



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS DE RUSSAS
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

FRANCISCO RENÉ ANDRADE

**DESAFIOS PARA A ENGENHARIA MECÂNICA NA ERA DA INDÚSTRIA 4.0 – A
INDÚSTRIA DOS SISTEMAS CIBERFÍSICOS (CYBER-PHYSICAL SYSTEMS -
CPS)**

RUSSAS
2023

FRANCISCO RENÉ ANDRADE

DESAFIOS PARA A ENGENHARIA MECÂNICA NA ERA DA INDÚSTRIA 4.0 – A
INDÚSTRIA DOS SISTEMAS CIBERFÍSICOS (CYBER-PHYSICAL SYSTEMS -
CPS)

Trabalho de Conclusão de
Curso (graduação) apresentada ao
Programa de Graduação em Engenharia
Mecânica da Universidade Federal do
Ceará Campus de Russas, como requisito
parcial à obtenção do título de Graduado
em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Camilo
Augusto Santos Costa.

RUSSAS

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

A567d Andrade, Francisco René.

Desafios para a Engenharia Mecânica na era da Indústria 4.0 – A indústria dos sistemas ciberfísicos (cyber-physical systems - CPS) / Francisco René Andrade. – 2023.
55 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Russas, Curso de Engenharia Mecânica, Russas, 2023.

Orientação: Prof. Dr. Camilo Augusto Santos Costa.

1. Engenharia Mecânica. 2. Indústria 4.0. 3. Sistemas Ciberfísicos. 4. Machine Learning. 5. CAx. I. Título.

CDD 620.1

FRANCISCO RENÉ ANDRADE

DESAFIOS PARA A ENGENHARIA MECÂNICA NA ERA DA INDÚSTRIA 4.0 – A
INDÚSTRIA DOS SISTEMAS CIBERFÍSICOS (CYBER-PHYSICAL SYSTEMS -
CPS)

Trabalho de Conclusão de
Curso (graduação) apresentada ao
Programa de Graduação em Engenharia
Mecânica da Universidade Federal do
Ceará Campus de Russas, como requisito
obrigatório à obtenção do título de
Graduado em Engenharia Mecânica.

Aprovada em: 29/11/2023.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Camilo Augusto Santos Costa (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC) – Campus de Russas

Prof. Dr. George Luiz Gomes de Oliveira
Universidade Federal do Ceará (UFC) – Campus de Russas

Prof. Dr. Reuber Regis de Melo
Universidade Federal do Ceará (UFC) – Campus de Russas

A Deus, pois não somos chamados para sermos aceitos, somos chamados para glorificar a Deus. Aos meus pais, minha esposa, colegas e amigos.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Camilo Augusto Santos Costa, pela excelente orientação.

Aos professores participantes da banca examinadora Prof. Dr. George Luiz Gomes de Oliveira e Prof. Dr. Reuber Regis de Melo pelo tempo, pelas valiosas colaborações e sugestões.

A todo o corpo docente da UFC Campus de Russas e em especial ao corpo docente do curso de Graduação em Engenharia Mecânica.

“Além de velocidade e da amplitude, a quarta revolução industrial é única por causa da crescente harmonização e integração de muitas descobertas e disciplinas diferentes. As inovações tangíveis que resultam da interdependência entre tecnologias distintas não são mais ficção científica.” (Schwab, 2016, p. 22)

RESUMO

Este trabalho tem por finalidade fazer uma visita à bibliografia a respeito dos desafios apresentados aos profissionais de engenharia mecânica frente as mudanças impostas pela chamada indústria 4.0. Cabe ao profissional se qualificar e buscar conhecimento das tecnologias de que passarão a fazer parte da vivência do mercado de trabalho em pouco tempo, tanto no dia a dia como na indústria. Tecnologias como Machine Learning e IoT já são realidades e a integração dessas novas tecnologias as já existentes CAx (CAD, CAM, CAE, CIM) é um passo que a engenharia mecânica terá de dar o mais breve possível. Por mais que as novas tecnologias sejam realidade, a intervenção da engenharia mecânica em muitos projetos não podem se concretizar, pois deve haver um elo entre o digital e o físico, que é a premissa dos sistemas ciberfísicos (CPS).

Palavras-chave: engenharia mecânica; CAx; sistemas ciberfísicos, IIoT, machine learning.

ABSTRACT

This work aims to visit the bibliography regarding the challenges presented to mechanical engineering professionals in the face of the changes imposed by the so-called industry 4.0. It is up to the professional to qualify and seek knowledge of the technologies that will become part of the job market experience in an abbreviated time, both in day-to-day life and in industry. Technologies such as Machine Learning and IoT are already realities and the integration of these new technologies with existing CAX (CAD, CAM, CAE, CIM) is a step that mechanical engineering will have to take as soon as possible. As much as innovative technologies are a reality, in the intervention of mechanical engineering, many projects cannot come to fruition, as there must be a link between the digital and the physical, which is the implementation of cyber-physical systems (CPS).

Keywords: mechanical engineering; CAX; cyber-physical systems, IIoT, machine learning.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Ilustração da evolução das Revoluções industriais.	16
Figura 2: Espaço Ciberfísico no mercado e na empresa.	20
Figura 3: Sistema Mecatrônico.	28
Figura 4: Representação de banqueta plástica em CAD e simulação CAE.....	34
Figura 5: Gráfico do processo de aquisição e formalização do conhecimento.	35
Figura 6: A Indústria e suas conexões e interconexões proporcionadas pela IIoT....	39
Figura 8: Esquema de uma programação elaborada por IA.	48
Figura 9: Curva de Falha Potencial.	51

LISTA DE TABELAS

Tabela 01: Bancos de dados de materiais de alto rendimento com recursos mecânicos.

.....44

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASME	American Society of Mechanical Engineers
BI	Business Intelligence
CAD	Computer-Aided Design
CAM	Computer-Aided Manufacturing
CAPP	Computer Aided Process Planning
CAx	Computer-Aided “x”
CE	Ceará
CIM	Computer-Integrated Manufacturing
CNC	Controle Numérico Computadorizado
CPS	Sistemas Ciberfísicos
DFMA	Design for Manufacturing and Assembly
IA	Inteligência Artificial
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IIoT	Internet das Coisas Industrial
IoT	See, Internet das Coisas
KBE	Knowledge-Based Engineering
ML	Machine Learning
PC	programmable controller
RI	Revolução Industrial
RS	Rio Grande do Sul
SDCD	Sistema Digital de Controle Distribuído
SP	São Paulo
TI	Tecnologia da Informação
UFC	Universidade Federal do Ceará
VR	Virtual Reality

