



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
COLEGIADO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

JHONATAN BARBOSA RAMOS

DIGITALIZAÇÃO E SIMULAÇÃO DE UM SISTEMA FLEXÍVEL DE MANUFATURA

Vitória, ES

2022

JHONATAN BARBOSA RAMOS

DIGITALIZAÇÃO E SIMULAÇÃO DE UM SISTEMA FLEXÍVEL DE MANUFATURA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Tecnologia Industrial do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro de Produção.

Universidade Federal do Espírito Santo – UFES

Centro Tecnológico

Departamento de Engenharia de Produção

Orientador: Prof. Dr. Laurence Colares Magalhães

Vitória, ES

2022

JHONATAN BARBOSA RAMOS
DIGITALIZAÇÃO E SIMULAÇÃO DE UM SISTEMA FLEXÍVEL DE MANUFATURA/ JHONATAN BARBOSA RAMOS. – Vitória, ES, 2022-
45 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Laurence Colares Magalhães

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal do Espírito Santo – UFES
Centro Tecnológico
Departamento de Engenharia de Produção, 2022.

1. Manufatura Integrada. 2. Robotização. 3. Gêmeo digital. I. Prof. Dr. Laurence Colares Magalhães. II. Universidade Federal do Espírito Santo. III. Colegiado do curso de Engenharia de Produção. IV. DIGITALIZAÇÃO E SIMULAÇÃO DE UM SISTEMA FLEXÍVEL DE MANUFATURA

CDU 02:141:005.7

JHONATAN BARBOSA RAMOS

DIGITALIZAÇÃO E SIMULAÇÃO DE UM SISTEMA FLEXÍVEL DE MANUFATURA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Tecnologia Industrial do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro de Produção.

Trabalho aprovado. Vitória, ES, 08 de Agosto de 2022:

Prof. Dr. Laurence Colares Magalhães
Orientador

Prof. Dr. Rômulo Almeida Cotta
Convidado 1

Prof. Dr. Luciano Raizer Moura
Convidado 2

Vitória, ES
2022

A meus pais.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente à Deus, Autor de todas as coisas, pelo sustento físico e mental. Agradeço à minha família, pelo suporte emocional, conselhos e ensinamentos que me trouxe até aqui e moldaram minha moral e caráter. Em especial, gratidão à Universidade Federal do Espírito Santo pela autorização no uso do laboratório de manufatura e os recursos necessários aos experimentos. Ao meu orientador Laurence, pelo vasto conhecimento compartilhado e pontualidade ao que se dispôs. E, por fim, mas não menos importante, aos amigos de curso pelo companheirismo durante toda essa jornada.

"(...) a uma coisa estou resolvido, isto é, a correr enquanto possa; e quando já não possa correr, caminharei devagar; e quando isto me seja impossível me arrastarei, pois em quanto ao essencial, graças Àquele que me ama, estou decidido".
(John Bunyan)

Resumo

A digitalização e a virtualização representam fatores-chave na era da Indústria 4.0. Os gêmeos digitais (GD) certamente podem contribuir para aumentar a eficiência de diversos setores produtivos, pois podem contribuir para o monitoramento, gerenciamento e melhoria de um produto ou processo ao longo de seu ciclo de vida. Neste trabalho, é concebido o gêmeo digital de um Sistema de Manufatura Flexível (SMF). O módulo específico de um sistema ERP é utilizado para digitalizar a entidade física. Os dados de produção são inseridos de acordo com os testes realizados no SMF. Sensores instalados nos principais componentes do SMF, torno CNC, braço robótico e transportador de paletes enviam informações em tempo real para a entidade digital. Os resultados mostram que as simulações utilizando o gêmeo digital apresentam resultados muito satisfatórios em relação à entidade física. Em tempo, informações como taxa de produção, gerenciamento de filas, estoque de alimentação, status de equipamentos e paletes podem ser facilmente acessados por operadores e gerentes em qualquer momento durante o processo de produção.

Palavras-chaves: Sistema de manufatura flexível. Gêmeo digital. Simulação. Indústria 4.0.

Abstract

Digitization and virtualization represent key factors in the era of Industry 4.0. Digital twins (DT) can certainly contribute to increasing the efficiency of various productive sectors as they can contribute to monitoring, to manage and improvement of a product or process throughout it's life-cycle. In this work, the digital twin of a Flexible Manufacturing System (FMS) is conceived. The specific module of an ERP system is used to digitize the physical entity. Production data is entered according to tryouts performed in the FMS. Sensors installed in the main components of the FSM, CNC lathe, robotic arm and pallet conveyor send information in real time to the digital entity. The results show that simulations using the digital twin present very satisfactory results compared to the physical entity. In time, information such as production rate, queue management, feed stock, equipment and pallet status can be easily accessed by operators and managers at any time during the production process.

Keywords: Flexible Manufacturing System. Digital Twin. Simulation. Industry 4.0

Lista de ilustrações

Figura 1 – Layouts de FMS em linha: (a) fluxo em uma direção e em (b) duas direções	18
Figura 2 – (a) Layout circular e (b) retangular	19
Figura 3 – Layout tipo escada	20
Figura 4 – Layout de campo aberto	20
Figura 5 – Layout do tipo robô centralizado	21
Figura 6 – Níveis BIM conforme descrito pelo BIM <i>Industry Working Group</i>	23
Figura 7 – Casos de uso (a) e tecnologia (b) mapeados para o ciclo de geminação	24
Figura 8 – Integração vertical de sistemas de informações da empresa	26
Figura 9 – Fluxograma geral do projeto	27
Figura 10 – Esquema da integração Esteira-robô-torno CNC	30
Figura 11 – Simulação CAM da geometria a ser usinada	31
Figura 12 – Rotina de programação do braço robótico	31
Figura 13 – Código G & M para usinagem no torno CNC	32
Figura 14 – Métodos de fixação dos tarugos no torno CNC (a) Operação manual (b) Carregamento com braço robótico	33
Figura 16 – Esquema ilustrativo de uma das medições de rugosidade das superfícies usinadas	35
Figura 17 – Status das <i>Work Stations</i>	35
Figura 18 – Detalhes da ordem de manufatura (CIMSOFT)	36
Figura 19 – Peça após a operação de torneamento	39
Figura 20 – Comparativo do tempo médio de manufatura utilizando-se carregamento robotizado e manual	40
Figura 21 – Imagem comparativa do sistema físico e virtual do FMS	40
Figura 22 – Esquema da integração entre a entidade física e virtual do FMS	41

Lista de tabelas

Tabela 1 – Tempo médio de ciclo com carregamento manual no torno CNC (média de três peças processadas)	38
Tabela 2 – Tempo médio de ciclo com carregamento robotizado (média de três peças processadas)	38

Lista de abreviaturas e siglas

CNC	Computer Numerical Control
FMS	Flexible Manufacturing System
SMF	Sistema de Manufatura Flexível
CLP	Controlador Lógico Programável
RFID	Radio-Frequency IDentification
GD	Gêmeo Digital
I4.0	Indústria 4.0
IoT	Internet das Coisas
IIoT	Internet Industrial das Coisas
CPS	Cyber Physical System
ERP	Enterprise Resources Planning
CAM	Computer Aided Manufacturing
OEE	Overall Equipament Efficiency
IMS	Sistemas Inteligentes de Manufatura

Lista de símbolos

ϕ	Diâmetro
Ra	Média Aritmética
μm	Micrômetro
σ	Desvio Padrão
Re	Repetitividade

Sumário

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Motivação	15
1.2	Objetivos	16
1.2.1	Objetivo geral	16
1.2.2	Objetivos específicos	16
2	REVISÃO DA LITERATURA	17
2.1	Indústria 4.0	17
2.2	SMF - Sistema de Manufatura Flexível	17
2.2.1	Layout do FMS	18
2.3	CPS - Cyber Physical System	21
2.4	Gêmeos Digitais	21
2.4.1	Categorias de Gêmeos Digitais	22
2.5	Integração Horizontal	25
2.6	Integração Vertical	25
3	MATERIAIS E MÉTODOS	27
3.1	Integração do FMS	27
3.1.1	Descrição	28
3.2	Programação dos equipamentos	28
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
5	CONCLUSÃO	42
	REFERÊNCIAS	43

1 Introdução

A Indústria 4.0 (I4.0) designa as profundas mudanças tecnológicas observadas na última década, sustentadas por novos avanços disruptivos nos métodos de industrialização e na tecnologia da informação. Com base em uma digitalização avançada dentro das fábricas, a combinação de tecnologias da Internet e tecnologias orientadas para o futuro no campo de objetos “inteligentes” (máquinas e produtos) parece resultar em uma nova mudança de paradigma fundamental na produção industrial (LASI et al., 2014). A principal tecnologia que lidera essa mudança é a Internet das Coisas (IoT), permitindo o uso generalizado da computação embarcada e a padronização da comunicação em rede digital, e a inclusão de Sistemas Ciber-Físicos (CPS) (NAKAYAMA; SPÍNOLA; SILVA, 2020). O objetivo do I4.0 é a implementação da chamada Fábrica Inteligente, caracterizada por Sistemas Inteligentes de Manufatura (IMS) que superam os sistemas tradicionais de manufatura em termos de eficiência, flexibilidade, nível de integração, digitalização e inteligência (OLIVEIRA et al., 2021).

A essência da I4.0 é a integração entre as decisões do sistema de operação e informações, com a intercomunicação entre todos os elementos da cadeia de produção. Para isso, é necessário um sistema autônomo que elimine a centralização do planejamento do processo nos gestores, e que as decisões sejam diretamente ligadas às características de consumo. Um importante aspecto para a Indústria 4.0 é a utilização de artefatos físicos modulares e flexíveis: Ao processar um produto, os equipamentos para usinagem ou demais processos devem ser agrupados e trabalharem em conjunto para a tomada de decisão distribuída. Portanto, é necessária uma unidade de fabricação modularizada e inteligente que possa reconfigurar dinamicamente as rotas de produção (VAIDYA; AMBAD; BHOSLE, 2018; ZHONG et al., 2017)

Os sistemas de manufatura flexível (FMS) têm sido um avanço importante na indústria, com uma produção automatizada e integrada. Um FMS é essencialmente um sistema de produção controlado por computador, que reúne diferentes máquinas autônomas e equipamentos de controle capazes de processar uma variedade de tipos de peças (MOURTZIS; ANGELOPOULOS; DIMITRAKOPOULOS, 2020; PABLO; RAHMAN, 2011; YILDIRIM; YÜCEL, 2016). Um exemplo da aplicação é o uso robótico em máquinas e ferramentas que reduz o tempo improdutivo gasto no manuseio de peças e torna pequenos lotes economicamente viáveis (VOSNIAKOS et al., 2019). É comum o uso de braços robóticos no Sistema de Manufatura Flexível, por ser ele o equipamento responsável por fazer as movimentações em cada etapa do processamento da peça.

Além do braço robótico, outro equipamento normalmente utilizado nas indústrias de

manufatura para a movimentação das peças são as esteiras. São elas que movimentam a matéria prima até os braços robóticos para que sejam retiradas dos paletes, e posteriormente processadas por um torno CNC, por exemplo. A esteira possui maior capacidade de movimentação longitudinal, no que se refere a distância e velocidade, logo é a peça chave para fazer a integração entre as estações de trabalho. Diferentemente dos braços robóticos que são articulados para movimentos precisos nos eixos x, y e z.

