

Virtualização de um Sistema Flexível de Fabrico no âmbito da Indústria 4.0

João Vítor Peroni de Almeida - 39624

Trabalho realizado sob a orientação de

Prof. Paulo Leitão

Prof. Joaquim de Mira Jr.

Prof. José Barbosa

Mestrado em Engenharia Industrial - Eletrotécnica

2019-2020

Virtualização de um Sistema Flexível de Fabrico no âmbito da Indústria 4.0

Dissertação de Mestrado

Mestrado em Engenharia Industrial

Escola Superior de Tecnologia e Gestão

João Vítor Peroni de Almeida - 39624

2019-2020

A Escola Superior de Tecnologia e de Gestão não se responsabiliza pelas opiniões expressas neste relatório.

Declaro que o trabalho descrito neste relatório é da minha autoria e é da minha vontade que o mesmo seja submetido a avaliação.

João Vítor Peroni de Almeida - 39624

Dedicatória

Dedico este trabalho principalmente à minha família, que foi meu suporte durante todo este tempo em que estive distante. Dedico também aos meus professores, amigos e colegas, que me ajudaram imensamente no desenvolvimento deste trabalho e tornaram possível a sua conclusão.

Agradecimentos

Agradeço especialmente e à minha família por todo o amor e suporte durante todo este tempo. Aos meus amigos e colegas pelos aprendizados, conversas, rodas de violão e risadas que tornaram esta experiência muito mais agradável. À UTFPR e ao IPB que me possibilitaram essa experiência única na minha vida e que me abriu portas que nunca mais serão fechadas. Ao CeDRI por todo o apoio e acompanhamento que possibilitou a realização deste trabalho. Ao Centro Ciência Viva de Bragança, especialmente às minhas gestoras e meus professores, pela compreensão e apoio durante o desenvolvimento deste trabalho.

Resumo

A indústria 4.0 é um conceito recente e cada vez mais aplicado na otimização de processos de fabrico. Dentre as tecnologias mais utilizadas, o digital twin apresenta uma forma de se monitorizar e controlar remotamente processos industriais utilizando ferramentas de modelagem 3D e comunicação de dados, criando-se modelos virtuais do processo industrial. Estes são então alimentados com os dados reais, caracterizando assim um gêmeo digital do sistema real. Este trabalho apresenta o desenvolvimento do digital twin de um sistema de manufatura flexível composto por quatro células de usinagem e um robô manipulador. Para o desenvolvimento do sistema foram inicialmente desenvolvidos modelos 3D de todo o sistema de manufatura utilizando-se ferramentas de desenho CAD 3D, então exportados para o ambiente de simulação V-REP. Os modelos foram alimentados com os dados coletados em tempo real do controlador do sistema através do desenvolvimento de uma aplicação de aquisição de dados em JAVA, e o desenvolvimento de scripts no ambiente de simulação, dinamizando o sistema virtual. Foi desenvolvido um sistema de monitorização de dados e deteção de falhas para auxiliar o usuário em tomadas de decisão, utilizando a plataforma Node-Red. Após a conclusão do trabalho, foi possível a visualização remota do sistema, monitorização de dados em tempo real e alarmes de falhas caso haja algum comportamento inesperado do sistema. O uso de sistemas computacionais que possibilitem menor latência é encorajado, de forma a aplicar a tecnologia em aplicações que necessitam de maior precisão, tal como uso de sistemas de machine learning para otimizar algoritmos de deteção de falhas.

Palavras-chave: Digital Twin; IoT; Indústria 4.0; Sistemas Ciber-físicos;

Abstract

Industry 4.0 is a recent and increasingly applied concept into optimization of manufacturing processes. Among the most used technologies, the digital twin presents a way to remotely monitor and control industrial processes, using 3D modeling and data communication tools to create virtual models of industrial process. These are then fed with real data, therefore characterizing a digital twin of the real system. This work presents the development of the digital twin of a flexible manufacturing system composed of four machining cells and a manipulator robot. For the development of the system, 3D models of the entire manufacturing system were created using 3D CAD drawing tools, then exported to the V-REP simulation environment. The models were fed with data collected in real time from the system's controller through the development of a data acquisition application in JAVA. The development of scripts in the simulation environment enabled the dynamizing of the virtual system. A data monitoring and fault detection system was developed for assisting the users in decision making, using Node-Red. After the work's conclusion, the remote system visualization, real-time data monitoring and activation of alarms were made possible, in the event of an unexpected system behavior. The use of computer systems that allow for less latency is encouraged, in order to apply the technology to applications that need higher accuracy, such as using machine learning techniques to optimize the fault detection algorithms.

Keywords: Digital Twin; IoT; Industry 4.0; Cyber-Physical Systems;

Conteúdo

Lista de Acrónimos	xvii
1 Introdução	1
1.1 Enquadramento	2
1.2 Objetivos	2
1.3 Estrutura do Documento	3
2 Estado da Arte	5
2.1 Indústria 4.0	5
2.2 Cyber-Physical Systems	11
2.3 Digital Twin	16
2.4 Desenvolvimento do SMF - Gêmeo Físico	20
2.5 Integração do <i>Digital Twin</i> - Simulação	21
3 Análise do Sistema e Abordagem Proposta	27
3.1 Caracterização do Sistema	27
3.2 Células Fischertechnik e CLP	28
3.3 Robô Manipulador	31
3.4 Abordagem Proposta para Desenvolvimento do Digital Twin	34
4 Desenvolvimento	39
4.1 Desenvolvimento dos modelos virtuais 3D	39
4.2 Desenvolvimento do sistema de visualização remota 3D	40

4.3	Desenvolvimento do sistema de aquisição e tratamento de dados	42
4.4	Desenvolvimento do Ambiente de Visualização	47
4.5	Desenvolvimento do Sistema de Monitorização	49
5	Resultados e Discussão	53
5.1	Aplicação de Aquisição de Dados	53
5.2	Ambiente de Visualização	54
5.3	Ambiente de Monitorização	56
5.4	Principais Dificuldades Encontradas	57
6	Conclusões	59
6.1	Trabalhos Futuros	60
A	Proposta Original do Projeto	A1

Lista de Tabelas

4.1	Endereçamento de memórias dos sensores e atuadores.	42
-----	---	----

Lista de Figuras

2.1	Histórico das revoluções industriais [8].	6
2.2	Estrutura de um sistema de produção Smart Factory. [13].	10
2.3	Pilares da indústria 4.0 [20].	12
2.4	Princípio de funcionamento do <i>Digital Twin</i> [37]	17
2.5	Publicações relacionadas com a palavra-chave " <i>digital twin</i> " nos últimos 10 anos.[41]	18
2.6	CPS que possibilita virtualização [1]	21
2.7	Características obtidas através dos modelos virtuais multiníveis [53].	23
2.8	Níveis de integração do <i>Digital Twin</i> [54]	24
3.1	Sistema de manufatura flexível a ser virtualizado.	28
3.2	Controlador Lógico Programável (CLP) Schneider Modicon m340 [58].	29
3.3	Relacionamento de rede tipo <i>master-slave</i> [59].	30
3.4	Fluxograma representando o fluxo das peças usinadas no Sistema de Manufatura Flexível (SMF)	32
3.5	Fluxograma representando os processos de usinagem da célula de punção	33
3.6	Fluxograma representando os processos de usinagem da célula indexada	33
3.7	Proposta de abordagem para desenvolvimento do Digital Twin.	35
3.8	Estrutura do Remote Application Programming Interface (API) [64].	37
4.1	Modelos 3D das células de fabrico no ambiente do Solidworks	40
4.2	Modelos 3D das células de fabrico no ambiente do Virtual Robotics Experimentation Platform (V-REP).	41

4.3	Fluxograma de aplicação do protocolo Modbus/Transmission Control Protocol (TCP) [67].	44
4.4	Esquema lógico da classe ContaTempo.	45
4.5	Fluxograma de funcionamento do algoritmo de detecção de falhas.	46
4.6	Comunicação baseado em tópicos [68].	47
4.7	Exemplo de aplicação do <i>Remote API</i> para controlo de movimentação. . .	49
4.8	Desenvolvimento e configuração do ambiente de monitorização Node-Red através do protocolo de comunicação Message Queue Telemetry Transport (MQTT).	50
5.1	Sistema Real vs Sistema Virtual.	54
5.2	Detalhe do ambiente de visualização remota do <i>Digital Twin</i> (V-REP). . .	55
5.3	Painel de Monitorização do <i>Digital Twin</i>	56

Lista de Acrónimos

API Application Programming Interface.

CAD Computer Aided Design.

CC Corrente Contínua.

CeDRI Centro de Investigação em Digitalização e Robótica Inteligente.

CLP Controlador Lógico Programável.

CPS Cyber-Physical System.

ESTiG Escola Superior de Tecnologia e Gestão.

GPS Global Positioning System.

GRP Glass Reinforced Polyester.

GUI Graphics User Interface.

HMI Human-Machine Interface.

I/O Inputs/Outputs.

IDE Integrated Development Environment.

IIoT Industrial Internet of Things.

IoT Internet-of-Things.

IPB Instituto Politécnico de Bragança.

LCAR Laboratório de Controlo, Automação e Robótica.

M2M Machine-to-machine.

MQTT Message Queue Telemetry Transport.

MTBF Mean Time Between Failures.

NFC Near Field Communication.

RFID Radio-Frequency IDentification.

SCADA Supervisory Control and Data Acquisition.

SMF Sistema de Manufatura Flexível.

TCP Transmission Control Protocol.

TCP/IP Transmission Control Protocol / Internet Protocol.

URDF Unified Robot Description Format.

V-REP Virtual Robotics Experimentation Platform.

WLAN Wireless Local Area Network.

WSN Wireless Sensors Network.

Capítulo 1

Introdução

A evolução de tecnologias de robótica e comunicação têm permitido uma maior integração em ambientes industriais nos tempos atuais, possibilitando o desenvolvimento de sistemas integrados e interconectados. A Indústria 4.0 é um conceito ainda recente e pouco aplicado na prática, em que equipamentos possuem sistemas de troca de informações e controlo descentralizados, realizando comunicações entre si em tempo real e ajustando-se às condições externas por meio de algoritmos adaptáveis.

A união do ambiente físico de produção e do ambiente virtual de troca de informações, controlo e visualização do sistema é conhecido como Cyber-Physical System (CPS) [1], que pode ter variadas funções a depender da aplicação. Um CPS que permite a visualização do ambiente de fabrico em tempo real, utilizando modelos 3D para permitir ao usuário a análise de funcionamento do sistema de forma remota é denominado *Digital Twin*. É possível observar diversas aplicações deste conceito no ambiente industrial, como para análise de dados em diferentes níveis do sistema (micro ao macro), análise do ciclo de vida do produto, prevenção e predição de falhas de sistemas em funcionamento, simulações comportamentais, entre outros. Desta forma, possibilita-se a análise do sistema de forma virtual de forma a economizar tempo e recursos e otimizar o sistema produtivo.

O uso das diferentes tecnologias englobadas pelo paradigma da Indústria 4.0 é necessário para o desenvolvimento e implementação do *Digital Twin* em um ambiente industrial, como tecnologias de Internet-of-Things (IoT), *Big data*, ambientes de simulação e *machine*

learning, que funcionando de forma completamente integrada permite o desenvolvimento de um sistema inteligente e adaptável a mudanças nas condições de operação de forma ágil e precisa.

O *Digital Twin* é um conceito recente que possui um crescente número de estudos realizados em diferentes aplicações, sendo uma tecnologia promissora e que vem ganhando cada vez mais espaço na academia científica e em implementações práticas em ambientes de produção. Isto se deve à sua alta capacidade de adaptação a diferentes aplicações, capacidade de condensar informações importantes em diferentes níveis de forma prática e visual, auxiliando na tomada de decisão e permitindo a monitorização e controlo da planta de manufatura de forma remota e em tempo real.

1.1 Enquadramento

Sistemas flexíveis de fabrico são uma realidade no contexto industrial atual. Conceitos de Indústria 4.0, como IoT e ambientes virtuais de monitorização e controlo remoto de sistemas industriais vêm sendo aplicados em ambientes de manufatura na atualidade, sendo o *Digital Twin* um dos conceitos mais promissores neste âmbito. Com base em estudos recentes em aplicações de *Digital Twins* em ambientes de manufatura [2] [3] [4] [5] [6], foi proposta a virtualização do SMF *Fischertechnik* presente no Laboratório de Controlo, Automação e Robótica (LCAR) do Centro de Investigação em Digitalização e Robótica Inteligente (CeDRI), localizado Escola Superior de Tecnologia e Gestão (ESTiG) do Instituto Politécnico de Bragança (IPB).

1.2 Objetivos

Nesta seção são apresentados os objetivos esperados a serem atingidos na conclusão deste trabalho

- Realizar um estudo do conceito de Digital Twin e tecnologias associadas;

- Observar os benefícios do uso do Digital Twin em aplicações de manufatura;
- Realizar um caso de estudo de tecnologias de IoT e simulação aplicadas no desenvolvimento de um Digital Twin;
- Desenvolver um Digital Twin para o sistema de manufatura flexível estudado;
- Observar dificuldades e propor soluções para o desenvolvimento de Digital Twins aplicados à Sistemas de Manufatura Flexíveis;

1.3 Estrutura do Documento

Este item descreve a estrutura do trabalho, e os tópicos abordados em cada capítulo.

O relatório encontra-se dividido em seis capítulos:

Capítulo 2: Introdução ao conceito de indústria 4.0, *smart factories*, *CPS* e *digital twins*, através da exemplificação de diversos estudos do conceito de *digital twin* descritos em publicações nos últimos anos, técnicas utilizadas e objetivos atingidos em cada aplicação;

Capítulo 3: Proposta de solução para atingir os objetivos definidos com base em análise das tecnologias disponíveis e caracterização do sistema real, tal como a metodologia utilizada para implementação da solução;

Capítulo 4: Descrição das técnicas utilizadas para desenvolvimento do Digital Twin, baseadas na solução proposta no item anterior.

Capítulo 5: Apresentação e discussão dos resultados obtidos ao final do desenvolvimento, tal como as principais características positivas no uso das técnicas descritas e as principais dificuldades encontradas na implementação;

Finalmente, o **Capítulo 6** apresenta as conclusões obtidas e propostas de trabalhos futuros.

Capítulo 2

Estado da Arte

Neste capítulo são introduzidas as tecnologias e conceitos utilizados para basear o desenvolvimento deste trabalho, tal como os trabalhos realizados na área que utilizam estas tecnologias de diferentes maneiras para atingir objetivos similares, o desenvolvimento de *digital twins*.

2.1 Indústria 4.0

O mundo está a passar por uma transformação digital conhecida como a quarta revolução industrial, mais comumente conhecida como Indústria 4.0. Esta nomenclatura está relacionada com as três revoluções industriais anteriores. A primeira revolução industrial começou na Europa no século XVIII, onde a indústria usava a capacidade de aquecimento do carvão para alimentar sistemas de máquinas à base de vapor. A segunda revolução industrial, ocorreu durante o século XX, foi baseada em sistemas de eletricidade e produção em massa, no desenvolvimento de esteiras transportadoras industriais e máquinas elétricas. A terceira revolução industrial, que decorreu também no século XX, foi baseada em sistemas eletrônicos e computacionais, com o uso de bancos de dados e softwares para controlar remotamente os processos industriais, onde o maior representante são os sistemas Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA), desenvolvidos com base em

CLPs, utilizados para visualização e monitorização remota do sistema [7]. A quarta revolução industrial, para a qual transitamos atualmente, é baseada em tecnologias de *IoT*, *CPS* e sistemas industriais inteligentes. A Figura 2.1 ilustra a evolução das tecnologias e os principais agentes de cada uma das revoluções industriais.

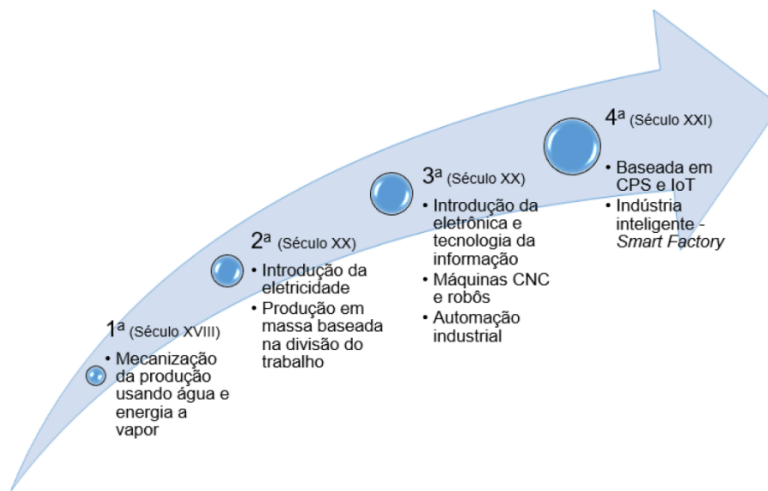


Figura 2.1: Histórico das revoluções industriais [8].

De acordo com [9], a Indústria 4.0 é definida como sendo o avanço desenvolvido por sistemas computacionais, onde serviços baseados em nuvem permitirão a possibilidade de se considerar mais requisitos dos clientes em planejamentos e no processo produtivo, admitindo um novo nível de personalização com mínimo custo.

A Indústria 4.0 está relacionada com os recentes avanços nas tecnologias computacionais e eletrônicas, permitindo a interconexão de sistemas ligados à rede. Essa interconexão agora é aplicada não apenas às pessoas, mas também às máquinas e dispositivos, permitindo serviços mais rápidos, com menor custo e maior precisão em sistemas industriais. Estes sistemas interconectados são denominados *Internet of Things*, *Internet of Services* e comunicações *Machine-to-Machine*. Esse tipo de comunicação permite que as informações sejam geradas e processadas de maneira autônoma [10], minimizando a necessidade de operadores humanos, reduzindo as perdas causadas por erros humanos e permitindo que os sistemas sejam mais confiáveis e mais baratos.

Sistemas interconectados possuem a capacidade de interagir uns com os outros utilizando protocolos padronizados de comunicação via *internet*, e possuem a capacidade de analisar dados dos sistemas, realizar auto-configuração, previsão de falhas e adaptação a mudanças em um curto espaço de tempo [11].

