
Desenvolvimento de uma célula de manufatura aditiva robotizada baseada no processo deposição de metal à laser usando arame de soldagem

Development of a robotic additive manufacturing cell based on the laser metal deposition process using welding wire

Alberto José Alvares

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6745-1437>

Universidade de Brasília, Brasil

E-mail: alvares@unb.br

Igor Lacroix

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2526-3136>

Universidade de Brasília, Brasil

E-mail: igorlacroixarquitectura@gmail.com

Marco Aurélio de Lima Maron

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6628-8858>

Universidade de Brasília, Brasil

E-mail: marcoadlmaron@gmail.com

Brayan Stiven Figueroa

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1807-6498>

Universidade de Brasília, Brasil

E-mail: brayan.figueroa@unipamplona.edu.co

RESUMO

Este trabalho apresenta a implementação de um Gêmeo Digital para uma célula de fabricação aditiva robotizada que utiliza o processo de Deposição de Metal a Laser com Arame (LMD-Wire). O sistema é composto por um cabeçote LMD-Wire da Meltio3D e um robô Kuka KR 70 R2100. Isso é especialmente relevante em tecnologias emergentes, como a fabricação LMD, que utiliza um laser de diodo para fundir seletivamente uma camada de material metálico alimentado por arame ou pó. Para desenvolver o Gêmeo Digital, é utilizada a ISO 23247 como referência e o ambiente CAD Rhinoceros-Grasshopper em conjunto com a plataforma de simulação Kuka.Sim, com o objetivo de criar uma plataforma CAD/CAPP/CAM para a célula robotizada.

Palavras-chave: Deposição de metal à laser; Gêmeo digital; Manufatura aditiva; ISO 23247.

ABSTRACT

This paper presents the implementation of a Digital Twin for a robotic additive manufacturing cell using the Laser Metal Deposition with Wire (LMD-Wire) process. The system consists of an LMD-Wire head from Meltio3D and a Kuka KR 70 R2100 robot. This is particularly relevant in emerging technologies like LMD manufacturing, which uses a diode laser to selectively melt a layer of metallic material fed by wire or powder. To develop the Digital Twin, ISO 23247 is used as a reference, along with the Rhinoceros-Grasshopper CAD environment, in conjunction with the Kuka.Sim simulation platform, with the goal of creating a CAD/CAPP/CAM platform for the robotic cell.

Keywords: Laser metal deposition; Digital twin; Additive manufacturing; Robotics; ISO 23247.

INTRODUÇÃO

Um dos principais objetivos da Indústria 4.0 é obter produtos com maior eficiência e precisão por meio da digitalização e uso de máquinas, impulsionada por avanços tecnológicos, como a manufatura aditiva (JAN *et al.*, 2023). A deposição de metal à laser (LMD - *Laser Metal Deposition*) é um dos processos da Manufatura Aditiva (AM - *Additive Manufacture*) que consiste em gerar trajetórias de deposição de metal usando arame ou pó a partir de um modelo CAD, com foco, principalmente, na aplicação aeroespacial (GARMENDIA *et al.*, 2019; GU; LI, 2019).

A integração de processos de manufatura aditiva e robótica levou à criação de células robóticas de manufatura aditiva metálica com LMD que prometem benefícios em flexibilidade e economia de produção (BREMER *et al.*, 2019). O Gêmeo Digital de uma célula de manufatura aditiva metálica com LMD-*Wire* (LMD-Arame) é uma réplica virtual que simula e modela o processo de deposição a laser de metal usando um robô que manipula e alimenta o material de arame para simulação de design, otimização e monitoramento em tempo real, melhorando significativamente a qualidade, eficiência e manutenção da manufatura aditiva, tornando-a um meio eficaz para o desenvolvimento integrado de design e manufatura (FENG *et al.*, 2022).

A indústria e o mundo moderno demandam a produção de peças de metal de qualidade, personalizadas, com custos e tempos de produção reduzidos, vida útil mais longa e prototipagem rápida, onde o monitoramento em tempo real dos processos na fabricação dessas peças se tornou possível. Para atender às demandas exigidas pelas indústrias aeroespacial, de defesa, automotiva e biomédica, a manufatura aditiva se concentra na produção de componentes metálicos de geometrias complexas, incluindo metais, ligas e compostos metálicos, tendo a deposição de metal à laser (LMD) como um dos processos mais versáteis no universo da manufatura aditiva (YAN *et al.*, 2020).

O uso do LMD nos processos de fabricação de peças de metal às vezes apresenta erros no componente recém-fabricado devido ao aquecimento e solidificação rápidos, o que pode causar desvios de forma e fissuras (BIEGLER *et al.*, 2018). A fabricação de peças de metal planas e não planas requer um alto custo, razão pela qual os erros presentes na fabricação dessas peças levam a custos elevados e aumento do tempo de produção, uma vez que exigem análises corretivas em casos possíveis, sem a capacidade de usar análise preditiva, pois os métodos tradicionais não têm acesso a dados de monitoramento em tempo real.

A ISO 23247 fornece a arquitetura, *framework*, de fabricação para gêmeos digitais usando sistemas de automação e integração. Os gêmeos digitais têm o potencial de serem importantes na realização da manufatura inteligente; portanto, a ISO 23247 propõe uma estrutura que pode possibilitar implementações dependentes de contexto e promover a composição de componentes e reutilização de gêmeos digitais (SHAO; HELU, 2020; LIU et al., 2022).

Este artigo apresenta a arquitetura computacional e implementação de um Gêmeo Digital (DT - *Digital Twin*) para uma célula de manufatura aditiva robótica que utiliza o processo de Deposição de Metal à Laser com Arame (LMD-*Wire*).

O artigo inicia com a apresentação da revisão relacionada aos trabalhos investigativos mais recentes sobre manufatura aditiva de metal por LMD-*Wire* focada em gêmeos digitais (DT) e integrada em células de manufatura aditiva metálica robótica no contexto da Indústria 4.0. Em seguida, descreve o desenvolvimento *do DT* usando a norma ISO 23247 como referência, que fornece a arquitetura de Gêmeos Digitais para manufatura usando sistemas de automação e integração, onde o ambiente CAD Rhinoceros-Grasshopper é integrado à plataforma de simulação Kuka.Sim, apresentando o desenvolvimento de uma plataforma CAD/CAPP/CAM (Projeto Assistido por Computador, Planejamento de Processo Assistido por Computador, Fabricação Assistida por Computador) que gera o código Kuka KRL (Linguagem de Robô Kuka) no ambiente Rhinoceros-Grasshopper e a simulação do programa no ambiente Kuka.Sim. O artigo termina com a apresentação do DT proposto, mostrando a conexão do ambiente digital com a configuração física (robô Kuka e ferramenta LMD da Meltio) em perfeita harmonia e refletindo o mundo físico digitalizado em tempo real.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE MANUFATURA ADITIVA BASEADA EM ROBÔS

De acordo com LETTORI *et al.* (2022), a Manufatura Aditiva Baseada em Robôs (RBAM) está surgindo como uma solução promissora para aumentar a flexibilidade na manufatura, usando robôs nos processos de manufatura aditiva. A orientação da peça, a deposição multiaxial e as estratégias de fatiamento e preenchimento devem ser cuidadosamente avaliadas para obter resultados satisfatórios e evitar falhas na impressão. Embora alguns recursos avançados estejam disponíveis em *software* comercial de

fatiamento, como fatiamento adaptativo e estratégias de trajetória avançadas, o procedimento pode se tornar restritivo devido às opções limitadas. Várias abordagens e algoritmos foram propostos para cada fase, e sua combinação deve ser precisa para alcançar os melhores resultados. Este artigo revisa os trabalhos recentes que abordam os principais métodos para representação de geometrias e o subsequente processamento de geometria para RBAM.