Dessa forma, quando analisado a complexidade de um FMS, fica evidente a necessidade de um alto nível de controle na operação do sistema. Para isso, são utilizados os Sistemas Ciberfísicos (Cyber Physical System - CPS), são eles que possibilitam a interação entre o produto, as máquinas e pessoas.

Para concluir, sendo um sistema de manufatura flexível, integrado a tecnologia da informação, sabe-se que é exigido flexibilidade na produção para que seja possível sua adaptação de acordo com a demanda do cliente, logo para obter respostas rápidas e precisas referente ao processo é necessário o uso do *Digital Twin*. Pois é por meio dele que é possível ter um acompanhamento em tempo real do sistema, identificando falhas reais ou futuras, e quando necessário realizar simulações digitais para adaptações do FMS sem retrabalhos, com redução de custos de tempo e mão de obra.

1.1 Motivação

Atualmente, muitas estruturas conceituais, como manufatura em nuvem e manufatura inteligente, foram desenvolvidas para fornecer uma visão sobre o paradigma da manufatura autônoma (ADAMSON et al., 2017; KUSIAK, 2018). Ao mesmo tempo, alguns métodos de implementação de manufatura inteligente, como coleta e análise de dados de produção, monitoramento de produção baseado em RFID (*Radio-Frequency IDentification*) e fusão física cibernética baseada em gêmeos digitais foram propostos (DING et al., 2019; GUO et al., 2015). Os trabalhos pioneiros mencionados acima impulsionam a compreensão e a implementação da manufatura inteligente e autônoma. No entanto, não é tarefa fácil a concepção e implementação de uma unidade de manufatura completamente autônoma, que possa operar separadamente do controle humano.

Nesse sentido, este trabalho visa realizar etapas iniciais na sequência para se alcançar o esboço de uma futura unidade de manufatura autônoma, dentre as quais a integração de um robô a uma máquina CNC com o emprego de uma esteira de movimentação de palletes e ainda a concepção de um protótipo de gêmeo digital para o Sistema de Manufatura Flexível do Laboratório de Manufatura Integrada do Departamento de Tecnologia Industrial (CT-UFES). Com efeito, avança-se em dois pontos importantes na concepção da Indústria 4.0: a integração de tecnologias habilitadoras e a virtualização (ou digitalização) de sistemas produtivos.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Este trabalho tem como objetivo principal integrar um braço robótico a um torno CNC, em um sistema de manufatura flexível, buscando-se aumentar a performance de produção de geometrias por revolução. Em tempo, também conceber a digitalização do FMS, buscando-se obter um gêmeo digital (GD) onde se pode simular os tempos e custos de um dado lote de peças a ser produzido.

1.2.2 Objetivos específicos

- Programação de um braço robótico para fazer a completa manipulação de peças em um FMS;
- Quantificação da redução do tempo de produção de um lote de peças com a integração do braço robótico a um torno CNC;
- Avaliação da precisão da simulação de produção em um gêmeo digital com o processo físico de produção;
- Avaliação simplificada da rugosidade das superfícies usinadas.

2 Revisão da Literatura

2.1 Indústria 4.0

Indústria 4.0 pode ser definida como “a transformação digital da manufatura, criando a fábrica inteligente, que faz uso de Sistemas Ciberfísicos, sendo um ambiente autônomo e integrado de toda a cadeia de valor, para produção de produtos individualizados, com grande flexibilidade de produção, alta produtividade, agilidade de atuação e elevada qualidade”. Uma fábrica inteligente aproveita plataformas e tecnologias digitais para obter melhorias significativas em produtividade, qualidade, flexibilidade e serviço. A fábrica inteligente vai além da automação tradicional de máquinas, fazendo uso de tecnologias de manufatura inteligentes para a Indústria 4.0. As máquinas físicas são equipadas com sensores inteligentes e são conectadas a uma rede em nuvem, onde usa dados de operações e sistemas de produção conectados para aprender e se adaptar a situações espontâneas e tomar decisões em tempo real (MOURA, 2020).

A Indústria 4.0 faz uso de tecnologias habilitadoras para geração de valor para as empresas, usando, entre outras, a Internet das Coisas (IoT), que no ambiente industrial é definido de Internet Industrial das Coisas (IIoT). Permite que as indústrias integrem cadeias de valor totalmente digitalizadas, conectadas, inteligentes e descentralizadas e tenham ganhos com isso (HARTMANN; HALECKER, 2015; KIEL et al., 2016).

2.2 SMF - Sistema de Manufatura Flexível

Os Sistemas Flexíveis de Manufatura (SMF) - ou *Flexible Manufacturing System* (FMS) em inglês - são projetados para reagirem e se adaptarem às mudanças nos processos industriais. O FMS integra muitas das tecnologias avançadas que encontramos em unidades comumente utilizadas, incluindo automação flexível, máquinas CNC, controle distribuído por computador e manuseio e armazenamento automatizados de materiais. Algumas das vantagens do FMS incluem: melhor utilização do capital/equipamento, redução do trabalho em andamento e instalação.

De acordo com Shivanand (2006) o FMS é um arranjo de máquinas automáticas interligadas por um sistema de movimentação automatizado, em paletes ou em outro tipo de contenedor, controlado por computador central. Um FMS também pode ser entendido como uma célula de manufatura automatizada, composta por estações de processamento (normalmente máquinas-ferramentas), interligadas por um sistema automatizado de manuseio e armazenamento de material e controladas por um sistema distribuído de computação

industrial. Um FMS pode processar variados tipos de peças simultaneamente nas diversas estações de trabalho, ajustando-se ao *mix* e à demanda do mercado (GROOVER, 2011).

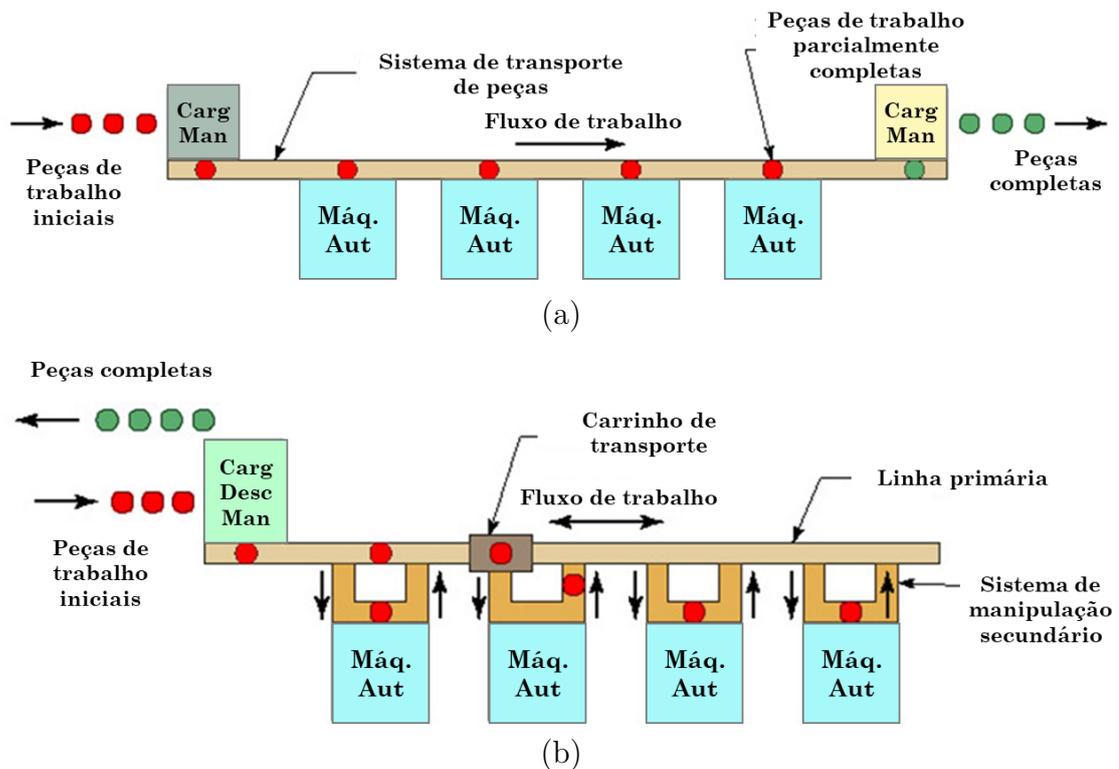
Os sistemas flexíveis normalmente se dividem em duas categorias principais: machine flexibility (Flexibilidade da Máquina), se refere à habilidade do sistema de mudar para produzir novos produtos, e à habilidade de mudar a ordem de operações executadas. A segunda categoria é chamada *routing flexibility* (Flexibilidade de Roteamento), que consiste na habilidade de usar múltiplas máquinas para fazer a mesma operação, também é a habilidade do sistema de absorver grandes mudanças, seja no volume, capacidade ou capabilidade. (BARUWA; PIERA, 2015)

2.2.1 Layout do FMS

Em um Sistema de Manufatura Flexível os layout's comumente utilizados são: em linha, circular, retangular, escada, campo aberto e célula com robô centralizado.

No layout em linha de produção ou progressivo (Figura 1), as máquinas e o sistema de manuseio são dispostos em linha. Como o fluxo de trabalho é unidirecional, esse layout é mais apropriado para um sistema no qual a peça progride de uma estação de trabalho para a próxima em um sequência bem definida. Um possibilidade para facilitar o fluxo em duas direções é com o sistema secundário de manuseio de peças em cada estação de trabalho.