A interconectividade e possibilidade de comunicação entre os dispositivos de um sistema permite que a Indústria 4.0 ocorra com base na combinação de diferentes conceitos, como Sistemas Autônomos, Wireless Sensors Network (WSN), *Big data*, *IoT*, *Machine-to-machine (M2M)*. A Indústria 4.0 pode ser definida como uma "*abordagem estratégica para integrar sistemas avançados de controle com a tecnologia da Internet, permitindo a comunicação entre pessoas, produtos e sistemas complexos*" [10].

O desenvolvimento da nova era tecnológica das fábricas inteligentes, ou *smart factories*, está transformando radicalmente a forma como tratam-se sistemas de produção e negócios. Sistemas de produção inteligentes vêm-se tornando um padrão em um mundo onde máquinas inteligentes e sistemas em rede possuem a capacidade de responder à informação e realizar a gestão da produção de forma eficiente e autônoma [12].

Diversos estudos vêm sendo realizados no âmbito da indústria 4.0 e *smart factories* de forma a validar as tecnologias mais recentes aplicadas em diferentes processos de fabrico, como a aplicação de um processo de controle industrial inteligente para fabrico de Glass Reinforced Polyester (GRP) realizado por [12], a criação de uma arquitetura hierárquica utilizando conceitos de *IoT*, *Big data* e *cloud computing* aplicada em uma linha de embalagem de doces descrita por [13], o desenvolvimento de um sistema de monitorização de desempenho utilizando tecnologias de *IoT* e Radio-Frequency IDentification (RFID) para garantia de qualidade de um sistema de produção de *commodities* realizado por [14], entre outros.

O crescente número de estudos de caso e trabalhos acadêmicos realizados no âmbito da Indústria 4.0 é um reflexo da crescente importância de se utilizar os conceitos relacionados com as *smart factories* para qualificar empresas em um cenário de alta competitividade industrial, onde é cada vez mais difícil se manter em uma posição de destaque no mercado.

Os sistemas SCADA permitem que as máquinas se comuniquem e tenham informações

sobre os estados dos sensores e atuadores entre si, permitindo que os sistemas funcionem com mais eficiência, e agora estão evoluindo de uma estrutura monolítica de primeira geração para uma estrutura distribuída de segunda geração e, mais recentemente, para uma estrutura distribuída de terceira geração, estrutura de nuvens [11].

Uma estrutura industrial onde os equipamentos possuem a capacidade de processamento dos dados presentes em uma nuvem compartilhada e tomada de decisão quanto à alteração dos parâmetros físicos do sistema, de forma descentralizada e autônoma, serve como base para o conceito recente de *smart factory*.

O termo *Smart* vem sendo utilizado amplamente no contexto tecnológico atual, desde *smartphones*, *smart houses* a *smart grids*. O uso exacerbado deste prefixo provém da falta de uma definição clara da palavra. Em alguns contextos *Smart* pode se referir a um sistema independente, que pode ser composto por um conjunto sensor/atuador, um controlador e um transmissor [15]. A “inteligência” deste tipo de dispositivo provém da capacidade de cooperação com uma rede de outros dispositivos interconectados, também da possibilidade de checar a existência de atualizações no sistema e decidir aplicá-las ou não [15].

Todos os tipos de equipamentos eletrônicos atuais têm um certo nível de inteligência, como localização Global Positioning System (GPS), tecnologia RFID, Near Field Communication (NFC), acesso à *internet* e interoperabilidade. Isso significa que a "inteligência" de um sistema de rede hoje é descentralizada para cada peça individual de equipamento, o *Smart Device*. Quando esse tipo de tecnologia estiver disponível com custos mais baixos, será somente necessário instalar apenas alguns sensores e atuadores para transformar um dispositivo em um sistema autônomo de sensores-atuadores [16].

Em sistemas industriais atuais, a interconectividade de sistemas integrados em computadores está se tornando uma realidade. Como um exemplo citado por [16], no caso de uma válvula que não funciona levando a um problema de superaquecimento em uma planta, o alarme resultante pode ser direcionado para a equipe de serviço pelo sistema de telefonia móvel remotamente, depois guiá-lo via GPS ou equivalente interno. Os sistemas portáteis podem identificar a válvula quebrada, por exemplo, pela tecnologia de RFID, e

fazer o *download* de todas as informações necessárias sobre essa válvula e possíveis substituições instantaneamente por canais de comunicação sem fio, como por Wireless Local Area Network (WLAN)s [16].

A capacidade de uma indústria de funcionar utilizando dispositivos inteligentes e interconectados, realizando a troca de dados em tempo-real e tomadas de decisão de forma autônoma com base em critérios que variam conforme a situação é o que define uma *smart factory*. A comunicação de dados pode ser realizada utilizando tecnologias de *Industrial IoT*, as tomadas de decisão sendo feitas com base em algoritmos de *machine learning* e todos os equipamentos com acesso a uma nuvem com acesso aos dados da indústria de forma autônoma. A utilização destes conceitos conjuntamente com os esforços humanos torna uma indústria capaz de realizar tarefas de forma muito eficiente.

Um sistema integrado de sensores e atuadores, que são capazes de perceber e interagir com o sistema real, e processadores e microcontroladores, que são capazes de interpretar e analisar os dados retirando informações úteis, é um sistema que faz a interação entre o mundo real e o mundo virtual, sendo então denominado um *CPS* [17]. Um *CPS* é uma das bases para a implementação de uma *smart factory*, pois realiza a interface entre o sistema físico e o sistema computacional.

Dispositivos inteligentes e sistemas de controlo descentralizados podem ser desenvolvidos usando várias tecnologias como *Bluetooth*, *ZigBee*, NFC, RFID, LoRaWAN para estabelecer comunicação sem fio entre dispositivos e sensores/atuadores. Com a comunicação sem fio, é possível reduzir custos e esforços, como o planejamento da planta industrial, instalação e manutenção equipamentos e redução de erros humanos, entretanto é necessário o estabelecimento de comunicações de rádio robustas em um ambiente tão heterogêneo e cheio de ruído [13]. A Figura 2.2 ilustra a estrutura hierárquica de uma *smart factory*.

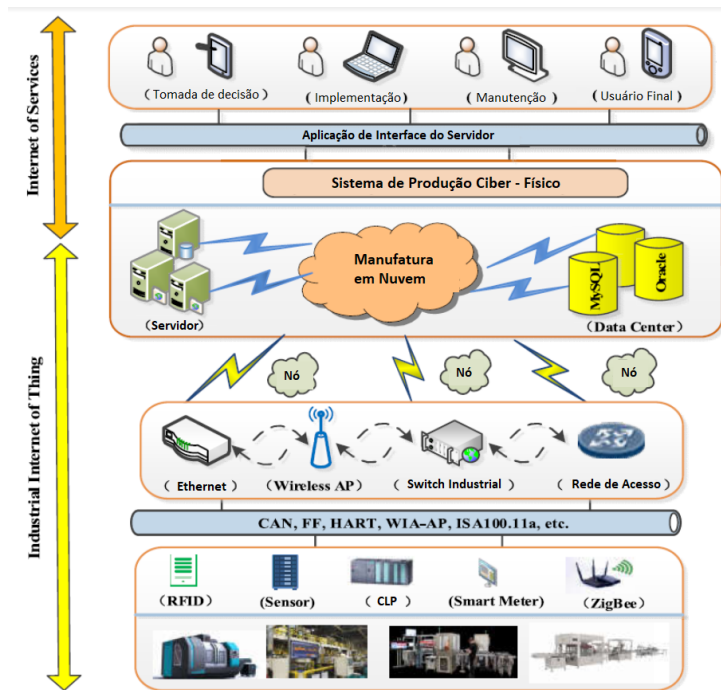


Figura 2.2: Estrutura de um sistema de produção Smart Factory. [13].

Com os recentes avanços tecnológicos que resultam em uma maior disponibilidade e menor custo de sensores, sistemas de aquisição de dados e redes de computadores, uma indústria que opera no cenário atual de competitividade é forçada a implementar recursos de maior complexidade para se manter em funcionamento [1]. Como consequência deste fenômeno, o crescente número de equipamentos que se comunicam entre si em rede gera um grande número de dados a ser armazenado, sendo estes sistemas conhecidos como *Big data*.

O uso de sistemas desenvolvidos para controlar a interatividade entre máquinas e gerenciar os dados presentes no sistema de *Big data*, de forma a atingir um nível de inteligência, resiliência e máquinas com capacidade de se adaptar de forma autônoma, integrando o *CPS* com os sistemas de produção, logística e serviços, transformaria um sistema de manufatura atual em um sistema de Indústria 4.0, trazendo um enorme potencial econômico para o processo [1].

2.2 Cyber-Physical Systems

Com a atual aplicação de tecnologias da nova geração da informação na indústria e manufatura, a tecnologia e os dispositivos *IoT* são empregados para coletar vários dados gerados em todo o ciclo de vida, como por exemplo, do produto. A tecnologia de computação em nuvem é usada para realizar o gerenciamento de dados e seu processamento, a inteligência artificial é usada para mineração de dados e percepção de valor agregado, portanto a grande era da manufatura orientada a dados se aproxima [18].

Sistemas de Indústria 4.0 são suportados em diferentes pilares tecnológicos utilizados de forma totalmente integrada, como ilustrado pela Figura 2.3. Comumente são aplicados os Sistemas de Manufatura Flexível SMF, definidos por [19] como sendo “*complexo integrado, controlado por computador, de dispositivos automatizados de manuseio de material e máquinas-ferramentas numericamente controladas que podem processar simultaneamente volumes médios de vários tipos de peças*”. Os dispositivos automatizados de manuseio de material são normalmente robôs autônomos, capazes de realizar tomada de decisão baseados em diversos parâmetros definidos no sistema de controle.

De acordo com [10], o desenvolvimento de *CPS* pode ser abordado de duas formas distintas: Virtualização do físico ou “Fisicalização” do virtual. A primeira abordagem visa a especificação de subsistemas físicos com a adição de interfaces e abstrações computacionais, e à equipagem dos subsistemas com inteligência e capacidade de comunicação e interoperabilidade (e.g. com sistemas embebidos). A segunda é caracterizada por “*abstrações de sistemas dinâmicos para software e interfaces, bem como componentes de rede para representar seu comportamento dinâmico no tempo*” [10].

Robôs autônomos são aqueles que possuem sistemas integrados de inteligência artificial e robótica inteligente [21]. Existem atualmente diversas aplicações de robôs autônomos em SMF, como o sistema descrito por [21], aplicado na indústria automobilística, onde o robô manipulador atua como ferramenta de transporte de peças para posterior processamento ou de peças processadas para o local de consumo.



Figura 2.3: Pilares da indústria 4.0 [20].

Para operar em ambientes dinâmicos, os robôs autônomos precisam ser capazes de utilizar e coordenar de forma efetiva os seus recursos computacionais escassos [22]. Em ambientes industriais, um robô necessita da capacidade de decidir quando planejar, quando agir, como detectar e recuperar-se de falhas, optar entre tarefas conflitantes. Em ambientes de alta complexidade, torna-se difícil prever o comportamento e mudanças no sistema, de forma que um robô autônomo precisa possuir um sistema de tomada de decisão deliberativo (*feedforward*) e reativo (*feedback*) simultaneamente [22].

De forma a garantir a comunicação entre robôs e demais equipamentos de uma indústria automatizada, existem métodos de comunicação descentralizada, sendo atualmente denominados *Industrial Internet of Things (IIoT)* e *M2M* [23]. A utilização deste tipo de técnica permite o acesso aos dados por robôs, operadores e outros equipamentos dentro de uma linha de produção, desde que possuam acesso à rede [23].

Apesar das tecnologias e técnicas utilizadas em sistemas *M2M* atuais serem muito

similares à *IIoT*, a escala de operação é muito diferente [24]. Utilizando *Big data* conjuntamente com *IIoT*, grandes pacotes de dados podem ser analisados em ambientes *on-line* utilizando sistemas de análise avançada hospedados em nuvem, permitindo também o armazenamento destes pacotes em sistemas de nuvem distribuídos para análise futura [24].

Sistemas automatizados e inteligentes interagem com grandes pacotes de dados provenientes dos mais variados equipamentos presentes em ambientes heterogêneos. Produtores de automóveis analisam as condições de veículos e dados de condução coletados por dispositivos instalados a bordo, fornecendo ao condutor informações sobre eficiência do combustível, consumo, segurança, entre outros [25]. Seguradoras coletam dados de pacientes e fornecem informações sobre cuidados de saúde aos seus clientes, de forma a melhorar a segurança, reduzir custos e desenvolver relacionamentos sustentáveis [26].

Big data pode ser definido como uma base de dados de grande volume e em constante expansão, formada por dados heterogêneos provenientes de diferentes fontes autônomas [27]. Em 2012, aproximadamente 2.5 *exabytes* de dados são produzidos diariamente [28], o que dá às empresas a oportunidade de trabalhar com muitos *petabytes* de dados simultaneamente.

Os dados em um sistema de *Big data* podem ser tipos variados, como imagens, leituras de sensores, informações de redes sociais, sinais de GPS de telefone, entre outros. O acesso a estes dados pode ser realizado em tempo real, o que dá a uma empresa uma grande vantagem em agilidade com relação à seus competidores [28]. Em ambientes industriais, a utilização de sistemas de *big data* para armazenamento e análise das variáveis de campo é essencial para o funcionamento de uma planta autônoma e inteligente, e para o desenvolvimento de um *CPS* com componente analítica.

Graças à capacidade de armazenamento massiva garantida por sistemas de *big data*, é necessário o desenvolvimento de sistemas que possuem a “capacidade de acessar um conjunto de recursos de computação pertencentes e mantidos por terceiros via *internet*” [29]. O princípio de funcionamento destes sistemas é a utilização de serviços remotos por rede, de forma a providenciar o máximo de serviços utilizando o mínimo de recursos

[29], dando a este tipo de sistemas vantagens como agilidade, menor custo inicial, não necessitar um local físico e escalabilidade [30].

Em sistemas conectados à redes de *internet*, a segurança dos dados sempre será uma preocupação, sendo considerada atualmente um dos aspectos mais críticos em sistemas computacionais. Como evidenciado por [29], “*Com a nuvem, a segurança física é perdida por causa do compartilhamento de recursos de computação com outras empresas. Nenhum conhecimento ou controlo sobre onde os recursos são executados*”, pois atualmente é inexistente uma padronização para garantir a integridade dos dados em um sistema baseado em nuvem. Na utilização de *GPS* baseados em sistemas de armazenamento e processamento massivo e remoto de dados, utilizando sistemas de nuvem conectados à *internet*, a segurança de acesso aos dados é um conceito que deve ser sempre levado em consideração. A este conceito é dado o nome cibersegurança.

Com o armazenamento massivo de dados em sistemas baseados em nuvem, e o processamento destes dados sendo realizados em ambientes virtuais remotos de *cloud computing*, sistemas industriais necessitam de algoritmos robustos, que impeçam o vazamento de dados confidenciais e dificultem o acesso aos dados para pessoas não autorizadas. Estes sistemas são conhecidos como algoritmos de cibersegurança. Este problema é tão comum no ambiente virtual, que existem empresas especializadas em encontrar vulnerabilidades em sistemas de outras empresas, de forma a alertá-las sobre a falta de segurança de seus dados [31].

O crescente uso de *GPS* conectados à redes *internet* conseqüentemente aumenta o risco de ciberataques direcionados a estes sistemas [31]. Sistemas de controlo industriais, como por exemplo SCADA, são muito comumente utilizados para controlar uma planta industrial, porém como a interconexão com outros *smart devices* em rede é um conceito recente, sistemas de controlo dificilmente eram programados considerando a cibersegurança.

Um estudo realizado por [32] mostra que mais de 2.5 milhões de sistemas de controlo integrados são conectados diretamente à *internet*. Em 2015, a *Dell Security Report* reportou que ciberataques envolvendo sistemas SCADA aumentou de 91,676 em 2012 para 163,228 em 2013 [33].

[31] cita vários casos de prejuízos causados por falhas em sistemas de segurança industriais, como em 2008, uma explosão no oleoduto Baku-Tbilisi-Ceyhan (BTC) na Turquia causado por um ataque virtual que resultou em uma perda de milhões de dólares em material [34], e o caso “Stuxnet” um *worm* projetado para atacar especificamente o SCADA desenvolvido pela Siemens que realizava o controle das centrífugas de enriquecimento de urânio iranianas. Casos como estes revelam a crescente necessidade do desenvolvimento de sistemas para proteção de dados em rede.

Com a utilização de sistemas integrados e o acesso aos dados industriais por meio de *big data* e *cloud computing*, é possível visualizar dados gerados em processos computacionais em um ambiente real. Este tipo de aplicação é denominada realidade aumentada, onde um usuário pode observar e interagir com sistemas gráficos gerados pelo computador em suas proximidades [35].

Atualmente, modelagem e simulação são processos padrão no desenvolvimento de sistemas industriais, como por exemplo no apoio de tarefas de design, validar propriedades, otimização e predição de falhas de sistemas [36]. Ambientes de simulação são uma ferramenta essencial para auxiliar os utilizadores (engenheiros, operadores, *designers*) em projetar, operar e realizar manutenções em sistemas mecatrônicos.

Sistemas mecânicos, elétricos e eletrônicos estão cada vez mais integrados, portanto os ambientes de simulação necessitam de abordagens multinível embebidas para tornarem-se ferramentas capazes de atender às necessidades dos sistemas físicos. A conexão dos ambientes de simulação com sistemas integrados em rede possibilita a realização destas abordagens utilizando-se de dados reais do sistema, permitindo assim a otimização temporal e em nível de detalhe do processo de fabrico [36]. Desta forma, é caracterizado o *digital twin*, um *CPS* que permite que ambientes de simulação sejam operados utilizando dados obtidos do sistema físico, que possui a capacidade de operação simultânea.

2.3 Digital Twin

O conceito de *Digital Twin* é um dos mais associados à Indústria 4.0, e é definido de forma distinta por diferentes autores. [2] possuem a visão que o *Digital Twin* é uma espécie de simulação com grau de fidelidade ultra-alto, integrado a um sistema de gerenciamento de funcionamento, histórico de manutenção e dados históricos, com a capacidade de espelhar todo o ciclo de vida de seu “gêmeo físico”, garantindo ganhos significativos em segurança e confiabilidade. De acordo com [3], o *Digital Twin* é baseado na idéia de que a construção informacional digital sobre um sistema físico pode ser criada como uma entidade própria, sendo “Gêmeo” da informação que foi incorporado ao próprio sistema físico e vinculado a esse sistema físico durante todo o seu ciclo de vida.

