




# Digital Twin Implementation for Machining Center Based on ISO 23247 Standard

João V. A. Cabral , Efrain Rodriguez , and Alberto J. Alvares 

**Abstract**—In the context of the Industry 4.0, Digital Twins are essential tools for monitoring and controlling manufacturing processes. In this sense, this work presents the development and implementation of a Digital Twins architecture for machining using a CNC Haas Mini Mill machine. The proposed architecture is based on the current Digital Twins framework for manufacturing normalized by ISO 23247. MQTT and MTConnect protocols are used to transfer machine status and process data to cloud platforms for realizing storing, monitoring, visualization, and simulation activities. This approach was validated in a real CNC machine and it is feasible to be applied to other machines and manufacturing processes.

**Index Terms**—Digital Twins, MTConnect, MQTT, ISO 23247, Industry 4.0.

## I. INTRODUÇÃO

A partir de 2011, tecnologias disruptivas como Internet das Coisas (IoT-*Internet of Things*), Inteligência Artificial (AI - *Artificial Intelligence*), Computação na Nuvem (Cloud Computing) e Dados Massivos (Big Data / Analytics) ganharam espaço no campo da manufatura para propiciar uma nova revolução industrial, referida como Indústria 4.0 [1]. Um dos propósitos da Indústria 4.0 é transformar os sistemas de produção industrializados atuais em direção a uma nova geração de sistemas de produção baseados em sistemas ciber-físicos (CPS - *Cyber-Physical Systems*) [2], [3].

Os CPPS [2] constituem a materialização dos sistemas ciber-físicos (CPS - *Cyber-Physical Systems*) no ambiente de manufatura; eles são caracterizados pela integração de máquinas-ferramenta, processos de manufatura e tecnologia de redes, onde os processos e operações de produção podem ser monitorados e controlados nestes espaços computacionais ao mesmo tempo que criam ciclos de retroalimentação para afetar as computações e vice-versa [3].

Os Gêmeos Digitais (DT - *Digital Twins*) são o núcleo tecnológico de todo CPS [4]. DT representam a virtualização de entidades físicas de manufatura alimentada por dados coletados em tempo real, permitindo otimização em malha fechada para alterar o comportamento de ditas entidades e processos físicos. A tecnologia de DT vem ganhando cada vez mais relevância tanto no âmbito acadêmico quanto no setor industrial [4], [5].

Enquanto isso, as máquinas-ferramenta continuam tendo um papel fundamental dentro de qualquer ambiente de manufatura, sendo que a produtividade dos processos e qualidade final do

produtos fabricados depende em grande medida de sua eficiência e capacidade. O conceito de máquina-ferramenta ciber-física comandada por tecnologia de DT tem sido introduzido por [3], onde as máquinas-ferramenta deveriam ser mais inteligentes, autônomas, adaptáveis, flexíveis e com capacidades *smart*. Com a ideia de alcançar o próximo nível tecnológico das máquinas-ferramenta baseadas em DT é necessário impulsionar e acelerar o desenvolvimento de implementações que levem a resolver questões como: que arquitetura/framework de implementação de DT pode ser usada? Quais protocolos de comunicação são factíveis para coleta de dados em tempo real? Que tecnologias podem ser selecionadas para construção de DT visando aplicações de manufatura?

Nesse sentido, o trabalho responde a essas questões e apresenta uma implementação de DT para processos de usinagem usando um centro de usinagem vertical CNC Haas Mini Mill com interface de comunicação RS232. Uma aplicação de servidor suportando os protocolos de comunicação MTConnect e MQTT foi desenvolvida para coletar os dados de máquina no chão de fábrica e disponibilizá-los via API para um cliente web. Neste caso, o objetivo principal foi usar os dados de máquina coletados em tempo real para alimentar um ambiente de simulação WebGL (Web Graphics Library) com o modelo 3D da máquina Haas, ferramenta de corte e da peça sendo usinada. Um dashboard de monitoramento com capacidade de armazenamento de dados na nuvem da IBM é também apresentado.

O trabalho é organizado da seguinte forma: a seção II apresenta uma breve revisão de literatura sobre os principais modelos de referência e arquiteturas de implementação de DT e listando os principais trabalhos correlatos encontrados; a seção III descreve a arquitetura de implementação proposta com base no framework da norma ISO 23247; a seção IV descreve os detalhes de implementação e ressalta os principais resultados obtidos; finalmente, as principais conclusões do trabalho são ressaltadas.

## II. REVISÃO DE LITERATURA

Uma das definições de DT mais bem aceitas pela comunidade científica foi introduzida pela NASA em 2012, onde definem o *Digital Twin* como “uma simulação integrada, multi-física, multi-escalar e probabilística de um veículo ou sistema construído, que utiliza os melhores modelos físicos disponíveis, atualizações de sensores, histórico, etc., para espelhar a vida da correspondente contra-parte” [6].

Algumas propostas de modelos de referência e frameworks de arquitetura para implementação de DT em manufatura, bem como, de trabalhos correlatos são apresentados a seguir.

João V. A. Cabral, Efrain Rodríguez and Alberto J. Alvares are with Department of Mechanical Engineering, University of Brasilia, Brazil, e-mails: jvarantescabraltrab@gmail.com, efrainrg2009@gmail.com, alvares@AlvaresTech.com

### A. Modelos de Referência de DT para Manufatura

Lu et al. [4] apresentam um estudo para clarificar definições e conotações de DT no contexto de *Smart Manufacturing*, ressaltando os cenários de aplicação, focos de pesquisa e potenciais perspectivas em direção ao futuro dos DT no campo dos sistemas avançados de manufatura.

O trabalho propõe um modelo de referência de DT formado por três camadas: 1) um modelo de informação que representa abstrações das entidades físicas; 2) um módulo de processamento de dados que gera conhecimento a partir dos dados coletados; e 3) um mecanismo de comunicação bidirecional que habilita a interação entre o espaço físico e o espaço digital.