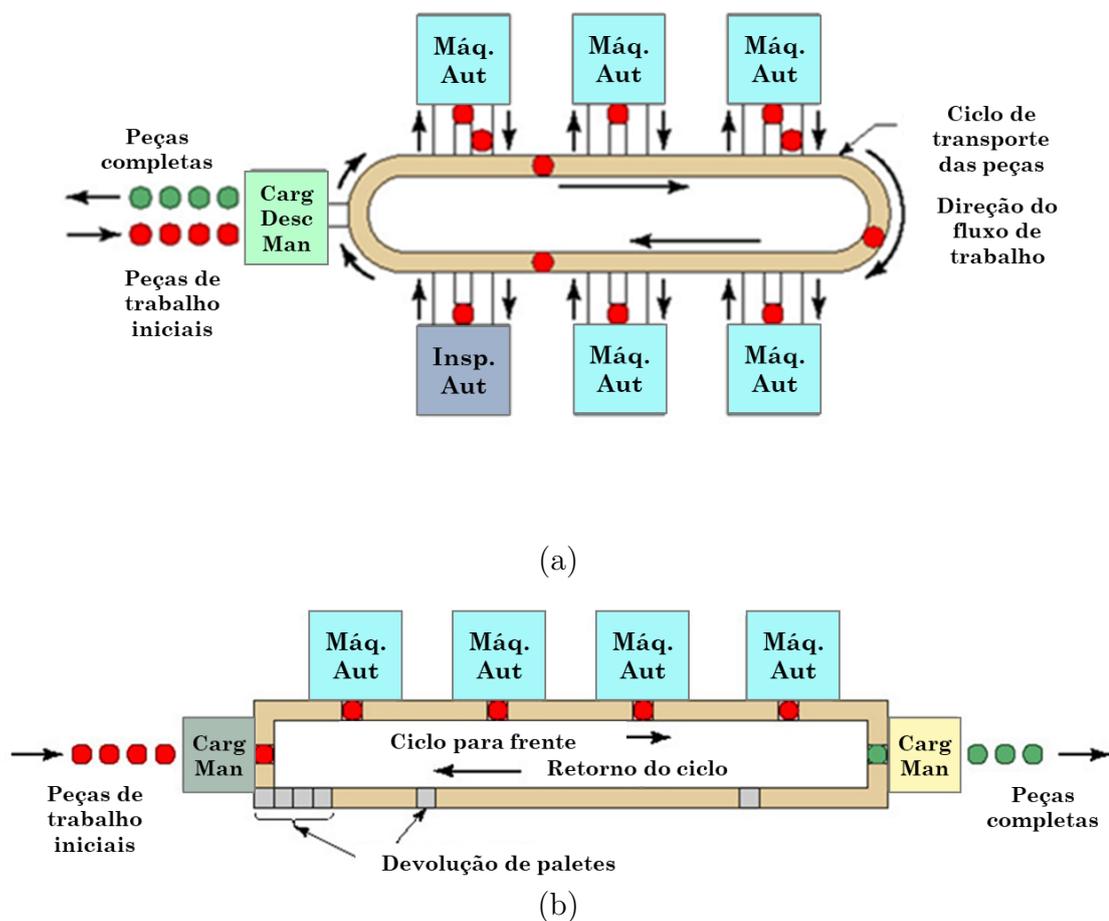
Figura 1 – Layouts de FMS em linha: (a) fluxo em uma direção e em (b) duas direções



Fonte: Adaptado de Skrivastava, Yada e Singh (2020)

No layout circular (Figura 2) há apenas uma estação de carga e descarga, geralmente localizada na extremidade, e as peças seguem na linha de movimentação em apenas um sentido, com a capacidade de parar e serem transferidas para qualquer estação de trabalho. Diferentemente do layout circular, o retângular (Figura 2) possui uma estação para carga e outra para descarga, e devido o seu formato permite a utilização dos paletes e sua reutilização na linha de produção,

Figura 2 – (a) Layout circular e (b) retangular

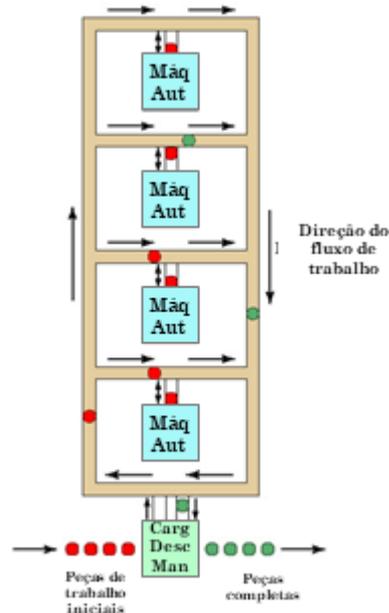


Fonte: Adaptado de [Skrivastava, Yada e Singh \(2020\)](#)

O layout do tipo escada (Figura 3) é uma derivação do layout retangular, porém a diferença é que a estação de carga e descarga normalmente é localizada na extremidade, e que a sequência para a operação/transferência de peças de uma máquina-ferramenta para outra é na forma de degraus de escada. Esse tipo de layout é recomendado quando há múltiplas peças que não precisam necessariamente passar por todas as estações de trabalho, dessa forma otimizando a operação principalmente no tempo de movimentação de peças.

No layout de campo aberto (Figura 4) os arranjos das estações de trabalho ficam flexíveis,

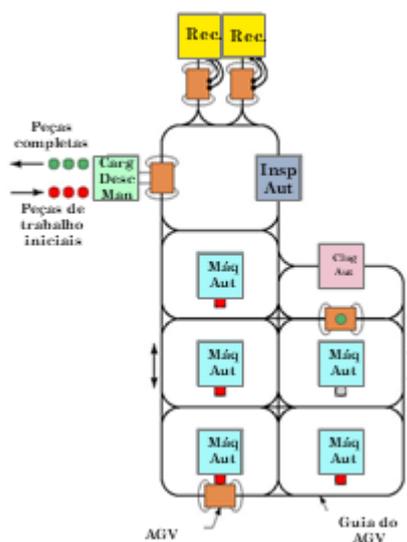
Figura 3 – Layout tipo escada



Fonte: Adaptado de Skrivastava, Yada e Singh (2020)

já que as movimentações de peças ocorrem através dos AGV's (*Automated Guided Vehicle*). Dessa forma, é possível em um sistema serem realizados vários produtos diferentes, com otimização de tempo e espaço.

Figura 4 – Layout de campo aberto

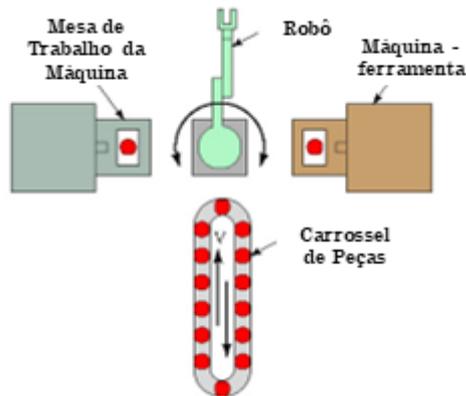


Fonte: Adaptado de Skrivastava, Yada e Singh (2020)

Por fim, o layout do tipo robô centralizado (Figura 5) é uma forma relativamente nova de sistema flexível, onde um ou mais robôs são usados como sistemas de manuseio de materiais. Os robôs industriais podem ser equipados com garras que os tornam adequados

para o manuseio de peças rotativas.

Figura 5 – Layout do tipo robô centralizado



Fonte: Adaptado de [Skrivastava, Yada e Singh \(2020\)](#)

2.3 CPS - Cyber Physical System

A essência das fábricas inteligentes são os Sistemas Ciberfísicos (*Cyber Physical System* – CPS). É o CPS que proporciona a integração do mundo real, das máquinas e produtos, com o mundo virtual, dos sistemas e dados. O CPS é que promove, de fato, a integração entre operação e tecnologia da informação, pelo uso de sensores, unidades de processamento de dados e atuadores, constituem o núcleo tecnológico da IIoT, possibilitando as interações entre produtos, máquinas e pessoas ([LEE; BAGHERI; KAO, 2015](#); [WAN et al., 2011](#)). Esta automação, digitalização e conectividade ampliada para toda a cadeia de valor de fabricação leva a custos reduzidos, prazos de entrega e qualidade aprimorada ([OESTERREICH; TEUTEBERG, 2016](#)).

2.4 Gêmeos Digitais

A ideia de um gêmeo digital foi descrita como um modelo de espelho de informação por [Grieves \(2014\)](#). Um gêmeo digital é uma réplica digital de uma entidade física. Ele permite uma transferência perfeita de dados conectando mundos físicos e virtuais, permitindo assim que entidades virtuais interagem simultaneamente com entidades físicas.

Na literatura as principais aplicações de uso do Gêmeo Digital incluem: área da saúde, design de produto, engenharia baseada em modelo, comunicação 5G para fábricas, otimização composta, carros inteligentes e cadeia de abastecimento agrícola ([JONES et al., 2020](#)). Além da aplicação no uso relacionado a Indústria 4.0, que possibilitou a construção das fábricas inteligentes, sendo assim a solução para o desafio do acompanhamento em tempo real do *status* do sistema de manufatura flexível. Agora, os sistemas de manufatura

podem monitorar processos físicos, e com o gêmeo digital receber informações em tempo real do sistema para análise de simulação e tomada de decisão por meio de comunicação e colaboração em tempo real com humanos. A combinação de gêmeos digitais e fabricação inteligente torna a fabricação mais inteligente, mais eficiente e mais assertiva.

A aplicação do gêmeo digital na fabricação baseia-se principalmente no modelo de simulação virtual de um gêmeo digital para construir um modelo sólido, que é aplicado ao processamento e montagem do produto para obter um controle preciso da produção. Esta parte inclui a simulação do processo de produção, linha de produção digital e monitoramento do *status* do equipamento. (HE; BAI, 2021)

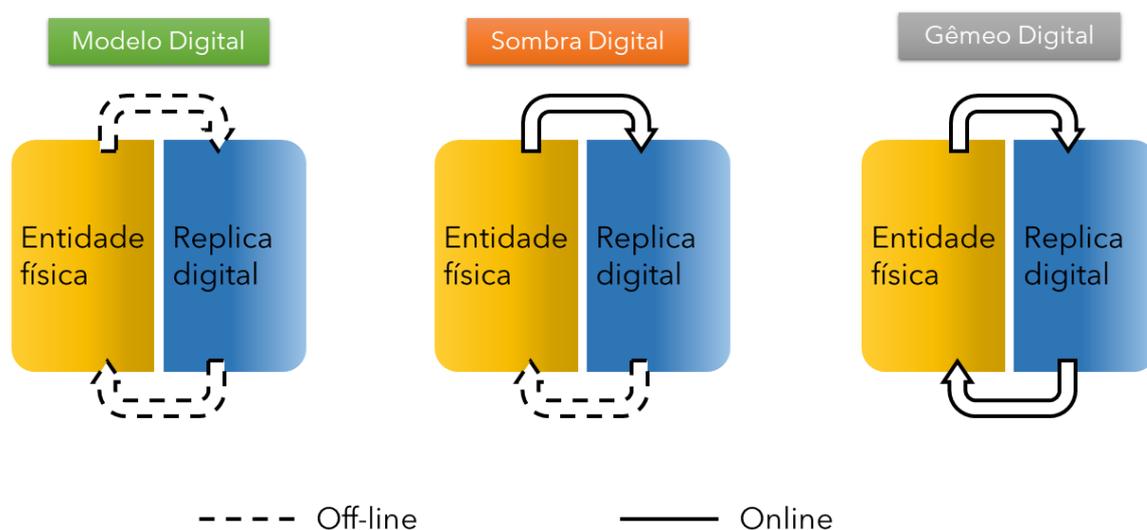
2.4.1 Categorias de Gêmeos Digitais

- Desempenho - Antes da fabricação do produto, o processo pode ser simulado por meio de produção virtual, e a produtividade e a eficiência serem analisadas de forma abrangente. O gêmeo digital é a ferramenta chave para o desenvolvimento de simulação de desempenho, a ideia é otimizar processos a partir de algo muito semelhante ao real. Dessa forma é possível aprimorar as tomadas de decisão e otimizar a performance. As principais tecnologias usadas para esse propósito são: AI (*Artificial Intelligence*), ML (*Machine Learning*), DL (*Deep Learning*).
- Produto - A aplicação de gêmeos digitais para o produto é baseada principalmente em métodos de design de produtos de pesquisa de gêmeos digitais que levantam estatísticas e dados operacionais úteis, necessários para a avaliação da performance sobre diversos aspectos e condições para torná-lo mais eficiente. Isso inclui design digital e simulação digital.
- Produção - Na produção o gêmeo digital explora o sistema produtivo para aprimorar questões-chave como manutenção preditiva, capacidade, fluxo operacional e detecção de ociosidade. Com o gêmeo digital um modelo de monitoramento remoto visual é construído ao ler os parâmetros em tempo real dos sensores ou sistemas de controle de produtos industriais inteligentes, com isso é possível analisar o estado dos produtos com inteligência artificial e fazer um alerta antecipado a tempo. Enquanto isso, são dadas estratégias de manutenção para reduzir as perdas. A detecção de falhas e o gerenciamento de integridade podem ser implementados para diferentes dispositivos com base na geração digital. O modo de operação do dispositivo pode ser otimizado de acordo com os dados de estado do modelo virtual para reduzir a taxa de falhas e melhorar a estabilidade. (HE; BAI, 2021)