PIRES *et al.* (2022) apresentam uma revisão do papel da robótica em várias tecnologias de AM para destacar sua importância, seguida pela introdução de um sistema inteligente e inovador para a tecnologia de deposição de energia direcionada (DED). Este artigo tem como objetivo identificar as características essenciais de uma plataforma DED inteligente capaz de abordar os aspectos científicos e operacionais das aplicações avançadas de AM. Além disso, apresenta e discute um novo sistema de AM robótico projetado para processar uma variedade de metais e ligas, incluindo alumínio, aços de alta resistência, aços inoxidáveis, titânio, magnésio, superligas de níquel e outras ligas metálicas para diversas aplicações.

CUEVAS e PUGLIESE (2020) explicam como transformar um projeto de uma peça em uma série de curvas e trajetórias para que uma impressora 3D as utilize; por meio da programação em código G diretamente do Grasshopper, sem o uso de *scripts* ou *plugins*. O livro se concentra principalmente na impressão 3D de argila, mas a mesma lógica pode ser aplicada à impressão 3D de filamento termoplástico (FDM).

COMPARAÇÃO SISTEMAS CAD/CAPP/CAM PARA MANUFATURA ADITIVA ROBÓTICA COM DEPOSIÇÃO DE METAL À LASER COM ARAME (LMD-Wire)

As estratégias de deposição de material usando Robótica LMD-Wire são classificadas com base na geometria da peça a ser criada, associadas às técnicas de fatiamento Planar, Não Planar, Superfícies Rotacionais, Molduras de Curvas e Entre Superfícies. Além disso, pode-se usar Taxa de Deposição Variável ou Taxa de Deposição Constante. Essas estratégias podem ser categorizadas como estratégias de fatiamento: Planar (Peça1); Multi-planar (Peça2); Não planar (Peça3); Segmentado (Peça4); Impressão Angulada (Peça5); Impressão Radial (Peça6); Revestimento (Peça7); Impressão Rotacional, Peças Ocas (Peça8); Contorno com 1 ou mais Cordões de Deposição de Material (Peça9); Sólido (Peça10).

A Tabela 1 apresenta as principais plataformas de *softwares* disponíveis para CAD/CAPP/CAM aplicadas na Manufatura Aditiva Robótica usando robôs ABB e Kuka, associados aos tipos de peças/fatiamento listados acima, com a opção de uso de uma mesa de posicionamento de 2 graus de liberdade.

Tabela 1 – Comparação de sistemas CAD/CAPP/CAM para manufatura aditiva robótica.

Software Plataforma	Peça1	Peça2	Peça3	Peça4	Peça5	Peça6	Peça7	Peça8	Peça9	Peça10	Custo
SKM	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	(Euro) 45000
ADAXIS	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	7500
Ai Build	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	27000
Meltio Gcode/Rapid/KRL	Sim	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Sim	Sim	Gratuito
ABB Studio	Sim	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	5000
Kuka.Sim	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	8000
MasterCam Aplus	Sim	Sim	Sim	Não	Não	Não	Não	Sim	Sim	Sim	7500
OpenMind	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	43000
Siemens NX	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	50000
Grasshopper/Rhino	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	1000
Simplify3D	Sim	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Sim	Sim	300
RoboDK	Sim	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Não	Sim	Sim	1500

Fonte: Alvares, Lacroix, Maron & Figueroa (2023).

No caso da arquitetura mencionada, não há uma mesa de deposição com dois graus de liberdade, apenas o robô Kuka KR70 R2100. As empresas de *software* CAD/CAM que se juntaram ao ecossistema de parceiros de *software* do Meltio Engine para plataformas híbridas e robóticas (<https://tinyurl.com/mdzbp86y>) incluem SKM DCAM da SKM Informatik; AdaOne da Adaxis; AiSync da AiBuild; Esprit da Hexagon; Fusion 360 da Autodesk; Aplus+Mastercam da Camufacturing e Mastercam; Hypermill da OpenMind; SiemensNX da Siemens; Hy5CAM da 1ATechnologies; RobotStudio 3D Printing PowerPack da ABB; e SprutCAM X da SprutCam. A empresa Meltio, fabricante do cabeçote LMD-Wire, usado neste desenvolvimento, lançou em agosto de 2023 o software CAD/CAM *Meltio Space*, sendo um gerador de percurso para integração do robô Meltio Engine (cabeçote) com uma interface fácil de usar para percursos de deposição plana, não plana e variável.

CÉLULA DE MANUFATURA ROBOTIZADA

A Célula de Manufatura Aditiva Robotizada que utiliza o processo LMD-*Wire* é composta por um robô Kuka KR70 R2100 e pelo controlador e cabeçote *Meltio Engine Robots LMD-Wire*. A célula foi montada (Fig. 1) dentro de uma cabine de metal com dimensões de 4,75x5x3,5 metros. A cabine está completamente fechada e possui quatro Janelas Segurança Laser (filtro de laser de 980 nm) para garantir a proteção do operador.

Existe um sistema de intertravamento de portas, utilizando um Relé de Segurança conectado aos botões de parada de emergência, tanto do controlador Kuka quanto do controlador Meltio. Esse sistema garante que a célula só possa operar quando a porta estiver fechada.

Uma mesa com altura de 680 mm é utilizada, e sobre a mesa há uma peça de trabalho metálica, substrato medindo 300x300x35 mm. Os cordões de deposição metálica serão adicionados a esse substrato por meio da manufatura aditiva, formando a peça final.

O custo do equipamento foi de 800.000 reais, e o custo de outros componentes foi de 80.000 reais. O projeto recebeu apoio da FAPDF (Fundação de Apoio à Pesquisa do Distrito Federal) no valor de 1 milhão de reais. Até o momento, foram gastos 880.000 reais. Para completar a integração Meltio/Kuka, a energização do robô Kuka e o treinamento de operação ocorreu em setembro de 2023. A fixação do robô Kuka ao piso foi realizada através de chumbadores tipo barra roscada e ancoragem química Fischer, além da integração física e lógica do cabeçote de deposição Meltio LMD-*Wire* à flange do robô Kuka. Um primeiro treinamento para integração e uso do sistema Meltio LMD-*Wire* ocorreu na Espanha em setembro de 2022, nas instalações da Meltio em Linares, pois não há suporte técnico no Brasil.