A definição que é mais utilizada atualmente é a dada por [5] em 2012, “*Digital Twin é uma simulação probabilística integrada multi-física, multi-escala e de produto complexos, e utiliza os melhores modelos físicos disponíveis, sensores atualizados, etc., para refletir seu gêmeo correspondente*”.

Do ponto de vista da cadeia produtiva e do ciclo de vida do produto, o *Digital Twin* deve ser um modelo dinâmico e passível de adaptação. Sistemas produtivos se iniciam virtualmente na fase de projeto, e tomam forma física na fase de produção e operação. Em grande parte da história da humanidade, o espaço virtual era nada mais do que as mentes dos desenvolvedores, e nos últimos anos, estabeleceu-se a possibilidade do espaço virtual existir no sistema digital dos computadores [3]. Este facto possibilitou um avanço no desenvolvimento de sistemas, por dispensar a necessidade da elaboração prévia de protótipos custosos, com resultados muitas vezes inadequados. O avanço em tecnologias digitais nos possibilita modelar sistemas de forma detalhada em três dimensões, armazenar dados da produção e analisá-los de forma dinâmica e otimizada, permitindo a elaboração do sistema completamente virtual e predição de comportamentos indesejados sem aumento dos custos e tempo de produção [3].

Apesar de possuir diversas definições formais, é possível concluir que o *digital twin* caracteriza-se por um sistema ciber físico com uma componente real e uma componente

virtual que operam em simultaneidade, permitindo a livre comunicação de dados entre as duas contrapartes. Este paradigma pode ser utilizado em inúmeras aplicações, dentro ou fora do âmbito industrial. A Figura 2.4 ilustra o princípio de funcionamento do *Digital Twin*, e a integração entre as contrapartes física e virtual.

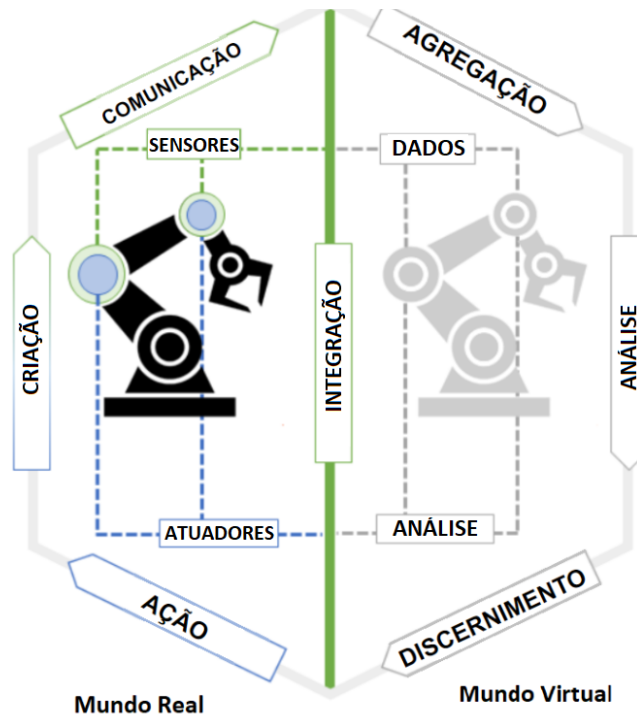


Figura 2.4: Princípio de funcionamento do *Digital Twin* [37]

O desenvolvimento de um *Digital Twin* de um sistema físico é baseado na integração das diversas tecnologias previamente descritas. Primeiramente, é necessária a integração de todos os equipamentos em uma mesma rede, permitindo a livre troca de dados entre os dispositivos [38].

O Centro de Ciências Estruturais da *US Air Force Research* empregou *Digital Twin* para construir um modelo de voo realista alta fidelidade e combinar dados de modelo virtual com dados físicos para fazer uma previsão mais precisa da vida útil da estrutura da aeronave e garantir sua integridade estrutural [39]. [4] propõe em 2014 a utilização conjunta de *Digital Twin* com tecnologias de partículas sensoriais com o objetivo de realizar a detecção de fissuras em tempo real para otimizar sistemas de inspeção e manutenção

de aeronaves.

É possível encontrar diversos usos do *Digital Twin* em aplicações aeroespaciais, por apresentar a necessidade de extrema precisão e detecção de falha minuciosa dos equipamentos em operação, com monitorização remota em tempo real. Em linhas de produção ou SMF, o *Digital Twin* é utilizado como ferramenta que permite às indústrias atingir um nível maior de competitividade, como eficiência de recursos energéticos e aumentar a flexibilidade do sistema [40].

Em uma pesquisa realizada no repositório *Web of Science* [41], em março de 2020, é possível observar um número crescente de publicações e citações baseados na busca pela palavra-chave "*digital twin*", ilustrado pela Figura 2.5.

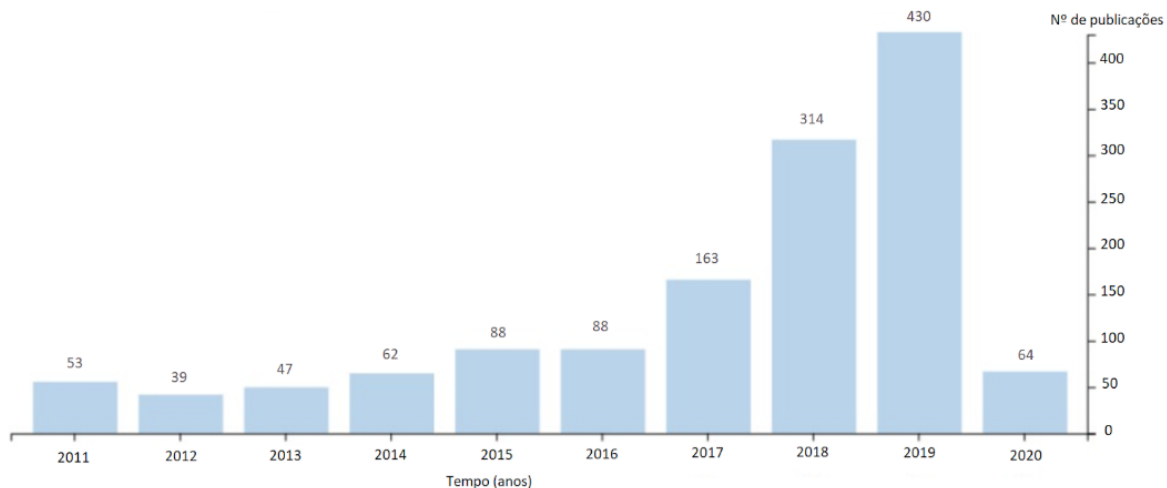


Figura 2.5: Publicações relacionadas com a palavra-chave "*digital twin*" nos últimos 10 anos.[41]

Nota-se que o número de publicações em apenas 3 meses de 2020 já é superior ao ano completo de 2014, sendo possível inferir um grande interesse na realização de pesquisas na área.

De acordo com [6], é possível observar diferentes usos do *Digital Twin*. Dentre estes, destacam-se trabalhos realizados com as finalidades de:

1. Realizar análise de funcionamento, auxiliando nas atividades de manutenção e planejamento como, monitorização anomalias, fadiga e rachaduras no gêmeo físico [42]

- [43] [44];
2. Monitorização de deformações plásticas e geométricas no material do gêmeo físico [45];
 3. Reflexão do funcionamento de sistemas no longo prazo, de forma a realizar análises preditivas do comportamento dos sistemas como, obtenção de informação a respeito de todo o ciclo de vida de um sistema [40] [46];
 4. Ser uma ferramenta de suporte à tomada de decisão de engenharia e análise estatística, como, otimização do comportamento do sistema durante a fase de design [47] [48] [46];
 5. Otimização de desempenho, com possibilidade de prevenção e otimização de desempenhos futuros ao se saber os estados passados e presente do sistema [49] [50].

Em aplicações industriais, nota-se que o *Digital Twin* é frequentemente relacionado à otimização dos sistemas produtivos, a nível de custo ou de tempo. Os autores de [36] afirmam que tanto para otimização do tempo quanto de nível de detalhe, é necessário o desenvolvimento de um *Digital Twin* focado em: Redução de *time-to-market*, onde o entrelaçamento dos modelos da simulação em diferentes níveis de detalhe e em todas as fases do ciclo de vida devem ser aplicadas; Otimização de produtos e sistemas mecatrônicos durante o seu uso, preenchendo a lacuna entre a fase de desenvolvimento e a fase de operação; Entrelaçamento entre diferentes cadeias de valores, como o *Digital Twin* de um produto transporta informações valiosas (dados e modelos executáveis) para os produtores, tornando a integração do sistema mais simples, porém sendo necessário que o sistema contenha modelos de diferentes “granularidades”, agregando valores e dados de todas as etapas do ciclo de vida do produto.

A criação de um ambiente fabril interativo totalmente virtual é um desenvolvimento sem precedentes históricos. Uma empresa do ramo industrial é capaz de utilizar a tecnologia para otimizar a operação diretamente na cadeia de produção, manipular parâmetros

e processos produtivos, adaptando o processo para a necessidade individualizada do mercado [51]. O *Digital Twin* possibilita também o acompanhamento do processo produtivo em tempo real, através do acesso contínuo aos dados de processo. Desta forma, é possível otimizar o ciclo produtivo, reduzir o tempo necessário para se introduzir novos produtos a um processo de fabrico e detectar configurações ineficientes no sistema [51].

2.4 Desenvolvimento do SMF - Gêmeo Físico

O desenvolvimento de um *Digital Twin* preconiza que o sistema de fabrico possua a capacidade de enviar seus dados de funcionamento à uma plataforma on-line integrada em tempo-real. Para ser possível a implementação de técnicas de monitorização de condições técnicas, funções de diagnóstico e predição de comportamento, o objeto real deve interagir com a sua contraparte virtual utilizando tecnologias de comunicação, como a Internet, por meio de protocolo Transmission Control Protocol / Internet Protocol (TCP/IP) [38].

O uso de instrumentos de medição (de simples sensores a complexos sistemas de medição integrados), com a capacidade de conexão em redes sem fio é necessário para a construção do gêmeo físico do *Digital Twin*. Estes tipos de sensores são eficientes, adaptativos e capazes de auto-organização, sendo elementos essenciais para o envio dos dados com confiabilidade para o sistema computacional. Os sensores utilizados em *CPS* utilizam as tecnologias de *IIoT* para estabelecimento de comunicação em tempo real, aliadas à tecnologias de computação em nuvem, transferindo a realização dos cálculos de um centro de dados para um grande número de dispositivos distribuídos e integrados [38].

O desenvolvimento de um *CPS* que torna possível a sua digitalização e criação de um *Digital Twin* pode ser entendida como a “*configuração consequente de sistemas embarcados, sensores, atuadores, incluindo acesso à rede*” [10]. A Figura 2.6 ilustra a abordagem que possibilita a criação de sistemas de produção integrados à rede, com a possibilidade de desenvolvimento de um *Digital Twin* [10].

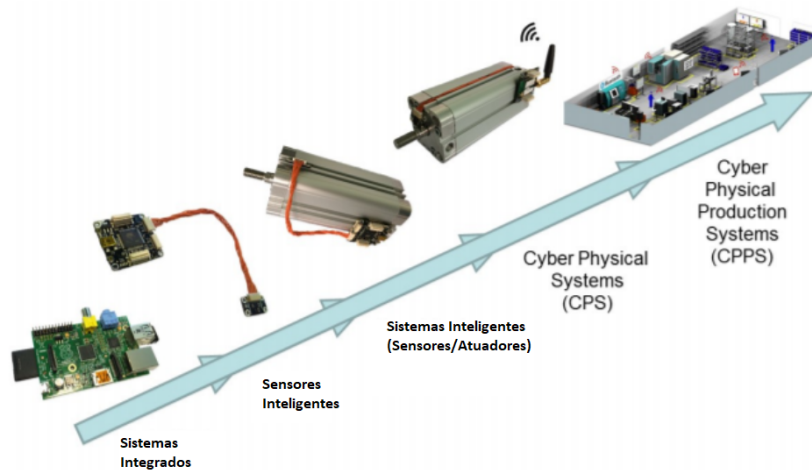


Figura 2.6: CPS que possibilita virtualização [1]

Em CPS, é possível notar o uso de sensores descentralizados que possuem conexão sem-fio à rede, ou de sistemas integrados que utilizam um controlador lógico programável CLP central para envio dos dados de todo o sistema em conjunto. Utilizando uma arquitetura centralizada, o processo de estabelecimento da comunicação entre os gêmeos se torna mais simples, porém a integração do gêmeo físico com o gêmeo digital torna-se mais centralizada, dificultando o acesso aos dispositivos separadamente, implementação de lógicas de auto-organização e detecção de falhas de forma descentralizada.

2.5 Integração do *Digital Twin* - Simulação

Em aplicações do conceito *Digital Twin* são utilizados ambientes de simulação para o desenvolvimento do gêmeo virtual do sistema. Os ambientes de simulação, anteriormente restritos a *experts* de computador e matemáticos, atualmente são amplamente utilizados por engenheiros para auxiliar em questões de *design* e engenharia dos produtos [36].

Como o *Digital Twin* é uma tecnologia baseada nos ambientes de simulação, nota-se uma necessidade de computação de alto desempenho [39], sendo um dos requisitos para utilização do *Digital Twin* na sua máxima precisão. Aumentando-se o nível de complexidade do sistema, conseqüentemente haverá um aumento na necessidade de *hardware*

para executar o *Digital Twin* com menor latência possível, a depender da necessidade da aplicação.

A facilitação de obtenção de modelos digitais leves que necessitam baixa capacidade de processamento pode ser um diferencial apresentado pelos fabricantes de *softwares* de simulação, por fornecer a possibilidade de visualização do gêmeo 3D digital em uma versão *lite*, que segundo [52], pode ser utilizada por um analista ou gerente do processo de fabrico, em um dispositivo de diagnóstico móvel, como um telemóvel ou tablet.

A utilização de diversos níveis na interface gráfica do utilizador Graphics User Interface (GUI) pode reduzir a complexidade do sistema a nível de visualização pelo usuário, como por exemplo, uma broca em utilização pode indicar uma caixa com a palavra *drilling* no ambiente virtual, que ao selecionada guia o usuário a uma outra aba com informações mais detalhadas a respeito do processo observado. Desta forma, não se perdem informações, mas facilita-se a visualização pelo fato dos dados não estarem condensados em uma única página.

Um gráfico interativo, ilustrando dados de *mean time between failures* (um indicador de confiabilidade do sistema utilizado em engenharia de manutenção), pode ser inicializado utilizando um comando “plotar dados”. Os dados em tempo real dos sensores ilustram características do funcionamento do sistema, e a taxa no qual este se aproxima do *Mean Time Between Failures (MTBF)*. As estratégias de indicação de falhas e monitorização dos dados podem ser definidas pelos desenvolvedores, ou por meio de ferramentas de *machine learning* operando em modo de diagnóstico [52].

Uma das abordagens do desenvolvimento de modelos 3D para integração com o sistema físico é a transmissão de fundamentos conceituais da especificação do produto para a visão do gêmeo digital. Os autores de [53] propõem o conceito de dotar o *Digital Twin* com um modelo abstrato que descreve completamente o gêmeo físico a um nível conceitual durante todo o seu ciclo de vida. Baseando-se neste modelo abstrato, diversos experimentos podem ser realizados, possibilitando o entendimento total do comportamento do gêmeo físico em diversas situações e ambientes.

A diferenciação entre o modelo conceitual e sua representação virtual possibilitam

caracterizar diversas propriedades do sistema, tal como a sua escalabilidade (análise do sistema em diferentes níveis, do micro ao macro), interoperabilidade (converter ou combinar diversas representações do modelo), expansibilidade (adicionar ou alterar modelos) e fidelidade (capacidade de descrever o sistema físico com exatidão) [53]. A Figura 2.7 ilustra as propriedades do sistema físico e suas representações virtuais.

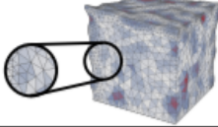
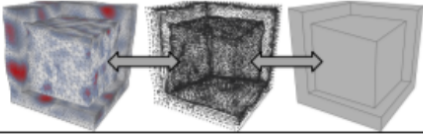
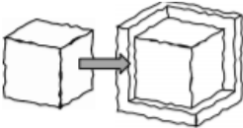
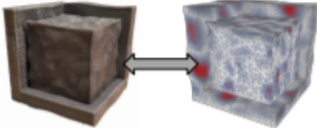
ESCALABILIDADE	<p>Habilidade de dar detalhes em diferentes escalas (detalhes micro a sistemas macro)</p> 
INTEROPERABILIDADE	<p>Habilidade de converter, combinar e estabelecer equivalência entre diferentes modelos</p> 
EXPANSIBILIDADE	<p>Habilidade de integrar, adicionar ou substituir modelos</p> 
FIDELIDADE	<p>Habilidade de descrever a proximidade ao produto físico</p> 

Figura 2.7: Características obtidas através dos modelos virtuais multiníveis [53].

Existem diferentes níveis de integração do *Digital Twin*, e diferentes técnicas podem ser utilizadas para obter resultados distintos, a depender da necessidade da aplicação. Em um primeiro nível, apenas o desenvolvimento de um modelo virtual do sistema permite a visualização do sistema remotamente e previsão de comportamentos e situações em ambientes de simulação. Em um segundo nível, é possível desenvolver a interconexão dos sistemas, em que a simulação roda utilizando os dados reais do sistema, através de um sistema de aquisição de dados. Em um terceiro nível, é possível obter informações do

sistema em tempo real através de algoritmos, como estado de funcionamento, detecção de falhas, tempo decorrido desde a última falha, médias. Estes dados podem ser disponibilizados na mesma interface ou em diferentes níveis de detalhe, através da interação do usuário. Em um quarto nível, pode-se utilizar estas informações coletadas para auxiliar na tomada de decisão do utilizador. Em um quinto nível, o próprio *Digital Twin* pode ser embebido de algoritmos de controlo que permitem a intervenção do próprio sistema virtual no sistema físico, utilizando algoritmos pré programados ou técnicas de *machine learning* e inteligência artificial para controlar e alterar parâmetros operacionais visando a otimização da produção [53].