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	15
1.1.	Breve Histórico da Revolução Industrial (RI)	16
1.1.1	<i>Revolução Industrial (RI) 4.0</i>	17
1.2.	Problemática	19
1.3.	Objetivo Específico	21
1.4.	Organização do texto	21
2.	REVISÃO BIBLIGRÁFICA	23
2.1.	Conhecimentos e disciplinas	23
2.2.	Combinando o “Mundo Mecânico” e o “Mundo Digital”	23
2.3.	Sistemas Ciberfísicos para Tecnologia de Produção	25
2.4.	Mecatrônica ou Eletromecânica	27
2.5.	CAX (Computer-Aided “x”)	28
2.6.	CAD (Computer Aided Design)	29
2.7.	CAPP (Computer Aided Process Planning)	31
2.8.	CAM (Computer Aided Manufacturing)	31
2.9.	CAE (Computer-Aided Engineering)	33
2.10.	KBE (Knowledge-Based Engineering)	34
2.11.	Manufatura Aditiva	35
2.12.	Internet das Coisas (IoT)	37
2.13.	Fundamentos da Internet Industrial das Coisas e Sistemas de Manufatura Cibernética (IIoT; CIM)	38
2.14.	Características e funcionalidades da IIoT	40
2.15.	CIM (Computer Integrated Manufacturing)	41
2.16.	Machine Learning	43
3.	APLICAÇÕES	47
3.1.	Programação de Produção	47
3.2.	Almoxarifado de Materiais	49
3.3.	Corte Automático	52
4.	CONCLUSÕES	55
	REFERÊNCIAS	57

1. INTRODUÇÃO

Estamos em uma constante e inevitável evolução para uma sociedade informatizada e inserida em ambientes digitais, e não poderia ser diferente com o ambiente industrial. Esta evolução impactará diretamente em diversas esferas da indústria como um todo; e esta ocorre de maneira exponencial e intensa, sendo de fundamental importância a busca pela inserção neste novo ambiente de inovações e mudanças.

A quarta revolução industrial, no entanto, não diz respeito apenas a sistemas e máquinas inteligentes e conectadas (SCHWAB,2016). Esta revolução tecnológica mudará profundamente a maneira como vivemos, trabalhamos e nos comunicamos. Os engenheiros mecânicos estão perfeitamente posicionados para aproveitar com a transformação tecnológica, como parte dos mais diversos campos de engenharia.

A evolução dos processos de fabricação, a crescente necessidade de aumento de produção, sendo essa alavancada tanto por demandas quantitativas quanto qualitativas, como: eficiência de e eficácia de produção; desenvolveram uma industrialização tanto dinâmica quanto sedenta por novas tecnologias e avanços.

Menos atenção é dada na literatura às atividades realizadas nas áreas de projeto do produto, preparação do processo de fabricação ou sua execução (máquinas-ferramentas ou sistemas de medição), ou seja, as áreas ilustradas na Fig. 1 no plano vertical. E é nessas atividades que os produtos adquirem as propriedades que seu futuro comprador e usuário espera. As TIs são um suporte inestimável para eles, mas apenas um suporte (HAMROL, 2019).

Neste escopo de análise é perceptível a necessidade de os mais diversos profissionais se adaptarem veloz e constantemente, e conseqüentemente a literatura deve acompanhar a evolução, a fim de criar princípios basilares de estudos voltados as necessidades dos graduados ou graduandos.

Com esse intuito buscaremos entender e vislumbrar temas pertinentes para o desenvolvimento do Engenheiro Mecânico inserido na Indústria 4.0.

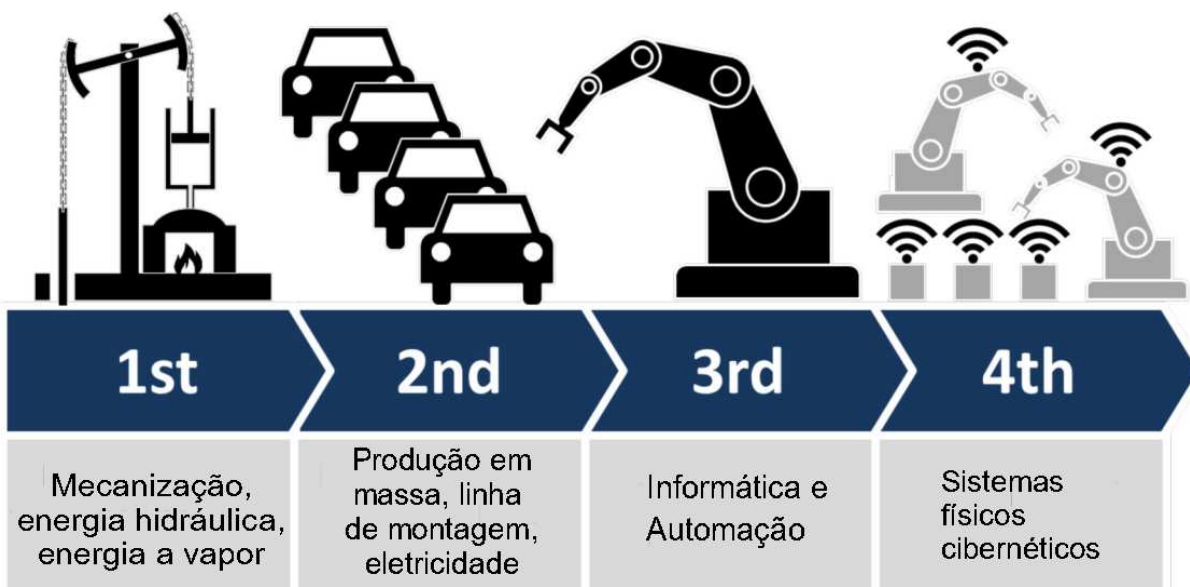
1.1. Breve Histórico da Revolução Industrial (RI)

A ilustração das etapas para a Revolução Industrial (RI) 4.0 é apresentado na Figura 1. O RI começou em 1800. Nos anos 1700, a IR foi iniciado pelo motor a vapor comercial e pela era mecânica. Ficou conhecida como Indústria 1.0. A RI foi seguida pela eletricidade e produção em massa no início do século XX, aplicada às linhas de produção de bens. A Indústria 2.0 começou em 1900 (SETIYO,2021).

Então, o RI continuou a evoluir para a era computadorizada na década de 1970, conhecida como Indústria 3.0. Nesse ponto, tudo começou a se tornar digital e os elementos de fabricação mudaram para automação e robótica. O uso da eletrônica, da tecnologia da informação e da internet é o início da era da informação.

Nessa época, foi introduzida a Indústria 4.0, que foi o início das cadeias de suprimentos digitais, produtos e serviços digitais e modelos de negócios. A análise orientada por dados e a tomada de decisões começaram como uma competência central.

Figura 1: Ilustração da evolução das Revoluções industriais.



Fonte: Adaptado de https://id.wikipedia.org/wiki/Industri_4.0

Como recurso principal, a RI 4.0 é caracterizada por uma combinação de tecnologias que obscurecem as disciplinas físicas, digitais e biológicas. No mínimo, existem três causas para a mudança atual, que é mais do que apenas uma extensão da terceira revolução industrial: velocidade, escopo e efeito do sistema.