Na mesa do escritório (Fig. 1), fora da célula, um computador tem instalado os *softwares* Kuka.sim, Rhino 3D e Grasshopper, RoboDK, Simplify3D, juntamente com outras aplicações usadas no desenvolvimento da plataforma computacional de DT. Uma câmera USB é usada para monitoramento local e remoto do processo de deposição. Os controladores da Meltio e Kuka, bem como um trocador de calor, *chiller*, é usado para resfriar o cabeçote de deposição Meltio LMD-*Wire*, sendo instalados fora da cabine, entre o controlador Kuka (esquerda) e Meltio (direita), conforme Figura 1.

Figura 1 – Célula de manufatura aditiva robótica LMD-Wire : Kuka KR70 R2100.



Fonte: Alvares, Lacroix, Maron & Figueroa (2023).

A célula está sendo desenvolvida pelo Grupo de Inovação em Automação Industrial (GIAI) da Universidade de Brasília (UnB), sendo o primeiro sistema de manufatura aditiva robótica LMD-Wire no Brasil, bem como na América Latina.

MODELOS DE REFERÊNCIA DE GÊMEOS DIGITAIS PARA MANUFATURA

LU *et al.* (2020) apresenta definições e implicações dos Gêmeos Digitais na Manufatura Inteligente, enfocando cenários de aplicação, áreas de pesquisa e possíveis perspectivas para o futuro dos Gêmeos Digitais em sistemas de manufatura avançada. O artigo propõe um modelo de referência para Gêmeos Digitais com três camadas: 1) um modelo de informação que representa abstrações de entidades físicas; 2) um módulo de processamento de dados que gera conhecimento a partir de dados coletados; e 3) um mecanismo de comunicação bidirecional que permite a interação entre o mundo físico e

o digital.

Uma das definições amplamente aceitas para Gêmeo Digital (DT - *Digital Twin*), introduzida pela NASA em 2012, o define como "uma simulação integrada, *multiphysics*, em múltiplas escalas e probabilística de um veículo ou sistema construído que utiliza as melhores informações disponíveis, modelos físicos, atualizações de sensores, dados históricos, etc., para espelhar a vida de seu correspondente" (GLAESSGEN; STARGEL, 2012).

A seguir são apresentadas algumas abordagens e normas para implantação de DT para aplicações na Manufatura Aditiva e Subtrativa.

ESTRUTURA DE DT PARA MANUFATURA DA STEP TOOLS, INC.

A STEP Tools (2016) propôs uma estrutura interoperável para implementar Gêmeos Digitais em processos de usinagem em colaboração com a Boeing, OMAC e o comitê TC184/SC4 da ISO em 2016. Essa estrutura permite a manufatura em malha fechada com base em dados em tempo real de inspeções dimensionais e geométricas, usando padrões como STEP-NC, MTConnect e QIF (*Quality Information Framework*). O modelo STEP-NC, liderado pela ISO e desenvolvido pela STEP Tools, unifica dados de geometria, tolerâncias, operações de usinagem e resultados de inspeção em um único formato de arquivo. O MTConnect fornece dados de monitoramento de processo via TCP/IP para clientes da web, e o QIF é usado para coletar resultados de inspeção e avaliar a qualidade das peças.

MODELO DE REFERÊNCIA RAMI 4.0

O Modelo de Referência de Arquitetura para Indústria 4.0 (RAMI 4.0), conforme HANKEL (2015), estabelece padrões e é descrito em três dimensões:

- ❖ "Nível de Hierarquia" (IEC 62264, IEC 61512): Relacionada aos níveis hierárquicos, abrangendo desde o produto inteligente até o mundo conectado.

- ❖ "Ciclo de Vida e Fluxo de Valor" (IEC 62890): Esta dimensão cobre o ciclo de vida do produto, desde a concepção até o final de sua vida útil, produção e manutenção.
- ❖ "Camadas": Esta dimensão envolve o mapeamento de sistemas e máquinas em suas representações virtuais, conhecidas como gêmeos digitais, abrangendo dispositivos individuais e entidades comerciais.

O *Asset Administration Shell* (AAS) é um componente fundamental da arquitetura. Segundo KERIN *et al.* (2023), o AAS do RAMI 4.0 tem sido referido por alguns como um gêmeo digital, mas ainda está em desenvolvimento. O termo "Gêmeo Digital" é mencionado apenas uma vez no padrão (RAMI 4.0 - Platform Industrie 4.0 Part 1, 2019).

ISO 23247 – ESTRUTURA DE GÊMEOS DIGITAIS PARA MANUFATURA

A norma ISO 23247-1 (2021) foi desenvolvida pelo Comitê Técnico ISO TC 184/SC 4 para padronizar uma estrutura de arquitetura de implementação de Gêmeos Digitais na Indústria 4.0. Essa estrutura orienta a construção de Gêmeos Digitais e a integração de dados de diferentes fontes em quatro camadas de aplicação (CABRAL *et al.*, 2023).

A primeira camada lida com o domínio dos Elementos de Manufatura Observáveis (OME - *Observable manufacturing element*), que incluem todos os dispositivos, sensores, máquinas, materiais, produtos e outros elementos físicos no chão de fábrica que são de interesse para fins de monitoramento e controle.

A segunda camada (DCDCE - *Data Collection and Device Control Entity*) é responsável pela coleta de dados de sensores no domínio OME e pelo controle de dispositivos dentro desse domínio, mantendo a sincronização entre o domínio OME e as entidades digitais.

A terceira camada, correspondente ao domínio DT, permite o gerenciamento, monitoramento e otimização do sistema como um todo, com modelagem e sincronização dos OMEs para fornecer serviços como monitoramento, simulação e análise. O domínio do usuário é onde pessoas, dispositivos e outros sistemas utilizam os serviços e aplicativos fornecidos pelo Gêmeo Digital.

A norma ISO 23247 baseia-se no modelo RAMI 4.0 e propõe um Modelo de Negócios com seis camadas: Ativo, Integração, Comunicação, Informação, Funcional e Negócios. A dimensão do Gêmeo Digital dentro do RAMI 4.0 ainda não possui uma norma associada. O trabalho inicial da STEP Tools e do Comitê de Dados Industriais ISO/TC 184/SC 4 levou ao desenvolvimento do AP 238 (padrão STEP-NC) e, subsequentemente, à ISO 23247. Essa norma estabelece padrões para a troca de informações e interoperabilidade entre sistemas de manufatura.

A estrutura da ISO 23247 é usada como base para projetar uma arquitetura de implementação de Gêmeo Digital voltada para o monitoramento, usando um painel 2D e um ambiente CAD/CAPP/CAM para planejamento de processos, programação CAD/CAM e simulação 3D de uma Célula de Manufatura Aditiva Robótica com LMD-Wire. A ISO 23247 define diferentes funcionalidades do Gêmeo Digital, como monitoramento, simulação 3D, controle e análise preditiva, permitindo a criação de serviços em nuvem e novos modelos de negócios para fabricantes de máquinas inteligentes.