### B. Framework de DT para Manufatura da STEP Tools, Inc.

STEP Tools, Inc. [7] propôs um framework de arquitetura interoperável para a implementação de DT em processos de usinagem durante as reuniões de demonstração ocorridas em 2016 com participante da Boeing, OMAC e do comitê TC184/SC4 da ISO. O framework permite execução da manufatura em malha fechada (Closed Loop Manufacturing) usando os resultados de inspeção dimensional e geométrica, em tempo real, usando padrões como STEP-NC, MTCConnect e QIF (Quality Information Framework).

O modelo de alto nível de STEP-NC desenvolvido pela ISO e liderado pela STEP Tools habilita a integração de dados que descrevem geometria, tolerâncias, operações de usinagem e resultados de inspeção que podem ser transferidos através de um formato de arquivo único. O MTCConnect disponibiliza os dados de monitoramento do processo para serem utilizados por clientes web via TCP/IP. E o QIF é usado para reunir os resultados de inspeção e avaliação de qualidade das peças.

### C. Modelo de Referência RAMI 4.0

O modelo de Referência de Arquitetura da Indústria 4.0 [8], RAMI 4.0 (*Reference Architecture Model for Industrie 4.0*), estabelece padrões a serem utilizados descrito em 3 dimensões:

- "Hierarchy Level" (IEC 62264, IEC 61512): dimensão associada aos níveis hierárquicos, incluindo o produto inteligente até o mundo conectado;
- "Life Cycle & Value Stream" (IEC 62890): a segunda dimensão refere-se ao ciclo de vida e fluxo de valor de um produto desde a sua concepção, passando por sua produção, manutenção até o fim de vida;
- "Layers": a terceira dimensão corresponde ao mapeamento de sistemas e máquinas, denominados de ativos, em suas representações virtuais, gêmeos digitais, desde os dispositivos até as entidades de negócio.

Um elemento fundamental da arquitetura é o Asset Administration Shell (AAS). De acordo com [5] o AAS do RAMI 4.0 foi descrito por alguns como um DT, mas permanece imaturo. O termo DT é referenciado apenas uma vez no padrão (RAMI 4.0 - Plattform Industrie 4.0 Part 1 de 2019).

### D. ISO 23247 - Framework de DT Para Manufatura

A norma ISO 23247 [9] recém-publicada oficialmente em 2021, foi desenvolvida pelo comitê TC 184/SC 4 da ISO com

o propósito de padronizar um framework de arquitetura de implementação de Digital Twin para aplicações de manufatura industrial no contexto da Indústria 4.0. O framework fornece um guia sobre como construir um DT para manufatura, especificando como os sistemas podem interoperar e como os dados de diferentes fontes podem ser integrados. O framework é composto por quatro domínios representados por quatro diferentes camadas de aplicação.

A primeira camada trata do domínio dos elementos/entidades de manufatura observáveis (OMEs - Observable Manufacturing Elements) que são todos os dispositivos, sensores, máquinas, materiais, produtos, e demais elementos físicos no chão de fábrica sobre os quais tem-se interesse em monitorar e controlar.

A segunda camada representa o domínio de coleta de dados e controle de dispositivos (DCDCE - *Data Collection and Device Control Entities*) que permitem monitorar e coletar dados de dispositivos sensoriais desde o domínio de OME, além de controlar os dispositivos atuados nesse mesmo domínio.

O DCDCE tem como principal tarefa manter a sincronização entre o domínio de OME e as entidades digitais. As entidades digitais encontram-se na terceira camada que corresponde ao domínio de DT, o qual é responsável por permitir o provisionamento, gerenciamento, monitoramento e otimização do sistema como um todo. Os OMEs são modelados e sincronizados dentro deste domínio para proporcionar serviços de monitoramento, simulação, análise de status, entre outros. É importante mencionar que este domínio constitui o núcleo do framework e as entidades de DT devem ser capazes de interagir e ser integradas com outras entidades de DT tanto internas como externas a fim de garantir a interoperabilidade do sistema.

Finalmente, tem-se o domínio de usuário, onde existem entidades como pessoas, dispositivos ou outros sistemas que usam os serviços e aplicações fornecidas pelo domínio de DT.

Cabe destacar que a ISO 23247 descreve um framework de implementação associado à dimensão Camadas ("Layers") do modelo RAMI 4.0 que apresenta o Digital Twin, mundo físico e mundo digital, bem como um Modelo de Negócios baseado em uma ou mais das funcionalidades a serem exploradas, sendo estratificado em 6 camadas: Asset, Integration, Communication, Information, Functional, Business. Diferente das demais dimensões do RAMI 4.0, a dimensão de DT da RAMI 4.0 ("Layers") não tem uma norma associada, até a presente data.

O trabalho inicial liderado pela STEP Tools junto ao Comitê da ISO/TC 184/SC 4 Industrial Data, que desenvolveu a AP 238 (norma STEP-NC), levou ao surgimento da norma ISO 23247. O framework proposto pela STEP Tools em 2016 [7] foi a base para o desenvolvimento da ISO 23247.

Neste trabalho, o framework de DT para manufatura padronizado pela ISO 23247 é tomado como base para a concepção de uma arquitetura de implementação de DT visando o monitoramento usando um dashboard em 2D e um ambiente de visualização/simulação 3D de operações de usinagem usando uma máquina CNC Haas Mini Mill, o que será descrito na seção III. De acordo com a norma ISO 23247 as funcionalidades presentes no DT têm níveis de maturi-

TABELA I  
COMPARATIVA DESTE TRABALHO COM TRABALHOS CORRELATOS

Proposta	Aplicação	Arquitetura	Protocolos de comunicação	Cloud storage
[2]	Monitoramento e controle	Sem padrão	OPC-UA, MTConnect	Sim
[10]	Manutenção preditiva	Sem padrão	Proprietário	Não
[11]	Manutenção preditiva	Sem padrão	OPC-UA	Não
[12]	Monitoramento e análise	Sem padrão	MTConnect	Não
Este trabalho	Monitoramento e simulação 3D	Padrão ISO 23247	MQTT, MTConnect	Sim

dade e complexidade distintas: monitoramento; acesso remoto; simulação 3D; comando; controle; otimizações; e análise preditiva (por exemplo, Manutenção Preditiva); permitindo a realimentação na visão do usuário final ou da máquina física. Estas funcionalidades podem ser exploradas como serviços na nuvem, criando assim um novo modelo de negócio, produto-serviço, para o fabricante da máquina inteligente.