Acima deste nível, o *Digital Twin* pode ser ampliado para múltiplos equipamentos de um ambiente de fabrico. Como descrito por [1] “*técnicas de análise fornecem a capacidade de auto-comparação, onde o desempenho de uma única máquina pode ser comparado e classificado entre a frota. Por outro lado, as semelhanças entre o desempenho da máquina e os ativos anteriores (informações históricas) podem ser medidas para prever o comportamento futuro do maquinário*”. A Figura 2.8 ilustra os diferentes níveis de integração do gêmeo físico com sua contraparte virtual.

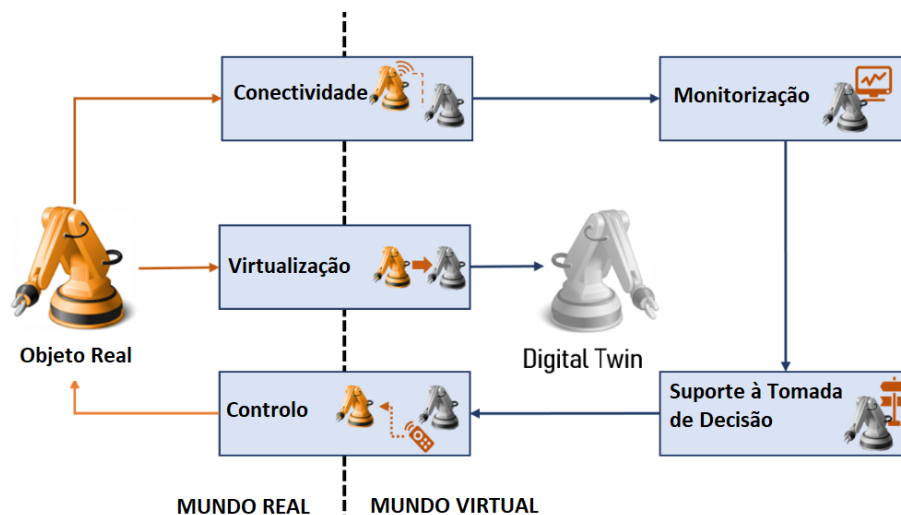


Figura 2.8: Níveis de integração do *Digital Twin* [54]

Com o avanço das tecnologias de *IoT*, *cloud computing*, *Big data*, inteligência artificial e *machine learning*, uma era de manufatura inteligente está se iniciando. Uma das maiores

dificuldades de se alcançar a manufatura inteligente é a integração de todas os conceitos e tecnologias de forma eficiente, estabelecendo a união entre o sistema físico, o sistema virtual, a interação, interconexão, controlo e gestão inteligentes do processo de fabrico [55].

Neste âmbito, este trabalho propõe a virtualização de uma célula flexível de fabrico personalizado, desde a modelagem 3D dos componentes do sistema, interconexão entre os sistemas físico e virtual, e integração para operação simultânea dos sistemas, caracterizando-se então um *Digital Twin*.

Capítulo 3

Análise do Sistema e Abordagem

Proposta

Este trabalho tem como objetivo a aplicação dos conceitos e técnicas previamente descritas para a virtualização e desenvolvimento do *Digital Twin* do sistema de manufatura flexível do CeDRI, localizado ESTiG, IPB.

Para atingir este objetivo, foram utilizados *softwares* de desenho Computer Aided Design (CAD) 3D para realizar a modelagem 3D do sistema, exportada posteriormente para o ambiente de simulação. Foi desenvolvido também um painel de monitorização, com informações úteis condensadas para auxiliar na tomada de decisão do utilizador. Simultaneamente foi desenvolvida uma aplicação de aquisição de dados que realiza a coleta dos dados do sistema físico em tempo real, e realiza a conversão dos dados em informação útil e a comunicação com o ambiente de simulação e com a interface gráfica do utilizador.

3.1 Caraterização do Sistema

Segundo a informação disponível no *website* do CeDRI, “*A unidade de produção em pequena escala permite a circulação de peças em um sistema de produção flexível, proporcionando a experimentação necessária de soluções de protótipos desenvolvidas. Esta unidade*

de produção é composta por várias correias transportadoras, um robô IRB 1400 ABB, duas perfuradoras, duas linhas indexadas com 2 estações de usinagem, um centro de processamento pneumático, todos da Fischertechnik, e vários leitores RFID, além de vários buffers. Esses dispositivos de automação são controlados com o CLP da Omron e Schneider" [56].

O SMF a ser virtualizado é composto por quatro células de usinagem, denominadas Punção A (PA), Punção B (PB), Indexada A (IA) e Indexada B (IB), juntamente com o robô ABB IRB 1400. As células são controladas pelo CLP *Schneider* Modicon M340, programado utilizando linguagem *ladder*. A Figura 3.1 ilustra o SMF a ser virtualizado, com as células de usinagem, o CLP e o robô manipulador indicadas em texto.



Figura 3.1: Sistema de manufatura flexível a ser virtualizado.

3.2 Células Fischertechnik e CLP

As células de fabrico e simulação de Indústria 4.0 *Fischertechnik* são equipadas com diversos sensores e atuadores com a possibilidade de controlo por um CLP, portanto permitem a simulação de um sistema de fabrico real. Desta forma, as células *Fischertechnik* se apresentam como uma plataforma de testes ideal para experimentação de técnicas aplicadas

à Indústria 4.0 e *IoT*.

“Uma SmartFactory já pode ser simulada e testada hoje - e, acima de tudo, demonstrada de forma abrangente. Sistemas e máquinas se comunicam por meio de uma plataforma de software em rede e, por exemplo, por meio da conexão de uma nuvem, comunicam os dados reais ao data center conectado em tempo real, o que, por sua vez, deriva automaticamente as próximas etapas, por exemplo ativar o pedido, organizar o reabastecimento de estoque ou enviar o pedido de retirada ao departamento de logística”[57].

Cada célula indexada possui um conjunto de cinco sensores fotoelétricos, e oito atuadores ativados por motores Corrente Contínua (CC) (quatro esteiras, dois empurradores e duas brocas. Cada célula de punção é equipada com um conjunto de dois sensores fotoelétricos (início e fim de curso), e quatro atuadores ativados por dois motores CC (uma esteira que possui movimento em dois sentidos, uma punção que possui movimento vertical nos dois sentidos).

O controlo do sistema é realizado por um CLP *Schneider* Modicon M340, que é facilmente utilizado em aplicações semelhantes devido ser compacto, e de acordo com seu fabricante *“o Modicon M340 oferece flexibilidade em caixas pequenas e funções integradas. (...) fornece soluções Plug & Work com dispositivos da Schneider Electric e de terceiros”* [58]. A Figura 3.2 ilustra o CLP utilizado para controlo do sistema de manufatura.



Figura 3.2: CLP Schneider Modicon m340 [58].

O algoritmo de controlo do CLP executa o armazenamento de todos os sinais binários dos sensores e atuadores mapeados nos endereços de memória e o envio dos dados à

intranet da ESTiG através do protocolo Modbus/TCP.

O protocolo Modbus/TCP utiliza um relacionamento *master-slave* para estabelecer a comunicação entre dois nós. Em um relacionamento *master-slave*, a comunicação sempre ocorre em pares, um dispositivo deve iniciar a requisição e então aguardar por uma resposta e o dispositivo iniciador (*master*) é responsável por iniciar cada interação [59]. A Figura 3.3 ilustra o relacionamento de rede tipo *master-slave*.

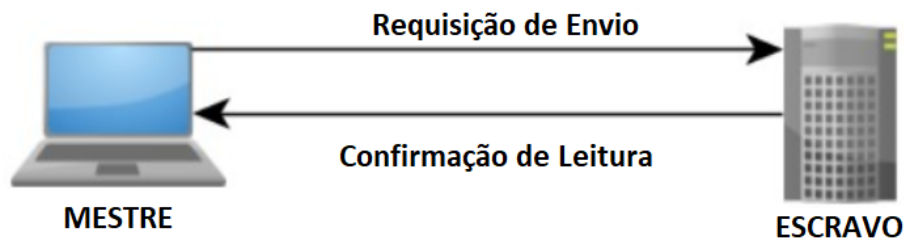


Figura 3.3: Relacionamento de rede tipo *master-slave* [59].

O protocolo de comunicação Modbus/TCP pode ser definido como, “*uma variante da família MODBUS de protocolos de comunicação simples e neutros ao fornecedor, destinados à supervisão e controlo de equipamentos de automação. Especificamente, abrange o uso de mensagens MODBUS em um ambiente de 'Intranet' ou 'Internet' usando os protocolos TCP/IP. O uso mais comum dos protocolos no momento é para conexão Ethernet de CLPs, módulos de Inputs/Outputs Inputs/Outputs (I/O) e gateways a outros barramentos de campo simples ou redes de I/O.*” [60].

[61] afirma que o Modbus/TCP é eficiente em estabelecer comunicação entre o nó mestre e os nós escravos, pois o processo de comunicação prevê que o mestre chame o nós escravos em sequência na rede, em um ciclo. A vantagem da comunicação não é apenas que toda mensagem terá uma mensagem de resposta, aumentando a confiabilidade de comunicação, mas também os nós escravos enviam as mensagens um de cada vez, sequencialmente, evitando assim conflitos.

Ao partilhar seus dados em tempo real com a rede, o sistema possibilita a criação de aplicações externas de aquisição e tratamento dos dados, portanto possibilitando o

desenvolvimento do *digital twin*. Além de permitir acesso a dados que vão além das fronteiras do registrador, alguns mestres Modbus permitem o uso de referências a bits individuais dentro de um registrador. Com isso, os dispositivos podem combinar dados de todos os tipos em uma mesma faixa de memória sem ter de separar dados binários no coil e faixas de entrada discretas [59]. A comunicação de dados dos sensores e atuadores (0/1, sendo *OFF/ON* respectivamente) é realizada desta forma combinada, e cada bit de memória de um registrador corresponde a um sensor/atuador da planta.

3.3 Robô Manipulador

O robô manipulador do sistema de fabricação flexível é um robô ABB IRB 1400, amplamente utilizado em processos de solda ou de manipulação de objetos na indústria. De acordo com [62], *“a capacidade de ajustar a velocidade e a posição do processo significa que você alcança o fabrico ideal precisão com pouca ou nenhuma rejeição”*.

A movimentação das peças no SMF é realizada pelo robô e ilustrado pela Figura 3.4, onde as peças são transportadas para as células de fabricação, e finalmente inspecionadas por um operador humano por meio de uma Human-Machine Interface (HMI) e um leitor RFID para identificação das peças.

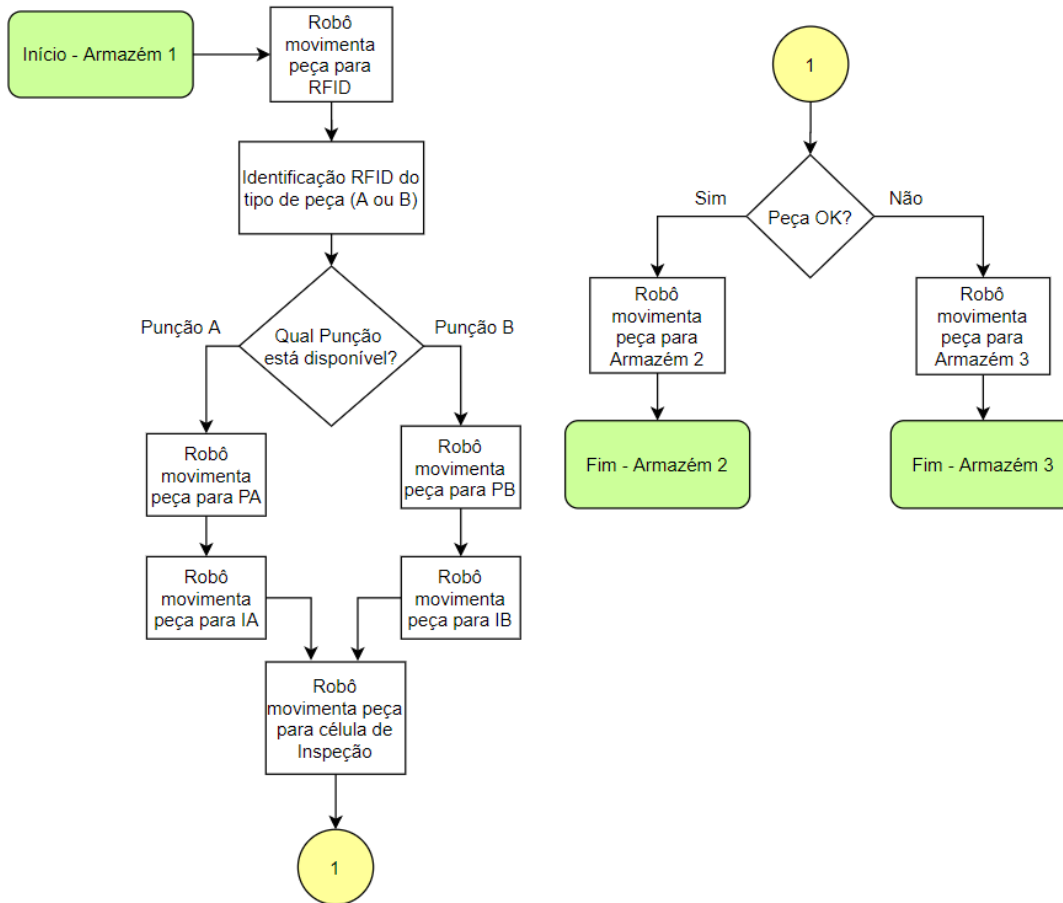


Figura 3.4: Fluxograma representando o fluxo das peças usinadas no SMF

As células de usinagem são controladas pelo CLP, de forma que a ativação de um sensor ou temporizador irá acionar um atuador. O funcionamento da célula A é idêntico ao da célula B, sendo diferenciado pelo tipo de célula (punção ou indexada). A figura 3.5 ilustra a sequência de ativações dos sensores/atuidores e do funcionamento da célula de punção,

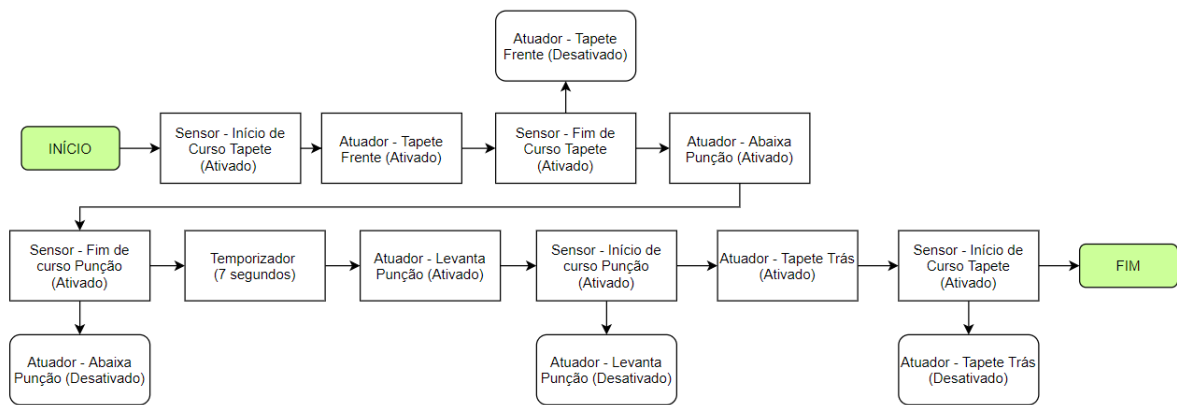


Figura 3.5: Fluxograma representando os processos de usinagem da célula de punção

A figura 3.6 representa a sequência de ativações dos sensores/atuadores e do funcionamento da célula indexada. O diagrama representa o funcionamento do código *ladder* o qual foi usado para programar o CLP e permitir o controle do funcionamento do sistema.

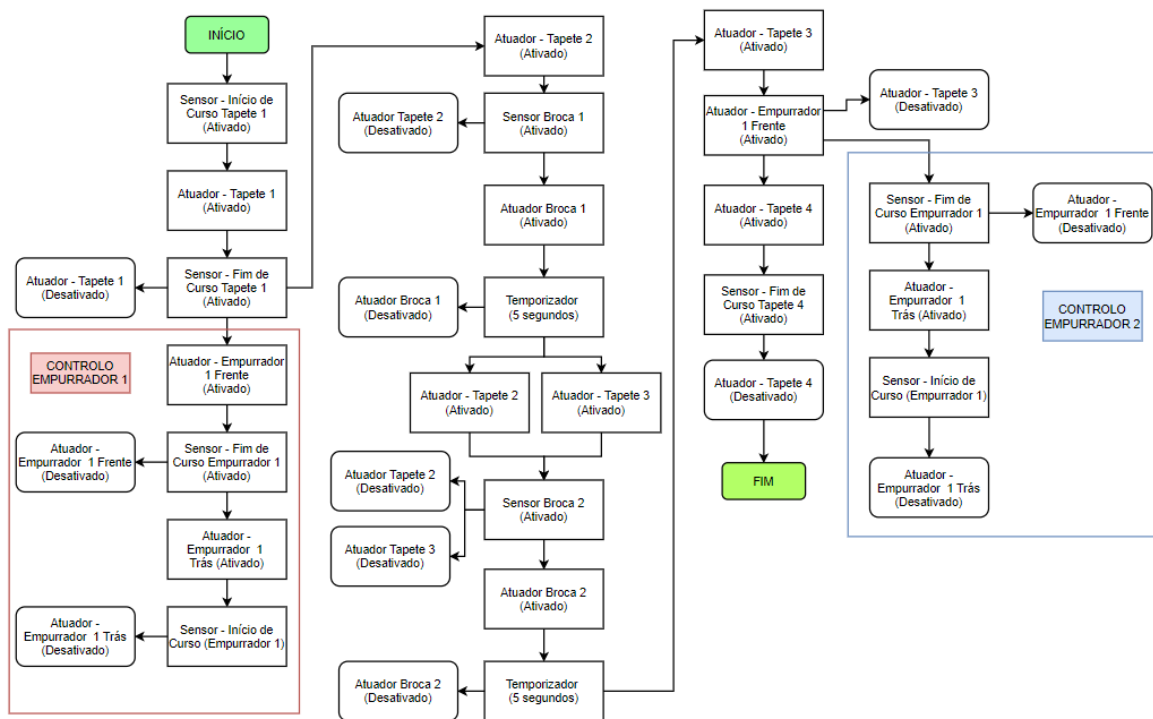


Figura 3.6: Fluxograma representando os processos de usinagem da célula indexada

O robô é controlado por um CLP e programado utilizando a linguagem de programação

RAPID, uma linguagem de programação de alto nível utilizada em robôs ABB, através de disquetes. O uso de disquetes para a programação impossibilita aceder aos dados de operação do robô em tempo real, como posição da garra manipuladora ou ângulo das juntas em tempo real, tal como o controlo do robô através de uma aplicação externa.