TRABALHOS RELACIONADOS A GÊMEOS DIGITAIS

Nesta subseção, são feitas referências à literatura relacionada a trabalhos que lidam especificamente com o projeto e desenvolvimento de Gêmeos Digitais para processos de usinagem em máquinas-ferramenta. No entanto, um estudo de revisão de literatura mais abrangente foi conduzido por HUANG *et al.* (2021) em que eles realizaram uma revisão de literatura abrangente sobre tecnologias de Gêmeos Digitais baseados em IA para a Indústria 4.0, abrangendo várias aplicações na manufatura. Eles revisaram mais de 300 artigos publicados de 2016 até meados de 2020.

LUO *et al.* (2020) propõem um método de modelagem multidomínio unificado para construir Gêmeos Digitais de máquinas-ferramenta, direcionados especificamente para aplicações de manutenção preditiva e diagnóstico de falhas. Eles demonstram a capacidade do modelo ao prever e diagnosticar falhas em um centro de usinagem CNC.

QIAO *et al.* (2019) apresentam um modelo de Gêmeo Digital de cinco dimensões baseado em um modelo de previsão híbrida que utiliza técnicas de aprendizado profundo para aprimorar a previsão das condições da máquina-ferramenta. Eles validam o modelo proposto usando dados de vibração da máquina em um processo de usinagem.

TONG *et al.* (2020) desenvolveram uma aplicação de monitoramento em tempo real de máquinas que utiliza tecnologia de fusão de múltiplos sensores para adquirir e processar dados críticos da máquina. Eles validaram essa aplicação por meio de exemplos que utilizaram o Gêmeo Digital para visualizar e analisar dados do processo, o estado da máquina e o consumo de energia.

CABRAL *et al.* (2023) implementaram uma arquitetura de Gêmeo Digital para usinagem em uma máquina CNC Haas Mini Mill, baseada no *framework* de Gêmeos Digitais padronizado pela ISO 23247. Essa arquitetura utiliza os protocolos MQTT e MTConnect para transferir dados da máquina e do processo para plataformas em nuvem para armazenamento, monitoramento e simulação.

Até o momento, não há especificações de estrutura de arquitetura para Gêmeos Digitais usando o padrão ISO 23247 para Manufatura Aditiva, norma ISO publicada em novembro de 2021. Uma comparação deste trabalho com a literatura revisada relevante é apresentada na Tabela 2. Este trabalho tem como objetivo desenvolver e validar uma arquitetura de Gêmeo Digital para monitoramento em uma Célula de Manufatura Aditiva Robótica usando o processo LMD-*Wire*, com a integração de um painel 2D, *dashboard*, e um ambiente 3D CAD/CAPP/CAM para projeto, planejamento e programação de processos de manufatura aditiva LMD-*Wire* robotizada.

Tabela 2 – Comparação deste trabalho com trabalhos relacionados.

Proposta	Aplicação	Arquitetura	Protocolos de Comunicação	Armazenamento em Nuvem
Liu <i>et al.</i> (2019)	Monitoramento e Controle	Sem padrão específico	OPC-UA, MTConnect	Sim
Liu <i>et al.</i> (2022a)	Monitoramento e Controle - Manufatura Aditiva de Metal	Sem padrão específico	OPC-UA, MTConnect	Sim
Luo <i>et al.</i> (2020)	Manutenção Preditiva	Sem padrão específico	Proprietário	Não
Qiao <i>et al.</i> (2019)	Manutenção Preditiva	Sem padrão específico	OPC-UA	Não
Tong <i>et al.</i> (2020)	Monitoramento e Análise	Sem padrão específico	MTConnect	Não
Cabral <i>et al.</i> (2023)	Monitoramento e Simulação 3D	Padrão ISO 23247	MTConnect, MT-Connect	Sim
Este trabalho	Monitoramento CAD/CAPP/CAM 3D	2D, Padrão ISO 23247	MQTT, OPC, Socket, CAN-Bus	Sim

Fonte: Alvares, Lacroix, Maron & Figueroa (2023).

PROPOSTA DE ARQUITETURA LMD-Wire ROBOTIZADA DE GÊMEO DIGITAL COM BASE NA ISO 23247

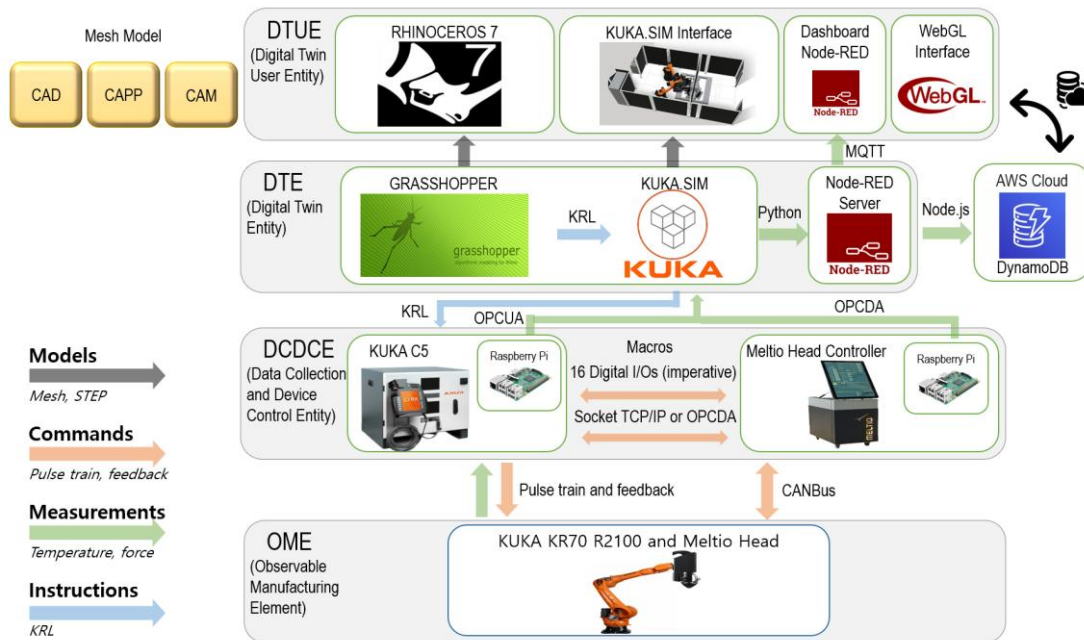
A Figura 2 ilustra a arquitetura proposta para a implementação de um Gêmeo Digital em conformidade com a norma ISO 23247. Os quatro domínios de aplicação, de acordo com a norma, são integrados nesta arquitetura. O principal objetivo é o monitoramento, que inclui um painel 2D e um ambiente CAD/CAPP/CAM para planejamento de processos, programação CAD/CAM e simulação 3D de uma Célula de Manufatura Aditiva Robótica usando o processo LMD-Wire. Detalhes adicionais dos domínios da arquitetura serão abordados a seguir.

ELEMENTOS DE MANUFATURA OBSERVÁVEIS

A primeira camada, olhando de baixo cima na Figura 2, corresponde ao domínio de elemento/entidade de manufatura observável, onde o Robô Kuka KR70 R2100 e o LMD-Wire Meltio Robots Engine a partir da qual serão coletados dados de processo e de

status de máquina.