O diferencial do GD é a capacidade de interação bidirecional entre a entidade física e virtual. Ou seja, as entidades físicas, como por exemplo, torno CNC, braço robótico, esteira,

que estão no ambiente físico, enviam dados para a entidade virtual (réplica da entidade física no ambiente virtual), no qual é capaz de gerar respostas que retornam para a entidade física. Dessa forma, a operação no ambiente físico é de acordo com a resposta recebida do ambiente virtual. Uma maneira de destacar a diferença de um Digital Twin, é através da divisão em níveis BIM (*Building Information Modeling*), que é aplicado no campo de engenharia que gerencia o ciclo de vida de um ativo de engenharia: um edifício. A divisão BIM é baseada em níveis 1 a 3, sendo eles: Modelo Digital, Sombra Digital e Gêmeo Digital, conforme descrito por [Kritzinger et al. \(2018\)](#). O Modelo Digital é o modelo CAD bi e tridimensional (BIM Nível 1), a Sombra Digital é o modelo CAD tridimensional contendo dados da construção física em tempo real (BIM Nível 2), e o Gêmeo Digital é o modelo tridimensional com conexões de dados bidirecionais (BIM Nível 3), como esquematizado na Figura 6. Colocando no contexto das características do Digital Twin, *Building Information Modeling* visa criar um gêmeo do edifício, usando conexões de dados virtual-físico e físico-virtual, com os meios para medir e realizar mudanças no estado atual da estrutura física do edifício.

Figura 6 – Níveis BIM conforme descrito pelo BIM *Industry Working Group*



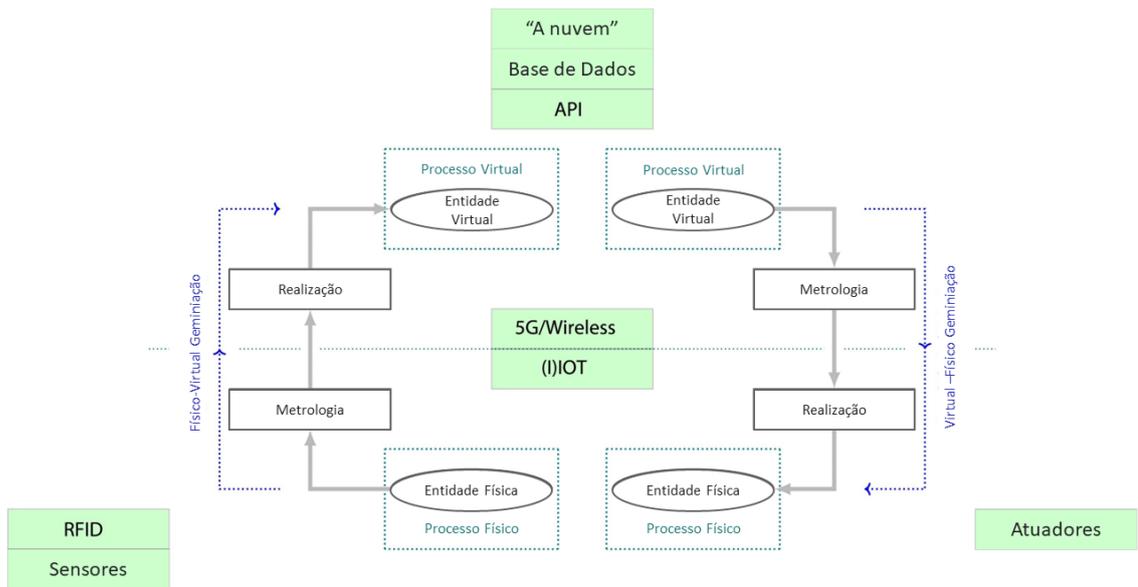
Fonte: Autoral

Por fim, a Figura 7.a mostra de forma geral as tecnologias envolvidas na habilitação do Gêmeo Digital para o ciclo de geminação. Observa-se que as tecnologias são colocadas na área do ciclo onde são utilizadas. As tecnologias colocadas no centro do ciclo são aplicáveis a todo o ciclo. Por exemplo, 5G e tecnologia de comunicação sem fio são usadas para conexões físicas para virtuais e virtuais para físicas.

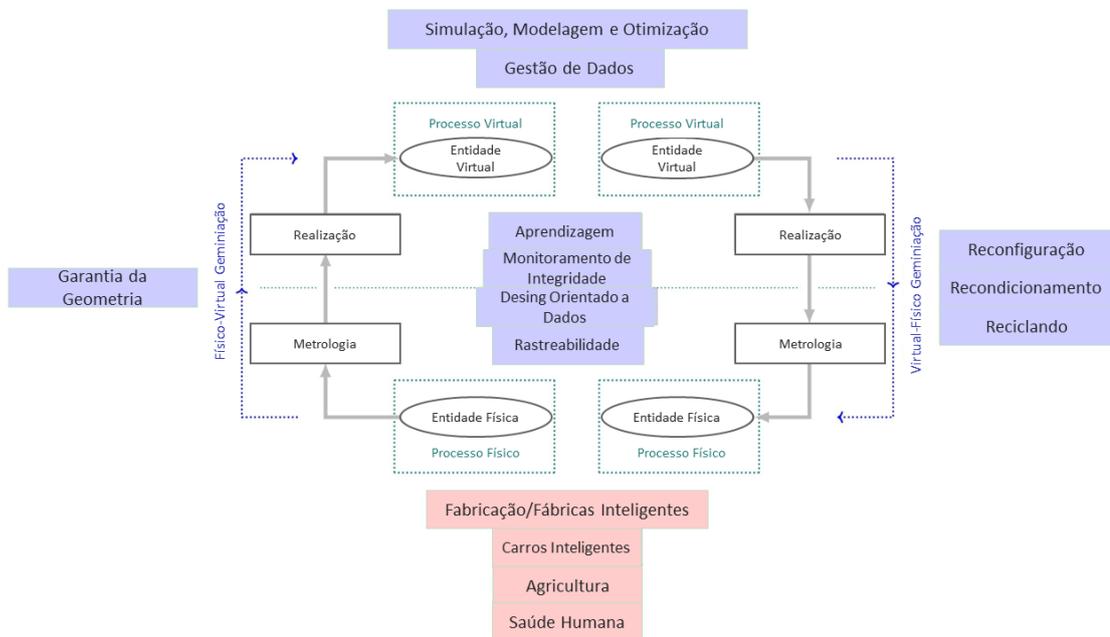
Já a Figura 7.b destaca as principais áreas de aplicação de Digital Twin, as respostas

na integração bidirecional do ambiente físico e virtual, as funções realizadas na entidade virtual do gêmeo digital, e na parte central as tecnologias que podem ser aplicadas através do Digital Twin.

Figura 7 – Casos de uso (a) e tecnologia (b) mapeados para o ciclo de geminação



(a)



(b)

Fonte: Adaptado de Jones et al. (2020)

2.5 Integração Horizontal

Uma ampla pesquisa realizada a respeito dos desafios da implantação da Indústria 4.0 pelas empresas destaca que, entre muitos pontos a serem considerados, o desafio mais frequente citado pelas empresas é a integração técnica da IIoT, estabelecendo as conexões intra-firma e inter-firma. São também denominadas de Integração Vertical (Intra-firma) e Integração Horizontal (Inter-firma) (KIEL et al., 2020).

A integração horizontal é a integração interempresarial sendo a base para uma colaboração estreita e de alto nível entre várias empresas, utilizando sistemas de informação para enriquecer o ciclo de vida do produto, criando um ecossistema interligado dentro da mesma rede de criação de valor. É necessária uma plataforma independente para alcançar a interoperabilidade, baseada em padrões industriais, possibilitando a troca de dados ou informações (ALCÁCER; CRUZ-MACHADO, 2019).

2.6 Integração Vertical

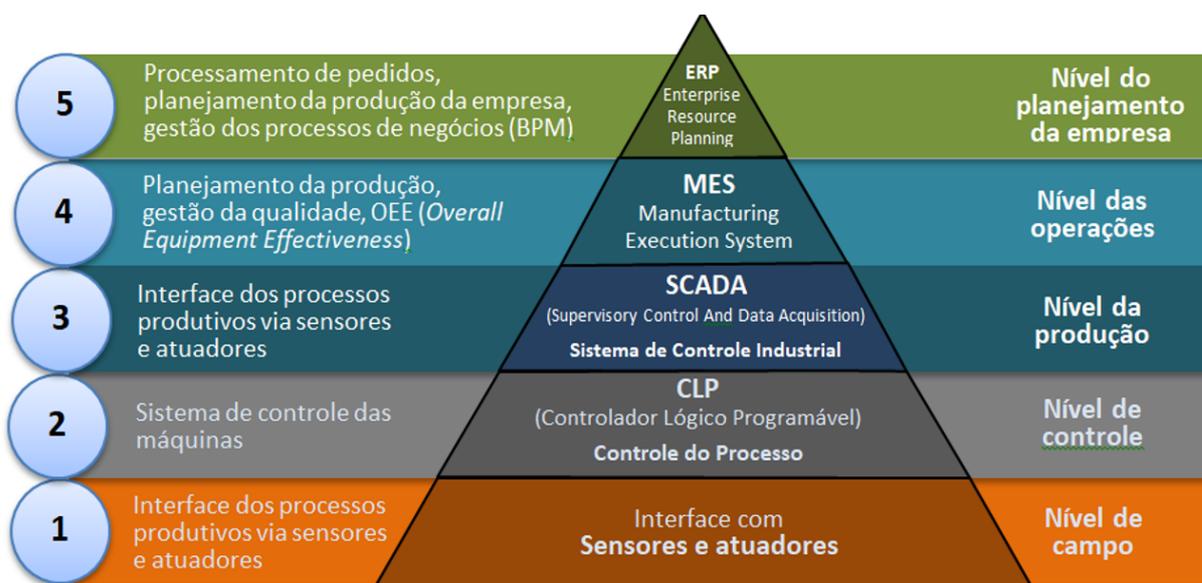
A integração vertical estabelece um sistema de manufatura em rede, sendo a integração intra-empresa e a base para a troca de informações e colaboração entre os diferentes níveis da hierarquia da empresa, como planejamento corporativo, programação de produção ou gerenciamento. A integração vertical "digitiza" toda a operação interna, considerando todos os dados dos processos de fabricação, por exemplo, gerenciamento de qualidade, eficiência de processo ou planejamento de operações que estão disponíveis em tempo real. Com isso, de forma flexível e de alto nível, proporcionando a produção de pequenos lotes e produtos customizados, a integração vertical possibilita a transformação na fábrica inteligente (ALCÁCER; CRUZ-MACHADO, 2019).