3.4 Abordagem Proposta para Desenvolvimento do Digital Twin

A elaboração do Digital Twin foi primeiramente desenvolvida por etapas, sendo posteriormente implementada de forma conjunta. O desenvolvimento foi dividido nas seguintes etapas: i. Desenvolvimento dos modelos 3D; ii. Desenvolvimento da aplicação de aquisição de dados; iii. Dinamização dos modelos 3D no ambiente de simulação com os dados do sistema real; iv. Tratamento dos dados em informações e desenvolvimento do sistema de detecção de falhas; v. Desenvolvimento do ambiente de monitorização das informações em tempo real; vi. Integração dos sistemas e operação de forma conjunta.

Primeiramente foram desenvolvidos modelos 3D do sistema de forma a permitir a visualização do funcionamento pelo usuário. Foi optado pelo uso da ferramenta de desenho CAD 3D *SolidWorks*, devido à sua simples utilização e exportação dos modelos em diferentes formatos. Desta forma, a integração com diferentes ambientes de simulação é facilitada. Foi proposta a utilização das ferramentas *Assembly*, de forma a minimizar o trabalho na criação das peças, pois a ferramenta permite a utilização de partes criadas individualmente na montagem de várias células, aproveitando-se da similaridade dos componentes das células de fabrico.

O sistema físico estabelece comunicação com a intranet da ESTiG através do protocolo Modbus/TCP, portanto a aplicação de aquisição de dados foi focada em adquirir estes dados em tempo real diretamente dos registradores do CLP. Os dados coletados dos registradores foram separados e armazenados em variáveis únicas, de forma a permitir o seu envio para o ambiente de visualização e a transformação dos dados binários em

informações úteis para o envio posterior ao ambiente de monitorização de dados.

Os modelos 3D foram dinamizados utilizando os dados reais coletados pela aplicação através da implementação do protocolo Remote API disponível no V-REP, e a utilização de *scripts* disponíveis no próprio ambiente de simulação. Posteriormente foi desenvolvido um sistema de monitorização, utilizando a plataforma *Node-Red*, em que os dados coletados do controlador em tempo real são traduzidos em informações úteis para o usuário, e transmitidas para a plataforma através da implementação do protocolo de comunicação MQTT. A Figura 3.7 ilustra a abordagem proposta, com as tecnologias utilizadas.

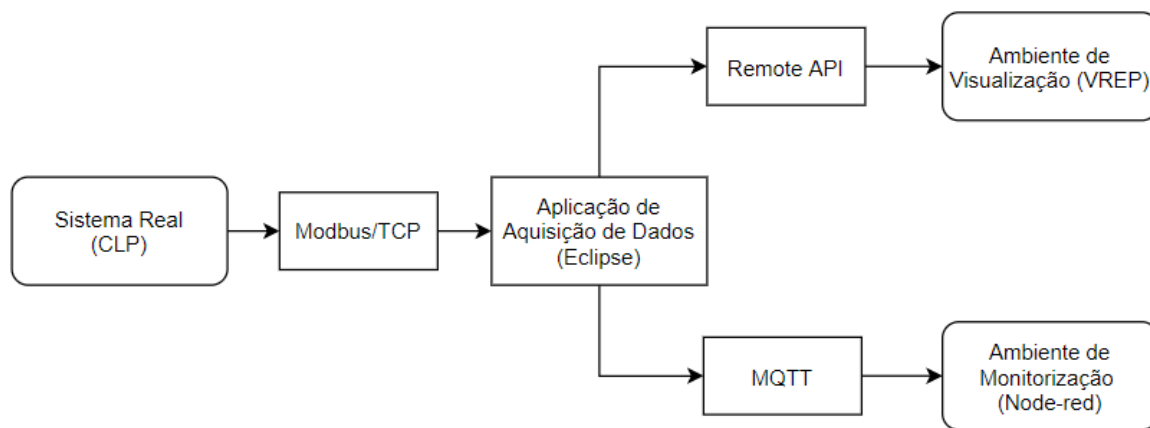


Figura 3.7: Proposta de abordagem para desenvolvimento do Digital Twin.

O desenvolvimento da aplicação de aquisição de dados permite o sistema virtual aceder aos dados reais do controlador, armazenados nos endereços de memória do CLP e enviados à *intranet* da ESTiG através do protocolo Modbus/TCP. Foi optado pelo uso da linguagem de programação JAVA pois esta possui ampla aceitação comercial por suportar um modelo de programação orientado a objetos verdadeiramente portátil, com execução segura do programa, ainda possui um familiar sintaxe semelhante à do C ++ [63], sendo portanto uma opção viável para a aplicação deste trabalho. A linguagem Java é equipada com diversas bibliotecas e classes externas com funções pré-programadas, reduzindo o esforço de programação.

O princípio de funcionamento da aplicação de aquisição de dados é de armazenar os dados de cada sensor/atuador individualmente em variáveis e enviá-las em tempo real para a simulação, permitindo que a última possua dinâmica equivalente a do gêmeo físico, proporcionando ao usuário a visualização do funcionamento do sistema físico remotamente e em tempo real. Os dados são então convertidos em informações úteis para o usuário através de algoritmos de tratamento dos dados e detecção de falhas do sistema (estado de funcionamento, tempo decorrido, falhas detectadas, tempo médio entre falhas). As informações são então transmitidas a um ambiente de monitorização, onde o usuário pode acessar aos dados do sistema individualmente de maneira intuitiva e visual. O principal objetivo do ambiente de monitorização é permitir que o usuário colete dados relevantes do sistema em tempo real e possua uma ferramenta de auxílio na tomada de decisão.

Para o desenvolvimento do ambiente de visualização remota do sistema físico foi optado pelo *software* de simulação V-REP, de propriedade da *Coppelia Robotics*, em sua versão educacional gratuita e release 3.5 (V-REP-3 EDU), devido a sua capacidade de “*executar uma simulação cinemática para as outras partes do ciclo quando efeitos dinâmicos são insignificantes*” [64]. Esta abordagem torna possível o cálculo de parâmetros industriais de maneira simples e precisa. Foi utilizada função Remote API disponível no V-REP para permitir a conexão do ambiente de simulação com fontes de dados externas, como a aplicação JAVA. A Figura 3.8 ilustra o princípio de funcionamento do Remote API.

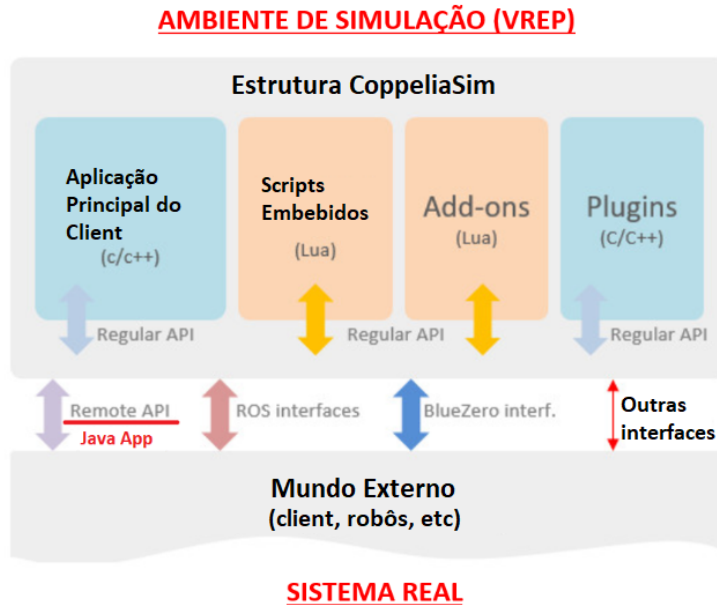


Figura 3.8: Estrutura do Remote API [64].

Para o desenvolvimento do ambiente de monitorização, foi optado pelo *software* Node-red, “*uma ferramenta de programação para conectar dispositivos de hardware, APIs e serviços online de maneiras novas e interessantes, e fornece um editor baseado em navegador que facilita a conexão de fluxos usando a ampla variedade de nós na paleta que podem ser implementados em seu tempo de execução com um único clique*” [65]. O Node-red é implementado em *Javascript* utilizando a estrutura Node.js, e permite a fácil implementação de protocolos de comunicação entre dispositivos no contexto IoT, como Modbus e MQTT, sendo já utilizado em aplicações de Indústria 4.0 e CPS atualmente [65].

A aplicação de aquisição de dados se comporta como um intermediário que realiza a aquisição e tratamento de dados do sistema real, através do protocolo Modbus/TCP, envia os dados dos sensores diretamente para o ambiente de simulação utilizando a função Remote API disponível no V-REP, e envia informações relevantes aos usuários do sistema (estado de funcionamento, tempo médio, tempo decorrido, número total de falhas detectadas e *MTBF*) para o dashboard do Node-Red através do protocolo de comunicação MQTT, concluindo-se assim a base para o desenvolvimento do *Digital Twin*.

Capítulo 4

Desenvolvimento

Este capítulo aborda com mais detalhes os conceitos e técnicas utilizadas para tornar possível a comunicação de dados em tempo real entre o sistema físico e seu *Digital Twin*, o desenvolvimento do ambiente de visualização remota e do sistema de monitorização de dados, tal como a integração dos sistemas e criação de algoritmos de comunicação e detecção de falhas e ativação de alarmes.

4.1 Desenvolvimento dos modelos virtuais 3D

O primeiro passo para o desenvolvimento do ambiente de visualização remota do sistema foi a criação dos modelos 3D de cada célula de fabrico, atentando-se à necessidade das peças dinâmicas (esteiras, empurradores e brocas) serem virtualizadas separadamente das peças estáticas.

Foi optado pelo uso do *software* de desenho CAD 3D SolidWorks, pela facilidade de criação e união de diferentes peças, e fácil exportação em vários formatos de arquivo, facilitando-se assim a integração com diferentes ambientes de simulação e possibilitando trabalhos futuros em diferentes plataformas sem a necessidade de refazer esta etapa.

Para desenvolvimento dos modelos 3D, foram primeiramente realizadas as medições de cada peça que compõe as células de fabrico, e desenvolvidas separadamente, utilizando as funções de desenho 2D (*sketch*), e modelagem 3D (*extrude*, *hole*, *cut extrude*) presentes

no *software*.

Após o desenvolvimento de cada peça, é utilizada a função *Assembly* do SolidWorks para se realizar a montagem das células. Esta técnica permite o reaproveitamento das peças desenvolvidas anteriormente, evitando assim o retrabalho de se desenvolver cada célula de forma única (pode-se utilizar um mesmo motor CC para montagem de todas as células, por exemplo).

A Figura 4.1 ilustra o desenvolvimento das peças no ambiente de desenho do Solidworks.

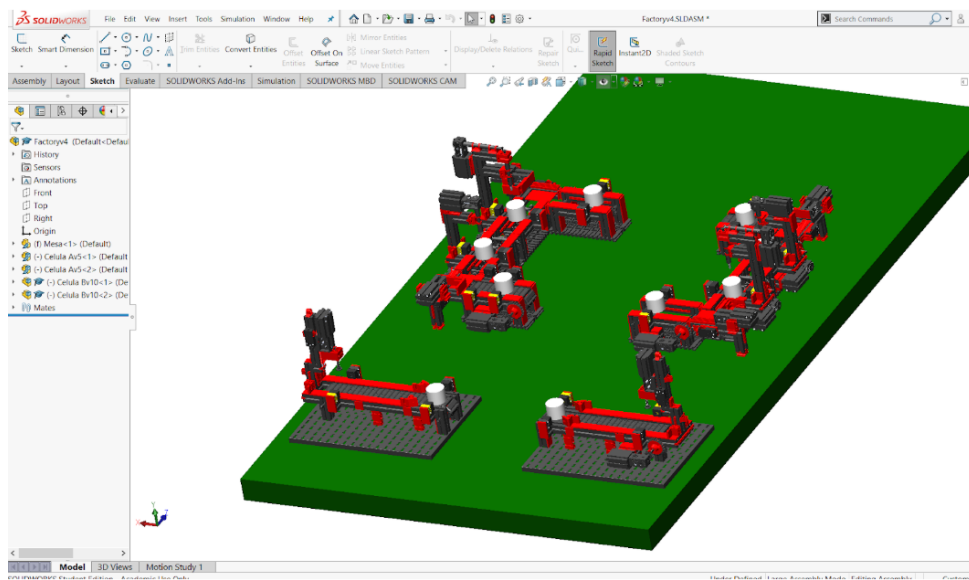


Figura 4.1: Modelos 3D das células de fabrico no ambiente do Solidworks

4.2 Desenvolvimento do sistema de visualização remota 3D

Para o desenvolvimento do sistema de visualização remota, foi optado pelo uso do software de simulação de robótica V-REP, por oferecer um ambiente muito versátil de simulação.

O V-REP permite a criação de diferentes cenas personalizadas, é portanto uma boa ferramenta para o desenvolvimento do ambiente virtual de visualização do *Digital Twin*.

O *software* disponibiliza diversos modelos virtuais 3D em bibliotecas, para facilitar o trabalho de virtualização de um sistema físico, porém os sistema de manufatura flexível do CeDRI, por ser composto de células *fischertechnik* e montado de maneira personalizada, teve de ser criado do início.

É possível importar modelos 3D externos em diferentes formatos para o ambiente do V-REP, e dentre estes foi utilizado o formato Unified Robot Description Format (URDF), que é um arquivo em formato XML para representar um modelo de robôs. Após o desenvolvimento dos modelos 3D das células de fabrico, foi utilizado o *plugin* “*Solidworks URDF exporter*” para criação dos arquivos URDF, posteriormente importados diretamente para o ambiente de simulação do V-REP. A Figura 4.2 ilustra os modelos 3D das células de fabrico após a importação para o V-REP.

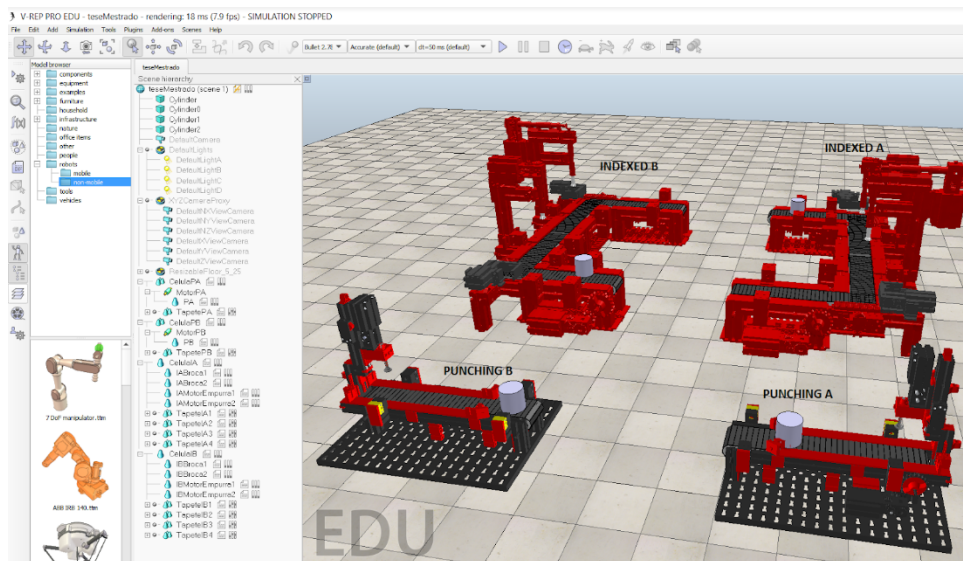


Figura 4.2: Modelos 3D das células de fabrico no ambiente do V-REP.

Na utilização das técnicas previamente descritas, deve-se atentar que as peças dinâmicas do sistema devem ser exportadas separadamente, para permitir a liberdade de movimentação a ser executada posteriormente na fase de *scripting*. Nesta etapa, é possível utilizar inserir valores fictícios de grandezas físicas, (como torque nos motores, velocidade nas esteiras e técnicas de simulação de sensores) para previsão do comportamento do sistema em diversas situações. Já nesta fase, o ambiente de simulação é uma ferramenta que

auxilia na tomada de decisão e análise da performance de sistemas de manufatura.

Para caracterizar um *Digital Twin*, é necessário desenvolver um sistema de simulação que opere em consonância com seu gêmeo físico, e portanto foi necessário o desenvolvimento de um sistema de aquisição de dados que permitisse o acesso aos dados dos sensores/atuadores armazenados nos endereços de memória do CLP e compartilhados com a *intranet* da escola.

4.3 Desenvolvimento do sistema de aquisição e tratamento de dados

O algoritmo de controlo presente no CLP estudado permite a partilha dos dados dos sensores/atuadores armazenados nos endereços de memória do CLP com a *intranet* da ESTiG, através do protocolo de comunicação Modbus/TCP, previamente abordado neste trabalho. Os dados são armazenados na forma de memórias nos registradores do CLP, e foram dispostos na forma apresentada na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Endereçamento de memórias dos sensores e atuadores.

