvolvimento de Sistemas na Faculdade SENAI de Tecnologia Mecatrônica. Assessora também o Instituto SENAI de Tecnologia Metalmeccânica em projetos industriais com foco na Indústria 4.0, onde desenvolveu inúmeros projetos como integrador de relevância nacional e internacional. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, Automação Industrial, Mecatrônica, Robótica e Indústria 4.0. Experiência internacional na aprovação de linha de produção (Cavemil) em Milão na Itália e sua instalação no Brasil. ORCID <https://orcid.org/0009-0002-1800-4854> CV Lattes: <http://lattes.cnpq.br/9165856219131658>



**iii Daniel Camusso**

Mestrando Profissional pela Universidade de Taubaté - UNITAU Pós-Graduado em Indústria 4.0 pela Faculdade SENAI de Tecnologia Mecatrônica. Pós-Graduado em Engenharia Automobilística pela Faculdade de Engenharia Industrial - FEI (2000). Aperfeiçoamento em CAD/CAM/CAE pela Dassault Systèmes em Paris - França. Graduado em Engenharia Mecânica Plena pela FEI (1996). Atualmente é docente na Faculdade SENAI de Tecnologia Mecatrônica. Possui experiência como engenheiro na área de desenvolvimento de novos projetos para a indústria automobilística, utilizando o software CATIA e NX. CV Lattes: <http://lattes.cnpq.br/7303249573994245>  
ORCID <https://orcid.org/0000-0001-7827-9564>

**iv Riardo Martinez Vicentini**

Mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do ABC - UFABC (2018), pós-graduado lato sensu em Automação Industrial pela Faculdade SENAI de Tecnologia Mecatrônica (2016) e Tecnólogo em Automação Industrial pela Faculdade de Tecnologia de São Vicente (2013). Atualmente é Professor de Educação Superior da Faculdade SENAI de Tecnologia Mecatrônica e professor da FATEF- Faculdade de Tecnologia de São Vicente, lecionando em cursos de tecnologia, engenharia e de pós-graduação lato sensu. É membro da Sociedade Brasileira de Automática (SBA). ORCID <https://orcid.org/0000-0001-6974-0873>