

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

CARLOS VINICIUS POMBO SPINASSÉ DUARTE

**INDÚSTRIA 4.0: O PAPEL DA MANUFATURA ADITIVA – UMA REVISÃO DA
LITERATURA**

**VITÓRIA
2022**

CARLOS VINICIUS POMBO SPINASSÉ DUARTE

**INDÚSTRIA 4.0: O PAPEL DA MANUFATURA ADITIVA – UMA REVISÃO DA
LITERATURA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia da Universidade Federal do Espírito Santo como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Produção.
Orientador: Prof. Dr. Laurence Colares Magalhães

VITÓRIA

2022

RESUMO

A cada momento, qualquer empresa precisa se tornar mais competitiva para se manter viva em seu mercado. Um modo de se atingir esse objetivo é através da implantação de processos produtivos mais eficientes, como a Manufatura Aditiva (MA), um dos pilares da Indústria 4.0. Com efeito, o presente trabalho tem como objetivo estudar o papel da MA no contexto da Indústria 4.0. Para isso, realizou-se um levantamento bibliográfico, utilizando-se trabalhos acadêmicos recentes que tratam do tema. Conclui-se que existem inúmeras barreiras que dificultam a disseminação da MA, destacando-se: o controle de processo, a baixa eficiência e a incompatibilidade de matérias-primas. Torna-se assim, imprescindível o engajamento de núcleos de pesquisa e desenvolvimento (P&D) e da comunidade acadêmica, para a aceleração do desenvolvimento da tecnologia, uma vez que esta mostra-se promissora em vários setores chave da economia mundial.

Palavras-chave: Indústria 4.0. Manufatura aditiva. Quarta revolução industrial.

ABSTRACT

At every moment, any company needs to become more competitive to stay alive in its market. One way to achieve this goal is through the implementation of more efficient production processes, such as Additive Manufacturing (AM), one of the pillars of Industry 4.0. Indeed, the present work aims to study the role of AM in the context of Industry 4.0. For this, a bibliographic survey was carried out using the main graphic works, recent that deal with the work. It is concluded that there are barriers that hinder the dissemination of AM, highlighting: process control, low and incompatibility of raw range. It thus becomes the essential research and development (R&D) engagement of the academic community, to become the promise of technology development, since it shows in several sectors the key to the world economy.

Keywords: Industry 4.0. Additive Manufacturing. Fourth industrial revolution.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Características das Revoluções Industriais.....	15
Figura 2 – Características da Indústria 4.0 e sua conceituação.....	18
Figura 3 – Nove pilares da Indústria 4.0.....	19
Figura 4 – IoT.....	20
Figura 5 – 3V's de <i>big data</i>	21
Figura 6 – Robôs autônomos dotados de capacidade de locomoção.....	22
Figura 7 – Robôs colaborativos.....	23
Figura 8 – Impressão 3D.....	24
Figura 9 – <i>Cloud computing</i>	25
Figura 10 – Arquitetura da <i>cybersegurança</i>	27
Figura 11 – Fábrica simulada.....	28
Figura 12 – Realidade aumentada.....	29
Figura 13 – Níveis de integração dos sistemas.....	30
Figura 14 – Fases de um processo de manufatura aditiva.....	33
Figura 15 – (a) um modelo tridimensional e (b) o arquivo STL que foi gerado.....	34
Figura 16 – Fatiamento.....	34
Figura 17 – Fatiamento (a) uniforme e (b) adaptativo.....	35
Figura 18 – Diferentes processos de manufatura aditiva.....	36
Figura 19 – Campos de estudo dos trabalhos analisados.....	44
Figura 20 – Limitações encontradas.....	45
Figura 21 – Aplicações da MA.....	46

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Alguns processos de manufatura aditiva e suas características	32
Quadro 2 – Tecnologias, as aplicações e as limitações encontradas nas pesquisas	42

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3D – Três Dimensões

CPS – *Cyber-Physical Systems*

ERP – Enterprise Resource Planning

IoT – *Internet of Things*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	10
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO	10
1.2 JUSTIFICATIVA.....	11
1.3 OBJETIVOS.....	12
1.3.1 Geral.....	12
1.3.2 Específicos.....	12
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	13
2.1 AS REVOLUÇÕES INDUSTRIAIS.....	13
2.2 INDÚSTRIA 4.0.....	15
2.3 PILARES DA INDÚSTRIA 4.0.....	19
2.3.1 IoT	20
2.3.2 Big data.....	21
2.3.3 Robôs autônomos	22
2.3.4 Manufatura aditiva	23
2.3.5 Cloud computing	24
2.3.6 Cyber segurança.....	26
2.3.7 Simulação.....	27
2.3.8 Realidade aumentada	28
2.3.9 Integração dos sistemas	29
2.4 MANUFATURA ADITIVA	31
3 METODOLOGIA	37
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	38
5 CONCLUSÕES.....	47
6 REFERÊNCIAS	49

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Ao analisar a história, nota-se que o ser humano, em uma busca por trilhar os caminhos presentes no mundo, passou a empregar inúmeras ferramentas a fim de atingir seus objetivos. (REZENDE, 2018). Até os anos 1980 os modos tradicionais de fabricação das ferramentas tinham como base a remoção de material, a conformação mecânica ou as técnicas de fundição. Esses processos são eficientes e funcionais, porém contam com alguns inconvenientes como a geração de contaminantes para o meio ambiente, o gasto em excesso de energia, o dispêndio de materiais, a produção de resíduos e a elevada produção de lixo (SCHWAB *et al.*, 2018).

A partir dos anos 1980 passou-se a realizar diversas pesquisas que buscavam aprimorar os processos produtivos, com isso, começou-se a inserir novos recursos no meio produtivo. Aliado a isso, apareceram inúmeras vantagens que propiciavam ganhos elevados em comparação com as estratégias produtivas utilizadas até então, gerando assim inúmeros benefícios para todos (FERRARESI, 2018).

Com as novas estratégias de fabricação observou-se a diminuição do tempo gasto para entregar os produtos para o consumidor, o aperfeiçoamento na possibilidade de customização e a minimização da quantidade de material empregado na cadeia produtiva. Grande parte dos novos dispositivos fazem parte da Manufatura Aditiva (MA), processo em que se tem a aglutinação e a deposição de material em camadas sucessivas. Isso é possível graças à modelagem advinda de um *software* que manda para as máquinas as informações requeridas para a construção do componente almejado (SANTOS, 2018).

Diante disso, passou-se a ter uma tecnologia disruptiva, que modificou de modo significativo o que se sabia acerca da produção de componentes até então. Através desse processo inovador foi possível inserir novos conceitos e tecnologias que alteraram a forma de projeto, a produção e a distribuição de produtos para os clientes (ZANOTTO, 2017).

A manufatura aditiva é um dos principais pilares da Indústria 4.0, considerada por muitos pesquisadores como Santos (2014), Schwab *et al.* (2018), entre outros como a Quarta Revolução Industrial. Ao se tratar da MA, aponta-se que através dela

é possível contribuir em processos na cadeia de suprimentos. Destaca-se ainda que por meio dela dispensa-se o uso de ferramental e moldes dedicados, além de se conseguir produzir itens personalizados a custos mais atrativos (SACOMANO, 2018).

Tais características têm feito com que se analise de forma mais aprofundada a MA a fim de aplicá-la nas mais variadas situações e áreas. É possível adotá-la na indústria aeroespacial, na construção civil, na indústria automobilística, em eletrônicos, na biogenética, no setor de defesa, entre outros (BANDYOPADHYAY; BOSE, 2019).

Diante disso, o presente trabalho consiste em uma pesquisa de revisão bibliográfica que trata da Indústria 4.0 de modo geral, bem como de um dos seus pilares, que é a Manufatura Aditiva, uma tecnologia que promete revolucionar os tradicionais métodos de aplicação de tal instrumento. Isto posto, avalia-se os principais trabalhos acadêmicos que discorrem acerca da temática avaliando quais são os elementos estudados, as limitações, bem como as aplicações da manufatura aditiva.

1.2 JUSTIFICATIVA

Há inúmeros desafios que precisam ser identificados e superados para tornar a MA mais acessível a todas as empresas, especialmente no processo de alteração dos métodos convencionais para a nova tecnologia. Desse modo há vários eventos que devem ser compreendidos para a disseminação da tecnologia criada, como as vantagens do método, as dificuldades encontradas na contemporaneidade, entre outros desafios que precisam ser transpostos. Por esse motivo é imprescindível considerar os elementos destacados anteriormente, bem como os principais assuntos que estão sendo estudados pelos pesquisadores da área para gerar mais informações úteis para a ciência e compreender o estado da arte que trata da manufatura aditiva, suas perspectivas e os desafios encontrados na contemporaneidade para o seu desenvolvimento. Além disso busca-se auxiliar os pesquisadores da área a explorar os *gaps* (lacunas, brechas) existentes a fim de possibilitar o desenvolvimento dessa tecnologia e eliminar as lacunas existentes.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Geral

Classificar e avaliar as recentes pesquisas que tratam da contribuição da manufatura aditiva, no contexto da Indústria 4.0, buscando estabelecer suas vantagens e limitações, em um cenário atual e de curto a médio prazo.

1.3.2 Específicos

- Compreender as características da Indústria 4.0 que a tornaram um movimento necessário para o desenvolvimento da humanidade.
- Avaliar as particularidades da Manufatura Aditiva a fim de compreender suas características e tecnologias de aplicações.
- Entender os principais elementos estudados, as limitações e as aplicações da manufatura aditiva a fim de que se possa contribuir na disseminação de tal tecnologia.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 AS REVOLUÇÕES INDUSTRIAIS

Os modos de produção começaram a se modificar com a Primeira Revolução Industrial, pois passou-se a fazer o uso de máquinas para a realização de trabalhos realizados manualmente até então. Por meio desse movimento começou-se a transformar as tarefas executadas pelos artesãos, o que foi bom para os proprietários das indústrias (TEIXEIRA *et al.*, 2019).

Os processos industriais começaram a ser mais amplos e organizados juntamente com a Primeira Revolução Industrial que iniciou no século XVIII na Inglaterra. Tal estratégia culminou em uma transformação intensa na forma de produção em que se experimentou a mecanização das fábricas por meio da inserção de máquinas a vapor, algo que revolucionou por completo o processo produtivo dos bens na época. A Primeira Revolução Industrial foi caracterizada por uma divisão intensa no trabalho, a produção em massa, o trabalho assalariado e a especialização dos profissionais (TADEU; SANTOS, 2016).

A Segunda Revolução Industrial foi marcada pelo uso de combustíveis fósseis, isso implica que se passou a utilizar esses insumos com o objetivo de gerar trabalho. Tudo isso contribuiu para agregar mais valor à vida das pessoas existentes na época, destaca-se ainda a descoberta do aço, material amplamente utilizado na contemporaneidade. Portanto, foram obtidos ganhos significativos com essa nova forma de produção que perdurou até a Segunda Guerra Mundial (STEFANI *et al.*, 2021).

Segundo Coelho (2016) por volta do fim do século XIX e o começo do século XX houve uma intensificação na produção em massa, especialmente com o aparecimento de novas tecnologias como é o caso dos motores a combustão interna, da eletricidade e a produção em massa. Dessa forma, tais elementos propiciaram o surgimento da chamada Segunda Revolução Industrial, um evento histórico para os meios de produção. Destaca-se ainda o fordismo, um modelo de trabalho que tem como base as linhas de produção no qual se atua executando tarefas repetitivas e especializadas, culminou ainda mais na intensificação e desenvolvimento das companhias no período.

A Terceira Revolução Industrial ganhou força com o desenvolvimento dos microcomputadores que permitiram automatizar processos, armazenar e transmitir informações, entre outras coisas. Esse modelo é a realidade em muitas empresas brasileiras que começaram a automatizar seus processos recentemente, no entanto existem aquelas que ainda não se adequaram a essa nova realidade (SACOMANO, 2018).

A Terceira Revolução Industrial, que emergiu no século XX, especialmente entre os anos de 1960 e 1970, apresentou como marco o uso intenso de computadores, o surgimento da fibra óptica, a adoção e o desenvolvimento de novos materiais, bem como a automação de processos industriais. Esse modelo vigora até os dias de hoje e está cedendo espaço para a chamada Quarta Revolução Industrial, uma estratégia que pode ser sintetizada como um modo de integrar processos (não é apenas isso, porém, esse assunto será discutido com mais detalhes na próxima seção) (MARTINS; LAUGENI, 2015).