%mw	Descrição	Célula	%mw	Descrição	Célula
Atuadores			Sensores		
0.0	Motor Tapete Tras	PB	20.0	Sensor 1 Tapete	PA
0.1	Motor Tapete Frente	PB	20.1	Sensor 2 Tapete	PA
0.2	Motor Broca Down	PB	20.2	Sensor Broca Down	PA
0.3	Motor Broca Up	PB	20.3	Sensor Broca Up	PA
0.4	Motor Tapete Frente	PA	20.4	Sensor 1 Tapete	PB
0.5	Motor Tapete Tras	PA	20.5	Sensor 2 Tapete	PB
0.6	Motor Broca Down	PA	20.6	Sensor Broca Down	PB
0.7	Motor Broca Up	PA	20.7	Sensor Broca Up	PB
0.8	Motor Tapete 1	IA	20.8	Sensor 1 Tapete 1	IA
0.9	Motor Tapete 2	IA	20.9	Sensor 2 Tapete 1	IA
0.10	Motor Tapete 3	IA	20.10	Sensor Broca 1	IA
0.11	Motor Tapete 4	IA	20.11	Sensor Broca 2	IA
0.12	Motor Empura 1 Frente	IA	20.12	Sensor Tapete 4	IA
0.13	Motor Empura 1 Tras	IA	20.13	Sensor Empurra 1 Frente	IA
0.14	Motor Empura 2 Frente	IA	20.14	Sensor Empurra 1 Tras	IA
0.15	Motor Empura 2 Tras	IA	20.15	Sensor Empurra 2 Frente	IA
1	Motor Broca 1	IA	21.0	Sensor Empurra 2 Tras	IA
1.1	Motor Broca 2	IA	21.1	Sensor 1 Tapete 1	IB
1.2	Motor Tapete 1	IB	21.2	Sensor Empurra 1 Frente	IB
1.3	Motor Tapete 2	IB	21.3	Sensor Tapete 4	IB
1.4	Motor Tapete 3	IB	21.4	Sensor Empurra 2 Frente	IB
1.5	Motor Tapete 4	IB	21.5	Sensor Broca 1	IB
1.6	Motor Empura 1 Frente	IB	21.6	Sensor Empurra 1 Tras	IB
1.7	Motor Empura 1 Tras	IB	21.7	Sensor Empurra 1 Tras	IB
1.8	Motor Empura 2 Frente	IB	21.8	Sensor Broca 2	IB
1.9	Motor Empura 2 Tras	IB	21.9	Sensor 2 Tapete 1	IB
1.10	Motor Broca 1	IB			
1.11	Motor Broca 2	IB			

O desenvolvimento da aplicação de aquisição e tratamento de dados foi desenvolvida utilizando o Integrated Development Environment (IDE) Eclipse. A escolha foi feita com base em pesquisas que demonstram que o Eclipse foi criado como uma plataforma para ferramentas de *plug-in* que ampliam os recursos do IDE para que ele possa trabalhar com várias linguagens de programação e aplicativos, onde qualquer um pode escrever plugins para Eclipse e tê-los a trabalhar diretamente com quaisquer outros *plug-ins* para a plataforma, enquanto outros IDEs limitam a criação de *plug-in* a parceiros da empresa [66].

Foi levada em consideração a capacidade da aplicação Java se comportar como “*client side*” para fornecimento dos dados ao “*server side*” do V-REP, portanto é possível estabelecer comunicação com o ambiente de simulação através do protocolo *Remote API*, explicado com mais detalhes no item seguinte deste trabalho.

O desenvolvimento aplicação de aquisição de dados foi separada em quatro partes:

1. Conexão com o CLP e coleta dos dados dos registradores;
2. Tratamento dos dados em informações úteis;
3. Conexão com o sistema virtual de visualização (V-REP);
4. Conexão com o sistema virtual de monitorização (Node-Red).

Primeiramente, foi realizada a conexão com o CLP através do seu endereço IP, pela arquitetura de rede mestre-escravo do protocolo Modbus/TCP previamente descrito. O fluxograma lógico de funcionamento do código para conexão e leitura dos dados dos registradores, conforme indicado pela especificação do protocolo Modbus [67]. A Figura 4.3 ilustra o fluxograma de aplicação do protocolo Modbus/TCP.

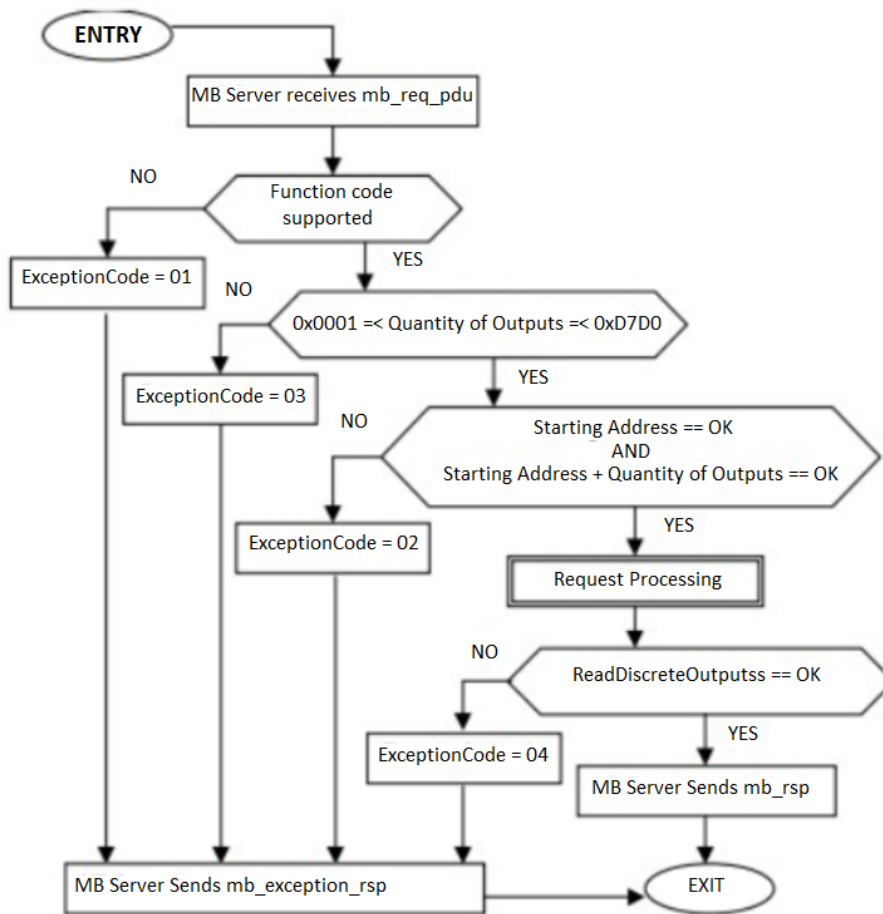


Figura 4.3: Fluxograma de aplicação do protocolo Modbus/TCP [67].

Os dados coletados foram armazenados em variáveis na aplicação Java, para posterior tratamento e conversão em informações úteis para o usuário, como velocidade das esteiras, tempo decorrido em cada esteira, detecção de falhas e tempo médio entre falhas. Para o tratamento dos dados foi desenvolvida uma classe “ContaTempo”, que realiza a contagem de tempo decorrido em cada esteira das células de fabrico, utilizando o método Java “java.lang.System.currentTimeMillis()”, que coleta o instante atual na escala de milissegundos. O desenvolvimento da classe foi necessário para que o sistema funcionasse como uma *thread*, e assim não interrompesse o funcionamento do código principal na aplicação. A classe utiliza o método “java.lang.System.currentTimeMillis()” ao detetar o acionamento do sensor de início (T1) e do sensor de fim de curso (T2), e retorna o tempo

decorrido ao realizar a diferença entre os dois instantes de tempo. A Figura 4.4 ilustra o funcionamento lógico da classe desenvolvida.

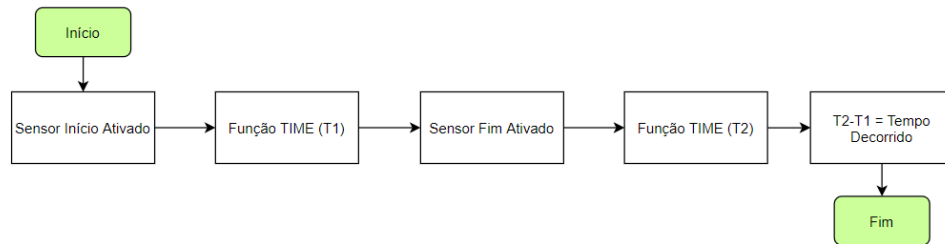


Figura 4.4: Esquema lógico da classe ContaTempo.

Medindo-se o comprimento total das esteiras e dividindo-os pelo tempo calculado, foram obtidas as velocidades médias de cada esteira. Foi necessário realizar a multiplicação deste valor por um fator de correção ao transmitir o dado para o sistema virtual, pois ao exportar os objetos virtuais para o V-REP, foram perdidas informações de dimensão real do sistema físico. Foram medidos os comprimentos das esteiras dos modelos virtuais utilizando as ferramentas disponíveis no ambiente de simulação, para calcular o fator de correção, obtendo assim as velocidades em que os modelos 3D deveriam se movimentar para possuir funcionamento análogo ao sistema real.

Na aplicação Java, foi desenvolvido um algoritmo de detecção de falhas, com regras definidas pelos autores: O tempo de funcionamento do sistema é medido utilizando um timer, a partir do momento que se inicia o *Digital Twin*; Os tempos medidos em cada esteira são armazenados em vetores em tempo-real; É realizado o cálculo da média destes tempos armazenados no vetor; Foi definida uma margem de erro de 20% do valor de tempo médio, para cada esteira; Caso o valor de tempo medido da iteração ultrapasse a margem de 20% de segurança, é então detetada uma falha e um alarme é acionado; Cada detecção de falha aumenta o valor de um contador desenvolvido para este fim, para cada esteira; Com o número total de falhas detetadas e o tempo total de funcionamento do sistema, é calculado o *MTBF*, dividindo-se o tempo pelo número de falhas, para cada esteira. O fluxograma lógico do algoritmo de detecção de falhas é ilustrado pela Figura 4.5.

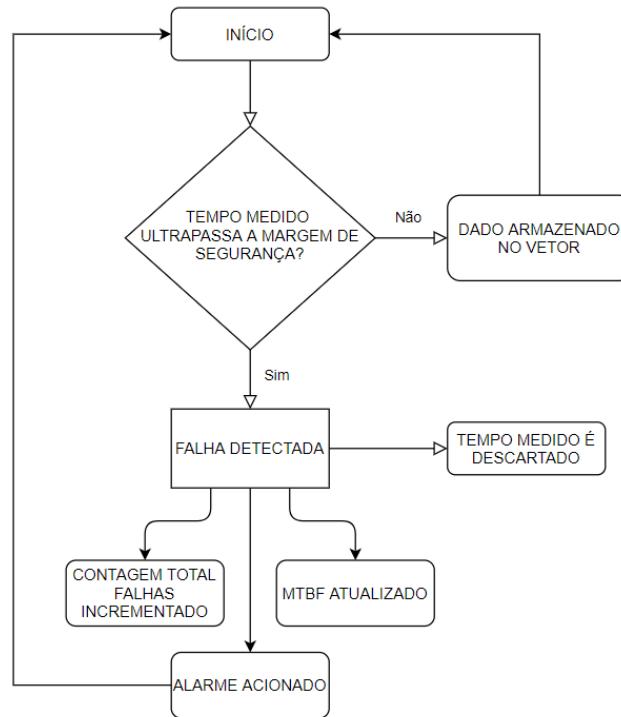


Figura 4.5: Fluxograma de funcionamento do algoritmo de detecção de falhas.

Para realizar a comunicação dos dados com o ambiente de simulação, permitindo que o modelos 3D se comportassem da mesma maneira que o sistema real, foi utilizada a função *Remote API*, disponível no V-REP. O *Remote API* permite a integração do ambiente de simulação com dados provenientes de fontes externas, como a aplicação de aquisição de dados em Java.

Através do *Remote API*, é possível transmitir o valor de uma variável da aplicação Java para o ambiente de simulação do V-REP, em tempo real, utilizando então os valores das variáveis como parâmetros para rodar a simulação, possibilitando o sistema virtual de se comportar da mesma maneira que o sistema real.

Os dados de funcionamento e informações de parâmetros do sistema (tempos, falhas) foram transmitidos para o ambiente de monitorização em Node-Red (descrito com maiores detalhes no item 3.6 deste trabalho) utilizando o protocolo de comunicação MQTT, um protocolo que utiliza técnicas de *publisher/subscriber*, comumente utilizado em *WSN* ou demais aplicações *M2M* para estabelecer a comunicação entre diversos nós sensores e

aplicações externas [68]. O dado é “postado” em um tópico, e ao se “inscrever” no tópico, a aplicação é habilitada a receber o dado “postado”. A Figura 4.6 ilustra o princípio de funcionamento da comunicação *publisher/subscriber*, portanto do MQTT.

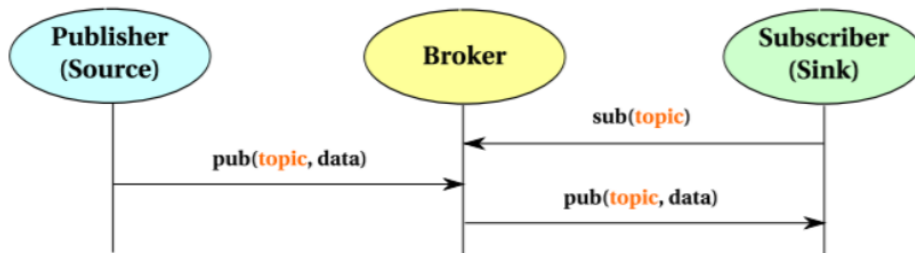


Figura 4.6: Comunicação baseado em tópicos [68].

Utilizando MQTT, é possível visualizar os dados relevantes para o usuário, e monitorizar remotamente o sistema utilizando o *dashboard* do Node-red em tempo-real. O protocolo MQTT também é uma ferramenta que fornece meios para a criação de diferentes ambientes de monitorização remota do sistema, como a utilização de mais sensores integrados no sistema, que se comuniquem ao ambiente virtual de forma independente do CLP e do protocolo Modbus/TCP.

No ambiente de programação do Eclipse, foi optado pela utilização do broker MQTT Eclipse Mosquitto, por ser “adequado para uso em todos os dispositivos, desde computadores de placa única de baixa potência até servidores completos” [69] e permitir a fácil implementação e envio dos dados de forma eficiente.

Os dados enviados para o V-REP são dados binários dos sensores, utilizados para parametrizar a simulação. Para o *Digital Twin* se comportar de forma análoga ao sistema real, foi necessário o desenvolvimento de animações no ambiente virtual de simulação.

4.4 Desenvolvimento do Ambiente de Visualização

Para que o seja possível visualizar o sistema físico remotamente através do *Digital Twin*, é necessário que a simulação funcione exatamente como o SMF. O V-REP oferece a possibilidade de desenvolvimento de *scripts* para comandar a movimentação das peças dinâmicas:

deslocamento das pás da esteira, rotação das brocas, movimentação dos empurradores e a movimentação das peças nas esteiras.

Os dados binários dos sensores, armazenados nas variáveis individuais na aplicação Java em formato *float*, são enviados para o V-REP utilizando a aplicação *Remote API*. No ambiente de simulação, os dados enviados são recolhidos através de uma função nos *scripts*, permitindo o controlo das animações com os dados recolhidos em tempo real dos atuadores.

Os *scripts* foram desenvolvidos em linguagem de programação LUA, utilizando as funções da *Regular API* disponível no V-REP. A *Regular API* apresenta diversas funcionalidades personalizáveis, como movimentação linear, movimentação angular, criar ou deletar formas, mudança de cores, entre outros, permitindo assim a personalização e criação de diferentes funções com a utilização dos *scripts*, portanto sendo uma ferramenta adequada na criação de *Digital Twins* em sistemas personalizados, como no caso das células *Fischertechnik*.

Na plataforma de aquisição de dados, é utilizada a função “*sim.setFloatSignal*”, onde são definidos os parâmetros a serem enviados para o V-REP, onde no *scripts*, é chamada a função “*sim.getFloatSignal*” que retorna o valor da variável a ser enviada pelo sistema de aquisição de dados. Desta forma é possível parametrizar a simulação e as animações utilizando os dados coletados em tempo real pela plataforma JAVA. A Figura 4.7 ilustra o ambiente de *scripting* do atuador da célula de punção, o qual movimenta-se verticalmente caso o sinal do sensor seja detetado através da aplicação do *Remote API*.

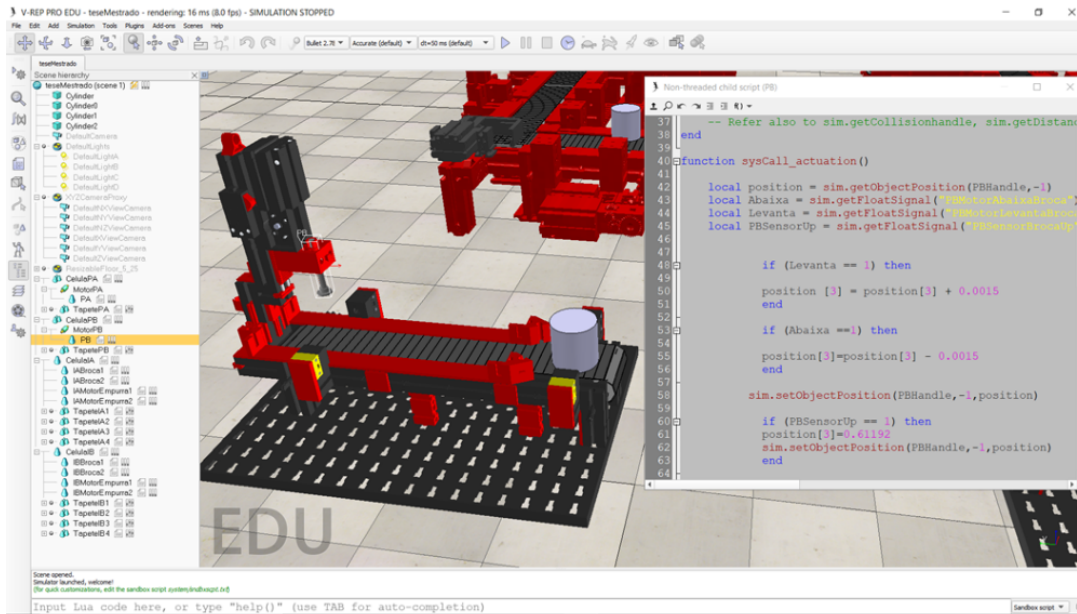


Figura 4.7: Exemplo de aplicação do *Remote API* para controlo de movimentação.