Figura 2 – Arquitetura DT para parametrização de manufatura aditiva planar e não planar e simulação do ciclo de vida de robô com o framework ISO 23247.



Fonte: Alvares, Lacroix, Maron & Figueroa (2023).

O Robô Kuka KR70 R2100 está integrado com o LMD-Wire Meltio Robots Engine usando protocolos OPC-UA, OPC-DA, Sockets TCP e CANBus para obter dados da máquina. Utilizou-se de um computador, *Notebook*, *Desktop* ou Raspberry Pi 2, para estabelecer o canal de comunicação com o Robô LMD-Wire, ou seja, o Gateway OPC-UA/OPC-DA/CANBus/Sockets Ethernet-TCP/IP. O protocolo de comunicação Meltio/CANBus é constituído por um conjunto de macro-comandos que podem então ser enviados à máquina para obter dados da máquina ou controlar algum dos dispositivos acionados.

Os dados/informações transmitidas por este serão a base do DT e percorrerão os outros domínios para compor as aplicações de uma determinada arquitetura de gêmeo digital, sendo a funcionalidade desenvolvida (monitoramento, teleoperação, manutenção preditiva, otimização, simulação, entre outros) explorada como um serviço oferecido na Cloud/Edge como um novo Modelo de Negócios da empresa, sendo fundamental para a transformação digital em curso na Indústria 4.0.

ENTIDADE DE COLETA DE DADOS E CONTROLE DE DISPOSITIVOS – DCDCE

Na segunda camada da arquitetura, é usado um computador Raspberry Pi 2, ou um *notebook/desktop*, como sistema de aquisição de dados integrado à máquina e conectado a ela via Ethernet TCP/IP. Uma aplicação servidor em Node.js foi desenvolvida para se comunicar com a máquina, enviando comandos do protocolo Meltio para recuperar os dados desejados. Esses dados foram disponibilizados no domínio do Gêmeo Digital por meio de diferentes canais de comunicação TCP/IP, utilizando os protocolos OPC-UA, OPC-DA, *sockets* e MQTT recomendados pela ISO 23247. Um *broker* MQTT recebe os dados da máquina, formata-os e os disponibiliza para qualquer assinante MQTT interessado. Além disso, um serviço Node-Red em execução no *gateway* Raspberry Pi 2, programado como assinante MQTT, recupera os dados do *broker* MQTT em Node.js e os envia diretamente para a nuvem AWS (*Amazon Web Service*) para armazenamento e visualização.

DOMÍNIO DO GÊMEO DIGITAL

A terceira camada constitui o domínio do DT, que, por sua vez, representa o núcleo do sistema desenvolvido. Neste ponto, estão os serviços de aplicação e funcionalidades do DT que são fornecidos a usuários interessados, que podem ser indivíduos/usuários finais e/ou outros sistemas. Os serviços fornecidos pelo DT neste trabalho são o monitoramento (visualização/*dashboard* 2D) e CAD/CAPP/CAM (visualização/simulação 3D) da Célula de Manufatura Aditiva Robótica usando LMD-*Wire*, conforme definido pela ISO 23247. As plataformas utilizadas são o Grasshopper-Rhino 3D (CAD/CAPP/CAM), Kuka.Sim (Simulação) e Node-RED (monitoramento e armazenamento de dados em um banco de dados).

Deve ser enfatizado que existem funcionalidades de DT mais complexas que requerem um maior grau de maturidade de desenvolvimento. As duas funcionalidades implementadas são descritas pela ISO como serviços do domínio do DT, embora tenham baixa complexidade em comparação com serviços de Manutenção Preditiva baseados em IA (Inteligência Artificial) ou manufatura em ciclo fechado com *feedback* com base em dados de inspeção dimensional ou geométrica.

Esses serviços são suportados por dados de processo e dados de status da máquina associados aos três diferentes fluxos de dados desenvolvidos:

1. Um fluxo baseado em MQTT e no ambiente de programação gráfica Node-Red, onde este último está diretamente conectado à AWS Cloud usando autenticação baseada em *token* para permitir o armazenamento e a visualização de dados, bem como o monitoramento em um painel 2D criado dentro da própria plataforma Cloudant;
2. Um segundo fluxo baseado em MQTT alimentando um ambiente de simulação 3D usando o Kuka.Sim, que inclui o modelo 3D da Célula de Manufatura Aditiva Robótica LMD-*Wire* da Meltio;
3. Um fluxo baseado em protocolos OPC-UA, OPC-DA, *sockets* TCP/7000 e CANBus, onde os dados da célula podem ser consumidos, lendo e gravando mensagens em variáveis como posição TCP do robô, pose, velocidade, monitoramento, IO, entre outros.

DOMÍNIO DO USUÁRIO DO GÊMEO DIGITAL

Neste domínio, temos os interessados em consumir os serviços fornecidos no domínio do DT, que podem ser indivíduos ou sistemas. Neste caso, os usuários são as pessoas que fazem parte do laboratório LaDPRER na Universidade de Brasília, que utilizam a máquina.

O *software* Grasshopper-Rhino 3D é utilizado como um sistema CAD/CAPP/CAM, onde um modelo de malha da peça a ser impressa é aberto, e os parâmetros de impressão, como altura da camada, potência do laser, velocidades do robô, taxa de alimentação do arame, dimensão do substrato, entre outros, são configurados. O sistema CAPP/CAM realiza o planejamento do processo e gera o programa KRL para o robô Kuka. Em seguida, o programa é enviado para o Kuka.Sim, que realiza a simulação do processo de impressão, validando o código KRL gerado. A monitorização das variáveis do processo é apresentada num painel 2D através de interfaces *web* utilizando os protocolos HTTP e MQTT, implementadas com o Node-RED. As variáveis do processo são armazenadas numa base de dados baseada na nuvem (AWS) para uso posterior em algoritmos de análise de dados, como manutenção preditiva.

DESCRIÇÃO DA IMPLEMENTAÇÃO E RESULTADOS

A configuração experimental deste trabalho consiste no robô Kuka KR70 R2100 e na cabeça LMD-Wire da Meltio, conectados a um computador *gateway* como Raspberry Pi 2, ou *Notebook/Desktop*, via Ethernet TCP/IP. Uma aplicação de servidor Node.js foi implantada como um serviço computador *gateway*, que inclui um módulo de comunicação por *sockets* para enviar macrocomandos para a máquina e recuperar seus dados de status.