A Quarta Revolução Industrial é um novo modo de produção que tem sido caracterizado por uma maior integração dos processos. Por meio das suas tecnologias habilitadoras busca-se garantir que se tenha níveis mais elevados de eficiência e autonomia ao longo da cadeia produtiva. Essa estratégia, quando consolidada trará muitos benefícios para a cadeia produtiva. Aponta-se ainda seu papel transformador, isto é, através dela tem-se alterado as aptidões e os conhecimentos mínimos exigidos para os profissionais que desejam atuar nesse campo (IKEZIRI *et al.*, 2020).

A Quarta Revolução Industrial é fruto do crescimento e desenvolvimento contínuo dos processos produtivos em que se tem buscado elevar a produtividade, além de conectar empresas, máquinas e pessoas para o desenvolvimento de redes mais inteligentes com o auxílio das tecnologias emergentes. Com isso, acredita-se que é possível ter fábricas mais autônomas, dotadas de uma capacidade de se adaptar, prever falhas e planejar as manutenções de forma contínua para suprir de modo eficiente as demandas mercadológicas (SACOMANO *et al.*, 2018). Diante disso a figura 1 sintetiza os principais marcos das Revoluções Industriais.

Figura 1 – Características das Revoluções Industriais



Fonte: Francisco Neto (2018)

De acordo com Viana (2019) existem diversas tecnologias que embasam a Indústria 4.0 como a computação na nuvem, a *Internet of Things* (IoT) ou Internet das Coisas, entre outras. Tudo isso permite que se tenham processos mais integrados para atender as demandas corporativas a fim de que se obtenha volumes de dados suficientes para a tomada de decisão nas organizações. A utilização de componentes como sensores, por exemplo, gera informações empregadas nas análises, propiciando que as próprias máquinas ajam de forma autônoma em casos de anormalidade.

Assim, com a Indústria 4.0, será possível dar mais autonomia para os processos que poderão tomar decisões de maneira autônoma. Isso implica que será possível, por exemplo, agendar a compra de estoque à medida em que se atinge o nível mínimo de segurança. Dessa maneira, passa-se a ter um ciclo produtivo mais eficiente e seguro, além de minimizar os erros humanos que porventura venham a ocorrer (TADEU; SANTOS, 2016).

2.2 INDÚSTRIA 4.0

A Indústria 4.0 é um termo que foi usado pela primeira vez no ano de 2011 na Alemanha, mais especificamente na Feira de Hanover, com o intuito de definir um

movimento que seria denominado posteriormente de Quarta Revolução Industrial. De modo resumido, pode-se ressaltar que as Revoluções Industriais passadas culminaram na inserção da mecanização, da eletricidade e da tecnologia da informação nas empresas (GONÇALVES, 2020). O novo movimento, por sua vez, é responsável por aglutinar todos os dados que estão disponíveis, combinando-os com as informações das companhias, constituindo um conceito novo da cadeia produtiva. Tudo isso permite que se controle, monitore, coordene e integre os processos com o auxílio de uma central computacional denominada como *Cyber-Physical Systems* (CPS) ou Sistemas Ciber-Físicos (PIAIA *et al.*, 2019).

O termo Indústria 4.0 é o responsável por associar valor e tecnologia para todas as empresas que adotam tal instrumento. Uma das razões disso se liga ao fato de que as companhias passarão a trabalhar com sistemas de armazenamento e de produção, bem como máquinas que atuam de forma integrada, dotadas de um intercâmbio de informações e de sistemas. Com isso, qualquer agente autorizado pode acompanhar os processos em tempo real, pois passa-se a ter um sistema de troca de dados automático (COELHO, 2016).

A questão principal atrelada a uma fábrica inteligente é a conexão que ocorre em tempo real, sendo que isso se dá entre as pessoas, os dispositivos e os equipamentos existentes ao longo da cadeia. Dispositivos conectados à internet são responsáveis por culminar na convergência do mundo virtual e do mundo físico, com isso, pode-se apontar que tal processo é tradicionalmente denominado como CPS (AZEVEDO, 2017).

Schwab (2020) cita que ao se tratar da Indústria 4.0 é necessário discorrer acerca de manufaturas, uma palavra que remonta às oficinas manuais, no entanto, atualmente implica em processos produtivos, ambientes de produção e fábricas. Dessa maneira, ter produtos manufaturados, significa ter a existência de componentes que são industrializados.

Pode-se apontar ainda que a manufatura consiste em um instrumento no qual se tem o sistema das fábricas, dotado de uma enorme quantidade de produtos e processos. Tudo isso é gerido e executado de modo padronizado por máquinas, por trabalhadores ou em série, sendo que a atuação desses elementos propicia a execução das operações (SACOMANO, 2018).

Diante disso, a Indústria 4.0 está intimamente associada às manufaturas, bem como à Quarta Revolução Industrial, se relacionando às alterações nos processos de produção que culminaram em níveis elevados de eficácia e eficiência operacional. Tais níveis devem ser buscados em quaisquer áreas associadas e em todas as questões atreladas à cadeia produtiva (ABREU *et al.*, 2017).

Segundo Gonçalves (2020), as indústrias em que as atividades se encontram em um nível de automação e de integração mais avançado requerem que se tenha edificações, sistemas, processo e máquinas projetados e instalados para alcançar tal objetivo. No entanto, não se refere apenas aos investimentos físicos, isto é, se faz necessário desenvolver ações programadas nos campos organizacionais.

As fábricas inteligentes terão a capacidade de otimizar os processos produtivos a fim de melhorar sua cadeia produtiva e, em muitos casos, promover a conexão de fornecedores com inovações tecnológicas. Tais inovações serão as responsáveis por potencializar o nível de eficiência e também ajudar as companhias a tornar seu ciclo produtivo ainda mais forte. (FRANCO, 2020).

Para Shafiq *et al.* (2015) a Indústria 4.0 pode conter outros dados com concepções distintas. Esse novo conceito consiste na integração de dispositivos físicos e de máquinas que apresentam *softwares* e sensores empregados para planejar, controlar e prever os resultados de um processo de modo a se potencializar a eficiência operacional.

Pode-se apontar também que a Revolução Industrial consiste em um movimento no qual se tem a aplicação de uma série de tecnologias avançadas na cadeia produtiva de forma a se agregar novos serviços e valores para os consumidores e para a própria companhia. Isso é essencial para elevar a qualidade e flexibilizar o sistema produtivo de maneira a se preencher as demandas por modelos de negócios inovadores e novos ao mesmo tempo em que se utiliza serviços com níveis de agilidade elevados. (SANTOS, 2017).

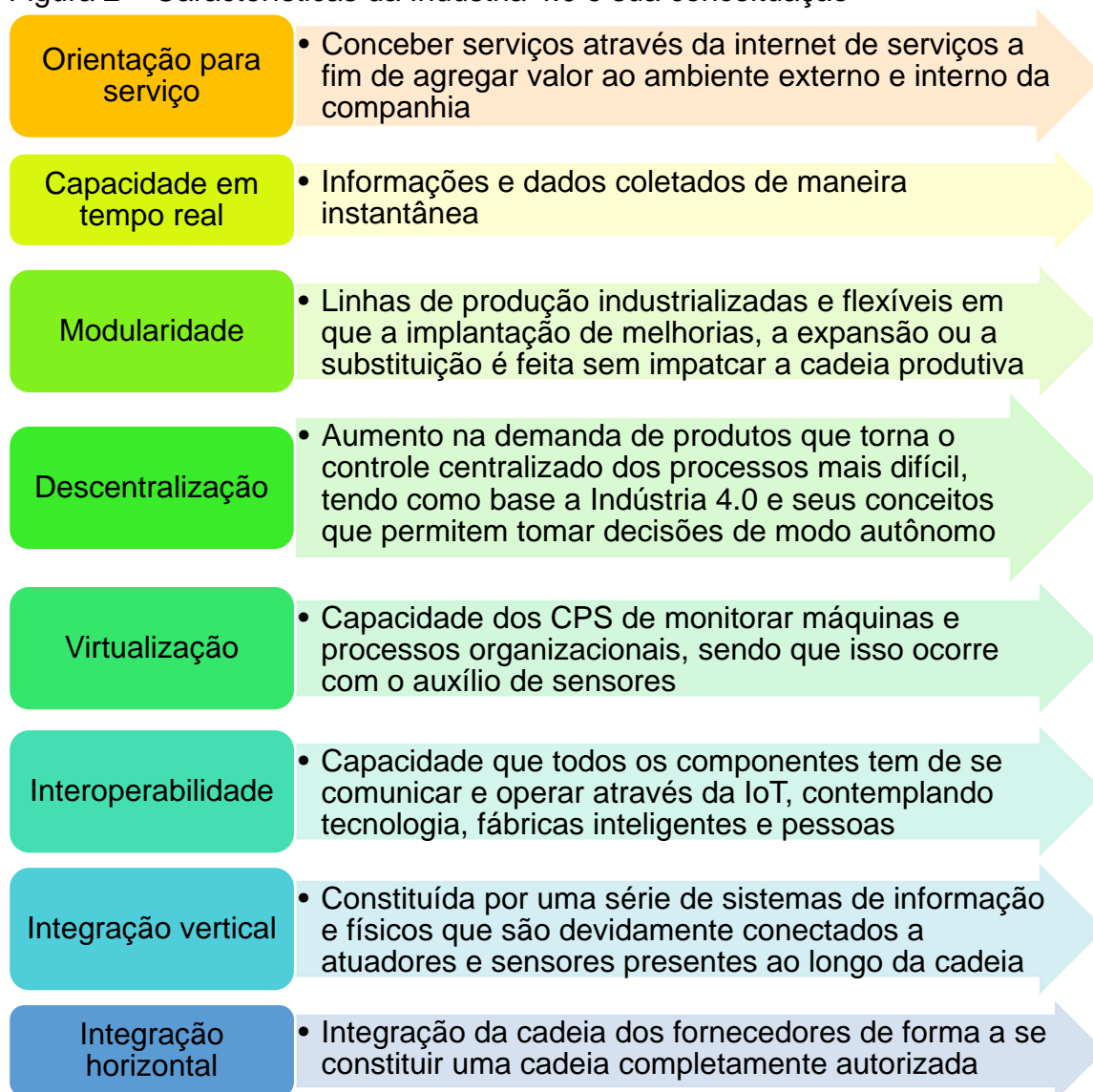
De acordo com Sacomano *et al.* (2018) a Indústria 4.0, independentemente das suas definições, conta com algumas características principais. Entre as mais relevantes associadas a esse movimento, pode-se apontar:

- a) A orientação para serviços.
- b) A capacidade em tempo real.
- c) A modularidade.

- d) A descentralização.
- e) A virtualização.
- f) A interoperabilidade.
- g) A integração vertical.
- h) A integração horizontal.

Schules (2018) afirma que as características apontadas acima contam com definições relevantes e que devem ser trabalhadas de forma integrada a fim de se atingir os objetivos da indústria 4.0. Isto posto, a figura 2 apresenta com mais detalhes as características da Indústria 4.0 e sua conceituação.

Figura 2 – Características da Indústria 4.0 e sua conceituação



Fonte: Adaptado de Schules (2018)

As características descritas anteriormente são de suma relevância para os clientes e para as empresas. No primeiro caso consegue-se ofertar uma ampla gama de produtos de forma rápida, propiciando assim o atendimento das exigências desse público. Já para as organizações, se torna possível tomar decisões de forma rápida a fim de evitar perdas de produção e atrasos (SCHWAB, 2018).

2.3 PILARES DA INDÚSTRIA 4.0

A Indústria 4.0 apresenta cerca de nove pilares tecnológicos e que são essenciais para assegurar o andamento da cadeia produtiva. Desse modo tais instrumentos são dispositivos que já se encontram em uso e a sua inserção na cadeia produtiva contribuirá de modo significativo para atingir os níveis 4.0 almejados (YAMADA; MARTINS, 2018). Isto posto, a figura 3 mostra esses nove pilares.

Figura 3 – Nove pilares da Indústria 4.0



Fonte: Schules (2018)

Os nove pilares serão descritos com mais detalhes a seguir em que se apresentarão as principais características de cada um deles. Vale citar que tais componentes devem trabalhar de modo integrado a fim de assegurar que se caminhe efetivamente rumo à Indústria 4.0.