A integração vertical dos sistemas de informações, do pedido dos clientes aos sensores e atuadores é feita por camadas de sistemas específicos, estabelecendo uma hierarquia na interação dos sistemas, formando a pirâmide da automação, conforme apresentado na Figura 8. A pirâmide de automação industrial apresenta uma arquitetura em níveis relacionando as etapas do ciclo de produção com os sistemas de informação usados. Representa uma referência para ilustrar e constituir a organização de todos os procedimentos que envolvem as operações de uma empresa permitindo um entendimento mais simples dos diferentes níveis de controle e monitoramento do ciclo operacional. Tem como base as normas técnicas ISA (2010), sendo composta por cinco níveis. O nível 1 está relacionado à coleta de dados de campo, criando interface com as máquinas e produtos. Esses dados são tratados e são agregados nos níveis superiores até chegar ao nível 5, do planejamento das operações, estando relacionado aos pedidos dos clientes e decisões corporativas. Esse fluxo pode ser feito no sentido descendente, da visão corporativa até se chegar às máquinas, como também ao contrário, das máquinas até se chegar à visão corporativa (MURRELEKTRONIK,

2018).

A conexão intra-firma ou Integração Vertical, que é um dos focos do subprojeto de pesquisa proposto (notadamente ao passo 2 da Figura 8), requer a transformação técnica e a modernização das instalações de produção, bem como a harmonização mecânica, elétrica e digital, com componentes integrados. Representa ainda um grande desafio promover a integração dos elementos internos dos sistemas produtivos de forma eficaz e viável economicamente, especialmente para fábricas já existentes e de pequeno porte (KIEL et al., 2020). A questão principal é conseguir os elementos do CPS, como máquinas, produtos e sistemas de gestão atuarem de forma integrada para se obter o máximo de produtividade e qualidade dos sistemas operacionais, atuando de modo autônomo. Esse ainda é um grande desafio e muito ainda tem que ser desenvolvido para que se consiga equipar empresas com essa tecnologia de forma viável.

Figura 8 – Integração vertical de sistemas de informações da empresa

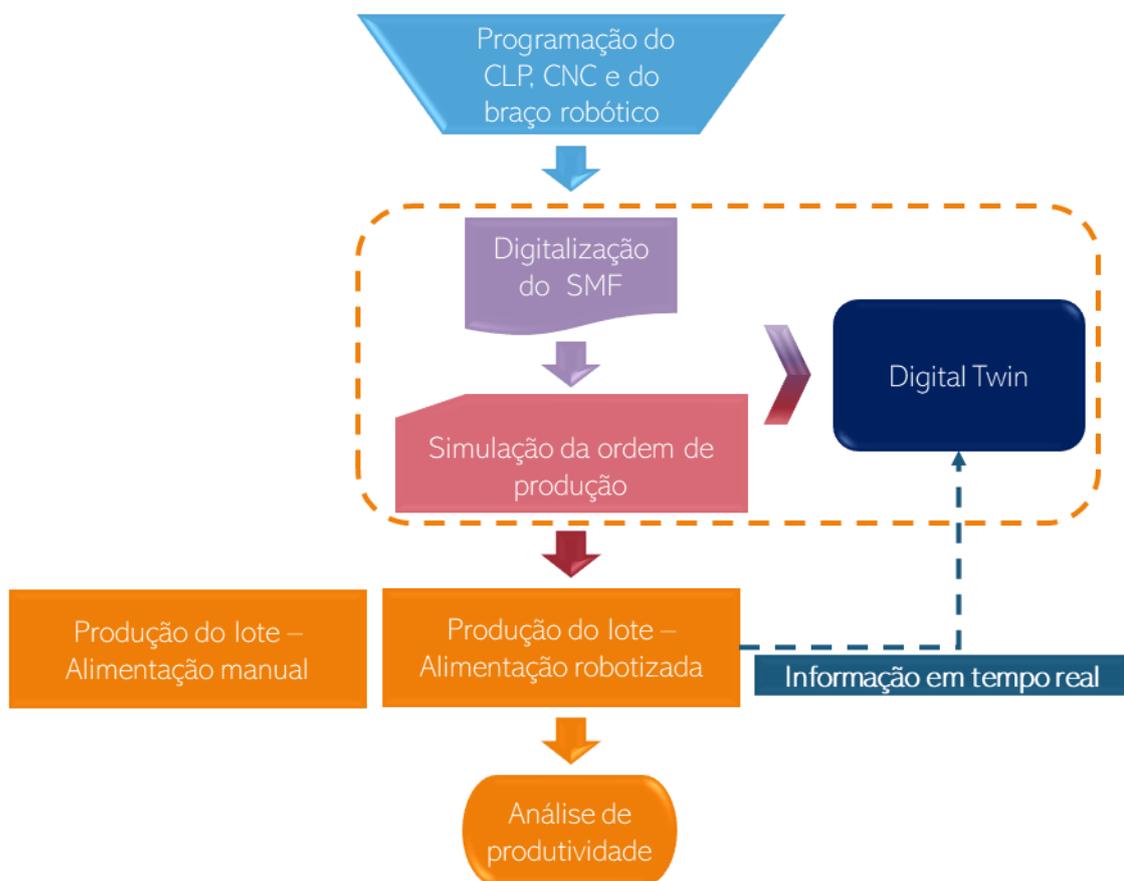


Fonte: Adaptado de Moura (2020)

3 Materiais e Métodos

Para alcançar os objetivos do projeto as seguintes atividades foram definidas: Treinamentos de programação e operação geral de braços robóticos, máquinas CNC e CLP; definição da geometria a ser processada; tryouts específicos e gerais; Simulação (através de sistema ERP – *Enterprise Resources Planning*) e realização da manufatura de lotes pilotos e avaliações comparativas de produtividade e rugosidade das superfícies usinadas. Estas etapas estão sumarizadas no fluxograma abaixo (Figura 9).

Figura 9 – Fluxograma geral do projeto



Fonte: Autoral

3.1 Integração do FMS

A integração do braço robótico ao torno CNC foi possível através da programação do controlador do robô Pegasus utilizando o *software Amatrol Controller*, para controle das principais entradas e saídas de comando, a saber: abertura e fechamento da porta e mandril

pneumáticos do torno, início e final de ciclo do torno e torno ocupado. Além de todos os pontos de movimentação do robô e abertura e fechamento da garra. Ainda, foi necessária a programação do CLP de controle, a Figura 10 mostra a sequência de programação para a integração robô-torno CNC e o esquema da integração esteira-robô-torno CNC. Nessa ilustração encerra-se o passo a passo para que a integração entre equipamentos aconteça em termos de programação computacional e sinais elétricos físicos das entradas e saídas de cada unidade para que a devida ação seja realizada no momento programado.

3.1.1 Descrição

- Esteira - Responsável pela movimentação dos suportes que comportam o tarugo a ser usinado. O FMS possui 2 esteiras transportadoras com 3 suportes que fazem a movimentação entre elas.
- Braço robótico - Possui a função de retirar o tarugo do suporte da esteira e o centralizar no mandril do torno. E após a usinagem retirar o tarugo do mandril e o fixar novamente no suporte da esteira.
- Torno CNC - Equipamento que o tarugo é usinado de acordo com a programação realizado no sistema CAM (*Computer Aided Manufacturing*). Todas as funções do torno foram programadas para serem feitas automaticamente, sem intervenção direta do operador.

3.2 Programação dos equipamentos

A Figura 11 mostra a simulação CAM (*Computer Aided Manufacturing*) da geometria a ser usinada utilizando o *software Boxford V10*. É no sistema CAM que é definido o código G, ou seja, a sequência de movimentos a ser executada pela máquina CNC. A Figura 12 mostra a rotina executada pelo robô para pegar a peça no palete e posicionar no mandril do torno CNC e em seguida tirar a peça do torno e retorná-la ao palete. Essa rotina é programada no controlador do braço robótico e contempla todos os pontos de movimentação do mesmo bem como aciona as entradas e saídas de cada unidade envolvida na integração. A Figura 13 mostra o programa CNC gerado (código G obtido com auxílio do sistema CAM) e a Figura 14 mostra as etapas de alimentação manual e robotizada no torno CNC, que foram empregadas para efeitos comparativos de produtividade. A sequência de Figuras 11 a 14 detalha algumas das etapas descritas no fluxograma da Figura 9.

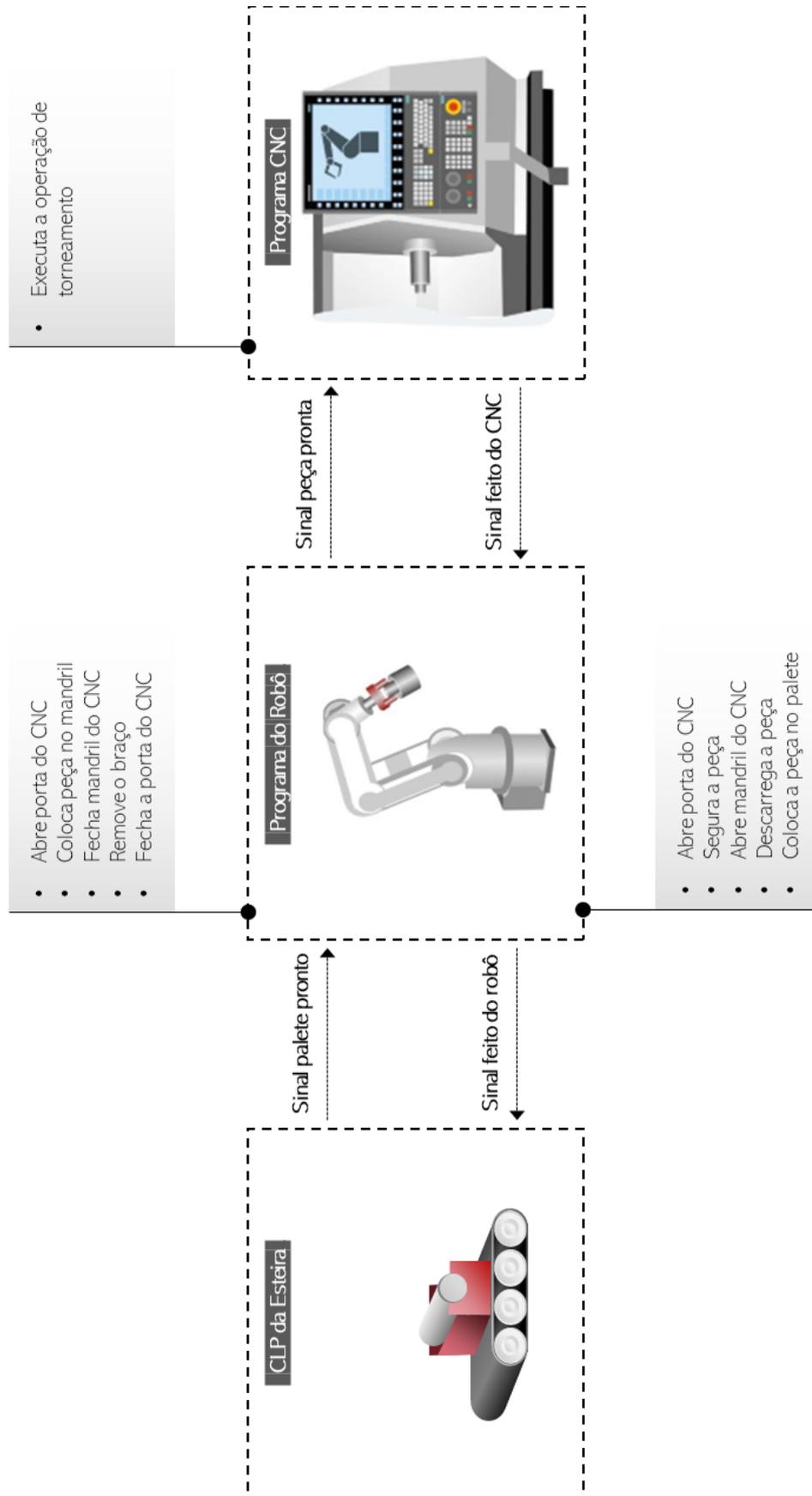
Os principais materiais e equipamentos utilizados na realização das atividades são mostrados na Figura 3.2. Um rugosímetro modelo Surtronic 25 da marca Taylor Hobson foi utilizado para medição da rugosidade das peças usinadas (Figura 16), sendo definido