CAD/CAPP/CAM UTILIZANDO RHINOCEROS 3D E GRASSHOPPER

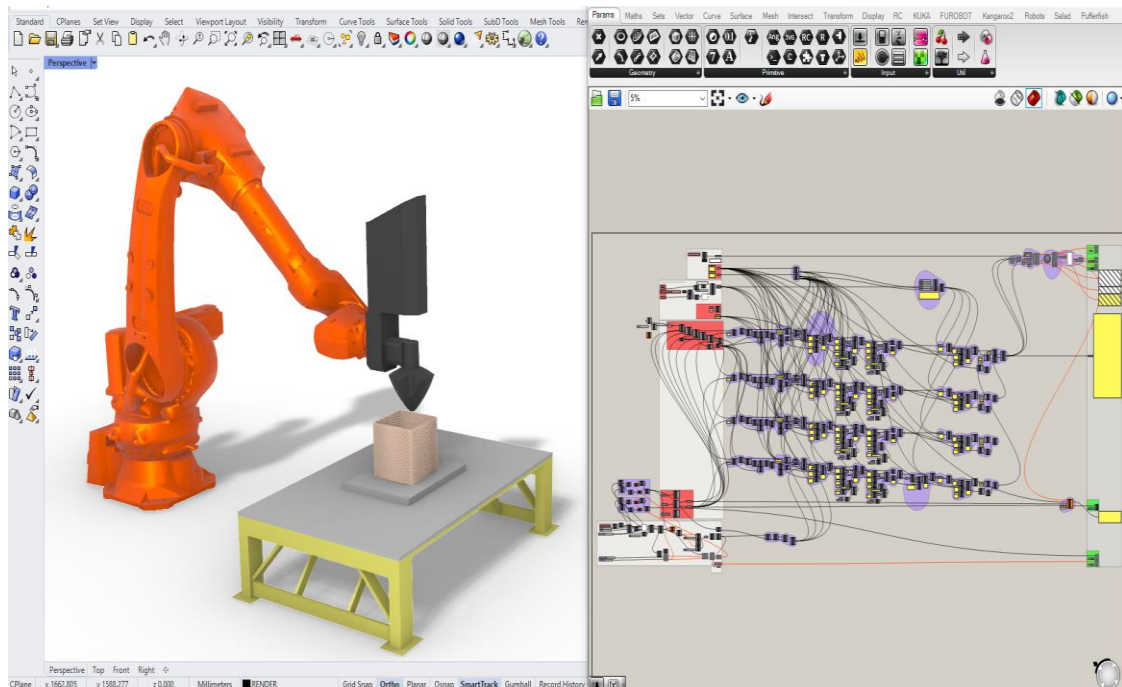
Um algoritmo foi desenvolvido no Grasshopper para CAD/CAPP/CAM, que está associado à programação, simulação e geração de programas no formato KRL (Kuka Robot Language) para estratégias de deposição de material. O algoritmo suporta a deposição de contorno de peças com uma, duas ou três cordas de deposição de material. Ele permite o fatiamento da peça oca a ser criada usando cordas de deposição de material associadas ao contorno da peça por meio de um processo de fatiamento planar. A URL <https://youtu.be/UsXkto9vljg> fornece um vídeo que demonstra o algoritmo em ação e a simulação no Rhinoceros (ALVARES e LACROIX, 2023a). O complemento Robots do Grasshopper é usado, o que permite a programação de robôs ABB, Kuka e Universal (UR). Embora existam outros complementos para robôs (FuroBot, KukaPRC, RoboDK), o complemento Robots é o mais interessante, pois funciona com robôs Kuka e ABB.

Para gerar a estratégia de deposição para o contorno de peças ocas, é necessário obter os pontos de coordenadas do contorno (X, Y, Z) e as orientações da ferramenta (A, B, C). Dependendo do objeto de entrada, do formato do arquivo da peça (BRep, Curva ou Malha), o seguinte fluxo de trabalho deve ser seguido: BRep => Curvas => Polilinhas => Pontos/Vetores => X, Y, Z, A, B, C (CUEVAS e PUGLIESE, 2020).

A Figura 3 apresenta o algoritmo CAD/CAPP/CAM desenvolvido no Rhino3D-Grasshopper. O lado esquerdo da figura representa o DT da célula exibido no Rhinoceros, e o lado direito mostra o algoritmo CAPP/CAM desenvolvido no ambiente Grasshopper usando o complemento Robots, entre outros, que permite a geração de código KRL compatível com robôs Kuka. A URL <https://youtu.be/UsXkto9vljg>, apresenta um vídeo

que demonstra o uso do algoritmo CAD/CAPP/CAM (ALVARES e LACROIX, 2023a), mostrando detalhes do desenvolvimento.

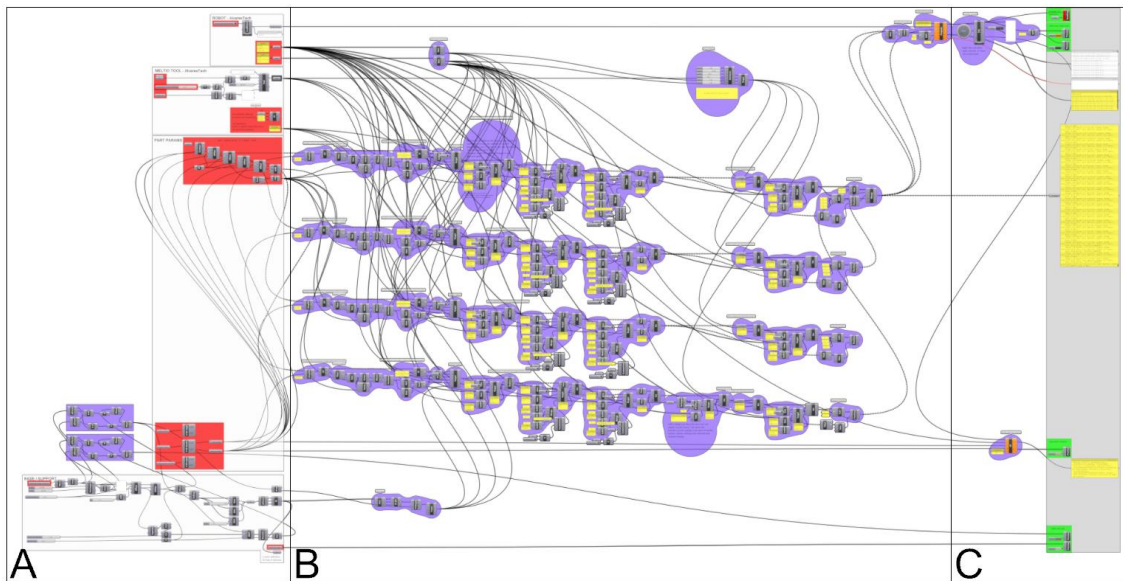
Figura 3 – Algoritmo CAD/CAPP/CAM Grasshopper para impressão contorno peça oca.



Fonte: Alvares, Lacroix, Maron & Figueroa (2023).

A Figura 4 apresenta o fluxo de informações de todo o algoritmo CAD/CAPP/CAM desenvolvido, mostrando as entradas, *addons* e saídas, incluindo o programa KRL (Kuka Robot Language) que é salvo automaticamente em um arquivo.

Figura 4 – Modelo de algoritmo com *plug-in* Robots para Rhinoceros-Grasshopper para operar o DT do robô: A) Quatro entradas, a Ferramenta Meltio, o robô, os parâmetros da peça e os parâmetros da base e da mesa de suporte; B) Coleta e direcionamento das entradas para coincidirem com o programa do robô; C) Simulação no Rhinoceros e seis saídas, o código para os caminhos de extrusão, os movimentos do robô e da ferramenta, o material depositado e as geometrias da base e da mesa.