Essa mudança representa a transformação de toda a produção, gestão e estrutura de governança de uma indústria, onde quer que a indústria seja desenvolvida e quais bens sejam produzidos (SETIYO,2021).

1.1.1 Revolução Industrial (RI) 4.0

A fabricação de bens em escala industrial dura pouco mais de 200 anos. Nesse período, o setor passou por diversas transformações. Atualmente está entrando na era da quarta revolução industrial, a Indústria 4.0 (HAMROL, 2019).

À medida que a Indústria 4.0 se consolida, engenheiros com visão de futuro adotarão essas ferramentas e tecnologias digitais. Isso permite que eles criem produtos de alta qualidade com mais eficiência e reajam mais rapidamente às mudanças nas demandas dos consumidores, aumentando a fidelidade do cliente e ganhando participação no mercado (CRAWFORD, 2018).

Com o surgimento da indústria 4.0, a indústria de engenharia mecânica está passando por uma extraordinária transformação digital. Essas tecnologias estão reformulando a forma como os engenheiros projetam e constroem novos equipamentos, desde Aprendizado de Máquina (ML, em inglês, Machine Learning) até Inteligência Artificial (IA) e Big Data (FUTURE..., 2022).

A tecnologia está expandindo o potencial dos engenheiros mecânicos para criar e lançar produtos aprimorados e adaptar esses produtos às necessidades em evolução dos clientes. Historicamente, a criação de novos equipamentos e sistemas, precisava de engenheiros para criar muitos protótipos antes de chegar à versão final. Quando mais dados se tornarem acessíveis, os engenheiros mecânicos poderão acelerar o processo de projeto, realizar avaliações precisas e fabricar produtos com base nos resultados.

As seguintes tecnologias são normalmente consideradas componentes-chave da Indústria 4.0:

Internet das Coisas (IoT, em inglês, internet of things) — usa tecnologia de sensores para conectar todo o ecossistema de fabricação com

comunicação em tempo real e dados de máquinas e dispositivos interconectados, rastreando o desempenho operacional;

Big data e análise de dados — utiliza a Internet das Coisas para capturar, analisar e armazenar dados em todas as etapas da produção, desde o design até a produção;

Simulação de engenharia - conta com realidade virtual e realidade aumentada para criar imagens ou hologramas tridimensionais realistas e perfeitamente dimensionados que aceleram o design do produto, reduzem as iterações e reduzem o tempo de lançamento no mercado;

Manufatura aditiva, incluindo impressão 3D e 4D – essas tecnologias de rápido avanço permitem que os engenheiros projetem e fabriquem produtos que muitas vezes não podem ser feitos usando métodos tradicionais de fabricação. (CRAWFORD, 2018)

Lasi et al. (2014) elucidam que as principais características da Indústria 4.0 são:

- a) Individualização (produtos de acordo com o pedido do cliente);
- b) Descentralização – decisão rápida para atender o mercado;
- c) Eficiência dos recursos (foco na sustentabilidade para combater a escassez e aumento dos preços dos recursos);
- d) Ciclo de vida mais curtos dos produtos (inovação);
- e) Aperfeiçoamento dos computadores para serem melhores e mais compactos.

Os autores ainda afirmam que a Indústria 4.0 é um termo generalizado para a junção de:

a) Fábrica inteligente: fábricas equipadas com sensores e sistemas autônomos relacionados à digitalização e demais tecnologias computacionais;

b) CPS: chamados de Sistemas Ciberfísicos, são a fusão de sistemas digitais e físicos, interagindo para otimizar os processos. De acordo com Lee, Bagheri e Kao (2014), um CPS consiste em dois componentes funcionais principais, com conectividade avançada que permite a coleta de dados em tempo real, física e virtual, e o gerenciamento inteligente de dados, capacidade analítica e computacional. Já os autores Hermann, Pentek e Otto (2015) conceituam o CPS como integrações computacionais e processos físicos, ou seja, computadores e redes incorporados

monitoram e controlam processos físicos, afetando os cálculos de produção e vice-versa.

c) Descentralização: com sistemas inteligentes, surge a necessidade de migrar do sistema de tomada de decisão hierárquico para o descentralizado;

d) Novos sistemas de distribuição e compras: os processos serão considerados de modo individual, alterando o modo como é feito hoje;

e) Necessidades humanas em foco: os sistemas deverão atender as necessidades do cliente, os produtos serão confeccionados do formato que o cliente desejar.

f) Sustentabilidade e responsabilidade social: os produtos devem ser produzidos de modo sustentável e responsável.

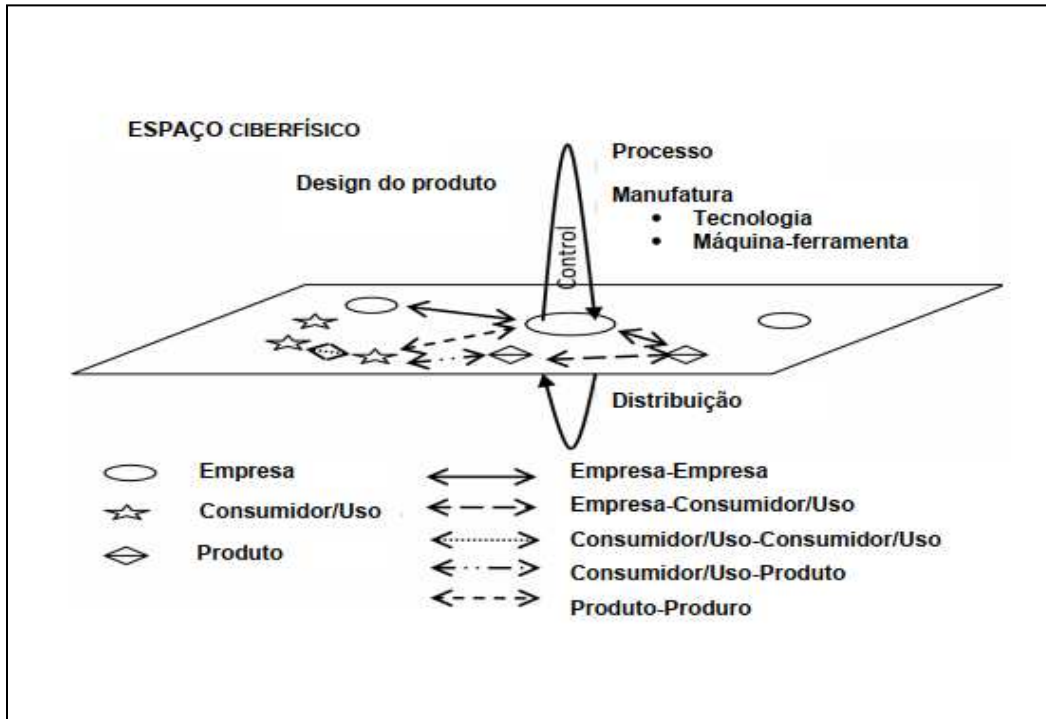
1.2. Problemática

As constantes mudanças e frequentes inovações do mercado de trabalho, tanto o Engenheiro Mecânico com o estudante de engenharia, deve procurar se adequar e/ou se preparar para estar na vanguarda da sua área, sendo assim é necessária a implementação de novos conhecimentos e novas disciplinas ao seu currículo, seja de forma externa ou interna ao campus, no caso o Campus da UFC Russas.