um valor de *cut-off* de 0,25 mm e um comprimento total de avaliação de 1,25 mm, de acordo com a norma NBR (2008). Cinco medidas foram realizadas em cada amostra para a obtenção de uma média. Foram ainda utilizados um CLP *Industrial Allen Bradley*, seis Tarugos de alumínio 6061 de Ø 20 mm x 64 mm. Os *softwares* empregados para a programação do braço robótico e torno CNC são, respectivamente, *Amatrol Controller* e *Boxford Design Tools V10*. Os parâmetros de usinagem foram os seguintes: velocidade de corte 150 m/min, avanço 0,05 mm/volta e profundidade de corte 0,2 mm. Foram utilizados insertos de cermet código DCGT090202N-SC, sem revestimento, do fabricante Sumitomo. A usinagem foi realizada a seco.

Como um dos pilares da Indústria 4.0, a digitalização do FMS foi concebida através da criação de um protótipo de gêmeo digital (do inglês *Digital Twin*) em um módulo específico para este fim no sistema CIMSOFT – Amatrol. Para a realização dessa tarefa, o FMS foi dimensionado através de equipamentos de medição a partir de um ponto inicial em coordenadas tridimensionais (0, 0, 0) sendo estas informações inseridas ao sistema, sendo o *layout* digital construído com uma tolerância de ± 5 mm em relação ao *layout* físico. Os componentes inseridos no sistema foram: 4 mesas de suporte, 4 monitores acompanhados de 5 computadores, CLP, 2 máquinas CNC's, 2 braços robóticos com fuso para traslado, 1 alimentador de matéria-prima e 1 esteira acompanhada de 2 paletes com sensores. Após a implantação dos componentes do FMS em suas respectivas alocações foram atribuídos ao sistema os dados de custo de operação (estimados) e os tempos médios de fabricação dos componentes (obtidos dos *tryouts* com carregamento robotizado). Por fim, foram definidas as estações de trabalho (*workstations*) no gêmeo digital do FMS (Figura 17).

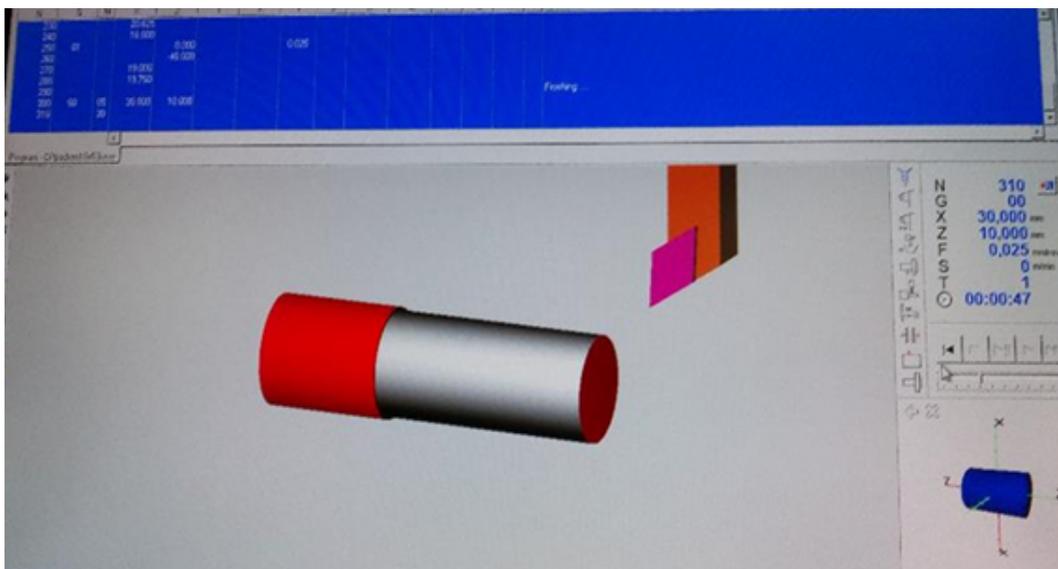
Para que fosse possível a realização da simulação e operação do gêmeo digital, foi necessária a realização de uma ordem de manufatura no sistema ERP (Figura 18) com todas as especificações exigidas pelo sistema: material utilizado (3 Tarugos de alumínio 6061 de Ø 20mm x 64mm), custo do material, tempos de processamentos, estoques e tipo de ordem.

Figura 10 – Esquema da integração Esteira-robô-torno CNC



Fonte: Autoral

Figura 11 – Simulação CAM da geometria a ser usinada



Fonte: Autoral

Figura 12 – Rotina de programação do braço robótico

```

Sub GET_CHESS
  Release
  Speed 200
  Pmove Point_1
  Pmove Point_2
  Pmove Point_4
  Grasp
  Pmove Point_3
  Pmove Point_2
  Pmove Point_1
  Return

Sub TURN_CHESS
  Speed 200
  Call ODoor
  Call OChuck
  Pmove Point_5
  Pmove Point_6
  Pmove Point_7
  Pmove Point_8
  Pmove Point_9
  Call CChuck
  Release
  Pmove Point_6
  Pmove Point_5
  Call CDoor
  //Call LATHE_CYCLE
  Call ODoor
  Pmove Point_5
  Pmove Point_6
  Pmove Point_10
  Grasp
  Delay 0.5
  Call OChuck
  Pmove Point_7
  Pmove Point_6
  Pmove Point_5
  Return

Sub LatheOPrep
  //Call CNCDatum
  Writeo Output_13,On
  Waiti Input_13,On
  Writeo Output_13,Off
  Writeo Output_15,On
  Waiti Input_15,On
  Writeo Output_15,Off
  Return

Sub ODoor
  Writeo Output_13,On
  Waiti Input_13,On
  Writeo Output_13,Off
  Return

Sub CDoor
  Writeo Output_14,On
  Waiti Input_14,On
  Writeo Output_14,Off
  Return

Sub OChuck
  Writeo Output_15,On
  Waiti Input_15,On
  Writeo Output_15,Off
  Return

Sub CChuck
  Writeo Output_16,On
  Waiti Input_16,On
  Writeo Output_16,Off
  Return

Sub CNCDatum
  Waiti Input_12,Off
  Waiti Input_12,On
  Writeo Output_11,On
  Delay 1.5
  Writeo Output_11,Off
  Waiti Input_12,Off
  Return

Sub LATHE_CYCLE
  Waiti Input_12,Off
  Writeo Output_12,On
  Delay 1.5
  Writeo Output_12,Off
  Waiti Input_12,On
  Waiti Input_12,Off
  Return

Sub PUT_CHESS
  Speed 200
  Pmove Point_11
  Pmove Point_12
  Pmove Point_13
  Pmove Point_14
  Release
  Pmove Point_11
  Return

Sub Posdone
  ProgComplete = 1
  Pmove <home>
  Return

Sub Posdone2
  ProgComplete = 2
  Pmove <home>
  Return
    
```

Fonte: Autoral

Figura 13 – Código G & M para usinagem no torno CNC

```
G21 G90 G94 G96
M04
T01 S200          Chama ferramenta 01, velocidade 200m/min
G00 X30 Z10
G00 X22 Z2
G00      Z0
G01 X-1      F0,05  Faceamento
G00 X22 Z2
G01 X18,75  F0,05
G01      Z-40      Primeiro passe
G00 X25 Z2
G01 X18,5  F0,05
G01      Z-40      Segundo passe
G01 X25
G00      Z10
M02          Final do programa
```

Fonte: Autoral

Figura 14 – Métodos de fixação dos tarugos no torno CNC (a) Operação manual (b) Carregamento com braço robótico



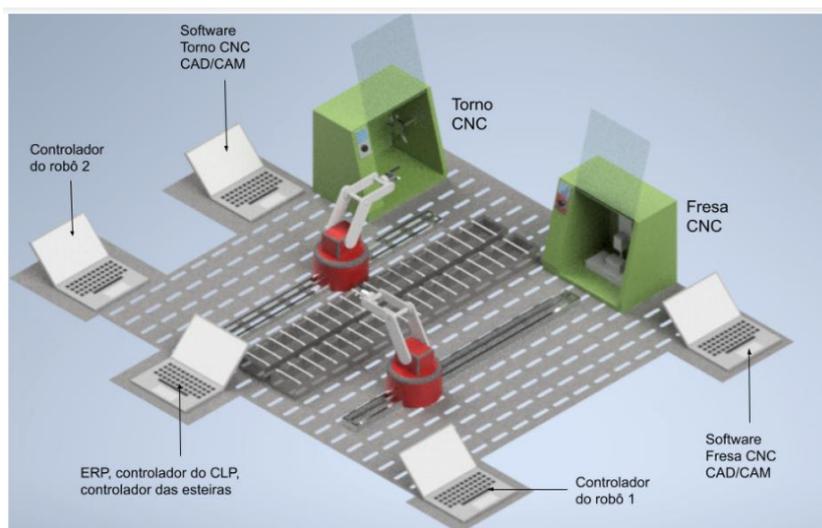
(a)



(b)

Fonte: Autoral

Figura 15 – (a) Esquema do sistema flexível de manufatura do laboratório do Departamento de Tecnologia Industrial (b) Vista do FMS



(a)



(b)