#### E. Trabalhos Correlatos

Nesta subseção, são referenciados os trabalhos encontrados na literatura que especificamente tratam com a concepção e desenvolvimento de DT de máquinas-ferramenta para processos de usinagem. No entanto, um estudo de revisão de literatura mais abrangente é realizado por Huang et al. [13], onde analisam mais de 300 manuscritos sobre tecnologias de DT baseadas em IA para da Indústria 4.0 usadas desde 2016 até meados de 2020 considerando uma grande quantidade de aplicações no campo da manufatura.

O conceito de máquina-ferramenta ciber-física, referida como máquina-ferramenta 4.0, foi proposto inicialmente pelo professor Xun Xu [3]. Esse conceito foi levado ao nível de implementação no trabalho [2], que descreve o desenvolvimento de uma plataforma de máquina-ferramenta ciber-física baseada nos protocolos de comunicação OPC-UA e MTConnect, para habilitar a interoperabilidade de maneira eficiente com outras máquinas e aplicações de software. Em outro trabalho [14], expandem as capacidades da plataforma de máquina-ferramenta ciber-física incorporando um modelo de dados de alto nível baseado no STEP-NC usando uma estrutura orientada a objetos com informações associadas à máquina e seus componentes.

Luo et al. [10] propõem um método de modelagem unificado multi-domínio para construção de DT de máquinas-ferramentas voltados para aplicações de manutenção preditiva e diagnóstico de falhas. Uma demonstração da capacidade do modelo é apresentada na predição e diagnóstico de falhas de um centro de usinagem CNC.

Qiao et al. [11] apresentam um modelo de DT de cinco dimensões baseado em um modelo de predição híbrido que usa técnicas de *Deep Learning* para melhorar a predição de condição de máquina-ferramenta. Eles validam o modelo proposto usando dados de vibração da máquina em um processo de usinagem.

Tong et al. [12] apresentam uma aplicação de serviço de monitoramento de máquina em tempo real usando tecnologia

de fusão multi-sensor para realizar aquisição e processamento de dados de certas partes críticas da máquina. Validações são feitas através de exemplos de aplicação do DT desenvolvido sendo usado para visualização e análise de dados de processo, status de máquina e consumo de energia.

A literatura revisada até a presente data não relata especificações de frameworks de arquitetura DT usando o padrão ISO 23247, apesar de a sua publicação ser de novembro de 2021. Uma comparação deste trabalho com a literatura revisada, mais relevante, é apresentada na Tabela I. A proposta deste trabalho tem por objetivo o desenvolvimento e validação de uma arquitetura de DT para monitoramento e simulação 3D de um processo de usinagem realizado por um Centro de Usinagem Haas Mini Mill baseada no framework ISO 23247, a qual será descrita na seguinte seção.

### III. PROPOSTA DE ARQUITETURA DT BASEADA NA ISO 23247

A Figura 1 ilustra a proposta de arquitetura de implementação de DT aderente à norma ISO 23247 desenvolvida neste trabalho. Como estabelece a norma, os quatro domínios de aplicação, sincronizados entre si, são consolidados na arquitetura que tem como principal objetivo o monitoramento em 2D via dashboard e simulação/visualização em 3D de um centro de usinagem vertical CNC Haas Mini Mill, através de um modelo digital da máquina CNC. Tais domínios da arquitetura são descritos a seguir.

#### A. Elemento de Manufatura Observável - OME

A primeira camada, olhando de baixo para cima na Figura 1, corresponde ao domínio de elemento/entidade de manufatura observável, onde se encontra a máquina Haas Mini Mill a partir da qual serão coletados dados de processo e de status de máquina.

A Haas Mini Mill disponibiliza uma interface RS-232 (DB 25) e um protocolo de aplicação Haas para obter dados da máquina. Utilizou-se de um Raspberry Pi 2 com adaptador USB-RS232 para estabelecer o canal de comunicação com o Centro de Usinagem, ou seja, o Gateway RS-232/Ethernet-TCP/IP. O protocolo de comunicação Haas é constituído por um conjunto de macro-comandos que podem então ser enviados à máquina para obter dados da máquina ou controlar alguns dos dispositivos atuados. Assim, por exemplo, o comando "Q600 3027" permite obter a velocidade atual do fuso da máquina em revoluções por minuto.