Atualmente e nas décadas subsequentes muito da Indústria 4.0 será implementado no ambiente fabril e empresarial, sendo de suma importância estarmos inseridos nessas novas tecnologias e ferramentas.

A 4ª RI, impactará não somente o ambiente fabril, mas a sociedade como um todo estará com uma cara nova, assim como será modificada, graças as inúmeras mudanças geradas.

Figura 2: Espaço Ciberfísico no mercado e na empresa.



Fonte: Adaptado de Hamrol, 2019.

Chama a atenção que tanto os artigos científicos quanto os estudos populares que tratam da Indústria 4.0 estejam focados principalmente nos aspectos de TI, como mencionado acima. Menos atenção é dada na literatura às atividades realizadas nas áreas de projeto do produto, preparação do processo de fabricação ou sua execução (máquinas-ferramentas ou sistemas de medição), ou seja, as áreas ilustradas na Figura 02 no plano vertical. E é nessas atividades que os produtos adquirem as propriedades que seu futuro comprador e usuário espera. As TIs são um suporte inestimável para eles, mas apenas um suporte.

Pode-se concluir que as atividades relacionadas à engenharia mecânica transformam a ideia incluída no projeto do produto em um valor agregado para o cliente (HAMROL, 2019). Sua eficácia depende do suporte de TI, automação, robótica, gestão e outros.

Trataremos das ferramentas e sistemas baseados nas mais recentes conquistas de TI e usados por engenheiros mecânicos. Em particular, são apresentadas as seguintes soluções:

a) projeto de produtos e processos: CAx distribuído e integrado, Engenharia Baseada no Conhecimento (KBE), modelos digitais, por exemplo, realidade virtual (VR),

b) processos de fabricação:

c) manufatura aditiva (AM): ferramentas inteligentes, máquinas tecnológicas e centros de usinagem flexíveis e configuráveis,

d) inspeção: sistemas de medição flexíveis e operacionais on-line.

1.3. Objetivo Específico

Tendo em vista os recentes avanços e mudanças na indústria como um todo, cabe ao Engenheiro Mecânico se preparar e adaptar para elas. A Indústria 4.0 é uma realidade e é encarada por muitos não só como um avanço, mas como uma outra Revolução Industrial.

O presente trabalho busca caracterizar a Indústria 4.0 e seus efeitos na formação e desenvolvimento do Engenheiro Mecânico, assim como destaca as principais competências e disciplinas a serem adquiridas para estar inserido na Indústria 4.0.

Após essa revisão geral será aplicado o estudo de aplicabilidade das diversas tecnologias abordadas, em uma indústria de calçados que está em processo de modernização e expansão da aplicação de tecnologia.

1.4. Organização do texto

O texto se desenvolve com uma revisão sistemática da literatura. Na primeira seção será discutida de maneira sucinta, temas que são imprescindíveis para a Indústria 4.0. Estabelecidos os pilares dos conhecimentos pertinentes, busca-se a aplicabilidade desses no contexto da Engenharia Mecânica e o desempenhar das

atribuições do engenheiro. Não se busca o esgotamento dos temas propostos, mas uma análise das literaturas mais atuais e relevantes sobre o assunto.

Na seção seguinte serão implementados os conceitos e como podem ser utilizados no ambiente fabril da indústria de calçados. Englobando os principais conhecimentos, a aplicação busca tronar a teoria em um objeto tangível e visível do que a literatura busca nos ensinar.

Uma revisão sistemática da literatura é uma revisão do estado da literatura sobre um tópico ou questão de pesquisa em particular. É uma abordagem estruturada para a síntese de pesquisa que segue uma série de procedimentos pré-estabelecidos (BURGERS, 2019). O primeiro passo de uma revisão sistemática da literatura é identificar uma questão de pesquisa específica para a qual se pretende encontrar uma resposta. É fundamental que a questão de pesquisa seja apresentada na forma de uma hipótese ou pergunta que possa ser respondida por meio da comparação de estudos pertinentes. Assim, não é aconselhável começar uma revisão sistemática da literatura após uma descrição geral do assunto.

A pesquisa pode produzir uma variedade de tipos de estudos que são difíceis de comparar. Ao iniciar uma pergunta que restringe o tópico de interesse, revisões sistemáticas da literatura fornecem perspectivas mais pertinentes. A questão de pesquisa deve se concentrar exclusivamente no enquadramento metafórico, evitando assim qualquer enquadramento previamente estabelecido. Após a definição de uma questão, os pesquisadores devem definir quais tipos de estudos serão empregados para encontrar a resposta a ela (Boland et al., 2017).

2. REVISÃO BIBLIGRÁFICA

2.1. Conhecimentos e disciplinas

Inúmeros conhecimentos e disciplinas podem ser citados, mas serão expostas algumas que estão tanto na vanguarda do conhecimento como em ampla expansão e desenvolvimento, configurando assim um cenário ótimo para aqueles que conseguirem desenvolver estes conhecimentos ao longo dos próximos anos.

2.2. Combinando o “Mundo Mecânico” e o “Mundo Digital”

Um Sistema Ciberfísico (CPS - Cyber-Physical System) é um sistema que combina componentes de software com componentes mecânicos ou eletrônicos. Geralmente, a transferência, o monitoramento, o controle e o intercâmbio de dados são realizados em tempo real por meio da internet.

Os CPSs são uma parte significativa da Indústria 4.0 e podem ser definidos como um sistema composto por componentes computacionais que envolvem comunicação, controle e computação em redes. Esses softwares permitem o controle da parte mecânica e eletrônica da máquina. Além disso, as empresas têm a capacidade de transmitir a realidade do mundo físico por meio de softwares.

Os CPS combinam habilidades físicas com novas formas de interação homem-máquina por meio de sensores e atuadores sofisticados. Eles usam recursos de engenharia e computação, bem como princípios de engenharia (BAHETI, 2011). Além disso, Wiesner, Hauge e Thoben () acreditam que o sistema compreenderá a logística e a gestão de processos, bem como serviços de Internet que recebem, processam e analisam dados dos sensores e controle dos atuadores, conectados por redes digitais e interfaces homem-máquina multimodal, para alcançar o potencial do CPS. Como resultado, os CPS são sistemas sociotécnicos abertos que têm muito mais funcionalidade do que os sistemas embarcados controlados (GEISBERGER, 2012).