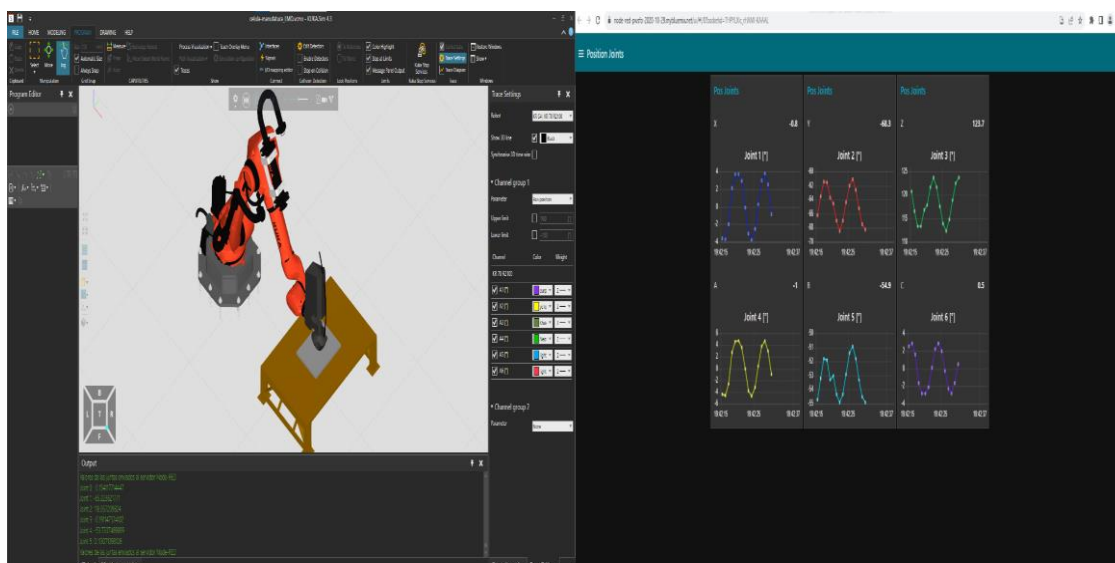


Fonte: Alvares, Lacroix, Maron & Figueroa (2023).

SIMULAÇÃO COM KUKA.SIM

A Figura 5 mostra a simulação do código KRL no ambiente Kuka.Sim gerado pelo algoritmo CAD/CAPP/CAM na plataforma Rhinoceros-Grasshopper, associado ao algoritmo desenvolvido para a estratégia de deposição de material usando fatiamento plano para peças de contorno (oco), como geometrias em forma de vaso. A URL https://youtu.be/ukc_CrEFBRE apresenta um vídeo mostrando a simulação com o Kuka.Sim (ALVARES e LACROIX, 2023b) associada ao programa KRL gerado pelo algoritmo CAD/CAPP/CAM baseado no Grasshopper (ALVARES e LACROIX 2023a).

Figura 5 – Simulação com o Kuka.Sim para contornar partes ocas e painel 2D gerado pela plataforma Node-RED usando o protocolo MQTT.



Fonte: Alvares, Lacroix, Maron & Figueroa (2023).

MONITORAMENTO COM NODE-RED E MQTT

Para possibilitar o monitoramento em tempo real pela *web* e armazenar dados para análises preditivas, optou-se por usar um banco de dados na nuvem (DynamoDB) fornecido pela AWS (Amazon Web Services). Nesta fase de implementação da Célula de Manufatura Aditiva Robótica LMD-Wire, a plataforma Kuka.Sim será usada como gerador de dados para alimentar a funcionalidade planejada no Gêmeo Digital (Figura 2), usando programação Python e Node-RED integrados com a plataforma Kuka.Sim. O monitoramento baseado na *web* do programa em execução no Kuka.Sim, seja no modo de simulação ou no monitoramento em tempo real do robô Kuka ativo (modo *online*), pode ser visualizado no Kuka.Sim. Portanto, o uso do monitoramento e o histórico de dados armazenados no banco de dados via *web* podem ocorrer tanto no modo de simulação (robô *offline*) quanto no modo *online* (robô *online*).

Usando um programa desenvolvido em Python, os seguintes dados são obtidos por meio do protocolo MQTT, que acessa os dados publicados pelo Kuka.Sim. O servidor Node-RED acessa o servidor MQTT e fornece um painel 2D (Figura 4) que exibe os gráficos de cada variável monitorada. Além disso, os dados são armazenados no banco de dados da AWS. As seguintes medições em tempo real são monitoradas: Posição dos

eixos: Indica as posições dos eixos selecionados; Velocidade dos eixos: Indica a velocidade dos eixos selecionados; Aceleração dos eixos: Indica a aceleração dos eixos selecionados; Posição do TCP: Indica a posição do TCP no sistema de coordenadas WORLD; Velocidade do TCP: Indica a velocidade do TCP; Aceleração do TCP: Indica a aceleração do TCP; BBRA Indica a sobreposição atual.

A URL <https://youtu.be/80m1G-9dw7k?si=TQ3du9unTWsQYDcY> apresenta um vídeo que mostra o Painel Node-RED, o programa Python que obtém dados das juntas da plataforma Kuka.Sim e os publica no Node-RED usando MQTT, além de armazenar os valores no banco de dados da AWS. A visualização em 3D da simulação também pode ser realizada usando um aplicativo chamado Visual Components Experience, que está disponível para dispositivos Android e Apple. Esse aplicativo permite que os usuários visualizem a simulação no formato WebGL.

CONCLUSÃO

Este artigo descreve uma Célula de Manufatura Aditiva Robótica usando o processo LMD-*Wire*. Apresenta as características das soluções associadas à implementação de Armários de Segurança a Laser, bem como as soluções de *hardware* e *software* adotadas e o DT concebido.

Os estudos de caso apresentados referem-se à programação, simulação e monitoramento sem a impressão real de peças. A principal contribuição desta pesquisa é apresentar as soluções e desafios da Manufatura Aditiva Robótica usando LMD-*Wire*. O desenvolvimento de soluções e abordagens que podem servir como diretrizes para outras implementações serve como um guia para opções de implantação e popularização dessa tecnologia em rápido crescimento em todo o mundo.

Segundo a Meltio, mais de 200 sistemas LMD-*Wire* já foram instalados em mais de 40 países, incluindo a Universidade de Brasília, sendo o primeiro no Brasil e na América Latina, sendo este desenvolvimento inédito no Brasil usando Manufatura Aditiva Robotizada LMD-*Wire*, com grande potencial de aplicação na Indústria de Manufatura (aeroespacial, automobilística, outras), Petróleo e Gás, Construção Civil, entre outras.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de expressar sua gratidão ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) e à FAPDF (Fundação de Amparo à Pesquisa do Distrito Federal) pelo apoio financeiro no desenvolvimento deste trabalho, bem como, à Universidade de Brasília e ao Programa de Pós-Graduação em Sistemas Mecatrônicos do Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Tecnologia.