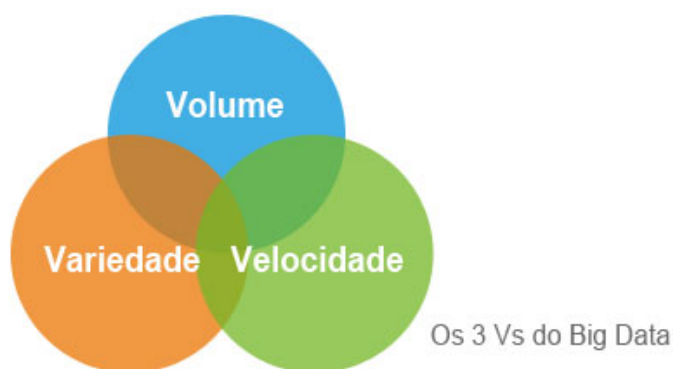
2.3.2 *Big data*

Em um mundo corporativo contar com as informações corretas no momento mais oportuno é o que irá determinar o fracasso ou o sucesso das empresas. As companhias visam obter informações constantemente a fim de que sobrevivam ao mercado e, na contemporaneidade, o lugar de tais pesquisas é através de *big data*. A expressão *big data* é empregada para se referir a uma quantidade elevada de dados que podem ou não estar estruturados e que propiciam a obtenção de *insights* (informações relevantes para o processo de tomada de decisão) quando usados de forma correta (AYUB *et al.*, 2021).

Portanto *big data* é um componente essencial para o planejamento estratégico das companhias, bem como que otimiza os processos de tomada de decisão. É possível determinar esse componente ainda como sendo uma série de tecnologias de processamento e armazenamento de volumes elevados de dados. Há uma ampla gama de informações que irão alimentar a *big data*, entre as mais comuns, pode-se citar as transações bancárias, os bancos de dados, os sensores, as redes sociais, entre outros. (COELHO, 2016).

Segundo Souza (2020), o termo *big data* se popularizou nos anos 2000 quando o pesquisador Doug Laney determinou os três V's dessa ferramenta, como apontado na figura 4. O primeiro V se liga à variedade de formatos em que se apresentam as informações, o segundo é a velocidade de tráfego dos dados ao longo da rede, requerendo quase que um processamento instantâneo e, por fim, o volume, atrelado à quantidade de informações que são geradas fora e dentro das organizações.

Figura 5 – 3V's de *big data*



Fonte: Stevan *et al.* (2018)

Desse modo, aponta-se que a exploração adequada de *big data* tende a contribuir para agregar valor à toda a cadeia produtiva. Por meio desse recurso tecnológico é possível otimizar o processo de criação de produtos, atender rapidamente os *feedbacks* dos clientes, diminuir o tempo gasto na manutenção e na fabricação de máquinas, entre outras coisas (SACOMANO, 2018).

2.3.3 Robôs autônomos

O desenvolvimento dos robôs industriais se deu a fim de pudessem realizar atividade repetitivas que requerem precisão ou força, substituindo o trabalho humano em tais casos. Vale apontar que as primeiras gerações de tais máquinas contam com uma programação do tipo fixa, além disso realizam apenas o que foi determinado previamente. Quaisquer mudanças nos processos definidos requerem paradas a fim de se reprogramar o sistema (PEREIRA; SIMONETTO, 2018).

Aponta-se que a robótica autônoma consiste em um modo de inspiração para a concepção de uma nova geração de robôs que contam com uma capacidade de compreender plenamente tudo que está ao seu redor. Além disso, esses instrumentos conseguem trabalhar por longos períodos de tempo de modo autônomo, isto é, sem um acompanhamento direto de pessoas (TEIXEIRA *et al.*, 2019).

De acordo com Stefani *et al.* (2021) os robôs autônomos começaram a aprender a executar uma série de tarefas, bem como se programar de maneira automática, assegurando assim que possam atuar nos processos de produção flexíveis. Determinados modelos de robôs autônomos contam com estruturas que lhes permite se locomover como mostra a figura 6.

Figura 6 – Robôs autônomos dotados de capacidade de locomoção



Fonte: Stevan *et al.* (2018)

Segundo Teixeira *et al.* (2019) os robôs podem atuar de modo integrado com outros robôs, bem como com os seres humanos e, justamente pela capacidade de compreender o ambiente que os circundam, conseguem controlar os seus movimentos, impedindo a ocorrência de acidentes. Com isso, tem-se um trabalho colaborativo entre o ser humano e o robô como ilustrado na figura 7, em que uma pessoa trabalha de frente para a máquina e sem a presença de uma barreira física entre ambos.

Figura 7 – Robôs colaborativos



Fonte: Santos *et al.* (2018)

Desse modo, com o aperfeiçoamento de sistemas autônomos será possível agregar benefícios para a Indústria 4.0. Isso ocorre, uma vez que se passa a ter uma redução nos custos atrelados à mão de obra, bem como níveis de produção mais flexíveis, dotados de uma capacidade de se produzir em lotes e de modo flexível (PEREIRA; SIMONETTO, 2018).

2.3.4 Manufatura aditiva

Com a manufatura aditiva consegue-se explorar e desenvolver uma série de oportunidades de negócios, uma vez que se torna possível disponibilizar componentes customizados com preços menores. Dessa forma passa-se a ter uma chance de suprir as necessidades de uma nova categoria de clientes que estão interessados em itens personalizados produzidos em lotes reduzidos e com custos acessíveis (SANTOS; BELEM, 2018). A manufatura aditiva permite conceber componentes que vão desde os dotados de pequenas dimensões a até aqueles com *design* mais complexo

(INACIO *et al.*, 2020). Desse modo a figura 8 exemplifica o processo de impressão 3D.

Figura 8 – Impressão 3D



Fonte: Santos *et al.* (2018)

Segundo Srivatsan e Sudarshan (2016) existem inúmeras aplicações para esse modelo de fabricação, é possível usá-lo na criação de componentes, indo desde a componentes para decoração residencial a até blocos de motores a combustão interna. Tudo isso ocorre com baixos níveis de desperdício, pois se adota apenas a quantidade adequada de material para a obtenção da peça, algo que não ocorre em processos de usinagem tradicionais.

Outro ponto que merece atenção é que não se faz o uso de moldes ou de fôrmas na manufatura aditiva, pois a concepção das peças ocorre de forma virtual, minimizando assim os custos com a fabricação. Acredita-se que no futuro esses componentes serão responsáveis pela produção em larga escala, algo que não é possível na contemporaneidade por causa de limitações técnicas das impressoras existentes no que tange à velocidade operacional (NICANOR; NAKAMOTO, 2017). Esse pilar será discutido com mais detalhes mais para frente.

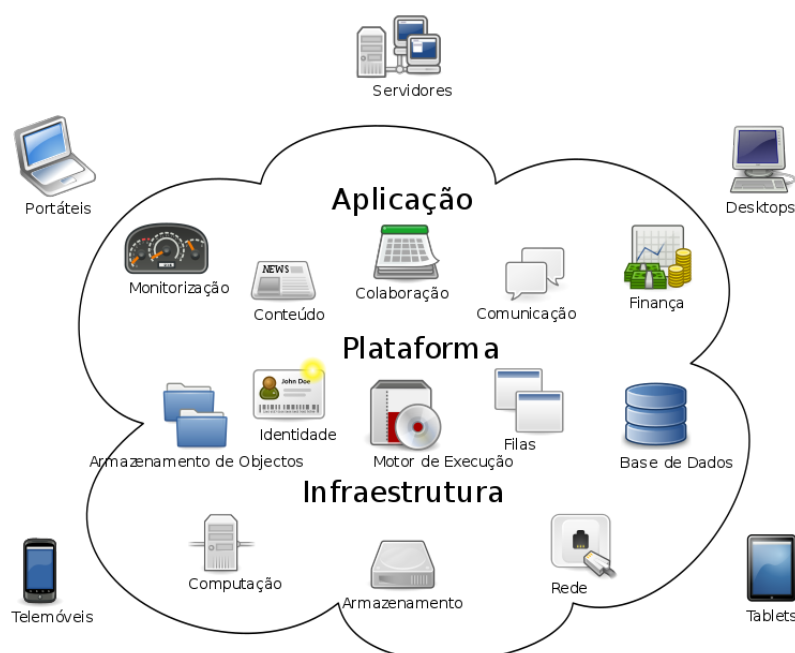
2.3.5 Cloud computing

Cloud computing ou computação nas nuvens corresponde à probabilidade se acessar os serviços associados à tecnologia da informação da empresa por meio da conexão com a internet. Através dela basta apenas contar com um único *browser* em componentes como *smartphones*, *notebooks*, entre outros, que se pode acessar os

aplicativos ou os arquivos em qualquer região, inclusive fora das dependências da companhia (VIEIRA *et al.*, 2021).

A palavra nuvens é empregada, pois a infraestrutura e os detalhes de cunho técnico que regem os serviços de tecnologia da informação não podem ser vistos pelos usuários finais como mostra a figura 9. Aponta-se que os agentes responsáveis pela manutenção e controle de tal infraestrutura são denominados como provedores (AZEVEDO, 2017).

Figura 9 – *Cloud computing*



Fonte: Stevan *et al.* (2018)

As organizações passaram a adotar esse recurso para minimizar os custos com processos como a aquisição de licenças para os programas e os seus servidores. Com isso, não se gasta recursos com o processo de administração dos *datacenters*, propiciando assim que se invista de modo direto somente nas tarefas atreladas às suas atividades (FRANCO, 2020).

Diante de um cenário tecnológico imposto pela Indústria 4.0, tem-se observado uma contribuição direta das ferramentas atreladas à computação em nuvem nas empresas, pois passaram a otimizar o processo de gerenciamento da cadeia produtiva por meio de um ambiente mais colaborativo. Isso ocorre por meio da reutilização dos códigos fonte e também pelo incentivo ao compartilhamento de dados, propiciando a

realização de testes, simulações e a criação de novos componentes (VIEIRA *et al.*, 2021).

Evidencia-se que não são apenas as indústrias maiores que se aproveitam das vantagens e benefícios do *cloud computing*, as menores também tem percebido os ganhos em potencial dessa metodologia e a otimização que traz para os resultados, assegurando assim que se mantenham competitivas no mercado. Quanto à inovação, aponta-se que tem sido possível criar novos produtos graças ao desenvolvimento de plataformas que eram acessíveis anteriormente somente para indústrias de grande porte, pois as licenças eram mais caras (MOCO; CUNHA, 2020).

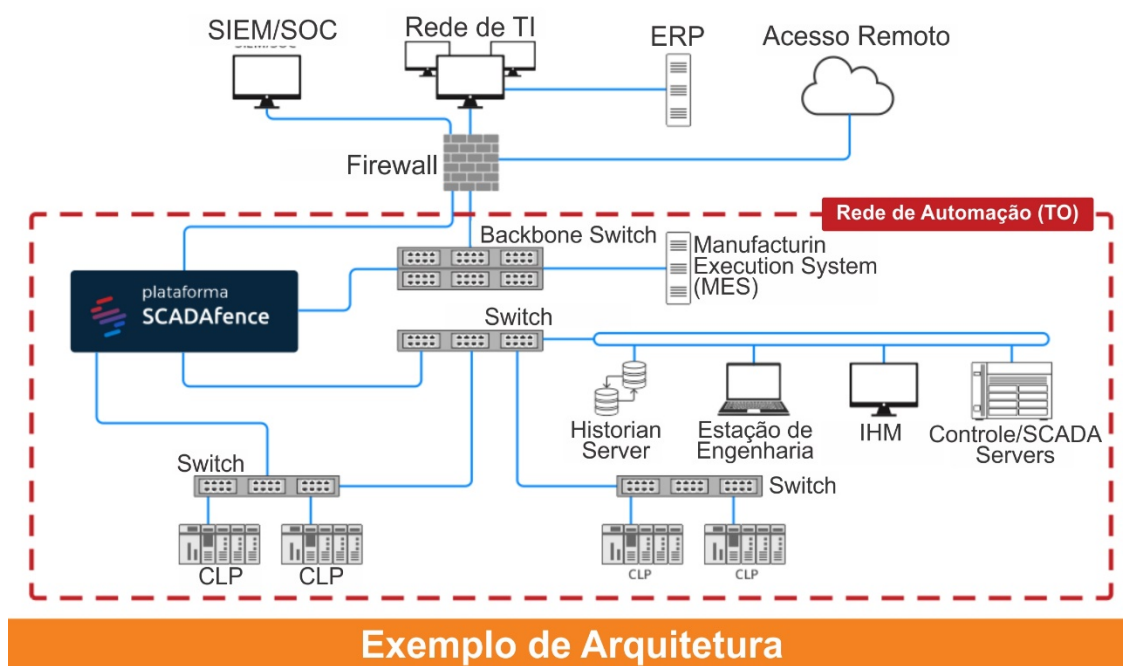
2.3.6 Cyber segurança

Por meio da Indústria 4.0 será possível promover a conexão entre uma série de setores na cadeia produtiva. Tais ligações são de suma relevância para assegurar o acompanhamento e o gerenciamento do desenvolvimento dos componentes ao longo de toda a sua vida útil. Porém, deve-se atuar para impedir ou minimizar os impactos caso se tenha a violação dos sistemas comunicacionais (AZEVEDO; AGUIAR JUNIOR, 2022).