Combinar o "Mundo Mecânico" e o "Mundo Digital" refere-se à integração da Engenharia Mecânica tradicional com as tecnologias digitais avançadas, como a Indústria 4.0, a IoT e a computação em nuvem. Essa combinação permite criar sistemas e processos mais eficientes, inteligentes e conectados (RAGULSKIS, 2012).

No contexto da Engenharia Mecânica, essa integração ocorre de várias maneiras:

a. Projeto Assistido por Computador (CAD - Computer-Aided Design): A engenharia mecânica utiliza softwares de CAD para projetar e modelar componentes e sistemas mecânicos. Essas ferramentas permitem criar modelos virtuais em 3D, realizar simulações e análises de desempenho, facilitando o processo de projeto e validação antes da fabricação física. Apesar de ser uma ferramenta de uso comum atualmente, seu uso pode ser potencializado pela junção do mesmo com outros sistemas que permitam o desenvolvimento e criação de componentes de forma célere.

b. Fabricação Assistida por Computador (CAM - Computer-Aided Manufacturing): Os sistemas de CAM permitem a integração do projeto com a produção, automatizando a criação de instruções para máquinas-ferramenta, como tornos e fresadoras CNC (Controle Numérico Computadorizado). Isso melhora a precisão, a eficiência e a velocidade de produção, reduzindo erros e retrabalho. Sendo o CAM uma ferramenta já consolidada nas indústrias de ponta, através do compartilhamento gerado pela computação em nuvem e o Aprendizado de Máquina, ela seria amplamente aplicada, até em indústria e produções em pequena escala.

c. Monitoramento e Controle em Tempo Real: A aplicação de sensores e sistemas de monitoramento em máquinas e equipamentos mecânicos permite coletar dados em tempo real sobre parâmetros operacionais, desgaste de componentes e outras informações relevantes. Esses dados podem ser processados e analisados para otimizar o desempenho, prever falhas e programar manutenção preventiva.

d. Internet das Coisas (IoT): A IoT permite a conexão e comunicação de dispositivos e sistemas mecânicos com a internet, facilitando o monitoramento remoto, a troca de informações e o controle dos equipamentos. Isso proporciona maior eficiência, flexibilidade e capacidade de resposta em tempo real. A IoT, somada ao CAD, CAM e Monitoramento Remoto podem criar um tipo de indústria alto suficiente na questão de dados, com a implementação de melhorias e manutenções em tempo real, assim como personalização de produtos numa singularidade e velocidade nunca vistas.

e. **Manufatura Aditiva (Impressão 3D):** A manufatura aditiva utiliza impressoras 3D para criar objetos tridimensionais camada por camada. Essa tecnologia está revolucionando a produção de protótipos, peças personalizadas e ferramentas, permitindo designs complexos e redução de custos. Num futuro próximo também se acredita que logo mais, determinadas indústrias possam operar apenas com impressões 3D, permitindo a criação de produtos únicos, com total foco nas especificações solicitadas pelo cliente.

f. **Análise de Dados e Inteligência Artificial:** A engenharia mecânica pode se beneficiar da análise de dados e do uso de algoritmos de inteligência artificial para extrair informações valiosas, identificar padrões, otimizar o desempenho, prever falhas e tomar decisões baseadas em dados. Pode-se criar IAs capazes de prever com exatidão de segundos quando determinado componente atingirá sua vida útil, evitando manutenções corretivas custosa e desgastantes e manutenções preventivas em equipamentos que não necessariamente estão precisando.

Ao combinar o "Mundo Mecânico" e o "Mundo Digital", a engenharia mecânica se torna mais eficiente, flexível e inovadora. Essa integração permite o desenvolvimento de sistemas e produtos mais inteligentes, conectados e adaptáveis, impulsionando a evolução contínua da indústria e dos processos de fabricação.

Embora a IA, os robôs e a manufatura colaborativa sejam provavelmente a principal tecnologia que impulsionará todas as especialidades de engenharia nas próximas décadas, os engenheiros de software e elétricos geralmente não podem implementar seus conceitos sem a assistência de engenheiros mecânicos.

Esse aumento na engenharia multidisciplinar promete boas perspectivas de emprego para os engenheiros mecânicos. No entanto, será necessário um investimento em todo o setor em aprendizado contínuo, desde recém-formados até engenheiro em meio de carreira e especialistas seniores.

2.3. Sistemas Ciberfísicos para Tecnologia de Produção

Parece que o engenheiro e inventor mundialmente famoso Nikola Tesla já previu o telefone celular há cerca de cem anos, quando ele disse:

Quando a tecnologia sem fio for perfeitamente aplicada, toda a Terra será convertida em um enorme cérebro, o que de fato é, sendo todas as coisas partículas de um todo real e rítmico. Um homem será capaz de carregar um no bolso do colete. (Nikola Tesla, 1926)

Ele já havia previsto que descobriríamos muitas maneiras diferentes de executar os processos se pudéssemos coletar todas as informações do mundo (JESCHKE, 2017). O objetivo da Internet das Coisas (IOT) e dos sistemas ciberfísicos (CPS) é conectar todas as coisas em uma rede para que seja mais fácil acessar e melhorar o desempenho. Helen Gill, da National Science Foundation dos Estados Unidos, criou o termo "sistema ciberfísico" por volta de 2006. Ela comparou esses sistemas aos "cibernéticos", que são usados para processamento e comunicação discretos de informações. Por outro lado, os sistemas técnicos naturais construídos pelo homem são referidos como "físicos" e significam que funcionam continuamente.

Os sistemas ciberfísicos incluem sistemas físicos, biológicos e de engenharia que são integrados, monitorados e/ou controlados por um núcleo computacional. Em todas as escalas, os componentes estão conectados em rede. A computação está profundamente arraigada em todos os elementos físicos, e talvez até mesmo nos materiais. O núcleo computacional é um sistema embarcado, que geralmente exige resposta em tempo real e é distribuído com mais frequência. (GILL, 2016)

Portanto, Gill (2016) afirma que os CPS são sistemas em que os sistemas virtuais e reais estão intimamente conectados em vários níveis e seus componentes estão conectados em todas as escalas. O CPS trata da intersecção, e não da união, do mundo físico e do ciberespaço como um desafio intelectual.

A Internet Industrial das Coisas (IIoT) cresceu como resultado de uma variedade de tecnologias e suas interconexões. O termo "Manufatura Integrada por Computador" (CIM) foi usado para resumir as primeiras tentativas de estabelecer uma rede de "coisas" no setor manufatureiro nos anos 1970 (JESCHKE, 2017). Ainda que as ideias da CIM tenham cerca de quatro décadas, a maioria dos problemas persiste até hoje, como a integração de gestão e engenharia de processos e o desenvolvimento de uma automação flexível e altamente autônoma.