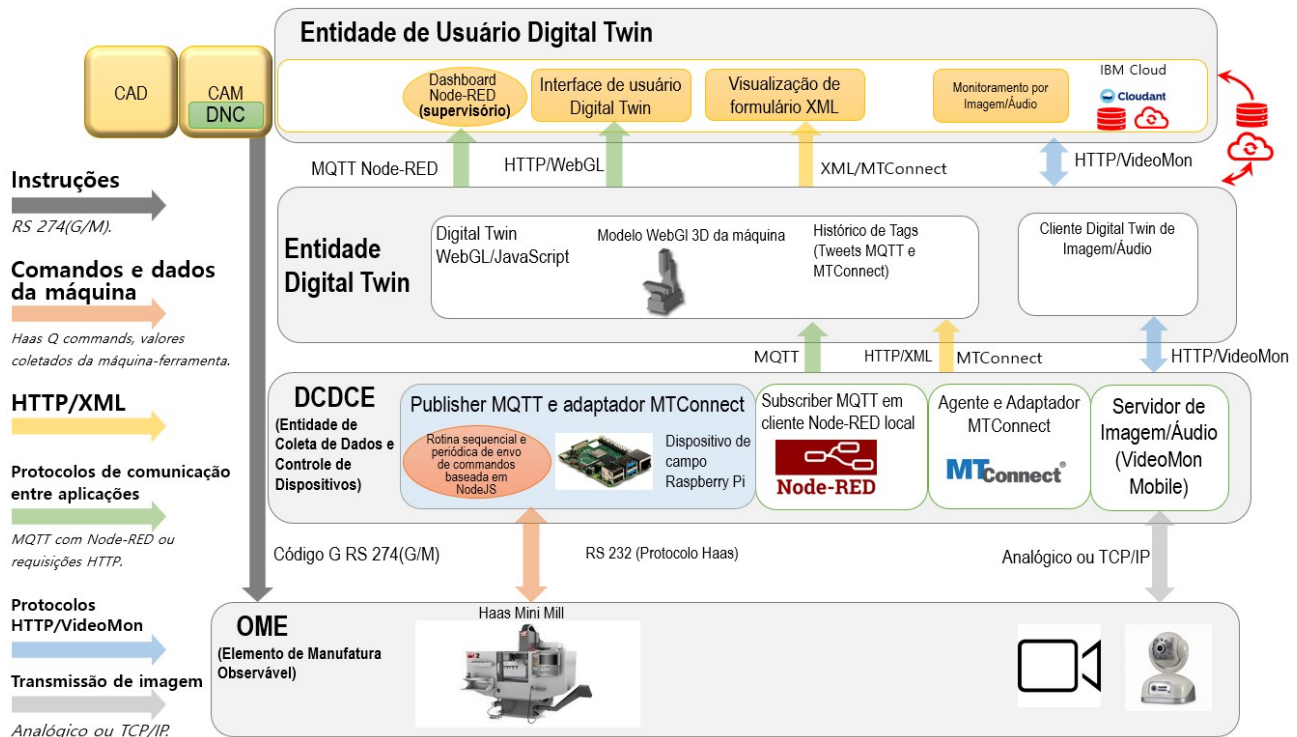


Fig. 1. Arquitetura de DT baseada na ISO 23247 [9].

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.

Além da máquina Haas, tem-se neste domínio um sistema de câmeras e microfones para o monitoramento de imagem e áudio com *streaming* de vídeo usando o sistema do VideoMon. O detalhamento deste sistema foge do escopo deste trabalho, no entanto, é amplamente descrito na referência [15].

**B. Entidade de Coleta de Dados e Controle de Dispositivos - DCDCE**

A segunda camada da arquitetura corresponde ao domínio de coleta de dados e controle de dispositivos atuados presentes no domínio anterior de OME. Nesta parte da arquitetura, uma placa de desenvolvimento com microprocessador Raspberry Pi 2 tem sido usada como sistema de aquisição de dados incorporado à estrutura da máquina e conectado à mesma via cabo USB serial.

Uma aplicação de servidor tem sido desenvolvida usando tecnologia de Javascript no ambiente execução Nodejs, a qual é embarcada na placa Raspberry Pi 2. Esta aplicação comunica-se com a máquina via USB, enviando os macrocomandos do protocolo de aplicação Haas para obter os dados de interesse, e disponibilizá-los ao domínio de DT através dos diferentes sockets TPC/IP (canais de comunicação) usando protocolos de aplicação MTConnect e MQTT, sendo estes

recomendados pela ISO 23247, bem como, o OPC-UA, que não está disponível no Centro de Usinagem, que não trabalha com OPC.

Um *broker* de MQTT recebe os dados da máquina, os formata e disponibiliza para qualquer *subscriber* de MQTT interessado nestes dados. Temos ainda um serviço Node-Red sendo executado no Gateway Raspberry Pi 2, programado com um *subscriber* de MQTT para obter os dados desde o *broker* MQTT em Nodejs e envia-los diretamente à nuvem da IBM para armazenamento e visualização.

Por outro lado, um adaptador de MTConnect também foi desenvolvido para receber os dados da máquina via USB, passa esses dados para um agente MTconnect a través de comunicação TCP, e este último é o encarregado de formatar os dados dentro de uma estrutura de dados XML e disponibilizá-los via API REST (Application Programming Interface Representational State Transfer) para que sejam consumidos por qualquer cliente web interessado.

Além disso, neste domínio também encontra-se o sistema de VideoMon que fornece imagem de vídeo e áudio.

Os detalhes de implementação relacionados a este domínio são relatados na seção IV.

**C. Domínio de DT**

A terceira camada constitui o domínio do DT, que por sua vez representa o núcleo do sistema desenvolvido. Neste ponto, existem os serviços de aplicação e as funcionalidades do DT que são fornecidas aos usuários interessados, que podem ser as pessoas/usuário final e/ou outros sistemas. Os serviços fornecidos pelo DT neste trabalho são o monitoramento com visualização 2D (dashboard) e visualização 3D (simulação 3D)

da máquina CNC Haas Mini Mill, os mais básicos previstos pela ISO 23247.

TABELA II  
COMANDOS Q ENVIADOS PARA A MÁQUINA HAAS E OS DADOS ATRELADOS A ESSES.

Rótulo	Descrição
'Q100'	Obtém a disponibilidade da máquina.
'Q104'	Comando referente ao modo de execução atual da máquina.
'Q500'	Coleta informações de status da máquina, programa e execução deste.
'Q600'	Comando que coleta variáveis da condição atual da máquina e fuso, possui vários sub-comandos descritos abaixo.
'Q600 5021'	Obtém a posição no eixo x do fuso.
'Q600 5022'	Obtém a posição no eixo y do fuso.
'Q600 5023'	Obtém a posição no eixo z do fuso.
'Q600 3027'	Comando referente à velocidade do fuso.
'Q600 1094'	Obtém o nível de líquido refrigerante presente na máquina.
'Q600 1098'	Coleta a porcentagem da carga aplicada pelo fuso à peça.

TABELA III  
PARÂMETROS DA COMUNICAÇÃO RS-232 ENTRE A MÁQUINA HAAS E A DCDCE.

Parâmetro de Comunicação	Valor
baud rate	38400 (restrição Raspberry Pi 2).
parity	Par.
stop bits	1,
data bits	7,
heartbeat (período de envio de comandos)	500 milissegundos.