É possível encontrar os sistemas de controle industrial em uma série de locais, indo desde as plantas industriais a até os sistemas mais complexos adotados na geração da energia. A invasão desses sistemas é algo que pode culminar em perdas econômicas ou ainda colocar a vida das pessoas em risco, requerendo que se dê uma atenção especial a isso (IKEZIRI *et al.*, 2020).

Desse modo, os sistemas industriais que antes se encontravam protegidos pela falta de conexão e isolamento de redes externas já não estão mais em tal condição. Estimativas demonstram que cerca de 35% de todas as anomalias que afetam o funcionamento de redes nas empresas se liga diretamente às invasões do tipo cibernéticas (IKEZIRI *et al.*, 2020). Diante disso, a figura 10 ilustra a necessidade de se ter melhores níveis de proteção visto à maior integração e conectividade entre os processos frente à Indústria 4.0, algo que se liga intimamente à *cyber segurança*.

Figura 10 – Arquitetura da Cybersegurança



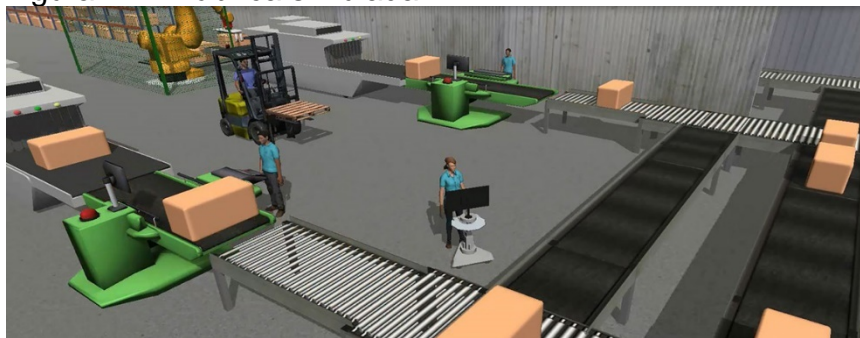
Fonte: Westcon (2022)

Desse modo, a *cyber segurança* visa assegurar a proteção de sistemas comunicacionais, de computadores e de redes industriais de acessos não permitidos que podem culminar em danos às atividades fins das companhias. Assim, o combate das invasões é algo que precisa de um esforço contínuo por causa do aprimoramento e a evolução de ataques cibernéticos (AZEVEDO; AGUIAR JUNIOR, 2022).

2.3.7 Simulação

Segundo Abreu *et al.*, (2017) por meio das tecnologias da virtualização tem-se agregado valor para toda a cadeia produtiva, especialmente para o chão de fábrica. Isso ocorre, uma vez que se consegue reproduzir de modo fidedigno as linhas produtivas, favorecendo a realização de testes acerca da configuração e disposição de máquinas, por exemplo, bem como mensurar quais são os resultados disso. Tal evento permite que se economize tempo e dinheiro, pois executa-se as atividades de modo virtual. Isto posto, a figura 11 ilustra a simulação em um ambiente industrial que conta com uma disposição de robôs durante toda a linha de montagem.

Figura 11 – Fábrica simulada



Fonte: Stevan *et al.* (2018)

As companhias responsáveis pela fabricação dos robôs têm adotado a virtualização para diminuir os prazos finais da entrega, bem como os custos de produção. Com isso realiza-se a simulação nos laboratórios operacionais, bem como se trocam sinais e efetuam-se movimentos, representando, de modo virtual, o que ocorrerá na prática (RANDON; CECCONELLO, 2019).

Através da virtualização, a fase de comissionamento fica mais rápida, uma vez que a lógica do programa que era implementada no campo e com as máquinas instaladas é realizada na etapa do projeto. Por meio dessa mudança consegue-se fazer com que a equipe que atua em campo aja somente instalando os programas (ABREU *et al.*, 2017).

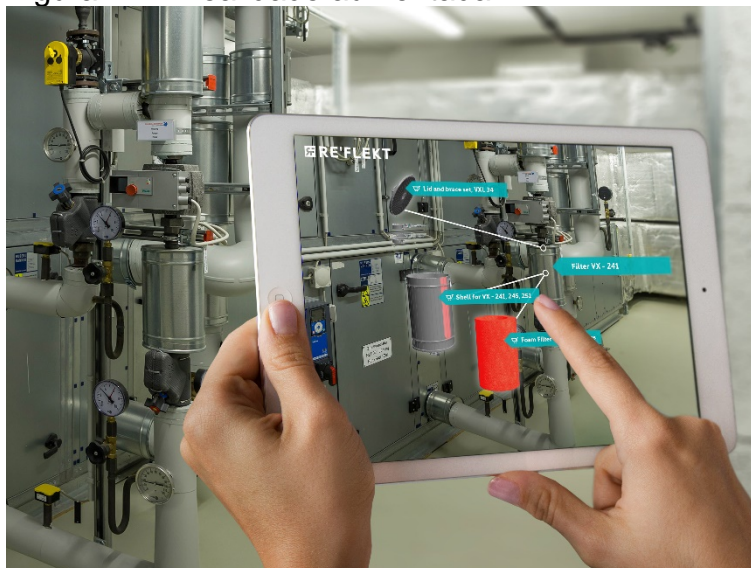
Nas fábricas virtuais é possível realizar a simulação de uma série de processos associados à linha de montagem. Com isso consegue-se otimizar o desenvolvimento de novos produtos, bem como a sua qualidade. Outra possibilidade desses instrumentos é a capacidade permitir realizar a simulação de operações e do deslocamento dos profissionais visando impedir a ocorrência de condições ergonômicas desfavoráveis que podem acarretar em doenças ocupacionais (CAVATA *et al.*, 2020).

2.3.8 Realidade aumentada

O mundo do entretenimento e dos jogos faz o uso da realidade aumentada, porém essa tecnologia tem conquistado espaço e adentrado no ambiente das indústrias. Pode-se apontar que esse componente consiste na integração entre o virtual e o real de maneira instantânea através de recursos tecnológicos. Por meio de *smartphones*, *tablets*, entre outros dispositivos é possível exibir imagens virtuais no

ambiente real. Desse modo, a principal característica desse recurso é o emprego e a apresentação dos objetos virtuais nos casos reais (COSTA *et al.*, 2021). A figura 12 ilustra a realidade aumentada.

Figura 12 – Realidade aumentada



Fonte: Santos *et al.* (2018)

A realidade aumentada é uma ferramenta que atuará fornecendo informações em tempo real e de maneira precisa que servirão de base para os processos de tomada de decisão e também para a criação de projetos. Afirma-se que as possibilidades para o uso desse recurso são muitas, tornando-os aplicáveis a uma série de setores econômicos. (CAMPARA *et al.*, 2021).

É possível adotar a realidade aumentada para supervisionar equipes de trabalho, capacitar em treinamento, entre outras coisas. Por meio dela os princípios operacionais de máquinas podem ser entendidos de forma mais simples, facilitando a detecção de comportamentos que se encontram fora dos padrões toleráveis (COSTA *et al.*, 2021).

2.3.9 Integração dos sistemas

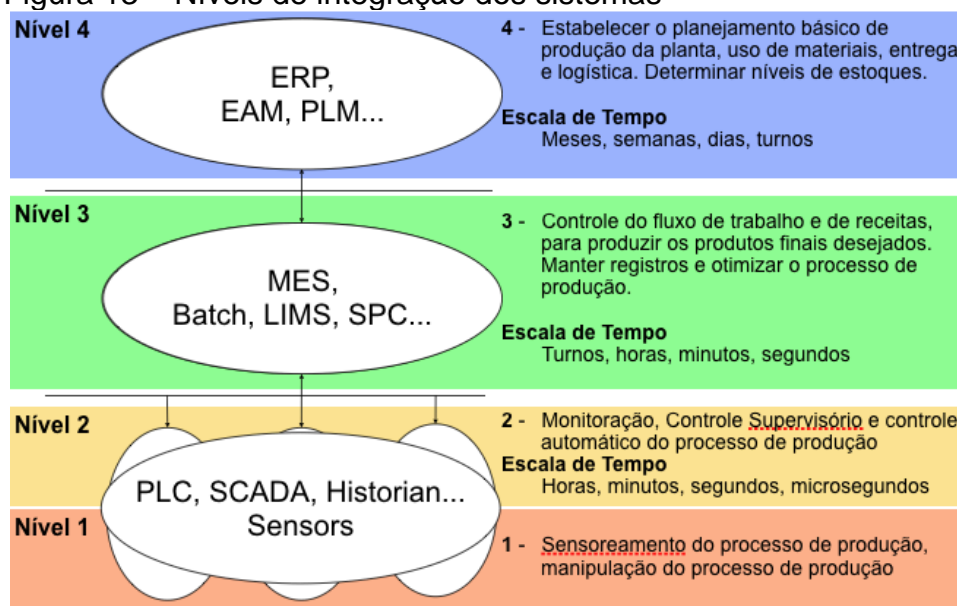
O processo de integração entre os sistemas consiste na unificação dos sistemas de controle e de gerenciamento de forma a se promover uma conexão direta do nível corporativo com o chão de fábrica. Através dessa associação consegue-se

potencializar a flexibilização da cadeia produtiva, reduzir os custos e elevar a competitividade (SANTOS *et al.*, 2018).

Aponta-se que o processo de integração é verticalizado e não se limita somente por um espaço físico único. Dessa maneira, tem-se uma integração entre os consumidores, os fabricantes, os fornecedores e a cadeia logística, resultando em uma possibilidade de abertura dos novos negócios, bem como o desenvolvimento e a melhoria dos produtos (SACOMANO *et al.*, 2018).

Isto posto, a figura 13 destaca o processo de integração vertical nos sistemas destinados ao gerenciamento em controle, com isso, cada rede se encontra em um nível distinto. No primeiro nível tem-se os atuadores e os sensores, por exemplo, no segundo tem-se os sistemas supervisórios e os dispositivos de controle. No terceiro nível há os programas e os dispositivos de armazenamento e, por fim, os sistemas *Enterprise Resource Planning* (ERP) ou sistema de gestão integrado que tendem a ajudar nos processos destinados à tomada de decisão (SILVA *et al.*, 2021).

Figura 13 – Níveis de integração dos sistemas



Fonte: Santos *et al.* (2018)

Aponta-se que a integração dos sistemas é algo que tende a trazer consigo uma série de possibilidades para as companhias, no entanto, há uma jornada longa para que se possa fazer com que tal estratégia seja completamente funcional e atenda por completo a Indústria 4.0. É imprescindível que sistemas distintos apresentem uma conexão direta entre si, no entanto, isso transcende pela padronização, pois deve-se

criar um protocolo comunicacional único. Na contemporaneidade cada produtor conta com arquiteturas e protocolos de comunicação distintos, tornando a interoperabilidade mais complexa e difícil (SACOMANO *et al.*, 2018).

2.4 MANUFATURA ADITIVA

No fim dos anos de 1980 criou-se um processo que tinha como base a deposição de materiais em fatias, ou seja, camada por camada, resultando assim na chamada manufatura aditiva das camadas. Inicialmente tal procedimento foi concebido para produzir componentes de modo rápido a fim de materializar protótipos/ideias. Portanto, não se buscava ter níveis de precisão e resistência elevados, desse modo emergiu a Prototipagem Rápida (WONG; HERNANDEZ, 2012).

Bourell *et al.* (2017) citam que na contemporaneidade tem-se a manufatura aditiva que consiste em um processo destinado a promover a união de materiais visando construir peças tendo como ponto de partida um modelo tridimensional. Normalmente tem-se a deposição dos materiais de camada em camada, algo que se opõe aos tradicionais métodos de fabricação que removem material para a obtenção de um componente. É comum encontrar outros sinônimos para a tecnologia da manufatura aditiva, sendo as mais comuns:

- a) Produção de modelos complexos.
- b) Manufatura através das camadas.
- c) Manufatura por meio da adição de camadas sucessivas.
- d) Processo de adição.
- e) Fabricação de adição.

Singh *et al.* (2017), afirma que o termo manufatura aditiva é o mais adequado, uma vez que a tecnologia é ampla, isto é, não se limitam somente à produção dos protótipos, pois consegue-se obter produtos finais. Aponta-se que a Estereolitografia (SLA) foi o sistema pioneiro da manufatura aditiva, sendo comercializado a partir dos anos de 1988. Após esse evento desenvolveram-se outras tipologias ou modelos através de esforços das comunidades acadêmicas e das entidades comerciais, entre as tecnologias mais comuns, destaca-se:

- a) A Laminação em Folhas (LOM).
- b) A modelagem por fusão e deposição (FDM).

c) A sinterização seletiva à *laser* (SLS).