No entanto, com a ascensão da Produção Enxuta na década de 1990, soluções de TI excessivas foram cada vez mais consideradas ineficazes e muitos projetos CIM foram considerados ineficazes. Por exemplo, depois de um tempo, as primeiras decepções podem ser atribuídas à falta de capacidade das pessoas e da tecnologia para implementar ideias com sucesso (JESCHKE, 2017).

Temas como produção enxuta, manufatura integrada por computador e TI, são assuntos cada vez mais determinantes no ambiente industrial. Seja a nível estratégico ou produtivo, redução de custos e maior eficiência são os pilares que movem o mercado e cada vez mais as indústrias que apresentam algum tipo de defasagem, ou estão em atualização tecnológica ou em péssimo estado competitivo.

2.4. Mecatrônica ou Eletromecânica

Hoje, as atividades de mecatrônica, incluem o projeto, o teste e a operação de máquinas e equipamentos, e a integração funcional de sistemas mecânicos com eletrônica e controle computacional em um grau significativo.

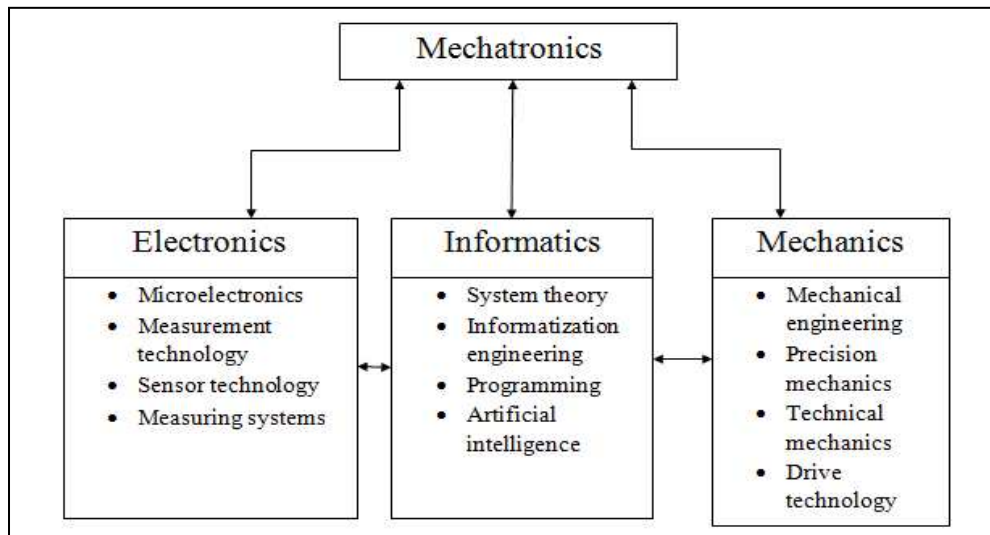
Alciatore e Histan (1998) nos dizem que a mecatrônica é uma área que combina conhecimentos clássicos da engenharia mecânica, hidráulica, pneumática, eletrônica, ótica e informática. Um sistema mecatrônico normalmente recebe sinais do ambiente e os processa para produzir sinais de saída que podem ser convertidos em forças, movimentos ou ações (PANNAGA, 2013). A mecatrônica visa desenvolver novos conceitos de máquinas e equipamentos com "inteligência artificial" e aumentar a eficiência dos sistemas técnicos.

Na indústria calçadista e têxtil em geral, os sistemas de corte são equipamento guiados por coordenadas que realizam esse corte esse processo. Esses requerem uma sinergia entre o que foi programado e o que as lâminas de corte realizam. Essa integração requer muita capacidade de compreender ambas as partes que compõem o processo.

A mecatrônica não apenas humaniza as máquinas, mas também muda a maneira de pensar sobre as questões tecnológicas e ensina novas tecnologias e habilidades (PANNAGA, 2013). A capacidade de processar e comunicar informações com precisão em vários tipos de sinais (mecânicos, elétricos, hidráulicos,

pneumáticos, óticos, químicos e biológicos) com alto nível de automação é a característica mais importante dos dispositivos mecatrônicos.

Figura 3: Sistema Mecatrônico.



Fonte: Adaptado de PANNAGA, GANESH e GUPTA, 2013

A Mecatrônica é a integração sinérgica de sensores, atuadores, condicionamento de sinal, eletrônica de potência, algoritmos de controle e decisão e hardware e software de computador para gerenciar a complexidade, a incerteza e a comunicação em sistemas projetados. "Mecatrônica é a integração sinérgica da engenharia mecânica com o controle eletrônico e o controle inteligente baseado em PC (programmable controller – PC-based controls), no projeto e fabricação de bens e processos", conforme definido pelo IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) e ASME (American Society of Mechanical Engineers).

2.5. CAx (Computer-Aided “x”)

CAx é uma abreviação para Computer-Aided “x”, onde “x” pode ser qualquer uma das várias disciplinas de engenharia. Inclui ferramentas como CAD (Computer-Aided Design), CAM (Computer-Aided Manufacturing), CAE (Computer-Aided Engineering), entre outras. Essas ferramentas são usadas para melhorar e auxiliar o processo de design e fabricação.

Um sistema CAx distribuído é semelhante a um Sistema Digital de Controle Distribuído (SDCD), onde uma série de equipamentos de controle digital são distribuídos no chão de fábrica, tendo como função primordial o aperfeiçoamento do controle de processos industriais. Isso permite uma otimização da produtividade, estruturada na diminuição de custos de produção, melhoria na qualidade dos produtos, precisão das operações das máquinas, segurança operacional, entre outros (SIASG..., 2022).

Um sistema CAx integrado, por outro lado, é semelhante ao Sistema Integrado de Administração de Serviços Gerais (SIASG). Ele integra e dota os órgãos da administração direta, autárquica e fundacional de instrumento de modernização (e-CAC: Como..., 2022). Ele é visto como um instrumento de apoio, transparência e controle na execução das atividades do SISG, por meio da informatização e operacionalização do conjunto de suas atividades, bem como no gerenciamento de todos os seus processos.

Em resumo, um sistema CAx distribuído e integrado seria um sistema que distribui várias ferramentas CAx em todo o ambiente de trabalho (distribuído) e garante que todas essas ferramentas funcionem juntas de maneira coesa (integrado). Isso pode levar a melhorias significativas na eficiência e produtividade.

2.6. CAD (Computer Aided Design)

Ao servir como ponte entre os departamentos de projeto e produção, o desenho técnico tem sido uma parte essencial da indústria desde a sua criação como organização produtiva.

O desenho preparado com padrões pré-determinados permite que o resto da fábrica receba as informações rapidamente, permitindo que o produto seja fabricado com maior rapidez (FIGUEIRA, 2003). Por esse motivo, o número de profissionais que usam o CAD como ferramenta de trabalho está aumentando a cada dia devido à grande evolução do poder de processamento e à queda nos preços dos computadores.