Em um primeiro momento, as animações foram desenvolvidas inteiramente utilizando as variáveis internas do sistema do V-REP e a *Regular API*, e posteriormente foi adaptado para utilizar os dados do sistema físico, fornecidos pela aplicação de aquisição de dados.

Todas as esteiras, punções, brocas e empurradores foram virtualizados dinamicamente, e as animações foram desenvolvidas individualmente, utilizando as técnicas previamente descritas. A *Remote API* permite que as animações aconteçam somente se a parte dinâmica do sistema físico também esteja em movimento, detetado a partir dos sinais dos atuadores das esteiras, brocas e empurradores.

4.5 Desenvolvimento do Sistema de Monitorização

Para ser possível auxiliar na tomada de decisão do usuário, foi desenvolvida uma aplicação de monitorização do sistema físico com dados coletados em tempo real da plataforma de aquisição de dados JAVA. O sistema de monitorização foi desenvolvido através da plataforma Node-Red, que possui um sistema de programação em blocos Javascript baseado na estrutura *Node.js*.

O Node-red possui uma GUI de simples implementação e visualização, permitindo a personalização, interatividade e fácil integração com demais tecnologias, como protocolos de comunicação (Modbus, MQTT), bases de dados em nuvem, e diversas funções pré-programadas no formato de blocos, simplificando a implementação de aplicações para desenvolvedores que apresentam experiência intermediária em programação *Javascript*.

Os dados foram enviados para o sistema *Node-Red* através da implementação do protocolo de comunicação de dados MQTT, que utiliza o modelo de comunicação topic/subscriber, previamente abordado neste trabalho. Na aplicação de aquisição de dados Java, as informações relativas ao sistema são publicadas nos tópicos correspondentes a cada célula, onde são enviadas os alarmes de falhas detetadas (Em funcionamento / Erro Detectado), tempo decorrido em cada tapete, número total de falhas detetadas, e o *MTBF* de cada tapete.

Na aplicação *Node-Red*, foi utilizado o nó tipo *MQTT In*, para realizar a “inscrição” no tópico e realizar a aquisição do dado enviado pela aplicação Java em tempo real, o qual é visualizado então como uma mensagem de texto pelo nó "ui_text". A Figura 4.8 ilustra o ambiente de programação em blocos Node-Red, e as configurações utilizadas para realizar o fluxo de dados através da aplicação do protocolo MQTT e o nó *MQTT In*.

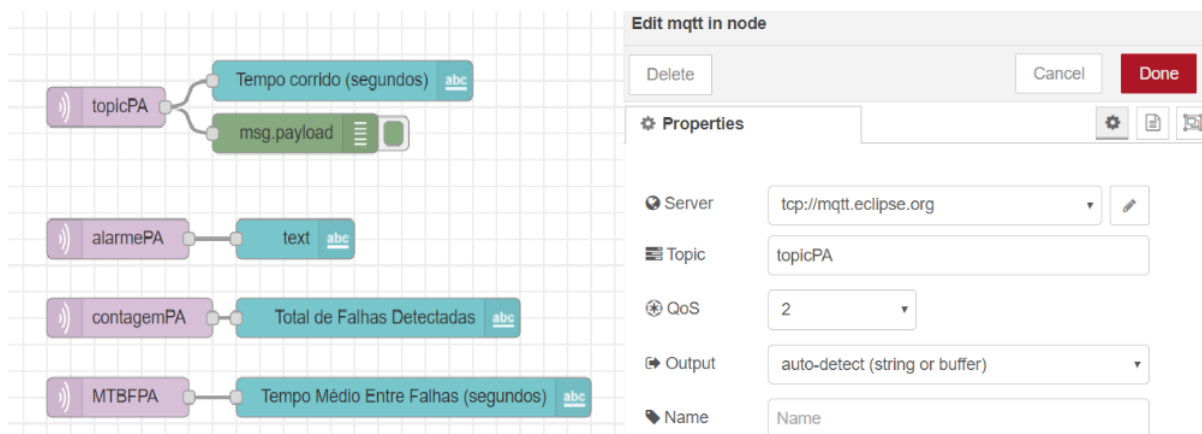


Figura 4.8: Desenvolvimento e configuração do ambiente de monitorização Node-Red através do protocolo de comunicação MQTT.

O *dashboard* do Node-red é personalizável, permitindo a criação de diversas páginas acessíveis através de botões programáveis na própria interface gráfica, possibilitando a

interação e distribuição dos dados relevantes em diversas camadas do *Digital Twin*, evitando a condensação excessiva dos dados que pode levar à uma dificuldade na visualização pelo usuário.

Após a implementação do sistema de monitorização, o desenvolvimento do *Digital Twin* é finalizado, possibilitando ao usuário visualizar o funcionamento do sistema e dados que auxiliam na sua tomada de decisão de forma remota.

Capítulo 5

Resultados e Discussão

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos com a aplicação das técnicas descritas no capítulo 4. São apresentadas imagens que ilustram o funcionamento dos sistemas de visualização e monitorização remota do *digital twin*, respetivamente.

5.1 Aplicação de Aquisição de Dados

O desenvolvimento do sistema de aquisição de dados possibilitou a coleta, tratamento e transmissão do fluxo de dados do CLP para ambas as plataformas de visualização e monitorização do *Digital Twin*, possibilitando assim a virtualização do sistema. A plataforma Eclipse (e a linguagem de programação JAVA) provou ser uma ferramenta útil e de fácil implementação e integração com os demais *softwares*, devido à grande documentação disponível online, tutoriais para desenvolvimento de aplicações em diferentes áreas, e grande número de bibliotecas pré-programadas que facilitam o desenvolvimento de aplicações de *Digital Twin* (como a biblioteca open source Eclipse Mosquitto, que permitiu a implementação fácil do protocolo MQTT para envio dos dados para a plataforma de monitorização).

A coleta dos dados do CLP através do protocolo Modbus/TCP provou-se de alta confiabilidade, com latência compatível à necessidade do sistema, simples implementação e integração com os demais *softwares* utilizados neste trabalho, sendo adequado para a

aplicação desenvolvida.

A utilização do protocolo MQTT através do broker Eclipse Mosquitto foi de rápida e simples implementação entre o Eclipse e o Node-Red, sendo uma ferramenta eficiente de comunicação de dados nos paradigmas da Indústria 4.0 e *IoT*.

5.2 Ambiente de Visualização

O SMF composto por células de usinagem *Fischertechnik* foi virtualizado com sucesso conforme descrito anteriormente, através do desenvolvimento dos modelos virtuais do sistema utilizando *softwares* de desenho CAD 3D, importando-os para o *software* de simulação V-REP, e as animações desenvolvidas utilizando as funções do *Regular API*, controladas pelos dados externos do sistema físico (CLP) através da implementação do Remote API. A Figura 5.1 ilustra o gêmeo físico (sistema real) e o seu gêmeo digital (sistema virtual) no ambiente do V-REP.

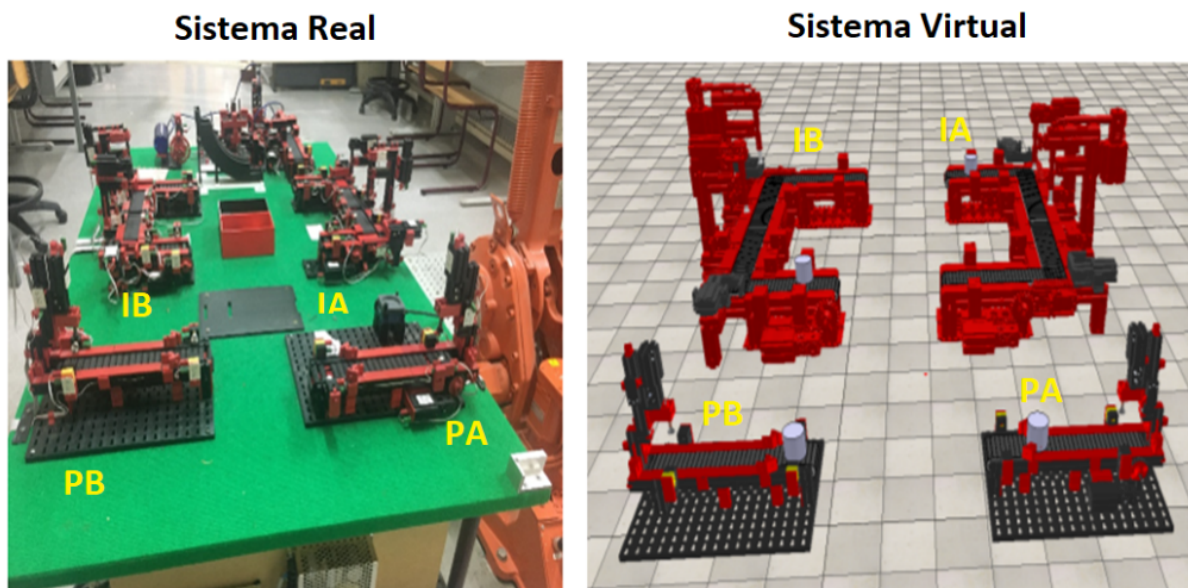


Figura 5.1: Sistema Real vs Sistema Virtual.

A Figura 5.2 ilustra com mais detalhes o ambiente de visualização do SMF no V-REP.

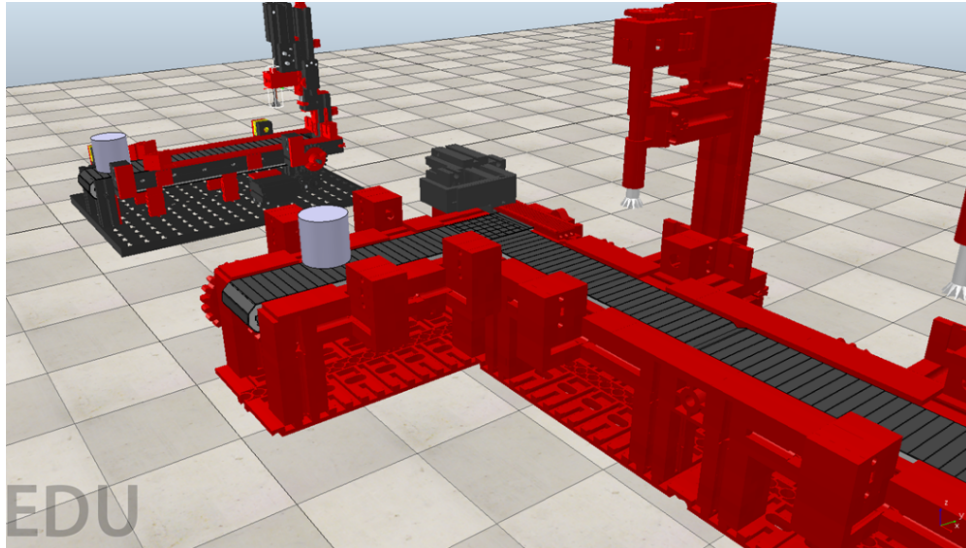


Figura 5.2: Detalhe do ambiente de visualização remota do *Digital Twin* (V-REP).

Como descrito no item 3.1 deste trabalho, não foi possível aceder aos dados de posição (ângulos ou posição das juntas) do robô de forma automatizada, impossibilitando a virtualização. O modelo 3D do robô ABB foi desenvolvido e importado para o ambiente de simulação, porém a incapacidade de se coletar os dados em tempo real não possibilitou a implementação do seu *Digital Twin*, sendo virtualizadas apenas as células de usinagem *Fischertechnik*.

O envio dos dados para o ambiente de visualização do V-REP, apesar de simples implementação limita as opções de forma de envio dos dados, notando-se que cada dado deve ser enviado individualmente em variáveis separadas, aumentando assim a latência, uso de memória do sistema e reduzindo a precisão do *Digital Twin* no ambiente do V-REP, podendo inviabilizar seu uso para aplicações que necessitam de menor latência (aplicações de alta precisão). A visualização de dados numéricos é limitada na interface do V-REP, que foca na visualização de modelos 3D e animações gráficas, o que gerou a necessidade de utilização de um ambiente externo de programação (Node-Red) para desenvolvimento do painel de monitorização.

5.3 Ambiente de Monitorização

O desenvolvimento do ambiente de monitorização provou-se de alta eficácia na visualização de dados pelo usuário de forma remota, sendo uma ferramenta com alto potencial para auxílio na tomada de decisão de gestores e profissionais que necessitam do acesso aos dados de forma rápida, visual e com alto teor de informações condensadas (como o *MTBF*), auxiliando no entendimento rápido das características do sistema que necessitam melhora e otimização, sem a necessidade de aprofundamento técnico na programação do sistema.

Utilizando a abordagem descrita neste trabalho, é possível desenvolver algoritmos que utilizam os dados do sistema físico para transmitir outras informações, sendo simples a implementação de alterações no sistema desenvolvido no Node-Red, provando ser assim uma ferramenta altamente escalável, de rápida implementação e confiabilidade. A Figura 5.3 ilustra o painel de monitorização desenvolvido no dashboard do Node-Red.



Figura 5.3: Painel de Monitorização do *Digital Twin*.

Por se tratar de uma ferramenta aberta que utiliza dados disponibilizadas através da rede *wireless*, algoritmos de controlo de acesso à rede e demais técnicas relacionadas à segurança dos dados necessitam de desenvolvimento para garantir a possibilidade da aplicação da tecnologia em ambientes industriais, onde a segurança dos dados é um fator de extrema importância para as empresas que atuam no setor produtivo.

5.4 Principais Dificuldades Encontradas

A primeira dificuldade encontrada no desenvolvimento do *Digital Twin* foi o fato do robô ABB IRB 1400 se tratar de um modelo antigo, em que sua programação é realizada através de disquetes, o que impossibilitou a coleta de dados em tempo real para permitir o funcionamento equivalente das animações do modelo virtual com o sistema real.

Células *Fischertechnik* são utilizadas para realização de simulações de conceitos de Indústria 4.0 em ambientes de fabrico reais, e o SMF do CeDRI é um sistema personalizado em que os modelos 3D das peças não se encontravam disponíveis em nenhum acervo online, portanto foi necessário o seu desenvolvimento do início. Este fato tornou o desenvolvimento do *Digital Twin* trabalhoso, em que tempo utilizado para a modelagem 3D do sistema poderia ter sido utilizado para desenvolvimento de algoritmos mais otimizados para fornecimento de um maior número de informações para o usuário, melhorias gráficas na interface de monitorização e o desenvolvimento do *Digital Twin* em mais níveis de complexidade.

O fato das células *Fischertechnik* serem utilizadas constantemente por outros usuários do laboratório (alunos e professores) causa um deterioramento físico do sistema, que ocasiona em alguns problemas observados em seu funcionamento (como mau contacto nos sensores/atuadores) que podem causar comportamentos inesperados no *Digital Twin*. Estes comportamentos inesperados são tratados na prática como erros grosseiros, não interferindo na análise de falhas e no *MTBF*.

Por fim, o ambiente de monitorização Node-Red só possibilita a análise dos dados enquanto o *Digital Twin* está em funcionamento, necessitando que uma máquina utilize a aplicação JAVA para coletar os dados do sistema durante todo o tempo. Uma falha na rede (manutenção ou queda) causa a perda de dados passados, devendo ser reiniciado o processo de coleta e análise, portanto novas abordagens para coleta dos dados sem a dependência da intranet são encorajadas, como o uso de outros protocolos que realizam a comunicação de dados de forma descentralizada sem a necessidade de um PC (LoRaWAN, por exemplo).

Capítulo 6

Conclusões

O uso de *Digital Twins* e *CPS* em ambientes de fabrico é uma realidade cada vez mais presente em ambientes industriais. Diversas técnicas e softwares são utilizados para o desenvolvimento de *Digital Twins* em diversos sistemas produtivos, permitindo uma análise completa do ciclo de vida de um produto. O número de estudos nesta área é crescente, e o *Digital Twin* é um conceito que apresenta uma abordagem inovadora de análise e controlo, permitindo a visualização e monitorização remota do sistema em tempo real, sendo uma ferramenta de gestão de alta eficiência.

Este trabalho apresenta uma abordagem para desenvolvimento do *Digital Twin* de um Sistema de Manufatura Flexível *Fischertechnik*, localizado em um dos laboratórios do CeDRI. Utilizando as técnicas descritas é teoricamente possível desenvolver o *Digital Twin* de qualquer sistema personalizado, desde que seja possível aceder aos dados de sensores/atuadores do sistema.

O ambiente de visualização do *Digital Twin* permite a observação do funcionamento do sistema de forma remota, onde o usuário pode verificar falhas e acompanhar de forma remota e em tempo real o funcionamento do sistema fabril.

O painel de monitorização do *Digital Twin* permite ao usuário a análise de dados relevantes do funcionamento do sistema, indicadores de qualidade e confiabilidade, sendo uma ferramenta de gestão que permite análises rápidas e remotas, auxiliando na tomada de decisão e otimização do sistema.

O sistema permite ao usuário visualizar o funcionamento do sistema de fabrico remotamente, sem a necessidade de traslado para o local físico, tal como a monitorização em tempo real do sistema desde que o usuário esteja conectado à *intranet*. O sistema de alarmes permite ao utilizador verificar falhas no sistema de forma remota, tal como analisar indicadores de confiabilidade, auxiliando na tomada de decisão.

6.1 Trabalhos Futuros

A dificuldade de se visualizar dados no V-REP tornou necessária a utilização de um segundo software, Node-Red, para tornar possível a monitorização dos dados em tempo real. É então proposta, em trabalhos futuros, a utilização de softwares que possibilitem a visualização do sistema e monitorização de dados de forma simultânea em um mesmo ambiente, facilitando-se a implementação e utilização do *digital twin*.

Os modelos 3D desenvolvidos em SolidWorks e exportados para o V-REP possuem alto nível de detalhe, tornando o *digital twin* uma aplicação pesada, com um nível significativo atraso no funcionamento do sistema virtual com relação ao sistema real. Sugere-se a utilização de máquinas com maior capacidade de processamento, ou softwares que simplifiquem os modelos 3D de forma a apresentar menor latência. Desta forma é possível a implementar as técnicas abordadas neste trabalho em aplicações que exijam maior precisão e menor tempo de resposta do *Digital Twin*.

Devido ao modelo do robô ABB ser antigo, a comunicação em tempo real foi inviabilizada neste trabalho. Propõe-se então a utilização de um robô mais moderno para realizar a manipulação das peças do SMF. Desta forma, permite-se a sua virtualização, e assim o desenvolvimento do *digital twin* do sistema completo.