É possível estratificar os processos da manufatura aditiva a partir de quatro elementos principais, as condições de construção do componente, o método para a formação de camadas, a fonte de energia e o estado inicial da matéria-prima adotada. Aponta-se os Agentes Formadores de Fatias (AFF)s, um princípio que age na matéria-prima ao longo da construção e da formação das camadas (THOMPSON *et al.*, 2016).

Wong e Hernandez (2012) afirmam que as AFFs se apresentam, normalmente, como um feixe energético (íons, elétrons e *laser*, por exemplo), uma lâmina e/ou um cabeçote para a impressão (extrusão polimérica ou jato de tinta). Esses itens podem estar ou não relacionados a sistemas mecânicos como os aparadores de camadas, as régua niveladoras e o rolo para espalhamento do pó. Isto posto, o quadro 1 sintetiza alguns processos de manufatura aditiva e suas particularidades.

Quadro 1 – Alguns processos de manufatura aditiva e suas características

Tecnologia adotada	Tipo de material	Princípio operacional
Laminação através de chapas	Polímeros, papel, entre outros	Adota-se um laser de dióxido de carbono para cortar as lâminas, com isso consegue-se empilhar e cortar ou cortar e empilhar as folhas. O método de união das folhas pode se dar através da colagem térmica, por adesivo, entre outras estratégias
Pautadas em extrusão	Cerâmicas e polímeros	Um cabeçote extrusor deposita o material, sendo que após a deposição, tem-se a solidificação e o resfriamento
Através da fusão dos pós	Cerâmicas, metais, polímeros, entre outros	Conduz-se um feixe a <i>laser</i> sobre um leito preenchido com pós, o que favorece a fusão dos materiais, propiciando a formação da seção transversal da camada
Fotopolimerização	Polímeros e resinas fotocuráveis	Emprega-se a radiação ultravioleta para promover a cura de um material que é fotocurável

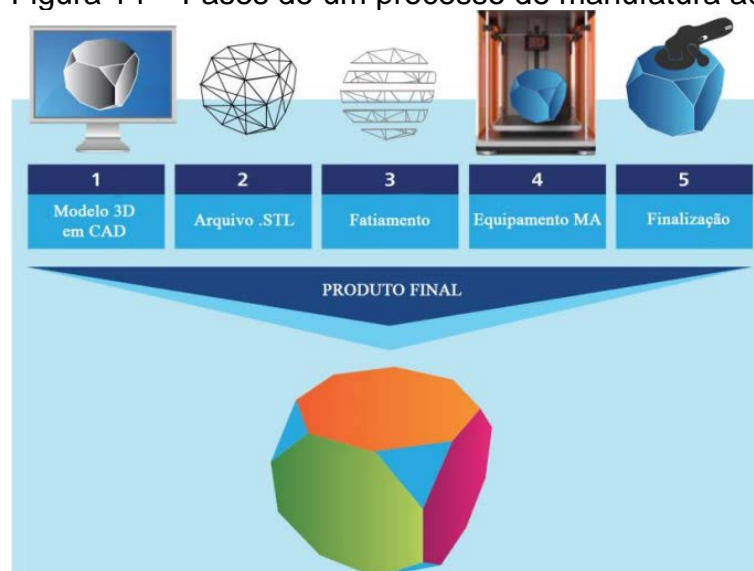
Fonte: Adaptado de Gibson *et al.* (2015)

Isto posto, destaca-se que de forma geral as mais variadas tecnologias aditivas contam com características idênticas no que tange às questões computacionais do planejamento de etapas de processo, no entanto, tem-se uma diferenciação quanto aos princípios físicos adotados no desenvolvimento dos modelos. As atividades da manufatura aditiva começam com a elaboração dos modelos em três dimensões, algo que se dá com o auxílio de programas *Computer Aided Design* (CAD) (GAO *et al.*, 2015).

Após a criação do modelo promove-se a conversão do arquivo para o formato denominado *Standard Tessellation Language* (STL). Em seguida, insere-se tal arquivo em um programa do planejamento dos processos em que se tem a divisão de

camadas individuais. Por fim, enviam-se os dados gerados na máquina da manufatura aditiva que executará a construção das peças através da adição sucessiva das camadas (HORN *et al.*, 2012). Desse modo a figura 14 ilustra de modo resumido as fases de um processo de manufatura aditiva.

Figura 14 – Fases de um processo de manufatura aditiva

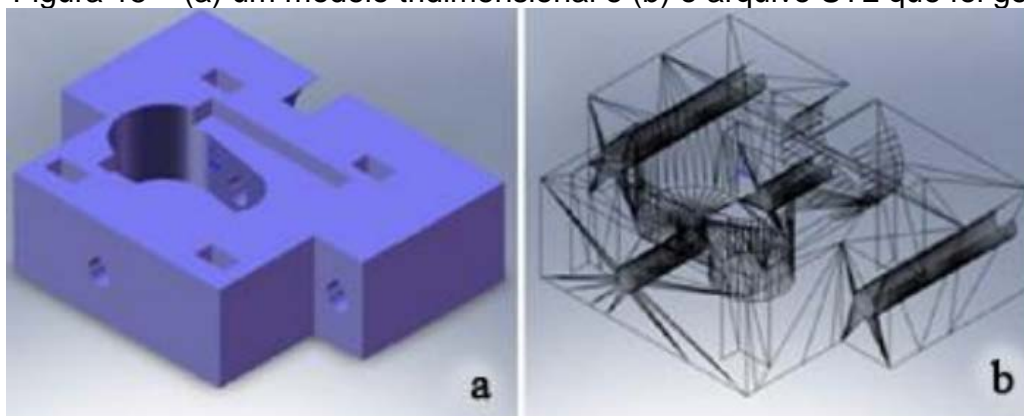


Fonte: Adaptado de Cotteleer *et al.* (2014)

Abdulhameed *et al.* (2019) afirmam que o desenvolvimento de um modelo CAD consiste na primeira fase dos processos de manufatura aditiva. Aponta-se que nesse caso deve-se descrever as dimensões e as formas externas do componente a ser produzido. Nesse momento é possível fazer o uso de outros equipamentos ligados à engenharia reversa como é o caso de *scanners a laser* para a confecção do componente almejado.

De acordo com Horn *et al.* (2012) ao se tratar do formato STL, evidencia-se que esse é um modelo de interface padrão empregado nos sistemas da manufatura aditiva. Aponta-se que tal instrumento é a representação triangular de uma dada superfície geométrica que se encontra em formato tridimensional. Divide-se a superfície em uma infinidade de triângulos menores em que se promove a descrição individual deles, além de três pontos que indicam o seu vértice. Os triângulos constituem a parte dos limites entre os pontos internos e externo do componente. Diante disso a figura 15 aponta em (a) um modelo tridimensional e em (b) o arquivo STL que foi gerado.

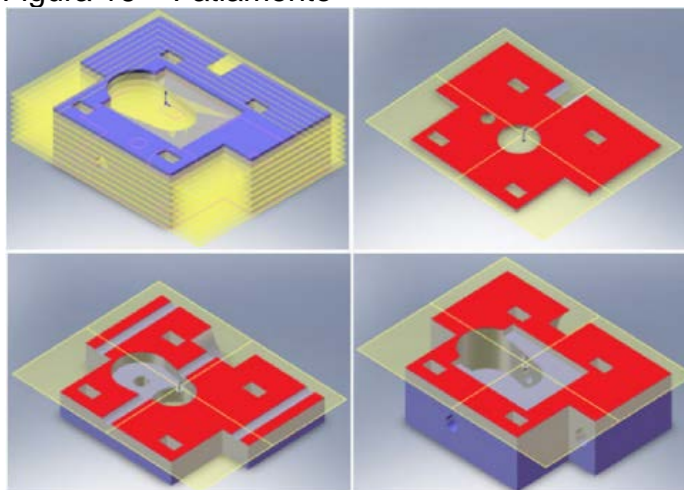
Figura 15 – (a) um modelo tridimensional e (b) o arquivo STL que foi gerado



Fonte: Raulino *et al.* (2013)

Para Gao *et al.* (2015) os dados acerca da geometria são obtidos por meio do fatiamento do modelo 3D no CAD e partindo do arquivo dotado de formato STL através do programa destinado ao planejamento do processo. Com isso geram-se as chamadas fatias que são os perfis em duas dimensões como mostra a figura 16. Destaca-se que o fatiamento é uma tarefa relevante, pois também impacta diversos fatores como as propriedades mecânicas do componente, o tempo de fabricação, a precisão e o acabamento superficial do item.

Figura 16 – Fatiamento



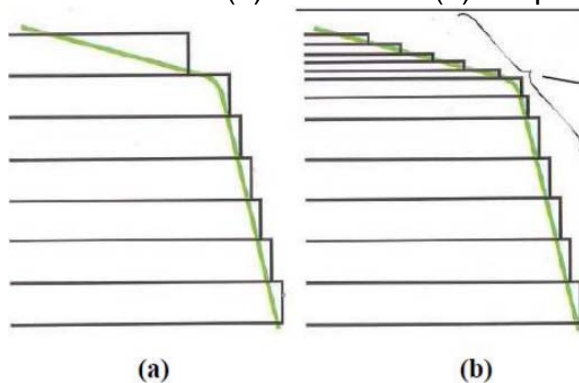
Fonte: Raulino *et al.* (2013)

De modo geral, há dois modos principais de execução do fatiamento em que se consegue determinar a espessura das camadas, sendo eles o adaptativo e o uniforme. No primeiro caso tem-se variações de espessura na camada de base com alterações na geometria do modelo à medida em que se avança para a direção da

construção. O método de fatiamento uniforme conta com uma abordagem mais simples em que se promove tal evento em intervalos idênticos, isto é, tem-se a obtenção de camadas dotadas de espessuras que não variam ao longo do eixo construtivo Z (ZHAO; GUO, 2020).

No que tange ao uniforme, destaca-se que tal estratégia conta com a vantagem de propiciar níveis de precisão dimensional e geométrica dos componentes produzidos, a otimização do acabamento superficial dos itens fabricados e a diminuição do tempo dispendido para a execução em comparação com o fatiamento adaptativo (HILDEBRAND *et al.*, 2013). Isto posto, a figura 17 mostra o fatiamento (a) uniforme e (b) adaptativo.

Figura 17 – Fatiamento (a) uniforme e (b) adaptativo



Fonte: Raulino *et al.* (2013)

De acordo com Bandyopadhyay e Bose (2019) os equipamentos que atuam produzindo as peças receberão as informações necessárias para o desenvolvimento do modelo que foi gerado previamente no *software* de planejamento. Nesses programas tem-se as estruturas do suporte, além das trajetórias e distâncias que devem ser percorridas a fim de se promover a deposição de material.

Após a fabricação deve-se fazer com que as peças experimentem a finalização que contempla as etapas de pós-processamento que buscam remover as estruturas do suporte, a limpeza, a cura da resina ou então estratégias para garantir níveis de resistência mais elevados ao item produzido. Por fim, é possível executar o acabamento com o intuito de promover a adequação do componente para um tipo de aplicação específico. Assim, efetuam-se diversas operações como a usinagem, a colagem, a texturização, entre outras (GIBSON *et al.*, 2015).

Bandyopadhyay e Bose (2019) citam que as tecnologias da manufatura aditiva consistem basicamente em três fases básicas. Inicialmente cria-se um modelo eletrônico em três dimensões computadorizado que precisa estar em um formato aceitável como o STL ou outro tipo, posteriormente converte-se tal arquivo que é enviado para a máquina da manufatura aditiva em que se consegue gerar dados acerca da escala, da orientação e da posição do sistema, após isso executa-se a deposição em camadas na máquina.

Segundo Srivatsan e Sudarshan (2016) desde o surgimento da manufatura aditiva, criou-se mais de 100 máquinas para a fabricação de máquinas. Tais componentes foram concebidos e inserido no mercado, obedecendo o chamado princípio de fabricação em camadas. Isto posto, a figura 18 mostra com mais detalhes os diferentes processos de manufatura aditiva.

Figura 18 – Diferentes processos de manufatura aditiva



Fonte: Raulino *et al.* (2013)

3 METODOLOGIA

O presente trabalho é básico. Segundo Marconi e Lakatos (2017) as pesquisas básicas são aquelas em que não se tem uma aplicação prática, atua-se gerando mais conhecimento científico, algo que fomenta discussões. No que tange à abordagem, a pesquisa é qualitativa, pois investigou-se o objeto de estudo, que é o uso da manufatura aditiva, sem o uso de técnicas estatísticas. No que se refere aos objetivos, a pesquisa é denominada descritiva.