Por outro lado, é importante observar que a maioria dessas pessoas usa o CAD apenas para fazer desenhos, pois a potência dos sistemas CAD permite além

da manipulação e integração de informações, conceber projetos em três dimensões, permitindo várias formas de visão e concepção de projetos e reduzindo a probabilidade de erro causado por inconsistências.

Existem várias formas de usar a tecnologia do CAD. A construção em si pode começar de diferentes maneiras. Uma maneira é criar um modelo desde o início, o chamado "do zero". Uma forma mais eficiente é utilizar um banco de dados de modelos existentes e posterior modificação. O problema surge com empresas que implementaram sistemas CAD recentemente. Nessas empresas, muitas vezes há documentação de desenho rica, mas não em formato digitalizado (FIGUEIRA, 2003).

Novák (2014) nos diz que, na maioria dos casos, não resta nada além de "redesenhar" meticulosamente esses desenhos no sistema CAD relevante. É oferecido o uso de digitalização 2D e, assim, exportar a documentação de desenho existente para um modelo de computador. No entanto, este método tem muitas desvantagens. O processo de vetorização não é 100% confiável e alguns elementos geométricos digitalizados (como linhas, círculos, ranhuras, arredondamentos etc.) não podem ser definidos com precisão devido à imprecisão do próprio desenho.

Um método chamado engenharia reversa parece ser uma opção mais realista. É uma digitalização tecnológica 3D, onde não é necessária uma peça real, mas sim um desenho. Usando uma digitalização 3D, as dimensões do componente são medidas e então um modelo de volume virtual é criado, que pode então ser modificado usando um software CAD (IŽOL, 2006).

Digitalizar componentes é de grande ajuda quando se fala em termos de manutenção de equipamentos automáticos. Pois pode se criar modelos de acompanhamento que prevejam falhas e necessidades de manutenção, por exemplo. Com um modelo 3D e base de dados com as características mecânicas de determinado material, se traça uma trajetória operacional daquele componente.

Segundo Novák (2014) *apud* KURIC (2002) e KRÁL' (2010), as vantagens básicas dos sistemas CAD são:

- a) A construção de um processo produtivo de alta produtividade;
- b) Criação de protótipos virtuais;
- c) Aumento da qualidade, inteligibilidade e clareza;
- d) Menos erros;
- e) Utilização de dados CAD em outras etapas do ciclo de vida - a documentação CAD digitalizada é posteriormente utilizada nas etapas seguintes,

como preparação tecnológica da produção (CAPP), controle de qualidade (CAQ), planejamento e controle de produção (PPS) e o próprio processo de produção (CAM);

f) Arquivamento da documentação do desenho.

2.7. CAPP (Computer Aided Process Planning)

O CAPP (em português, (Planejamento de Processo Auxiliado por Computador) representa o suporte informático na concepção e criação de documentação tecnológica (KURIC, 2002). O CAPP constitui o elo entre os sistemas CAD e CAM, ou seja, entre o projeto estrutural e a produção em si.

Este sistema planeja os processos individuais que serão utilizados na produção do componente proposto. O processo de planejamento concentra-se na determinação da sequência de operações de produção individuais necessárias para produzir uma determinada peça ou produto (NOVÁK, 2014). Este processo traduz as informações do projeto em etapas e instruções do processo para que os produtos sejam fabricados de forma eficiente e eficaz. Isso significa que a documentação tecnológica é projetada com base na documentação de projeto, ou dados CAD (KURIC, 1999).

A partir da documentação tecnológica é possível ler o que será produzido, por quais métodos, onde (em quais máquinas), com o quê (com quais ferramentas, em quais fixações etc.) e em que condições (KRÁL', 2010).

Assim podem ser criados “rotas” ou “caminhos” de operação que garantam o melhor desempenho e melhor eficácia de movimentação, assim como IA podem fazer modificações através de Machine Learnig.

2.8. CAM (Computer Aided Manufacturing)

CAM é a designação para o campo da Manufatura Assistida por Computador e para Sadilek (2010) pode ser entendido em dois níveis.

A primeira parte dos autores descreve o CAM como um sistema computacional específico para apoiar alguma atividade na produção, na maioria das vezes o suporte à criação de programas de controle para uma máquina controlada numericamente (NC – Numerical Control).

A segunda parte dos autores define CAM de forma muito mais abrangente. Portanto, no CAM é possível imaginar um amplo complexo de máquinas, movimentação, transporte, medição, controle e equipamentos auxiliares, que são controlados pelo computador durante a realização da peça. Alguns sistemas CAM mais extensos formam um todo integrado juntamente com sistemas CAD e CAE (Computer Aided Engineering).

A vantagem desta interconexão é a transferência perfeita de dados e dados geométricos entre peças e módulos individuais. Hoje em dia, os sistemas CAM são uma parte inseparável dos processos de produção em engenharia. Eles garantem uma produção eficiente e uma preparação tecnológica para a produção (TPV). (SADÍLEK, 2010).

Para Kuriç (2002) as atividades do sistema CAM incluem:

- a) controle de insumos de produção;
- b) layout de produção;
- c) coleta de dados de produção;
- d) monitoramento do progresso da produção;
- e) controle DNC, CNC e NC;
- f) robôs e manipuladores;
- g) sistemas de transporte flexíveis;
- h) produção células e sistemas de produção flexíveis;
- i) gerenciamento de ferramentas etc.

A área mais sofisticada dos sistemas CAM é a área de produção controlada numericamente. Esta é uma técnica onde programas são usados para controlar máquinas de produção, por exemplo, máquinas-ferramentas, dobradeiras, retificadoras, máquinas de corte, prensas (SADÍLEK, 2010).

Prevê a produção antes que ela aconteça, é uma vantagem estratégica imprescindível no cenário tão competitivo. Ao se avaliar a produção previamente, o retrabalho e o desperdício são deixados no menor patamar possível. Ao se trabalhar com o uso de software CAM, o esforço é tornar a produção o mais eficiente possível, ou seja, ter o mínimo de energia e material com a maior produção possível.