Por fim, o sistema de alarmes e detecção de falhas foi desenvolvido com base em parâmetros definidos pelos desenvolvedores (utilização de um percentual do valor médio de tempo decorrido como parâmetro para detecção de uma falha). Em trabalhos futuros, é encorajada a utilização de algoritmos de machine learning ou inteligência artificial de forma a otimizar os algoritmos de detecção de falhas, aumentando assim a confiabilidade

e escalabilidade do *Digital Twin*.

Bibliografia

- [1] J. Lee, B. Bagheri e H.-A. Kao, «A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems», *Manufacturing Letters*, vol. 3, pp. 18–23, 2015, ISSN: 2213-8463. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2014.12.001>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221384631400025X>.
- [2] M. P. Reifsnider K, «Multiphysics stimulated simulation digital twin methods for fleet management», *Structural Dynamics, and Materials Conference*, 2013.
- [3] V. J. Grieves M., «Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems», *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems*, 2017.
- [4] N. J. e. a. Hochhalter J Leser WP, «Coupling damage sensing particles to the digital twin concept», 2014.
- [5] S. D. Glaessgen E, «The digital twin paradigm for future NASA and US Air Force vehicles», *Structural Dynamics and Materials Conference 20th AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Conference 14th AIAA 1818*, 2012.
- [6] E. Negri, L. Fumagalli e M. Macchi, «A Review of the Roles of Digital Twin in CPS-based Production Systems», *Procedia Manufacturing*, vol. 11, pp. 939–948, 2017, 27th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing, FAIM2017, 27-30 June 2017, Modena, Italy, ISSN: 2351-9789. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.198>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978917304067>.

- [7] M. T. de Azevedo, «Transformação Digital na Indústria: Indústria 4.0 e a Rede de Água Inteligente», tese de doutoramento, Universidade de São Paulo, 2017.
- [8] M. A. Pisching, «Arquitetura para descoberta de equipamentos em processos de manufatura com foco na Indústria 4.0», tese de doutoramento, Universidade de São Paulo, 2018.
- [9] M. W. Ahmad-Reza Sadeghi Christian Wachsmann, «Security and Privacy Challenges in Industrial Internet of Things», *Proceedings of the 52nd Annual Design Automation Conference*, vol. 15, n.º 54, pp. 1–6, 2015. DOI: 10.1145/2744769.2747942.
- [10] R. Anderl, «Industrie 4.0 -Advanced Engineering o Smart Products and Smart Production», 2015. DOI: 10.13140/2.1.1039.4406.
- [11] R. S. Nakayama, «Oportunidades de Atuação na cadeia de fornecimento de sistemas de automação para indústria 4.0 no Brasil», tese de doutoramento, Universidade de São Paulo, 2017.
- [12] R. Aversa, R. V. V. Petrescu, F. I. T. Petrescu e A. Apicella, «Smart-Factory: Optimization and Process Control of Composite Centrifuged Pipes», *American Journal of Applied Sciences*, vol. 13, n.º 11, pp. 1330–1341, 2016. DOI: 10.3844/ajassp.2016.1330.1341.
- [13] B. Chen, J. Wan, L. Shu, P. Li, M. Mukherjee e B. Yin, «Smart Factory of Industry 4.0: Key Technologies, Application Case, and Challenges», *IEEE Access*, vol. 6, pp. 6505–6519, 2018.
- [14] G. Hwang, J. Lee, J. Park e T.-W. Chang, «Developing performance measurement system for Internet of Things and smart factory environment», *International Journal of Production Research*, vol. 55, n.º 9, pp. 2590–2602, 2017. DOI: 10.1080/00207543.2016.1245883. URL: <https://doi.org/10.1080/00207543.2016.1245883>.

- [15] A. Radziwon, A. Bilberg, M. Bogers e E. S. Madsen, «The Smart Factory: Exploring Adaptive and Flexible Manufacturing Solutions», *Procedia Engineering*, vol. 69, pp. 1184–1190, 2014, 24th DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation, 2013, ISSN: 1877-7058. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.03.108>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705814003543>.
- [16] D. Zuehlke, «SmartFactory—Towards a factory-of-things», *Annual Reviews in Control*, vol. 34, n.º 1, pp. 129–138, 2010, ISSN: 1367-5788. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2010.02.008>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1367578810000143>.
- [17] F. E. da Silveira Pazotto Palma, «Project Management best practices for cyber-physical systems development», tese de doutoramento, Universidade de São Paulo, 2016.
- [18] F. Tao, J. Cheng, Q. Qi, M. Zhang, H. Zhang e F. Sui, «Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data», *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 94, pp. 3563–3576, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0233-1>.
- [19] J. Browne, D. Dubois, K. Rahmill e K. E. Stecke, *Classification of flexible manufacturing systems*. The FMS Magazine, 1984.
- [20] *Materialise Website*, <https://www.materialise.com/en/blog/future-isindustry-40>, Accessed: 2020-03-25.
- [21] R. P. Anna Helena Reali Costa, «Construindo robôs autônomos para partidas de futebol: O time guaraná», *SBA Controle e Automação*, vol. 11, pp. 141–149, 2000.
- [22] R. G. Simmons, «Structured Control for Autonomous Robots», *IEEE Transactions on robotics and automation*, vol. 10, n.º 1, 1994. DOI: 1042-296X/9404.00.

- [23] G. B. T. João Vítor Peroni de Almeida, «Tecnologia LoRaWAN aplicada à agricultura de precisão no Brasil», tese de doutoramento, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2017.
- [24] A. Gilchrist, *Industry 4.0: The industrial internet of things*. apress, 2016. DOI: 10.1007/978-1-4842-2047-4.
- [25] C. Lim, M. Kim e J. e. a. Heo, «Design of informatics-based services in manufacturing industries: case studies using large vehicle-related databases.», *J Intell Manuf*, vol. 29, pp. 497–508, 2018. DOI: 10.1007/s10845-015-1123-8.
- [26] OECD, *ICTs and the health sector: Towards smarter health and Wellness models*. OECD Publishing, 2015. DOI: 10.1787/9789264202863.
- [27] Sowmya R e Suneetha K R, «Data Mining with Big Data», em *2017 11th International Conference on Intelligent Systems and Control (ISCO)*, 2017, pp. 246–250.
- [28] E. B. Andrew McAfee, *Big Data: The Management Revolution*. Harvard Business Review, 2012.
- [29] A. P. Rachna Arora, «Secure User Data in Cloud Computing Using Encryption Algorithms», *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)*, vol. 3, pp. 1922–1926, 2013.
- [30] Z. Shen, L. Li, F. Yan e X. Wu, «Cloud Computing System Based on Trusted Computing Platform», *International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation*, vol. 1, pp. 942–945, 2010.
- [31] D. Whyte, «Using a Systems-Theoretic Approach to Analyze Cyber Attacks on Cyber-Physical Systems», tese de doutoramento, MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY, 2017.
- [32] *Fahmida Y. Rashid. Project shine reveals magnitude of internet connected critical control systems*. <https://www.securityweek.com/project-shine-reveals-magnitude-internet-connected-critical-control-systems>, Accessed: 2020-03-25.

- [33] *dell security annual threat report*, <https://software.dell.com/docs/2015-dell-security-annual-threat-report-white-paper-15657.pdf>, Accessed: 2020-03-25.
- [34] *Media report of the Baku-Tbilisi-Ceyhan (BTC) pipeline Cyber Attack*, <https://ics.sans.org/media/Media-report-of-the-BTC-pipeline-Cyber-Attack.pdf>, Accessed: 2020-03-25.
- [35] V. Paelke, «Augmented reality in the smart factory: Supporting workers in an industry 4.0. environment», em *Proceedings of the 2014 IEEE Emerging Technology and Factory Automation (ETFA)*, 2014, pp. 1–4.
- [36] S. Boschert e R. Rosen, «Digital Twin—The Simulation Aspect», em. jun. de 2016, pp. 59–74, ISBN: 978-3-319-32154-7. DOI: 10.1007/978-3-319-32156-1_5.
- [37] F. Pires, A. Cachada, J. Barbosa, A. P. Moreira e P. Leitão, «Digital Twin in Industry 4.0 : Technologies , Applications and Challenges», em *IEEE International Conference on Industrial Informatics, INDIN'19*, 2019, pp. 721–726, ISBN: 9781728129273.
- [38] G. Malykhina, «Digital Twin Technology As A Basis Of The Industry In Future», dez. de 2018, pp. 416–428. DOI: 10.15405/epsbs.2018.12.02.45.
- [39] E. T. e. a. uegel EJ Ingraffea AR, «Reengineering aircraft structural life prediction using a digital twin.», 2011. DOI: 10.1155/2011/154798.
- [40] R. Rosen, G. [Wichert], G. Lo e K. D. Bettenhausen, «About The Importance of Autonomy and Digital Twins for the Future of Manufacturing», *IFAC-PapersOnLine*, vol. 48, n.º 3, pp. 567–572, 2015, 15th IFAC Symposium onInformation Control Problems inManufacturing, ISSN: 2405-8963. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.141>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896315003808>.
- [41] *Web of Knowledge Website*, www.webofknowledge.com, Accessed: 2020-03-25.

- [42] D. S. Edward Glaessgen, «The Digital Twin Paradigm for Future NASA and U.S. Air Force Vehicles», *53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference*, 2012. DOI: <https://doi.org/10.2514/6.2012-1818>. URL: <https://arc.aiaa.org/doi/pdf/10.2514/6.2012-1818>.
- [43] E. Tuegel, «The Airframe Digital Twin: Some Challenges to Realization», *53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference*, 2012. DOI: <https://doi.org/10.2514/6.2012-1812>. URL: <https://arc.aiaa.org/doi/pdf/10.2514/6.2012-1812>.
- [44] P. M. Kenneth Reifsnider, «Multiphysics Stimulated Simulation Digital Twin Methods for Fleet Management», *54th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference*, 2013. DOI: <https://doi.org/10.2514/6.2013-1578>. URL: <https://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/6.2013-1578>.
- [45] Y. L. Jian Yang Wei Zhang, «Subcycle Fatigue Crack Growth Mechanism Investigation for Aluminum Alloys and Steel», *54th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference*, 2013. DOI: <https://doi.org/10.2514/6.2013-1499>. URL: <https://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/6.2013-1499>.
- [46] M. Abramovici, J. C. Göbel e H. B. Dang, «Semantic data management for the development and continuous reconfiguration of smart products and systems», *CIRP Annals*, vol. 65, n.º 1, pp. 185–188, 2016, ISSN: 0007-8506. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.04.051>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850616300518>.
- [47] T. Gabor, L. Belzner, M. Kiermeier, M. T. Beck e A. Neitz, «A Simulation-Based Architecture for Smart Cyber-Physical Systems», em *2016 IEEE International Conference on Autonomic Computing (ICAC)*, 2016, pp. 374–379.
- [48] D. Z. Manas Bajaj Bjorn Cole, «Architecture To Geometry - Integrating System Models With Mechanical Design», *AIAA SPACE 2016*, 2016. DOI: <https://doi.org/10.2514/6.2016-1111>.

- org/10.2514/6.2016-5470. URL: <https://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/6.2016-5470>.
- [49] J. Ríos, J. Hernandez-Matias, M. Oliva e F. Mas, «Product Avatar as Digital Counterpart of a Physical Individual Product: Literature Review and Implications in an Aircraft», jul. de 2015. DOI: 10.3233/978-1-61499-544-9-657.
- [50] S. M. Benjamin Smarslok Adam Culler, «Error Quantification and Confidence Assessment of Aerothermal Model Predictions for Hypersonic Aircraft», *53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference*, 2012. DOI: <https://doi.org/10.2514/6.2012-1817>. URL: <https://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/6.2012-1817>.
- [51] J. Vachálek, L. Bartalský, O. Rovný, D. Šišmišová, M. Morháč e M. Lokšík, «The digital twin of an industrial production line within the industry 4.0 concept», em *2017 21st International Conference on Process Control (PC)*, 2017, pp. 258–262.
- [52] S. P. A. Datta, «Emergence of Digital Twins», *Journal of Innovation Management*, 2017.
- [53] B. Schleich, N. Anwer, L. Mathieu e S. Wartzack, «Shaping the digital twin for design and production engineering», *CIRP Annals*, vol. 66, n.º 1, pp. 141–144, 2017, ISSN: 0007-8506. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.04.040>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850617300409>.
- [54] F. Pires, V. Melo, J. Almeida e P. Leitão, «Digital Twin Experiments Focusing Visualisation, Connectivity and Real-time Monitoring», em *(Accepted to) IEEE International Conference on Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS2020)*, 2020.
- [55] F. Tao e M. Zhang, «Digital Twin Shop-Floor: A New Shop-Floor Paradigm Towards Smart Manufacturing», *IEEE Access*, vol. 5, pp. 20 418–20 427, 2017.
- [56] *Cedri Website*, http://cedri.ipb.pt/aboutus_laboratories.html, Accessed: 2020-03-25.

- [57] *Fischertechnik Website*, <https://www.fischertechnik.de/en/simulating/industry-4-0>, Accessed: 2020-03-25.
- [58] *Schneider Website*, <https://www.se.com/ww/en/product-range-presentation/1468-modicon-m340>, Accessed: 2020-03-25.
- [59] *National Instruments Website*, <https://www.ni.com/pt-pt/innovations/white-papers/14/the-modbus-protocol-in-depth.html>, Accessed: 2020-03-25.
- [60] *Modbus Website*, http://www.dankohn.info/projects/Fieldpoint_module/Open_ModbusTCP_Standard.pdf, Accessed: 2020-03-25.
- [61] Qing Liu e Yingmei Li, «Modbus/TCP based Network Control System for Water Process in the Firepower Plant», em *2006 6th World Congress on Intelligent Control and Automation*, vol. 1, 2006, pp. 432–435.
- [62] *ABB Website*, <https://www.robots.com/robots/abb-irb-1400>, Accessed: 2020-04-23.
- [63] R. Cartwright e G. Steele, «Compatible Genericity with Run-Time Types for the Java Programming Language.», vol. 33, out. de 1998, pp. 201–215. DOI: 10.1145/286936.286958.
- [64] *Coppelia Website*, <https://www.coppeliarobotics.com>, Accessed: 2020-03-25.
- [65] *Node-red Website*, <https://nodered.org/>, Accessed: 2020-03-25.
- [66] D. Geer, «Eclipse becomes the dominant Java IDE», *Computer*, vol. 38, n.º 7, pp. 16–18, 2005.
- [67] Modbus-IDA, *MODBUS APPLICATION PROTOCOL SPECIFICATION V1.1b*. Modbus-IDA, 2006.
- [68] U. Hunkeler, H. L. Truong e A. Stanford-Clark, «MQTT-S — A publish/subscribe protocol for Wireless Sensor Networks», em *2008 3rd International Conference on Communication Systems Software and Middleware and Workshops (COMSWARE '08)*, 2008, pp. 791–798.

[69] *Mosquitto Website*, <https://mosquitto.org/>, Accessed: 2020-03-25.

Apêndice A

Proposta Original do Projeto

Proposta de Dissertação / Projeto Mestrado em Engenharia Industrial 2018/2019

Título Provisório: Virtualização de sistema flexível de fabrico no âmbito da Indústria 4.0

Aluno de mestrado: João Victor Peroni de Almeida

Orientador: Paulo Leitão

Coorientador: José Barbosa

Coorientador (UTFPR): Joaquim Mira

Principais objetivos a atingir:

Pretende-se realizar a virtualização de um sistema flexível de fabrico, criando um *digital twin* cujo modelo virtual seja alimentado com os dados do sistema real colecionados em tempo real utilizando tecnologias Internet das Coisas (IoT do Inglês Internet of Things), e permita implementar técnicas de otimização do processo produtivo.

Resultados esperados:

Pretende-se com esta proposta realizar a virtualização de um sistema flexível de fabrico existente no laboratório de controlo, automação e robótica, sendo esperado a criação de um *digital twin* que represente virtualmente o sistema físico real, e a implementação de técnicas de otimização do processo produtivo.

Este trabalho está inserido nas atividades investigação, desenvolvimento e inovação que se encontram a ser desenvolvidas no CeDRI – Centro de Investigação e Robótica Inteligente (<http://www.cedri.ipb.pt>).

Caracterização do trabalho

O mundo da manufatura está a assistir a uma mudança de paradigma, quer a nível organizacional quer ao nível de controlo, levando a que surjam oportunidades para a introdução de novas abordagens, tal como novos sistemas de controlo de sistemas de produção. A abordagem desenvolvida sobre a designação de *Cyber-Physical System* (CPS) ou suportados por fortes medidas de financiamento, tal como o H2020 ou o Indústria 4.0, estão a alavancar esta 4ª revolução industrial, cativando a atenção, quer da academia, quer da indústria. Neste âmbito, um dos conceitos fundamentais associados ao Indústria 4.0 é a de *digital twin*, que envolve a utilização, entre outros de tecnologias de IoT, modelação, simulação e *machine learning* para análise de dados.

Este projeto tem como objetivo fazer a virtualização de um sistema flexível de fabrico, incluindo uma célula robotizada, de forma a criar um *digital twin* que represente virtualmente o sistema físico real. Após o desenvolvimento do *digital twin*, utilizando tecnologias de IoT e sistemas de modelação e simulação, por exemplo o V-REP, o aluno deverá implementar algoritmos de análise e otimização do processo produtivo, por exemplo visando a melhoria da produtividade do sistema ou utilização dos recursos.

Calendarização das fases do trabalho:

O desenvolvimento da presente proposta de trabalho será realizado através da execução das seguintes etapas:

1. Familiarização com o conceito de *digital twin* (M1 – M2)
2. Estudo do caso de estudo, nomeadamente do sistema flexível de fabrico (M1 – M2)
3. Virtualização do sistema flexível de fabrico (M3 – M5)
4. Implementação de estratégias de análise e otimização do processo produtivo (M6-M7)
5. Testes e validação do protótipo (M8 – M10)
6. Escrita da dissertação e defesa final do trabalho (M10 - M11)

Palavras-chave: digital twin, IoT, simulação, sistemas ciber-físicos, Indústria 4.0.

Infraestruturas a utilizar:

Está prevista a utilização do sistema flexível de fabrico do CeDRI.