Deve ser salientado que existem funcionalidades DT de maior complexidade exigindo um maior grau de maturidade no desenvolvimento. As duas funcionalidades implementadas são descritas pela ISO como serviços do Domínio do DT, apesar de sua baixa complexidade quando comparado com serviços de Manutenção Preditiva baseada em Inteligência Artificial ou de manufatura em malha fechada, com realimentação baseada em dados de inspeção dimensional ou geométrica.

Estes serviços são suportados por dados de processo e de status de máquina associado aos três diferentes fluxos de dados desenvolvidos:

- (1) um fluxo baseado em MQTT e o ambiente de programação gráfica de Node-Red, onde este último está diretamente conectado à nuvem da IBM via autenticação por *token* para permitir armazenamento de dados e visualização e monitoramento em um dashboard criado dentro da própria plataforma do Cloudant;
- (2) um segundo fluxo baseado em MQTT alimentando um ambiente de simulação 3D Web criado com Reactjs e Threejs/WebGL contendo o modelo 3D da máquina HaasMini Mill;
- (3) um fluxo baseado no protocolo MTConnect, onde os dados de máquina podem ser consumidos através de uma API REST usando uma estrutura de dados em XML.

#### D. Domínio de Usuário de DT

Neste domínio temos os interessados em consumir os serviços fornecidos no domínio do DT, podendo ser pessoas ou sistemas. No caso, os usuários são as pessoas, integrantes do laboratório LaDPRER da Universidade de Brasília, que fazem uso da máquina.

No entanto, pode ser estendido a usuários externos de empresas do setor industrial que requeiram serviços de monitoramento e simulação 3D de máquinas-ferramenta CNC, bem como, o sistema poderia gerar mensagens de SMS (Short Message Service) para notificação do operador de máquina sobre determinadas condições operacionais, alarmes, término de usinagem, entre outras, usando no Node denominado *node-red-contrib-smstools* (<https://tinyurl.com/2p942wh7>) [21].

#### IV. DESCRIÇÃO E RESULTADOS DA IMPLEMENTAÇÃO

O *setup* experimental do trabalho é composto pela máquina CNC Haas Mini Mill conectada à placa Raspberry Pi 2 via cabo USB-RS232. O Raspberry Pi 2 tem como Sistema Operacional o Raspberry Pi OS. Foi embarcada uma aplicação de servidor de Nodejs executado como serviço, que possui um módulo de comunicação serial através do qual são enviados macro-comandos à máquina para recuperar dados de status da mesma.

Alguns dos comandos usados pela aplicação são listados na Tabela II. O conjunto de comandos é enviado a cada 500 ms, tempo de ciclo, sendo executado no programa principal da aplicação no gateway Raspberry Pi 2. Para garantir a sincronização da comunicação entre o módulo USB da aplicação de servidor e a máquina Haas, sem perda de dados, foram configurados com os parâmetros de comunicação dispostos na Tabela III.

Conforme Rodriguez et. al [22] usando MTConnect, os dados podem ser amostrados numa frequência de no máximo 1 segundo, entre o adaptador e o agente para amostrar dados, neste caso o experimento trabalhou com um Arduino como Gateway usando a RS-232.

A frequência de amostragem da implementação em tela foi de 500 ms, sendo um tempo adequado usando um gateway baseado no Raspberry Pi 2, em função das restrições da serial e da capacidade de processamento do hardware utilizado. Nos CNCs da Haas, desde 2016 a RS-232 não é mais utilizada. Atualmente usam Ethernet/TCP/IP para Comando Numérico Distribuído (DNC). Nas máquinas Haas legadas e de outros fabricantes, a RS-232 é um fator limitante em função da sua velocidade e as restrições do hardware utilizado, Raspberry Pi 2, e quantidade de grandezas monitoradas do processo, resultando em uma baixa frequência de amostragem do conjunto de dados.

O módulo obtenção de dados da máquina via USB-RS232 é comum para os três fluxos de aplicação desenvolvidos e etiquetados na Figura 2 com os números 1, 2 e 3 respectivamente. Estes fluxos são detalhados a seguir.

#### A. Fluxo 1: Servidor MQTT com Conexão à Nuvem da IBM

O fluxo número 1 tem como propósito levar os dados coletados da máquina à nuvem da IBM para armazenamento