O procedimento metodológico escolhido para a redação do trabalho foi a revisão bibliográfica, em que trabalhos acadêmicos que tratam da Manufatura Aditiva, foram consultados. Por meio desse método, consegue-se investigar os trabalhos mais relevantes que discorrem acerca do campo de interesse, colocando o pesquisador em contato direto com a temática. Desta forma, passa-se a ter um nível de familiaridade mais elevado com o tema, o que contribui para a formação de hipóteses (GIL, 2019).

Desse modo, para o desenvolvimento da pesquisa coletaram-se livros, artigos, teses e dissertações para a redação da revisão bibliográfica. Na parte de desenvolvimento dos resultados e discussão utilizou-se apenas artigos que estavam disponíveis na íntegra em bancos de dados como *Web of Science*, *Scopus* e *Scientific Electronic Library*. Para isso utilizaram-se palavras-chaves como 'I4.0', 'Industry 4.0', 'pillars of industry 4.0' e 'additive manufacturing'.

Os trabalhos foram classificados, além do tema, pelo período de publicação (últimos 5 anos, entre 2017 e 2022) e seguindo o Qualis Capes, 2013 – 2016, selecionando-se apenas aqueles classificados como A1, A2 e B1. Em tempo, um fator de impacto do periódico mínimo de 1,1 pontos, também foi considerado. Ao todo, 15 artigos foram selecionados para compor a base da revisão realizada nesse trabalho. Destaca-se que se escolheram apenas artigos para compor a base de dados, em trabalhos futuros, para ampliar o campo de estudo pode-se realizar um estudo incorporando livros, teses e dissertações.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Ao se avaliar o trabalho “Progress in Additive Manufacturing on New Materials” escrito por Li *et al.* (2019), pode-se apontar que os autores focaram em materiais utilizados na manufatura aditiva. Destaca-se ainda questões atreladas a dificuldade de se controlar a distribuição e o tamanho das partículas, as dificuldades para o desenvolvimento de novos materiais e da produção de peças delgadas. Evidencia-se que uma infinidade de materiais pode ser utilizada na manufatura aditiva para a produção de componentes, sendo os mais populares as ligas de titânio, os biomateriais, o alumínio, o aço, as cerâmicas. Os autores citam como exemplo o uso de uma liga de aço com teor elevado de níquel e cobalto para a deposição a laser (processo de MA), empregada para recuperar pás danificadas de turbinas de titânio, mas ressaltam que o processo carece de melhorias, especialmente quanto ao desenvolvimento tecnológico e de novos materiais.

Chen *et al.* (2017) realizaram um estudo intitulado “The research status and development trend of additive manufacturing technology” em que se apresentou de modo resumido as tecnologias da manufatura aditiva, bem como o desenvolvimento da tecnologia e suas aplicações. Entre os problemas mais usuais destaca-se a quantidade reduzida de matérias-primas, as limitações dos equipamentos, a eficiência produtiva reduzida, os altos custos e a menor precisão. Os autores acreditam que o aumento da precisão e a adoção de novos materiais – eventos que já começaram a ser estudados – irá revolucionar o modo de se fabricar componentes. Destacaram também algumas aplicações dessa ferramenta que, geralmente, ocorrem em menor escala como na indústria aeronáutica, na medicina, na odontologia e na construção.

Bikas *et al.* (2019) desenvolveram uma pesquisa denominada “A design framework for additive manufacturing” e apontam que MA é um processo de fabricação promissor e que se destaca em comparação com as metodologias tradicionais. Existem várias justificativas para isso, mas, a principal é a flexibilidade geométrica, algo que tende a fazer com que os projetos sejam executados com mais liberdade. Evidenciam que existem algumas limitações ao se utilizar essa estratégia que se liga ao fato de se ter uma dependência grande do sistema *Computer Aided Design* (CAD). Além disso, existem diversas interações de projeto que ocorrem para atender as regras atreladas à manufaturabilidade dos produtos, algo que pode

dificultar o processo. Menciona-se que a MA é utilizada em várias áreas, especialmente na mecânica para a obtenção de componentes como engrenagens, eixos, entre outros componentes.

Tofail *et al.* (2018) realizaram a pesquisa chamada “Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities” e afirmam que a manufatura aditiva é diferente dos métodos de fabricação tradicionais, pois no primeiro caso obtém-se uma peça por meio da deposição de camadas sucessivas de materiais. Destaca-se ainda as características da tecnologia como a customização, a flexibilidade e a versatilidade que permitem obter, na atualidade, protótipos de produtos finais. Por meio da MA é possível obter componentes com as mais variadas classes de materiais como polímeros, compósitos, metais, cerâmicas, entre outros. No entanto existe um desafio que é transformar, de fato, os elementos em um produto funcional e que atenda as reais necessidades dos consumidores. Evidencia-se ainda que há as limitações atreladas à velocidade de objetos, às propriedades, entre outras coisas.

Sun *et al.* (2021) desenvolveram uma pesquisa denominada “Additive manufacturing for energy: A review” em que relacionam a MA à sustentabilidade, uma vez que gera menos resíduos para o meio ambiente, bem como gases nocivos à atmosfera. O processo de fabricação de camadas por camadas é promissor, porém, ainda conta com algumas limitações como o fato de não se produzir em larga escala, o baixo monitoramento e controle do processo, a precisão dimensional reduzida e a ausência de integridade estrutural dos componentes. Após a consolidação da MA é possível utilizá-la para a produção de componentes para a indústria energia como sistemas de armazenamento, conversores, células de combustíveis, entre outros. Na contemporaneidade faz-se seu uso para aumentar o desempenho de materiais utilizados em núcleo de reatores. Outra possibilidade de aplicação é na indústria de petróleo e gás, na obtenção de componentes a fim de reduzir custos, minimizar fases de produção, entre outras coisas.

Lee *et al.* (2017) realizaram a pesquisa denominada “Lasers in Additive Manufacturing: A Review” e destacam que a MA é um processo de manufatura verde, pois gera menos insumos para a produção de componentes. Existem algumas limitações quanto ao uso da MA que é o caso da sua utilização em pequena escala, bem como a necessidade de se escolher o melhor processo, de potencializar a

precisão e a taxa de transferência. No entanto, afirma que o uso da tecnologia tem se popularizado cada vez mais, sendo aplicada na indústria automotiva, aeroespacial.

Chen *et al.* (2020) desenvolveram um trabalho intitulado “Additive Manufacturing of Piezoelectric Materials” e apontam que a MA é uma técnica relevante e tem conquistado espaço na contemporaneidade devido ao seu potencial e prototipagem rápida. Essas duas características tornam tal instrumento apto para ser utilizado em dois setores específicos como a produção de componentes eletrônicos dotados de formatos distintos. Aponta-se ainda que com a MA consegue-se obter materiais piezoelétricos a partir de compósitos, polímeros e cerâmicos, o que permite a obtenção de conversores eletromecânicos, sistemas de armazenamento de energia, entre outros elementos. Existe muito a ser feito para a obtenção de produtos mais eficientes na indústria eletrônica. Entre as principais limitações destaca-se a baixa compatibilidade entre a MA e as matérias-primas, a falta de novos materiais alternativos e a necessidade de se processar o componente depois da fabricação a fim de lhe conferir acabamento final.

Bose *et al.* (2018) executaram o trabalho “Additive manufacturing of biomaterials” em que se estudou o uso da tecnologia para desenvolver recursos que auxiliam na reposição de tecidos corporais. Isso se dá, pois através do CAD integrado à MA consegue-se criar tecidos sintéticos. Desse modo, essa é uma aplicação promissora e que promete revolucionar a medicina, além de melhorar a qualidade de vida dos pacientes. Existem dois desafios atrelados à aplicação da MA para a obtenção de biomateriais, o primeiro se liga à obtenção de materiais compatíveis e o segundo diz respeito às limitações tecnológicas do processo.

Oliveira *et al.* (2020) realizaram um estudo denominado “Revisiting fundamental welding concepts to improve additive manufacturing: From theory to practice” e afirmam que a MA tem como base a fusão e a solidificação assim como a soldagem. Os autores evidenciam que existem muitas similaridades em ambos os processos, por isso é possível considerar parâmetros advindos da soldagem para a MA como tamanho de grão do material, espessura da camada depositada, velocidade de execução, entre outras coisas. Existem diversas limitações atreladas à MA como os tipos de materiais utilizados e suas propriedades. Além disso sugerem o estudo de outras áreas para popularizar a tecnologia como o uso de combinações distintas de

pós para a obtenção de peças mais precisas e resistentes, o comportamento da resistência à fadiga e as estratégias para minimizar as distorções e os defeitos.

Debroy *et al.* (2018) realizaram a pesquisa denominada “Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties” em que se avaliou a MA voltada a materiais metálicos. Os autores afirmam que carece na literatura estudos que investigam os processos físicos, a estrutura metalúrgica e as propriedades dos materiais que foram depositados em uma superfície. É imprescindível encontrar materiais alternativos para obter propriedades semelhantes ao do que se obtém na contemporaneidade com processos de fabricação como a soldagem. Outra limitação diz respeito à compreensão da microestrutura, que precisa ter sua evolução estudada durante o processo de deposição, pois tem-se ciclos térmicos complexos durante as operações. A MA é uma tecnologia promissora, já tem sido utilizada na indústria aeroespacial, mas tende a trazer ganhos significativos para a medicina e a indústria automotiva quando for mais compreendida. Para tal, deve-se investir maciçamente no estudo da MA, bem como no desenvolvimento da computação.

Sepasgozar *et al.* (2020) realizaram uma pesquisa intitulada “*Additive Manufacturing Applications for Industry 4.0: A Systematic Critical Review*” em que se avaliou as aplicações da MA frente à Indústria 4.0. Os autores estudaram as possibilidades de aplicações para a área e constataram que ainda há muito o que fazer para o desenvolvimento da tecnologia, especialmente no que tange ao controle de parâmetros para obter determinadas microestruturas e trabalhar o modo de distribuição das partículas. Destacam ainda que se tem um processo de precisão reduzida, em larga escala e com propriedades deficientes, algo que associa ao controle dos parâmetros. Isso tende a impactar de modo negativo sua aplicação nos mais variados setores como na medicina e na indústria aeroespacial, por exemplo.

Butt (2020) desenvolveu um trabalho denominado “*Exploring the Interrelationship between Additive Manufacturing and Industry 4.0*” em que investigou o desenvolvimento tecnológico da manufatura aditiva. O autor aponta que essa tecnologia é promissora e pode ser aplicada no setor de prototipagem e de energia, por exemplo. Contudo, existem inúmeros desafios que precisam ser transpostos com a menor precisão, a dificuldade de controlar parâmetros, algo que impacta diretamente a qualidade do produto final.

Korner *et al.* (2020) elaboraram um artigo chamado “*Systematic Literature Review: Integration of Additive Manufacturing and Industry 4.0*” em que estudaram o desenvolvimento tecnológico da MA. Os autores observaram que há inúmeros desafios a serem transpostos como a dificuldade no controle dos parâmetros, os custos altos, porém, com a transposição dessas limitações será possível aplicar tal tecnologia em várias áreas como a médica, por exemplo.

Mehrpouya *et al.* (2019) redigiram o trabalho “*The Potential of Additive Manufacturing in the Smart: Factory Industrial 4.0: A Review*” em que avaliam o desenvolvimento tecnológico da MA. Os autores afirmam que existem diversas limitações associadas à aplicação dessa tecnologia na contemporaneidade, sendo as principais delas os custos elevados, o tempo gasto na fabricação dos componentes, a limitação de materiais e a dificuldade em se obter produtos finais com dimensões menores. Além disso destacam que essa é uma tecnologia que pode trazer grandes benefícios para várias indústrias como a aeroespacial, a médica, a automotiva e a construção civil.

Godina *et al.* (2020) na pesquisa denominada “*Impact Assessment of Additive Manufacturing on Sustainable Business Models in Industry 4.0 Context*” investigaram o desenvolvimento e as potencialidades da manufatura aditiva, os autores apontam que a maior limitação do processo se liga às tecnologias/equipamentos. Contudo afirma que a metodologia pode modificar os métodos tradicionais de produção, uma vez que é mais sustentável, possibilita a customização e possibilita a obtenção de geometrias complexas.

Diante disso, o quadro 2 elenca os principais resultados obtidos anteriormente, evidenciando ainda as tecnologias, as aplicações e as limitações encontradas nas pesquisas.