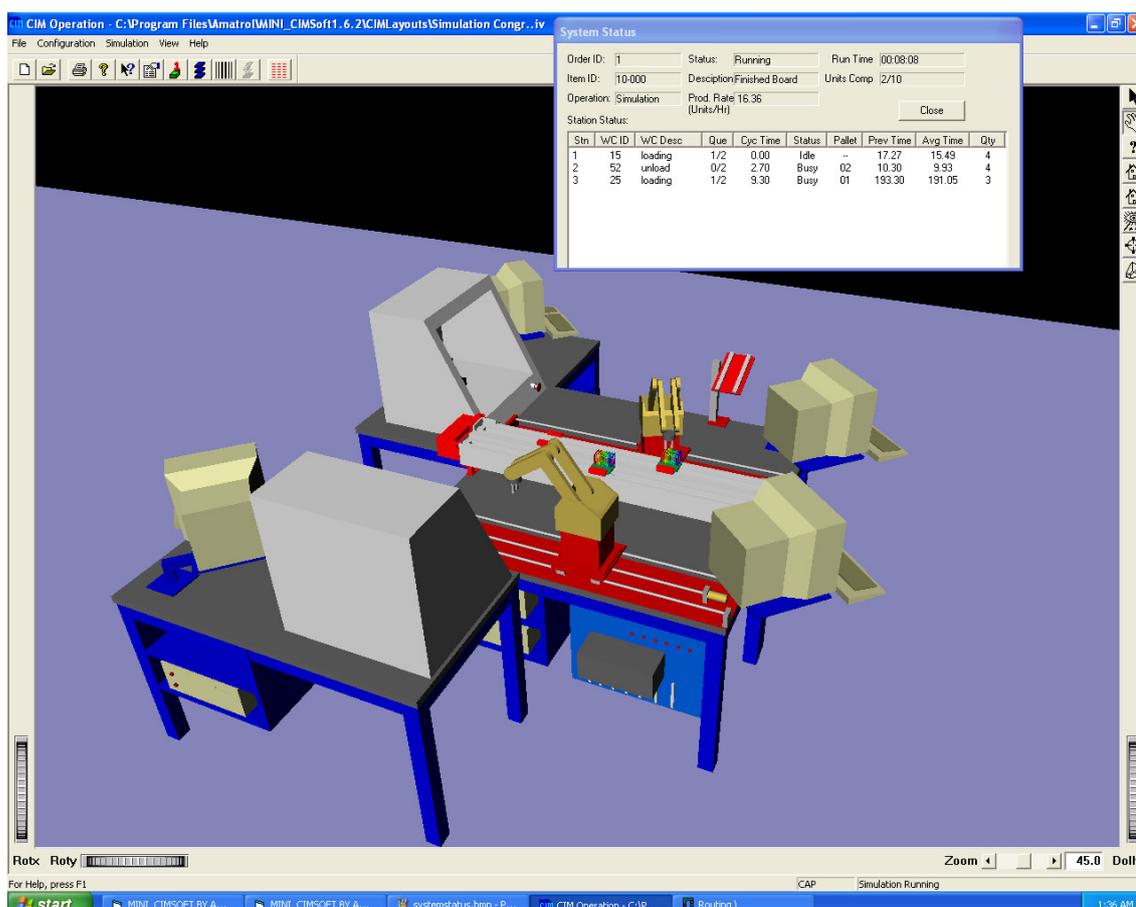
Fonte: Autoral

Figura 16 – Esquema ilustrativo de uma das medições de rugosidade das superfícies usinadas



Fonte: Autoral

Figura 17 – Status das Work Stations



Fonte: Autoral

4 Resultados e Discussão

As principais etapas previstas no projeto, como sumarizadas no fluxograma da Figura 9, foram cumpridas, notadamente, a realização da programação do braço robótico, programação do torno CNC, definição da geometria a ser usinada e integração do braço robótico e torno CNC, sendo possível o levantamento dos tempos de operação manual e robotizada (integração total do braço robótico e torno CNC) para um *tryout* de três peças em cada configuração. As Tabelas 1 e 2 mostram, respectivamente, os tempos médios, para cada etapa individual e totais para a operação manual e robotizada. A Figura 19 mostra uma das peças após o processo de usinagem.

A rugosidade média aritmética (Ra) obtida nas peças processadas foi da ordem de 0,2 μm , o que mostra um excelente acabamento de superfície usinada, de acordo com a NBR (1995), alcançando graus de tolerância ISO IT2 – IT3. Comparando-se este resultado ao encontrados na literatura pode-se afirmar que se tratam de dados para operações de super acabamento (*superfinishing*) o que denota uma adequada seleção de parâmetros para os ensaios e a qualidade dos equipamentos utilizados. Quanto aos comparativos de tempo, os resultados mostram que houve uma redução do tempo total de manufatura da ordem de 47% quando o braço robótico é integrado ao torno CNC (Figura 20). Se for considerado que o OEE (*Overall Equipment Efficiency*) para uma operação manual é, em média, da ordem de 70%, e para operações com robôs da ordem de 85%, essa redução total no tempo de manufatura, de um lote de três peças, será ainda maior, podendo alcançar patamares superiores a 60%. Essa redução deverá ser ainda maior na reprodução de lotes maiores, se mais de um turno de produção for adotado e se outras operações de usinagem forem necessárias na geometria. Os resultados para o FMS integrado já eram esperados uma vez que a operação com o robô reduz ou elimina algumas etapas manuais realizadas por um operador e ainda reduz perdas com deslocamentos desnecessários (conforme descrito nas atividades das Tabelas 1 e 2), no entanto, foi possível quantificar este ganho neste subprojeto de pesquisa.

É importante ressaltar que o desvio padrão para os resultados dos três ensaios, para cada configuração de testes, foi de $\sigma = 0,15$ e uma repetitividade calculada $Re = 0,67$, para uma probabilidade de 95,45%, considerando-se um coeficiente t de *Student* de 4,52. Certamente, aumentando-se os testes, as componentes dos erros, tanto aleatórios quanto sistemáticos, poderiam ser reduzidas, contudo para os três ensaios realizados em cada configuração. Os resultados apresentados nesta pesquisa contribuem a literatura dentro do tema por apresentar dados que raramente são encontrados em estudos acadêmicos, sendo mantidos, principalmente por indústrias onde sistemas flexíveis de manufatura são empregados. Por exemplo, o trabalho apresentado por Yildirim e Yücel (2016), se atem a estudar o efeito

da variação da velocidade nas vibrações dos braços robóticos do FMS. Por outro lado, Vosniakos et al. (2019), focam em otimizar o processo de definição dos pontos espaciais do braço robótico na alimentação de tornos CNC industriais.

Tabela 1 – Tempo médio de ciclo com carregamento manual no torno CNC (média de três peças processadas)

Atividade	Descrição	Tempo médio (s)
1	Abrir a porta do cnc	15
2	Pegar tarugo no palete	8
3	Abrir mandril	5
4	Colocar tarugo, fechar mandril e verificar aperto	17
5	Fechar porta do cnc	8
6	Enviar comando para máquina - "ciclo start"	42
7	Tempo efetivo de máquina (incluindo remoção do cavaco e movimentos de aproximação)	32
8	Referenciamento da máquina para próximo ciclo	33
9	Abrir porta do cnc	8
10	Colocar luva e retirar peça da máquina	24
11	Colocar peça no palete	12
	Tempo total do ciclo (minutos)	3,4

Tabela 2 – Tempo médio de ciclo com carregamento robotizado (média de três peças processadas)

Atividade	Descrição	Tempo médio (s)
1	Abrir a porta do cnc	8
2	Tempo para o robô pegar tarugo no palete	28
3	Abrir mandril	-
4	Tempo para o robô colocar o tarugo no mandril	9
5	Fechar porta do cnc	10
6	Enviar comando para máquina - "ciclo start"	1
7	Tempo efetivo de máquina (incluindo remoção do cavaco e movimentos de aproximação)	32
8	Referenciamento da máquina para próximo ciclo	33
9	Tempo de abertura automática da porta do cnc	4
10	Colocar luva e retirar peça da máquina	-
11	Tempo para o robô colocar a peça no palete	18
	Tempo total do ciclo (minutos)	1,8

Cumprindo com o objetivo inicial de conceber um gêmeo digital, esta etapa foi então realizada conforme descrito na seção metodologia. A Figura 21 mostra então duas vistas do FMS digitalizado comparando-o ao *layout* físico do laboratório de manufatura integrada. De acordo com a alimentação de dados no sistema foi verificado que os tempos simulados no GD, para uma produção de um lote com três peças, apresentou uma precisão de 92% ao tempo real de processamento, o que demonstra que essa ferramenta será consideravelmente útil para prever o tempo de processamento de lotes maiores. Como resultado da construção

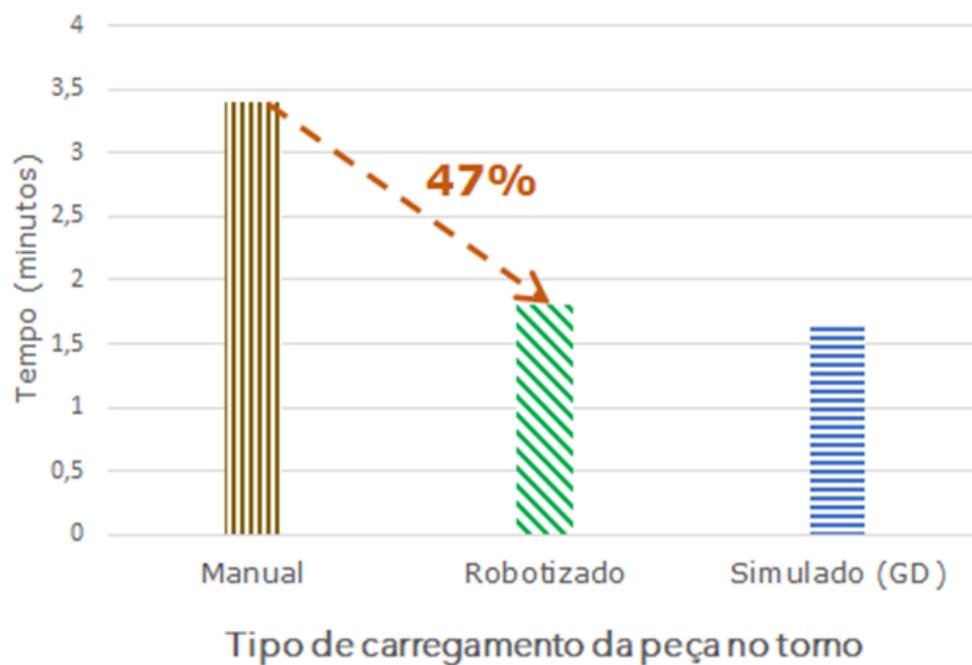
Figura 19 – Peça após a operação de torneamento



Fonte: Autoral

do GD (Figura 22), temos um FMS integrado entre as entidades físicas e virtuais, com o acompanhamento das informações das operações em tempo real, sendo elas: status da ferramenta de corte, velocidade do fuso, ferramenta em uso, velocidade do robô, velocidade do transportador, informações do código de barras, posição do palete, posição do robô, status do CNC, status do transportador, matéria-prima, status da fila, taxa de produção (un/hr).