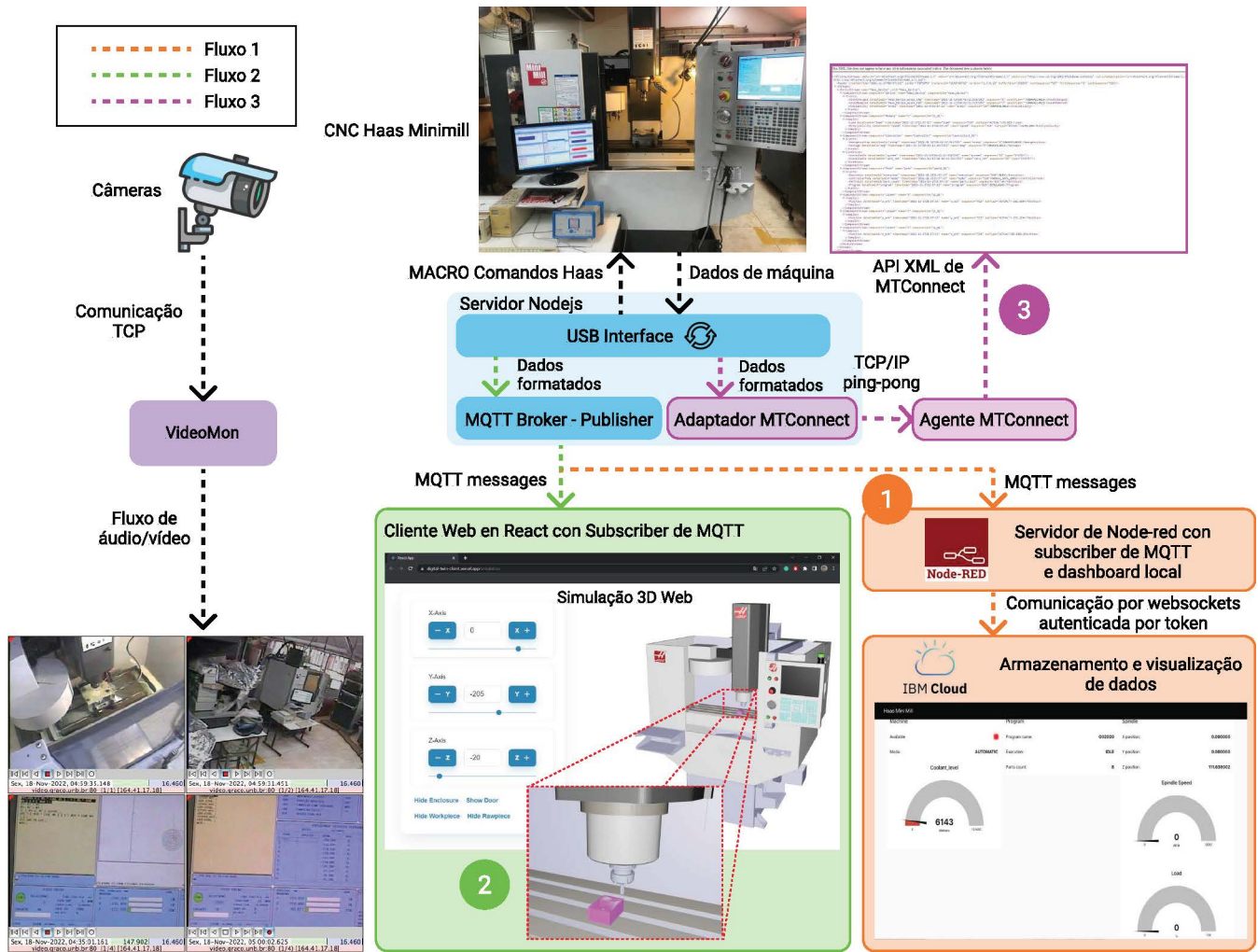


Fig. 2. Fluxos de implementação desenvolvidos [16]–[20], normalmente, off-line, Haas e plataforma DT desligados.

e visualização. Neste fluxo, faz-se uso do protocolo MQTT, o qual é um protocolo padrão de comunicação bidirecional caracterizado por ser leve e eficiente, e está baseado numa arquitetura de *publisher/subscriber*. Diferente da arquitetura cliente-servidor, onde o cliente faz requisições de dados ao servidor, na arquitetura *publisher/subscriber*, o *publisher* envia os dados relacionados a um tópico cada vez que existem mudanças e os *subscribers* inscritos a tal tópico podem receber as atualizações de dados que mudaram.

Um *broker* de MQTT foi incorporado na aplicação de servidor de Nodejs (Figura 2) usando a biblioteca de javascript *aedes.js* instalada via *npm* (*Node Package Manager*). O *broker*, usa um único *publisher*, recebendo os dados que chegam da máquina através do módulo USB-RS232 da aplicação. A seguir, formata os dados dentro de um objeto e os associa a um tópico principal denominado “haas/minimill”. Assim, o objeto de dados fica disponível para qualquer *subscriber* de MQTT dentro da rede inscrito no tópico.

Uma lista dos dados que são formatados e publicados pelo *publisher* de MQTT é apresentada na Tabela IV.

Dentro deste mesmo fluxo, um servidor de Node-Red também foi embarcado na placa Rapsberry Pi 2 executando como um serviço que contém um *subscriber* de MQTT inscrito

ao tópico “haas/minimill”. Node-Red é uma plataforma de programação gráfica voltada para IoT que foi usada neste trabalho devido a sua facilidade de integração com plataformas e serviços da IBM. Foram instalados *plug-ins* dentro do Node-Red para agregar comunicação com MQTT mesmo que para estabelecer conexão com o serviço na nuvem Cloudant da IBM. Cabe mencionar que também foi criado um dashboard dentro do Node-Red para visualização local dos dados no chão de fábrica.

A conexão entre o servidor de Node-Red (<https://tinyurl.com/9m4w7xw>) [16] com a nuvem da IBM usa um *token* de autenticação disponibilizado pela plataforma Cloudant associado à conta de usuário. Neste trabalho, um novo projeto foi criado dentro da plataforma Cloudant para armazenar os dados de máquina sendo enviados pelo servidor de Node-Red. Além disso, foi criado um dashboard na nuvem (<https://tinyurl.com/2sj85rnw>) [17] com as ferramentas fornecidas pela plataforma para visualização dos dados em tempo real quando a conexão com a máquina é estabelecida (fluxo 1 na Figura 2).

Para exemplificar a coleta de dados armazenados na nuvem IBM [19], é apresentado na Figura 3 um gráfico que relaciona a posição do atuador Z, negativo, com relação à carga aplicada

ao longo do tempo de execução de uma rotina de aquecimento da máquina (warm-up) e usinagem.

TABELA IV  
PARÂMETROS OBTIDOS DA HAAS MINI MILL

Rótulo	Descrição
status	Indica se a máquina está respondendo aos comandos enviados, presente somente na aplicação MQTT.
avail	Indica se a máquina está disponível para obtenção de dados.
mode	Indica o modo de execução da máquina (automático ou manual).
program execution	Mostra o nome do programa em execução. Indica se a máquina está trabalhando, ociosa ou com a emergência ativa.
part_count	Contagem de peças usinadas pela máquina até então.
x_act	Posição no eixo X do fuso.
y_act	Posição no eixo Y do fuso.
z_act	Posição no eixo Z do fuso.
speed	Velocidade de rotação do fuso.
coolant_level	Mostra o nível de líquido refrigerante presente na máquina.
load	Indica a porcentagem da carga aplicada pelo fuso à peça.