Quadro 2 – Tecnologias, as aplicações e as limitações encontradas nas pesquisas

Autor	Elemento (s) investigada (s)	Limitação (ões)	Aplicação (ões)
Li <i>et al.</i> (2019)	Uso de materiais na MA (ligas de titânio, cerâmicas, ligas, aço, alumínio e biomateriais)	Falta de controle de parâmetros como tipo de microestrutura obtida, distribuição de partículas e comportamento na deposição Dificuldade em fabricar peças delgadas	Recuperação de componentes como turbinas
Chen <i>et al.</i> (2017)	Desenvolvimento tecnológico Novas aplicações	Matérias-primas Equipamentos Baixa eficiência	Aeroespacial Medicina Odontologia

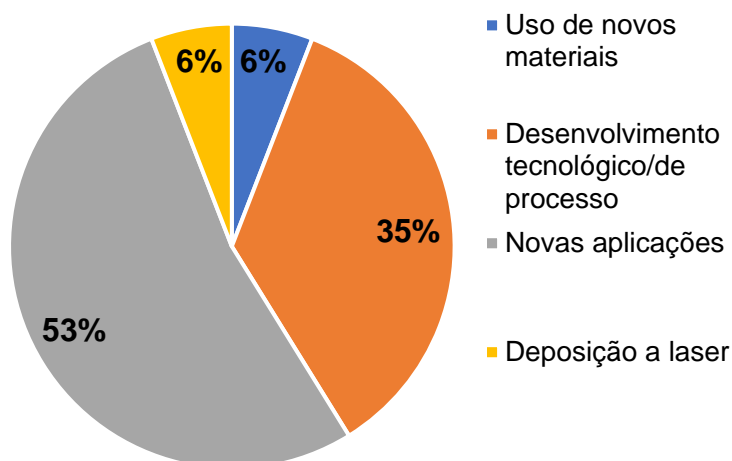
		Menor precisão Custo elevado	Construção civil
Bikas <i>et al.</i> (2019)	Novas aplicações, especialmente na mecânica Ganhos em potencial com o processo	Alto índice de interações que impactam a manufaturabilidade	Mecânica
Tofail <i>et al.</i> (2018)	Novas aplicações	Velocidade de fabricação/eficiência Propriedades obtidas (dificuldade em controlá-las)	Protótipos de produtos finais
Sun <i>et al.</i> (2021)	Novas aplicações	Não é possível produzir em larga escala (baixa eficiência) Baixo monitoramento e controle do processo Precisão dimensional reduzida Ausência de integridade estrutural dos componentes (ausência de controle)	Indústria energética (sistemas de armazenamento, conversores, células de combustíveis, entre outros) Indústria de petróleo e gás.
Lee <i>et al.</i> (2017)	Deposição a laser	Produção em pequena escala (eficiência) Baixa precisão Taxa de transferência reduzida (controle de parâmetros)	Aeroespacial Automotiva
Chen <i>et al.</i> (2020)	Novas aplicações	Limitação de materiais/matérias-primas Requer acabamento posterior a produção	Indústria de eletrônicos
Bose <i>et al.</i> (2018)	Novas aplicações	Tecnologia/ equipamentos Obtenção de matéria-prima compatível	Biomateriais Criação de tecidos sintéticos
Oliveira <i>et al.</i> (2020)	Novas aplicações	Materiais utilizados Propriedades do produto acabado (controle de parâmetros)	Indústria mecânica
Debroy <i>et al.</i> (2018)	Novas aplicações	Propriedades inferiores Desconhecimento da microestrutura	Aeroespacial Automotiva Medicina
Sepasgozar <i>et al.</i> (2020)	Novas aplicações	Falta de controle de parâmetros como tipo de microestrutura obtida, distribuição de partículas Produção em pequena escala Baixa precisão Propriedades do produto acabado (controle de parâmetros)	Médica Aeroespacial
Butt (2020)	Desenvolvimento tecnológico	Baixa precisão Dificuldade de controlar parâmetros (afeta qualidade do produto final)	Setor de energia Prototipagem
Korner <i>et al.</i> (2020)	Desenvolvimento tecnológico	Dificuldade de controlar parâmetros Custo elevado	Médica
Mehrpouya <i>et al.</i> (2019)	Desenvolvimento tecnológico	Alto custo Tempo elevado de processamento Limitação de materiais	Aeroespacial Médica Automotiva Construção civil

		Dificuldade na obtenção de produtos com dimensões reduzidas	
Godina <i>et al.</i> (2020)	Desenvolvimento tecnológico	Tecnologia/ equipamentos	Não cita

Fonte: Autor

Desse modo, evidencia-se que a maioria dos trabalhos analisados estavam avaliando novas aplicações para a MA (53%), seguido do estudo acerca do desenvolvimento tecnológico / de processos (35%), do uso de novos materiais e da avaliação da deposição a *laser* (6% cada). Esses dados podem ser vistos com mais detalhes na figura 19.

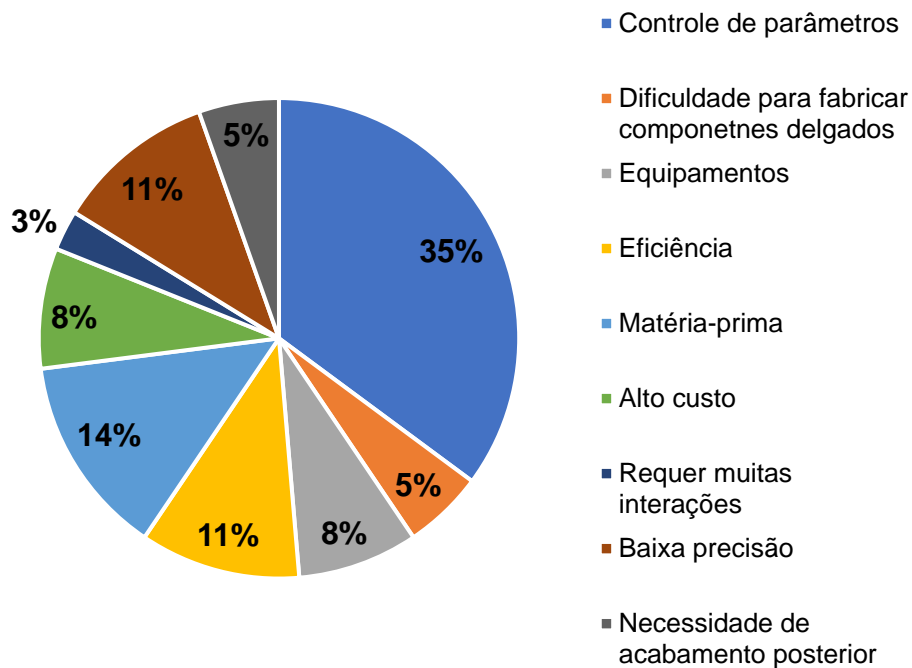
Figura 19 – Campos de estudo dos trabalhos analisados



Fonte: Autor

Outro ponto investigado na pesquisa foi acerca das limitações da manufatura aditiva, como mostra a figura 20. Diante disso, 35% afirmam que as limitações se ligam ao controle de parâmetros, outros 14% relatam as matérias-primas, 11% citam a eficiência e a baixa precisão (cada), 8% (cada alternativa) o alto custo e as limitações de equipamentos, 5% (cada) a dificuldade de produzir componentes delgados e a necessidade de acabamento posterior e, por fim, 3% necessidade de muitas interações para a produção dos componentes.

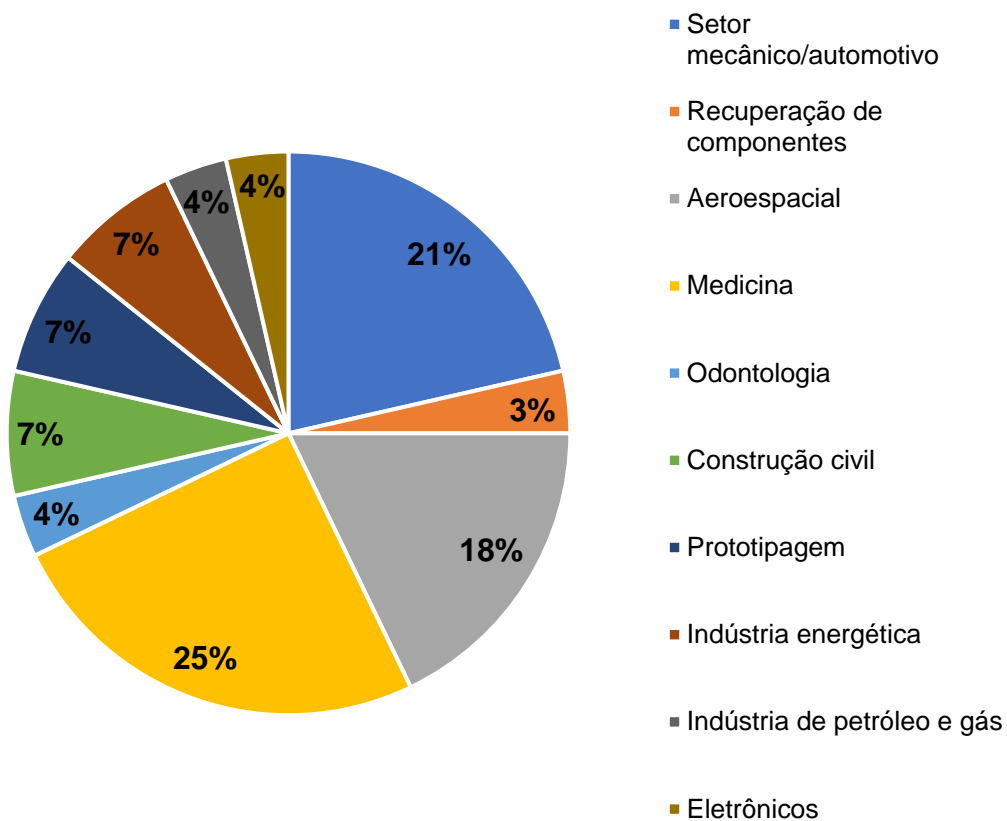
Figura 2020 – Limitações encontradas



Fonte: Autor

Investigaram-se também os campos de aplicação mencionado pelos pesquisadores, como mostra a figura 21. Diante disso, 25% apontaram a área da medicina, 21% destacaram o setor mecânico automotivo, 18% a aeroespacial e 7% apontaram a prototipagem, a indústria energética e a construção civil (cada), 4% a odontologia, a indústria de petróleo e gás e a indústria energética (cada) e 3% a recuperação de componentes

Figura 21 – Aplicações da MA



Fonte: Autor

5 CONCLUSÕES

Os objetivos do trabalho foram atingidos. Quanto ao geral, estudar o papel da manufatura aditiva frente à Indústria 4.0, evidencia-se que essa tecnologia é um dos pilares desse novo movimento. Pode-se apontar que existem várias limitações que impedem a popularização da tecnologia como a baixa produtividade, a ausência de matéria-prima, a falta de compreensão das propriedades dos componentes, entre outras. Diante disso é imprescindível atuar diretamente nestes componentes para garantir a utilização deste recurso que traz consigo benefícios para as empresas, a sociedade e o meio ambiente.

Quanto ao específico, compreender as características da Indústria 4.0, aponta-se que tal movimento tem sido considerado a Quarta Revolução Industrial e traz consigo diversas promessas de otimização das indústrias. Através dela busca-se ter uma empresa integrada em que as máquinas serão autônomas, tomando decisões tão rapidamente quanto preciso, algo que minimiza o fator humano e que poderia culminar em grandes prejuízos. Para isso, existem nove pilares que a sustentam e buscam atingir esse objetivo, um deles é a MA.

No que se refere ao objetivo específico de avaliar as particularidades da MA, destaca-se que esse é um processo de fabricação em que se tem a deposição de materiais em camadas sucessivas que propiciarão a obtenção do produto final. Inicialmente é necessário modelar o objeto desejado em um *software*, geralmente CAD, em seguida, enviar o projeto para a máquina que produzirá o item, de acordo com a tecnologia mais adequada para tal.

Ao se tratar do objetivo específico de entender os principais elementos estudados, as limitações e as aplicações da manufatura aditiva, cita-se que a manufatura aditiva é uma tecnologia relativamente nova e precisa ser estudada de forma mais aprofundada. Nas pesquisas investigadas neste trabalho, notou-se que a maioria dos pesquisadores tem estudado a aplicação da ferramenta, o uso de novos materiais, o desenvolvimento tecnológico/processos, entre outras coisas. Também se constatou que existem inúmeras limitações atreladas ao processo como o baixo controle de processo, a eficiência reduzida, a baixa disponibilidade de matérias-primas, além de outras situações que impedem seu uso na indústria mecânica, automotiva, aeroespacial, entre outras.