Figura 20 – Comparativo do tempo médio de manufatura utilizando-se carregamento robotizado e manual



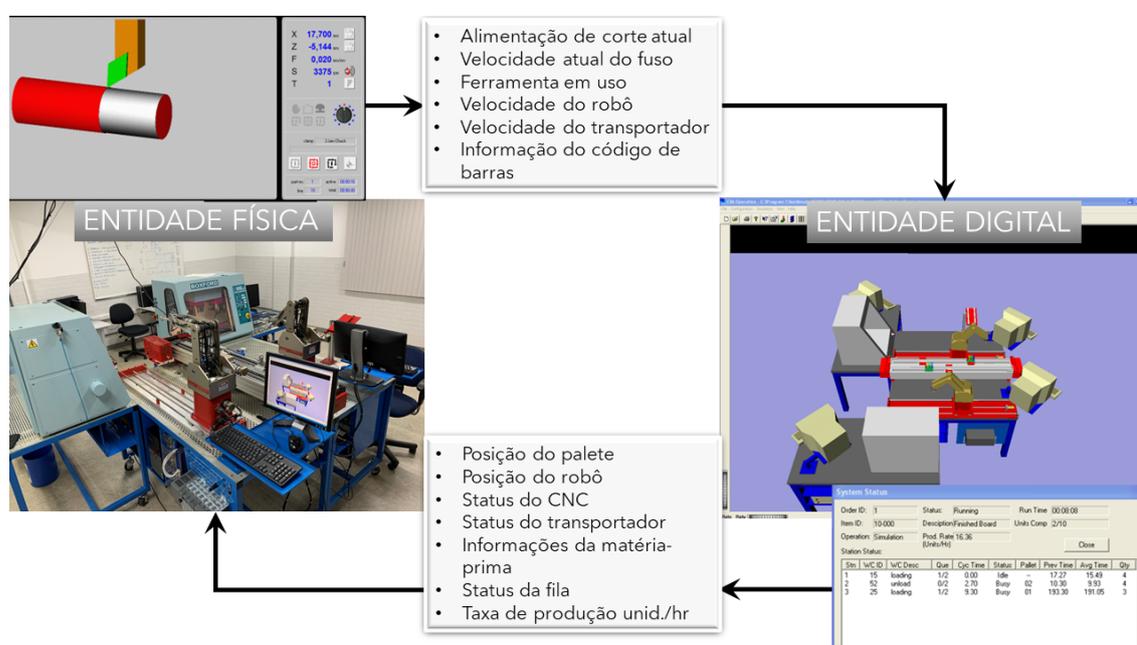
Fonte: Autoral

Figura 21 – Imagem comparativa do sistema físico e virtual do FMS



Fonte: Autoral

Figura 22 – Esquema da integração entre a entidade física e virtual do FMS



Fonte: Autoral

5 Conclusão

Diante dos resultados apresentados e discutidos neste trabalho é possível verificar que o objetivo principal, inicialmente estipulado para o projeto de pesquisa, foi alcançado, uma vez que a integração completa de uma célula de manufatura, consistindo de um braço robótico e um torno CNC foi realizada, processando pedidos de produção através de um sistema ERP. Realizou-se também a integração de uma esteira de movimentação de paletes através de um CLP. Além da concepção de um gêmeo digital de um sistema flexível de manufatura.

Com efeito, ainda é possível extrair as seguintes conclusões do trabalho de pesquisa que vão de encontro aos objetivos específicos inicialmente propostos:

- O aumento da produtividade, para um lote pequeno de peças, com a integração do braço robótico ao torno CNC é da ordem de 47%. Reduz-se assim, significativamente, o *lead time* de produção de peças por revolução;
- Foi possível a criação de um gêmeo digital do FMS, do laboratório de manufatura integrada do Departamento de Tecnologia Industrial, utilizando um módulo específico do *software* ERP CIMSOFT AMATROL. Além da integração de equipamentos físicos, esse é um importante passo na direção da criação de um espaço Ciberfísico para o FMS, em momento futuro;
- Com o gêmeo digital foi possível a realização de simulações de pedidos de manufatura, observando-se que estas apresentaram 92% de concordância em relação aos tempos reais de manufatura no FMS, para um lote pequeno de peças;
- A rugosidade média aritmética (R_a) das superfícies usinadas foi da ordem de $0,2 \mu m$, o que de acordo com a [NBR \(1995\)](#), corresponde a um grau de tolerância ISO IT2 – IT3, o que evidencia que, com os equipamentos disponíveis no FMS e a adequada seleção de parâmetros de corte, é possível a manufatura de componentes com elevado grau de precisão e acabamento de superfície;
- Com o sistema flexível de manufatura integrado e com o gêmeo digital concebido, o laboratório de manufatura integrada torna-se um espaço para treinamentos e difusão de tecnologias habilitadoras da chamada Indústria 4.0;
- Em tempo, salienta-se que no presente momento, um artigo com as realizações alcançadas neste projeto de pesquisa está sendo editado para a futura submissão a um periódico dentro do tema estudado.

Referências

- ADAMSON, G. et al. Cloud manufacturing—a critical review of recent development and future trends. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, Taylor & Francis, v. 30, n. 4-5, p. 347–380, 2017. Citado na página 15.
- ALCÁCER, V.; CRUZ-MACHADO, V. Scanning the industry 4.0: A literature review on technologies for manufacturing systems. *Engineering science and technology, an international journal*, Elsevier, v. 22, n. 3, p. 899–919, 2019. Citado na página 25.
- BARUWA, O. T.; PIERA, M. A. Identifying fms repetitive patterns for efficient search-based scheduling algorithm: A colored petri net approach. *Journal of Manufacturing Systems*, Elsevier, v. 35, p. 120–135, 2015. Citado na página 18.
- DING, K. et al. Defining a digital twin-based cyber-physical production system for autonomous manufacturing in smart shop floors. *International Journal of Production Research*, Taylor & Francis, v. 57, n. 20, p. 6315–6334, 2019. Citado na página 15.
- GRIEVES, M. Digital twin: manufacturing excellence through virtual factory replication. *White paper*, Florida Institute of Technology, v. 1, n. 2014, p. 1–7, 2014. Citado na página 21.
- GROOVER, M. P. *Automação industrial e sistemas de manufatura*. [S.l.]: Pearson Education do Brasil, 2011. Citado na página 18.
- GUO, Z. et al. An rfid-based intelligent decision support system architecture for production monitoring and scheduling in a distributed manufacturing environment. *International journal of production economics*, Elsevier, v. 159, p. 16–28, 2015. Citado na página 15.
- HARTMANN, M.; HALECKER, B. Management of innovation in the industrial internet of things. In: THE INTERNATIONAL SOCIETY FOR PROFESSIONAL INNOVATION MANAGEMENT (ISPIM). *ISPIM Conference Proceedings*. [S.l.], 2015. p. 1. Citado na página 17.
- HE, B.; BAI, K.-J. Digital twin-based sustainable intelligent manufacturing: A review. *Advances in Manufacturing*, Springer, v. 9, n. 1, p. 1–21, 2021. Citado na página 22.
- ISA, A. Isa-95.00. 01-2010 (iec 62264-1 mod). *Enterprise-Control System Integration Part*, v. 1, p. 21, 2010. Citado na página 25.
- JONES, D. et al. Characterising the digital twin: A systematic literature review. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, Elsevier, v. 29, p. 36–52, 2020. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 24.
- KIEL, D. et al. The impact of the industrial internet of things on established business models. In: *Proceedings of the 25th international association for management of technology (IAMOT) conference*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 673–695. Citado na página 17.
- KIEL, D. et al. Sustainable industrial value creation: Benefits and challenges of industry

4.0. In: *Digital Disruptive Innovation*. [S.l.]: World Scientific, 2020. p. 231–270. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 26.

KRITZINGER, W. et al. Digital twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. *IFAC-PapersOnLine*, Elsevier, v. 51, n. 11, p. 1016–1022, 2018. Citado na página 23.

KUSIAK, A. Smart manufacturing. *International Journal of Production Research*, Taylor & Francis, v. 56, n. 1-2, p. 508–517, 2018. Citado na página 15.

LASI, H. et al. Industrie 4.0. irtschaftsinformatik. *Business & Information Systems Engineering; Berkeley*, v. 6, 2014. Citado na página 14.

LEE, J.; BAGHERI, B.; KAO, H.-A. A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing letters*, Elsevier, v. 3, p. 18–23, 2015. Citado na página 21.

MOURA, L. R. *A Caminho da Indústria 4.0: fundamentos e orientações para a transformação digital na Indústria*. [S.l.]: Brazil Publishing, 2020. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 26.

MOURTZIS, D.; ANGELOPOULOS, J.; DIMITRAKOPOULOS, G. Design and development of a flexible manufacturing cell in the concept of learning factory paradigm for the education of generation 4.0 engineers. *Procedia Manufacturing*, Elsevier, v. 45, p. 361–366, 2020. Citado na página 14.

MURRELEKTRONIK, R. *Pirâmide da Automação industrial - Entenda Todas as Camadas*. 2018. Último acesso: 30 Março 2021. Disponível em: <<http://blog.murrelektronik.com.br/piramide-da-automacao-industrial-entenda-todas-as-camadas>>. Citado na página 26.

NAKAYAMA, R. S.; SPÍNOLA, M. de M.; SILVA, J. R. Towards i4. 0: A comprehensive analysis of evolution from i3. 0. *Computers & industrial engineering*, Elsevier, v. 144, p. 106453, 2020. Citado na página 14.

NBR, A. Abnt nbr iso 6158:1995-07-31. *Sistema de tolerâncias e ajustes*, p. 79, 1995. Citado 2 vezes nas páginas 37 e 42.

NBR, A. Abnt nbr iso 4288:2008-11-10. *Especificações geométricas de produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Regras e procedimentos para avaliação de rugosidade*, p. 14, 2008. Citado na página 29.

OESTERREICH, T. D.; TEUTEBERG, F. Understanding the implications of digitisation and automation in the context of industry 4.0: A triangulation approach and elements of a research agenda for the construction industry. *Computers in industry*, Elsevier, v. 83, p. 121–139, 2016. Citado na página 21.

OLIVEIRA, V. F. de et al. Sql and nosql databases in the context of industry 4.0. *Machines*, MDPI, v. 10, n. 1, p. 20, 2021. Citado na página 14.

PABLO, J. P.; RAHMAN, M. Z. Using robot to serve the nc lathe. Hämeen ammattikorkeakoulu, 2011. Citado na página 14.

- SHIVANAND, H. Benal and v. koti. "flexible manufacturing system. *New Age International Publishers, Bangalore, India*, 2006. Citado na página 17.
- SKRIVASTAVA, C.; YADA, A. V.; SINGH, A. A review on flexible manufacturing system a modern technology in manufacturing. *Journal of Engineering Sciences*, v. 11, n. 7, p. 970–978, 2020. Citado 4 vezes nas páginas 18, 19, 20 e 21.
- VAIDYA, S.; AMBAD, P.; BHOSLE, S. Industry 4.0 – a glimpse. *Procedia Manufacturing*, v. 20, p. 233–238, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.02.034>. Disponível em: <<https://app.dimensions.ai/details/publication/pub.1101148180>>. Citado na página 14.
- VOSNIAKOS, G. et al. Task-oriented off-line parametric programming of an industrial robot serving cnc lathes. *Proceedings in Manufacturing Systems*, University "Politehnica" of Bucharest, Machine and Manufacturing Systems . . . , v. 14, n. 1, p. 9–14, 2019. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 38.
- WAN, J. et al. Advances in cyber-physical systems research. *KSII Transactions on Internet and Information Systems (TIIS)*, Korean Society for Internet Information, v. 5, n. 11, p. 1891–1908, 2011. Citado na página 21.
- YILDIRIM, Ş.; YÜCEL, O. Performance analysis of an experimental micro flexible manufacturing system (fms). *Recent Innovations in Mechatronics*, v. 3, n. 1-2., p. 1–8, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 37.
- ZHONG, R. Y. et al. Intelligent manufacturing in the context of industry 4.0: a review. *Engineering*, Elsevier, v. 3, n. 5, p. 616–630, 2017. Citado na página 14.