REFERÊNCIAS

- ALVARES, A.J. and LACROIX, I., 2023a. “CAD/CAPP/CAM with Grasshopper to Robotic Additive Manufacture”. <https://youtu.be/UsXkto9vljg>. [Online; accessed 19-Juny-2023].
- ALVARES, A.J. and LACROIX, I., 2023b. “Simulation with Kuka.Sim to Robotic Additive Manufacture”. https://youtu.be/ukc_CrEFBRE. [Online; accessed 28-Juny-2023].
- BIEGLER, M., GRAF, B. and RETHMEIER, M., 2018. “In-situ distortions in lmd additive manufacturing walls can be measured with digital image correlation and predicted using numerical simulations”. **Additive Manufacturing**, Vol. 20, p. 101 – 110. doi:10.1016/j.addma.2017.12.007.
- CABRAL, J.V.A., GASCA, E.A.R. and ALVARES, A.J., 2023. “Digital twin implementation for machining center based on iso 23247 standard”. **IEEE Latin America Transactions**, Vol. 21, No. 5, pp. 628–635. doi:10.1109/TLA.2023.10130834.
- CUEVAS, D. and PUGLIESE, G., 2020. *Advanced 3D Printing with Grasshopper, Clay and FDM*. Independently published. ISBN 9798635379011. URL <https://books.google.com.br/books?id=2nGzzQEACAAJ>.
- FENG, A., CHEN, C., WU, C., WEI, Y. and WANG, Y., 2022. “Modeling of laser melting deposition equipment based on digital twin”. **Metals**, Vol. 12, No. 2. doi:10.3390/met12020169.
- GARMENDIA, I., PUJANA, J., LAMIKIZ, A., MADARIETA, M. and LEUNDA, J., 2019. “Structured light-based height control for laser metal deposition”. **Journal of Manufacturing Processes**, Vol. 42, p. 20 – 27. doi:10.1016/j.jmapro.2019.04.018.
- GLAESSGEN, E. and STARGEL, D., 2012. “The digital twin paradigm for future of NASA and U.S. air force vehicles”. In **53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference**.

GU, H. and LI, L., 2019. “Computational fluid dynamic simulation of gravity and pressure effects in laser metal deposition for potential additive manufacturing in space”. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, Vol. 140, p. 51 – 65. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.05.081.

HANKEL, M., 2015. “The reference architectural model industrie 4.0 (rami 4.0) - bosch rexroth”.

HUANG, Z., SHEN, Y., LI, J., FEY, M. and BRECHER, C., 2021. “A survey on ai-driven digital twins in industry 4.0: Smart manufacturing and advanced robotics”. **Sensors**, Vol. 21, No. 19. ISSN 1424-8220. doi:10.3390/s21196340.

ISO 23247-1, 2021. “Automation systems and integration — digital twin framework for manufacturing — part 1: Overview and general principles”.

JAN, Z., AHAMED, F., MAYER, W., PATEL, N., GROSSMANN, G., STUMPTNER, M. and KUUSK, A., 2023. “Artificial intelligence for industry 4.0: Systematic review of applications, challenges, and opportunities”. **Expert Systems with Applications**, Vol. 216. doi:10.1016/j.eswa.2022.119456.

KERIN, M., PHAM, D.T., HUANG, J. and HADALL, J., 2023. “A generic asset model for implementing product digital twins in smart remanufacturing”. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Vol. 124, No. 9, pp. 3021–3038. doi:10.1007/s00170-022-09295-w. URL <https://doi.org/10.1007/s00170-022-09295-w>.

KUBOTA, T., HAMZEH, R. and XU, X., 2020. “Step-nc enabled machine tool digital twin”. **Procedia CIRP**, Vol. 93, pp. 1460– 1465. ISSN 2212-8271. doi:<https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.06.004>. 53rd CIRP Conference on Manufacturing Systems 2020.

LETTORI, J., RAFFAELI, R., BILANCIA, P., PERUZZINI, M. and PELLICCIARI, M., 2022. “A review of geometry representation and processing methods for cartesian and multiaxial robot-based additive manufacturing”. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Vol. 123, No. 11, pp. 3767–3794.

LIU, C., LE ROUX, L., KÖRNER, C., TABASTE, O., LACAN, F. and BIGOT, S., 2022. “Digital twin-enabled collaborative data management for metal additive manufacturing systems”. **Journal of Manufacturing Systems**, Vol. 62, p. 857 – 874.

LIU, C., VENGAYIL, H., LU, Y. and XU, X., 2019. “A cyber-physical machine tools platform using opc ua and mtconnect”. **Journal of Manufacturing Systems**, Vol. 51, pp. 61–74. ISSN 0278-6125.

LU, Y., LIU, C., WANG, K.I.K., HUANG, H. and XU, X., 2020. “Digital twin-driven smart manufacturing: Connotation, reference model, applications and research issues”. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, Vol. 61, p. 101837. ISSN 0736-5845. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rcim.2019.101837>.

LUO, W., HU, T., YE, Y., ZHANG, C. and WEI, Y., 2020. “A hybrid predictive maintenance approach for cnc machine tool driven by digital twin”. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, Vol. 65, p. 101974. ISSN 0736-5845. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rcim.2020.101974>.

PIRES, J.N., AZAR, A.S., NOGUEIRA, F., ZHU, C.Y., BRANCO, R. and TANKOVA, T., 2022. “The role of robotics in additive manufacturing: review of the am processes and introduction of an intelligent system”. Vol. 49, No. 2, pp. 311–331. URL <https://doi.org/10.1108/IR-06-2021-0110>.

QIAO, Q., WANG, J., YE, L. and GAO, R.X., 2019. “Digital twin for machining tool condition prediction”. **Procedia CIRP**, Vol. 81, pp. 1388–1393. ISSN 2212-8271. 52nd CIRP Conference on Manufacturing Systems (CMS), Ljubljana, Slovenia, June 12-14, 2019.

SHAO, G. and HELU, M., 2020. “Framework for a digital twin in manufacturing: Scope and requirements”. **Manufacturing Letters**, Vol. 24, p. 105 – 107. doi:10.1016/j.mfglet.2020.04.004.

STEP Tools, I., 2016. “Digital Thread and Digital Twin Demonstrations at Future of Flight, <https://www.steptools.com/blog/>, Acesso em: 17 nov. 2022”.

TONG, X., LIU, Q., PI, S. and XIAO, Y., 2020. “Real-time machining data application and service based on imt digital twin”. **Journal of Intelligent Manufacturing**, Vol. 31, p. 1113–1132. doi:<https://doi.org/10.1007/s10845-019-01500-0>.

XU, X., 2017. “Machine Tool 4.0 for the new era of manufacturing”. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Vol. 92, No. 5-8, pp. 1893–1900. ISSN 0268-3768. doi:10.1007/s00170-017-0300-7.

YAN, L., CHEN, Y. and LIOU, F., 2020. “Additive manufacturing of functionally graded metallic materials using laser metal deposition”. **Additive Manufacturing**, Vol. 31. doi:10.1016/j.addma.2019.100901.