### B. Fluxo 2: Servidor MQTT com Simulação 3D WebGL

Este fluxo faz uso do módulo de servidor MQTT descrito anteriormente para o fluxo 1. Basicamente, um *subscriber* de MQTT é disponibilizado para a aplicação de cliente web construída com *Reactjs*. Para criar o *subscriber* do lado do cliente foi usada a biblioteca *socket.io*, a qual fornece uma série de funções para conexão e envio de dados via *websockets*.

Uma vez estabelecida a conexão com o *broker* de MQTT associado à aplicação de servidor desenvolvida, o cliente Web recebe os dados para alimentar uma simulação 3D da movimentação dos eixos e rotação do fuso da máquina CNC Haas Mini Mill. O ambiente de simulação 3D foi construído usando a biblioteca *three-fiber*, que é uma versão baseada em componentes para *Reactjs* da biblioteca base *threejs*, baseada em WebGL.

É necessário importar o modelo 3D da máquina Haas Mini Mill, em formato "\*.amf", dentro de um espaço tridimensional no navegador, como mostrado na Figura 2. O modelo da máquina em WebGL, "off-line" (máquina normalmente desligada), pode ser simulado na URL <https://tinyurl.com/mjt3xhsu> [18]. O modelo 3D da máquina virtual é dividido em partes referentes à estrutura base da máquina, porta, ferramenta montada no cone ISO BT40 e cada um dos eixos (x, y e z), que são montadas dentro do espaço 3D da aplicação.

Um modelo 3D da peça sendo fabricada também foi incorporado na simulação usando o formato de arquivo "\*.stl". Além disso, a interface de usuário possui funcionalidades para mostrar/ocultar o modelo da peça, mostrar/ocultar a estrutura da máquina, e abrir/fechar a porta da máquina. Existem controles para movimentar os eixos da máquina simulando seu movimento off-line.

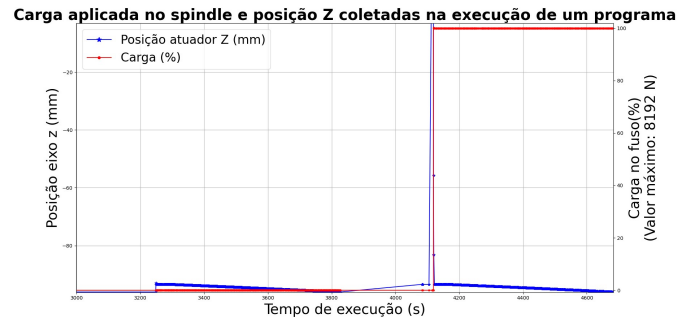


Fig. 3. Gráfico gerado com dados históricos armazenados no IBM Cloudant [19]: início de uma usinagem com variação da carga aplicada no fuso (<https://tinyurl.com/yxektrk9>).

### C. Fluxo 3: Serviço MTConnect

Este fluxo está relacionado a um canal de comunicação baseado no protocolo padrão MTConnect. Este padrão de comunicação é unidirecional, só leitura, e define tanto os modelos de informação quanto os protocolos de comunicação que devem ser usados dentro de uma conexão entre máquinas-ferramentas e clientes Web.

Um adaptador de MTConnect foi desenvolvido como um componente da aplicação de servidor de Nodejs, que recebe os dados de máquina via módulo USB-RS232. Em seguida, formata os dados como uma linha de texto com formato (SHDR-Simple Hierarchical Data Representation) com a forma "Timestampnamevaluevalue".

O adaptador envia a linha de texto ao agente MTConnect via TCP/IP usando um mecanismo de comunicação de *ping/pong*. O agente MTConnect usado neste trabalho foi desenvolvido em C++ pelo MTConnect Institute e disponibilizado online. O agente foi instalado como serviço em um computador conectado à mesma rede da máquina para permitir conexão com o adaptador embarcado no Raspberry Pi 2 (DCDCE).

Os dados de máquina são disponibilizados pelo agente MTConnect via API REST usando uma estrutura de dados XML (Figura 2) que pode ser consumida por clientes Web através de conexão HTTP.

### D. Monitoramento de Áudio e Vídeo Progressivo

Sobre a parte esquerda da Figura 2, é possível observar o sistema de monitoramento de áudio e vídeo que também faz parte da plataforma de DT desenvolvida visando uma maior imersão no mundo físico para melhorar a tomada de decisão. As imagens capturadas pelas câmeras apontam para a máquina Haas, lado de fora e dentro da máquina, permitindo visualizar o controlador e o processo de usinagem (<http://video.graco.unb.br>) [20].

## V. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentado o desenvolvimento e a implementação de uma arquitetura de DT para um processo de usinagem usando o Centro de Usinagem Haas Mini Mill, sendo que os adaptadores (MTConnect e MQTT) de comunicação com Haas via USB-RS232, estão disponível em [23]. A arquitetura proposta baseou-se no modelo de framework de

implementação de DT para manufatura normalizado pela ISO 23247. Cada domínio do framework da norma foi descrito e detalhado dentro do contexto de aplicação deste trabalho. Protocolos de comunicação como MQTT e MTConnect foram selecionados para as implementações realizadas, sendo estes recomendados pela ISO 23247. O protocolo MQTT tem a vantagem sobre o protocolo MTConnect no sentido de ser bidirecional e não precisar de requisições por parte do cliente para atualizar os dados.

O trabalho demonstra uma aplicação em manufatura com relevância em relação ao estado da arte da Indústria 4.0 e IoT, em conformidade com as normatizações recém-criadas para o desenvolvimento de arquiteturas Digital Twin. Esta abordagem utilizada, baseada no framework da ISO 23247, pode ser aplicada em outras áreas de IoT que requeiram o uso de DT como agricultura de precisão, gestão de frotas de aviões e veículos, entre outros. A visualização pela interface de simulação 3D e dashboard (2D) facilita a leitura e entendimento do estado momentâneo da máquina e seus parâmetros de operação pelos supervisores de processo, permitindo uma gestão do ativo mais eficiente.

Em trabalhos futuros pretende-se desenvolver soluções de *data analytics* sobre os dados armazenados na nuvem para funcionalidade de DT visando manutenção preditiva, assim como a melhoria no DT de simulação 3D, agregando novas funcionalidades e melhorando a experiência do usuário, complementando as duas funcionalidades básicas validadas no trabalho em tela, monitoramento e simulação 3D.