Como sugestões para trabalhos futuros recomenda-se desenvolver uma pesquisa a fim de investigar se as empresas já conhecem a manufatura aditiva e como têm atuado a fim de inseri-la em seus processos. Outra ideia é realizar um estudo de caso a fim de compreender como tem se dado o processo de implantação da manufatura aditiva nas empresas que a adotam bem como as principais dificuldades encontradas.

6 REFERÊNCIAS

ABDULHAMEED, A. *et al.* Additive manufacturing: Challenges, trends, and applications. **Advances in Mechanical Engineering**, v. 24, 2019.

ABREU, C. E. M. *et al.* Indústria 4.0: Como as Empresas Estão Utilizando a Simulação para se Preparar para o Futuro. **Revista de Ciências Exatas e de Tecnologia**, v. 12, n. 2, 2017.

AYUB, D. *et al.* Análise de Big Data por meio de estatísticas multivariadas na Indústria 4.0: uma revisão da literatura. **Revista Competitividade e Sustentabilidade**, v. 8, n. 1, 2021.

AZEVEDO, M. T. **Transformação digital na indústria: Indústria 4.0 e a rede de água inteligente no Brasil**. 2017. 177f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.

AZEVEDO, P. E. O.; AGUIAR JUNIOR, E. A. Análise de possíveis impactos da indústria 4.0 na sustentabilidade ambiental. **Revista Tecnológica da Universidade Santa Úrsula**, v. 5, n. 1, 2022.

BANDYOPADHYAY, A.; BOSE, S. **Additive Manufacturing**. 2. Ed. Boca Raton: CRC Press, 2019.

BIKAS, H. *et al.* A design framework for additive manufacturing. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 2. 103, 2019.

BOURELL, D. *et al.* Materials for additive manufacturing. **Manufacturing Technology**, v. 66, n. 2, 2017.

BOSE, S. *et al.* Additive manufacturing of biomaterials. **Progress in Materials Science**, v. 93, 2018.

BUTT, J. Exploring the Interrelationship between Additive: Manufacturing and Industry 4.0. **Designs**, v. 4, n. 13, 2020.

CAMPARA, E. Realidade aumentada aplicada na manutenção. **Revista Brasileira de Mecatrônica**, v. 4, n. 1, 2021.

CAVATA, J. T. *et al.* Destacando os benefícios da Indústria 4.0 na produção: uma abordagem de simulação baseada em agentes. **Gestão & Produção**, v. 27, n. 3, 2020.

CHEN, L. *et al.* The research status and development trend of additive manufacturing technology. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, n. 89, 2017.

CHEN, C. *et al.* Additive Manufacturing of Piezoelectric Materials. **Advanced Functional Materials**, v. 30, n. 52, 2020.

COELHO, P. M. N. **Rumo à Indústria 4.0**. 2016. 62 f. Dissertação (Mestrado - Engenharia e Gestão Industrial) – Universidade de Coimbra, Coimbra, 2016

COSTA, E. *et al.* Aprendizes Robóticos: Aplicação de Realidade Aumentada para Treinamento de Robôs em Fabricação Automatizada. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 10, 2021.

COTTELEER, M. *et al.* **An overview of additive manufacturing (3D printing): The 3d Opportunity Primer and The basics of additive manufacturing**. Westlake: Deloitte University Press, 2014.

DEBROY, T. *et al.* Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties. **Progress in Materials Science**, n. 92, 2018.

FERRARESI, H. N. **Efeito dos ciclos térmicos da manufatura aditiva por soldagem a arco sobre a dureza e microestrutura da zac de um ferro fundido nodular**. 2018. 125 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018.

FRANCISCO NETO, J. **A 4ª Revolução Industrial**. 2018. Disponível em: <http://avozregional.com.br/2018/03/06/joao-francisco-neto-4a-revolucao-industrial/>. Acesso em: 28 fev. 2022.

FRANCO, W. F. **Modelo para introdução de novas tecnologias em processos industriais no contexto da indústria 4.0**. 2020. 122f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, 2020.

GAO, W. *et al.* The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering. **Computer-Aided Design**, v. 69, 2015.

GIBSON, I. *et al.* **Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing**. 2. Ed. New York: Springer, 2015.

GIL, A. C. **Métodos e Técnicas de Pesquisa Social**. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2019.

GODINA, R. *et al.* Impact Assessment of Additive Manufacturing on Sustainable Business Models in Industry 4.0 Context. **Sustainability**, v. 12, 2020.

GONCALVES, R. H. C. **Gestão da manutenção na indústria 4.0**. 2020. 50 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Instituto Politécnico de Setúbal, Setúbal, 2020.

HILDEBRAND, K. *et al.* Orthogonal slicing for additive manufacturing. **Computers & Graphics**, v. 37, n. 6, 2013.

HORN, T. J. *et al.* Overview of Current Additive Manufacturing Technologies and Selected Applications. **Science Progress**, v. 1, n. 2012.

IKEZIRI, L. M. *et al.* A perspectiva da indústria 4.0 sobre a filosofia de gestão lean manufacturing. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 1, 2020.

INACIO, D. I. *et al.* A importância da manufatura aditiva como tecnologia digital para a indústria 4.0: uma revisão sistemática. **Revista Competitividade e Sustentabilidade**, v. 7, n. 3, 2020.

KORNER, M. E. H. *et al.* Systematic Literature Review: Integration of Additive Manufacturing and Industry 4.0. **Metals**, v. 10, n. 1061, 2020.

LEE, H. *et al.* (2017). Lasers in Additive Manufacturing: A Review. **International journal of precision engineering and manufacturing-green technolog**, v. 4, n. 3, 2017.

LI, N. *et al.* Progress in Additive Manufacturing on New Materials. **Journal of Materials Science and Technology**, v. 35, n. 2, 2019.

MARCONI, M. A.; LAKATOS, E. M. **Técnicas de Pesquisa: Planejamento e Execução de Pesquisas, Amostras e Técnicas de Pesquisas, Elaboração, Análise e Interpretação de Dados**. 8 ed., São Paulo: Atlas, 2017.

MARTINS, P. G.; LAUGENI, F. P. **Administração da Produção**. 3. Ed. São Paulo: Saraiva, 2015.

MEHRPOUYA, M. *et al.* The Potential of Additive Manufacturing in the Smart Factory Industrial 4.0: A Review. **Applied Sciences**, v. 9, 2019.

MOCO, P. A. B.; CUNHA, P. Análise da implementação da indústria 4.0 nas gestões de qualidade e de conhecimento. **Boletim de Gerenciamento**, v. 16, n. 16, 2020.

NICANOR, G. A.; NAKAMOTO, F. Y. A Indústria 4.0: Tecnologia da Manufatura Aditiva e Bioprinting. **TAS Journal**, v. 1, n. 3, 2017.

OLIVEIRA, J. P. *et al.* Revisiting fundamental welding concepts to improve additive manufacturing: From theory to practice. **Progress in Materials Science**, n. 107, 2020.

PEREIRA, A.; SIMONETTO, E. O. Indústria 4.0: conceitos e perspectivas para o Brasil. **Revista da Universidade do Vale do Rio Verde**, v. 16, n. 1, 2018.

PIAIA, T. C. *et al.* Quarta revolução industrial e a proteção do indivíduo na sociedade digital. **Revista Paradigma**, v. 28 n. 1, 2019.

PRODANOV, C. C.; FREITAS, E. C. **Metodologia do Trabalho Científico: Métodos e Técnicas da Pesquisa e do Trabalho Acadêmico**. 2. Ed. Novo Hamburgo: FEEVALE, 2013.

RANDON, G. C.; CECCONELLO, I. Simulação como Tecnologia Habilitadora da Indústria 4.0: Uma Revisão da Literatura. **Scientia cum Industria**, v. 7, n. 2, 2019.

RAULINO, B. R. *et al.* Sistema de Cotação Para Prototipagem Rápida – Influência dos Parâmetros de Fabricação no Custo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, 7., 2013, Penedo. **Anais...** COBEF: Penedo, 2013.

REZENDE, S. M. F. **Estudo e caracterização de componentes confeccionados por manufatura aditiva.** 2018. 134 f. Dissertação (Mestrado em Modelagem e Otimização) – Universidade Federal de Goiás, Catalão, 2018.

SACOMANO, J. B. *et al.* **Indústria 4.0: conceitos e fundamentos.** 1. Ed. São Paulo: Blucher, 2018.

SANTOS, N. D. B. **Indústria 4.0: Aplicação da Internet das Coisas na Área Industrial Estudo de Caso no Grupo Tecnofita.** 2017. 71f. Dissertação (Mestrado em Gestão) – Universidade Atlântica, Barcarena, 2017.

SANTOS, C. M.; BELEM, J. F. Indústria 4.0 e manufatura aditiva: um estudo de caso com os consumidores de calçados produzidos nas indústrias de calçados de Juazeiro do Norte. **Revista IDOnline**, v. 12, n. 42, 2018.

SANTOS, M. M. D. *et al.* **Indústria 4.0: Fundamentos, perspectivas e aplicações.** 1. Ed. São Paulo: Érica, 2018.

SCHWAB, K. *et al.* **Aplicando a Quarta Revolução Industrial.** 1. Ed. São Paulo: Edipro, 2018.

SCHULES, M. V. **Proposta de diagnóstico para adoção das tecnologias da indústria 4.0 em um processo produtivo com base em indicadores de sustentabilidade:** um estudo de caso. 2018. 90f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2018.

SEPASGOZAR, S. M. E. *et al.* Additive Manufacturing Applications for Industry 4.0: A Systematic Critical Review. **Buildings**, v. 10, 2020.

SHAFIQ, S. I. *et al.* Virtual engineering object/virtual engineering process: a specialized form of cyber physical system for Industry 4.0. **Procedia Computer Science**, v. 60, 2015.

SINGH, S. *et al.* Material issues in additive manufacturing: A review. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 25, 2017.

SILVA, M. D. T. *et al.* Governança da informação no contexto dos módulos contábeis dos sistemas ERP. **AtoZ: novas práticas em informações e conhecimento**, v. 10, n. 3, 2021.

SOUZA, F. F. **Big data analytics como ferramenta de adaptação do total quality management na industria 4.0, aplicado a uma empresa multinacional do ramo automobilístico.** 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2020.

SRIVATSAN, T.; SUDARSHAN, T. **Additive Manufacturing: Innovations, Advances, and Applications**. Boca Raton, Florida: CRC Press, 2016.

STEFANI, E. *et al.* Aplicabilidade da filosofia lean na Indústria 4.0. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 3, 2021.

SUN, C. *et al.* Additive manufacturing for energy: A review. **Applied Energy**, n. 282, 2021.

TADEU, H. F. B.; SANTOS, E. S. O que seria a Indústria 4.0? **Fundação Dom Cabral**. Alphaville, v. 2, 2016.

TEIXEIRA, R. L. P. *et al.* Os discursos acerca dos desafios da siderurgia na indústria 4.0 no Brasil. **Brazilian Journal of Development**, v. 5, n. 12, 2019.

THOMPSON, M. K. *et al.* Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints. **Manufacturing Technology**, v. 65, n. 2, 2016.

TOFAIL, S. A. M. *et al.* Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities. **Materials Today**, v. 21, n. 1, 2018.

VIEIRA, P. P. S. *et al.* Gestão da inovação tecnológica, Indústria 4.0 e Cloud Computing: Implantação do trabalho remoto em uma distribuidora de energia elétrica. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 12, 2021.

WESTCON. **Plataforma de Cyber Segurança para Automação**. 2020. Disponível em: <https://wii.com.br/produtos/plataforma-de-cyber-seguranca-para-automacao/>. Acesso em: 15 mar. 2022.

WONG; K. V.; HERNANDEZ, A. A Review of Additive Manufacturing. **International Scholarly Research Network**, v. 10, 2012.

YAMADA, T. Y.; MARTINS, L. M. Indústria 4.0: um comparativo da indústria brasileira perante o mundo. **Terra e Cultura**, v. 34, 2018.

ZANOTTO, T. T. **Influência da otimização de trajetórias ociosas do bico extrusor em processo de manufatura aditiva**. 2017. 107 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica e de Materiais) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2017.

ZHAO, D.; GUO, W. Shape and Performance Controlled Advanced Design for Additive Manufacturing: A Review of Slicing and Path Planning. **Journal of Manufacturing Science & Engineering**, v. 142, n. 1, 2020.