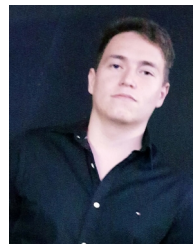
#### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq e FAPDF pelos suportes financeiros para o desenvolvimento do presente trabalho.

#### REFERÊNCIAS

- [1] M. d. M. Fernandes, J. A. Bigheti, R. P. Pontarolli, and E. P. Godoy, "Industrial automation as a service: A new application to industry 4.0," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 19, p. 2046–2053, May 2021.
- [2] C. Liu, H. Vengayil, Y. Lu, and X. Xu, "A cyber-physical machine tools platform using opc ua and mtconnect," *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 51, pp. 61–74, 2019.
- [3] X. Xu, "Machine Tool 4.0 for the new era of manufacturing," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 92, pp. 1893–1900, sep 2017.
- [4] Y. Lu, C. Liu, K. I.-K. Wang, H. Huang, and X. Xu, "Digital twin-driven smart manufacturing: Connotation, reference model, applications and research issues," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 61, p. 101837, 2020.
- [5] M. Kerin, D. T. Pham, J. Huang, and J. Hadall, "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, 2023.
- [6] E. Glaessgen and D. Stargel, "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*, 2012.
- [7] I. STEP Tools, "Digital Thread and Digital Twin Demonstrations at Future of Flight, <https://www.steptools.com/blog/>, Acesso em: 17 nov. 2022." 2016.
- [8] M. Hankel, "The reference architectural model industrie 4.0 (rami 4.0) - bosch rexroth," 04 2015.
- [9] ISO 23247-1, "Automation systems and integration — digital twin framework for manufacturing — part 1: Overview and general principles," 2021.
- [10] W. Luo, T. Hu, Y. Ye, C. Zhang, and Y. Wei, "A hybrid predictive maintenance approach for cnc machine tool driven by digital twin," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 65, p. 101974, 2020.

- [11] Q. Qiao, J. Wang, L. Ye, and R. X. Gao, "Digital twin for machining tool condition prediction," *Procedia CIRP*, vol. 81, pp. 1388–1393, 2019. 52nd CIRP Conference on Manufacturing Systems (CMS), Ljubljana, Slovenia, June 12-14, 2019.
- [12] X. Tong, Q. Liu, S. Pi, and Y. Xiao, "Real-time machining data application and service based on imt digital twin," *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol. 31, p. 1113–1132, 2020.
- [13] Z. Huang, Y. Shen, J. Li, M. Fey, and C. Brecher, "A survey on ai-driven digital twins in industry 4.0: Smart manufacturing and advanced robotics," *Sensors*, vol. 21, no. 19, 2021.
- [14] T. Kubota, R. Hamzeh, and X. Xu, "Step-nc enabled machine tool digital twin," *Procedia CIRP*, vol. 93, pp. 1460–1465, 2020. 53rd CIRP Conference on Manufacturing Systems 2020.
- [15] A. J. Álvares, H. A. Akitaya, and B. R. Raulino, "Vidaatrack – vehicle monitoring system based on video, gps, gsm/gprs/3g and google maps," 11 2009.
- [16] A. J. Álvares, E. Rodriguez, and J. V. A. Cabral, "Servidor node-red máquina haas mini mill na nuvem ibm." url< <https://tinyurl.com/9m4w7xw> & <https://tinyurl.com/4u784kap> >, 2022.
- [17] A. J. Álvares, E. Rodriguez, and J. V. A. Cabral, "Dashboard associado ao servidor nodored máquina haas mini mill na nuvem ibm." url< <https://tinyurl.com/2sj85rnw> >, 2022.
- [18] A. J. Álvares, E. Rodriguez, and J. V. A. Cabral, "Simulação webl máquina haas mini mill." url< <https://tinyurl.com/mjt3xhsu> >, 2022.
- [19] A. J. Álvares, E. Rodriguez, and J. V. A. Cabral, "Banco de dados da máquina haas mini mill na nuvem ibm." url< <https://tinyurl.com/yxektrk9> >, 2022.
- [20] A. J. Álvares and E. M. Rubino, "Videmonmobile: Monitoramento áudio e vídeo do chão de fábrica." url< <http://video.graco.unb.br> >, 2010.
- [21] P. Desenvolvedor, "Nodes for handling messages using smstools3 daemon, version: 1.1.1." url< <https://tinyurl.com/2p942wh7> >, 2016.
- [22] E. Rodriguez, J. P. Rodriguez, A. J. Alvares, C. Riaño, and L. E. de Oliveira, "Developing a mtconnect framework for rewrap additive manufacturing machines," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 52, pp. 2507–2512, 2019.
- [23] E. Rodriguez, A. J. Álvares, and J. V. A. Cabral, "Mtconnect and mqtt adapters for haas." url< <https://tinyurl.com/msjkb3pk> >, 2022.



**João Vítor A. Cabral** is a B. Mechatronic Engineering student at University of Brasília. Member of the Innovation Group on Industrial Automation (GIAI), his research interests concern industrial automation, Internet of Things, communication protocols, Industry 4.0 and Digital Twins.



**Efraim Rodriguez** received the B.S. degree in mechatronics engineering from the University of Pamplona, Colombia, and the M.S. degree in mechatronic systems from the University of Brasília, Brazil. He is currently pursuing his Ph.D. degree in mechatronic systems with the department of mechanical engineering from the University of Brasília. His research areas are additive manufacturing, industrial robotics and advanced manufacturing systems.



**Alberto J. Alvares** is a Titular Professor at the University of Brasília, working in Mechatronics Engineering. He graduated in Mechanical Engineering from the University of Brasília (1986), a Master in Mechanical Engineering from the Federal University of Santa Catarina (1990), Doctorate in Mechanical Engineering from the Federal University of Santa Catarina (2005) and Post-doctorate from the University of Jaume in Spain (2017).