2.9. CAE (Computer-Aided Engineering)

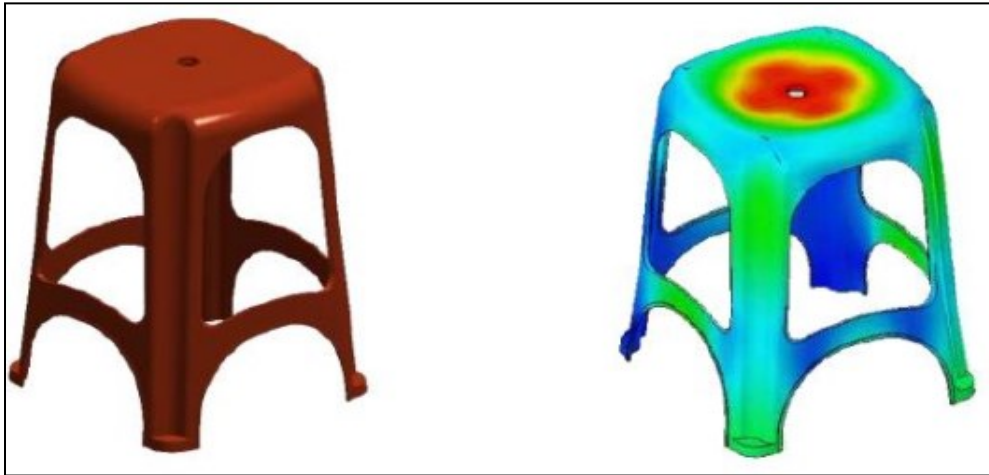
Oliveira (2012) afirma que os softwares CAE (em português, Engenharia Assistida por Computador), foram desenvolvidos para ajudar os projetistas no design durante a fase de desenvolvimento de produto, independentemente do tipo de produto pretendido. Como resultado, as plataformas CAE oferecem uma variedade de recursos para simular diferentes situações antes da fase de prototipagem, incluindo simulações de esforços estruturais, deformações, fadiga, fluxo de fluídos e simulações térmicas e magnéticas.

Existem situações em que, em um estudo inicial na fase de desenvolvimento de um produto, não foram identificadas certas condições, como fadiga por ciclos repetitivos de esforços, que podem resultar em falha ou até mesmo quebra do componente. Como tal, a ferramenta CAE pode ser útil em estudos de melhorias de produtos após o produto se consolidar no mercado.

De acordo com Pina e Beal (2011), as ferramentas CAD e CAE podem reduzir o tempo necessário para fazer um projeto, bem como a quantidade de ajustes e protótipos que precisam ser feitos e o número de moldes que precisam ser fabricados até a versão final do produto. Isso resulta em um produto final mais assertivo e de melhor qualidade. Há outra vantagem que estes softwares podem oferecer, no mesmo trabalho dos autores, que é a capacidade de integrá-los com sistemas CAM. Isso significa que o arquivo pode ser importado diretamente ao programa, produzindo o código numérico para usinagem da peça ou mesmo o molde para a fabricação de outras peças.

Os softwares CAE podem ser usados para a avaliação final de esforços estruturais de acordo com a aplicação após o design da peça elaborado, incluindo todos os dimensionamentos e materiais a serem usados, escolhidos pelo cliente ou mesmo pelo projetista responsável. As estruturas do produto são definidas usando sistemas integrados CAD, CAM e CAE que podem realizar vários tipos de análises por meio da representação tridimensional de modelos sólidos do produto e seus componentes (PINA; BEAL, 2011, p. 6), como mostra a figura abaixo.

Figura 4: Representação de banqueta plástica em CAD e simulação CAE.



Fonte: Pina e Beal (2011, p. 6).

2.10. KBE (Knowledge-Based Engineering)

A engenharia baseada no conhecimento (KBE, do inglês Knowledge-based Engineering) é uma área que combina design auxiliado por computador e uma base de conhecimento de sistema.

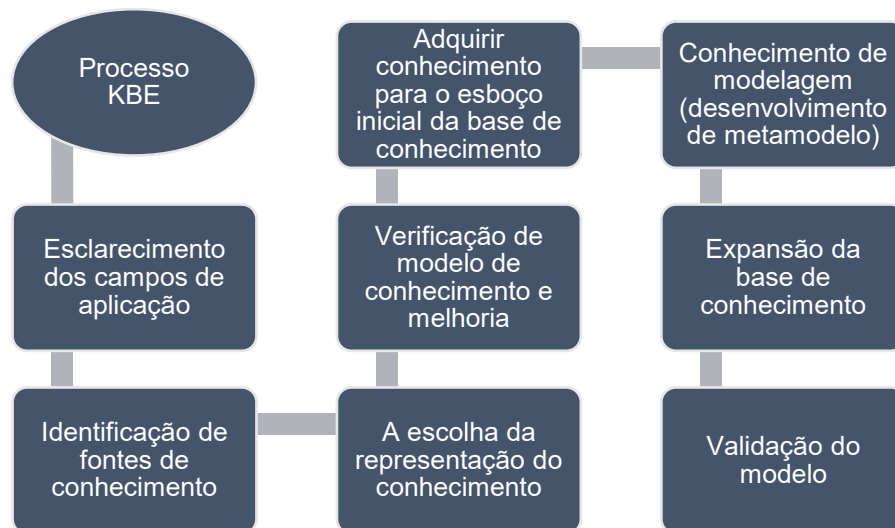
O objetivo dos aplicativos KBE é centralizar todo o know-how relacionado ao design de um produto. A engenharia baseada em conhecimento é uma abordagem para administrar o conhecimento necessário para o desenvolvimento de um produto (GOBBO JÚNIOR, 2017).

O uso de soluções KBE, como um sistema especialista, permite a personalização ou automatização de tarefas de projeto. Uma ferramenta com essa característica pode ajudar as equipes de projeto a implementarem o conceito de Design for Manufacturing and Assembly (DFMA), que tradicionalmente depende do conhecimento do projetista e da comunicação com outros departamentos ou fornecedores (GOBBO JÚNIOR, 2017).

Existe um elevado banco de dados que poderia ser utilizado como ferramenta para o desenvolvimento de soluções fabris com a ajuda do KBE. Compilar e entender os inúmeros dados, que podem estar em plataformas e grandezas distintas é tarefa fácil para softwares de BI e IA, com essas duas ferramentas, dados que

parecem desconexos podem trabalhar para se desenvolver um produto ou método produtivo mais eficientes e econômicos.

Figura 5: Gráfico do processo de aquisição e formalização do conhecimento.



Fonte: Adaptado de Jałowiecki, 2017.

Por fim, a KBE é uma técnica que usa conhecimento especializado para automatizar e otimizar o processo de design, melhorando a eficiência e a qualidade do produto.

2.11. Manufatura Aditiva

A manufatura aditiva, uma tecnologia revolucionária, permite que modelos virtuais sejam usados para criar objetos. Os itens nesse formato são criados adicionando materiais em camadas. Esses materiais podem incluir filamentos de polímeros ou metais (PALUDO, 2022).

É uma tecnologia em que o material é colocado camada por camada até que a peça seja concluída. Isso difere de outros processos de fabricação, como soldagem, forjamento e perfuração, em que o material é retirado para fazer os componentes (CONNER et al., 2014).

Volpato e Carvalho (2018) definem a manufatura aditiva (AM), também conhecida como impressão 3D, como um processo de fabricação caracterizado pela

adição de material em camadas sucessivas de um modelo geométrico 3D criado por um sistema de desenho assistido por computador (CAD), que permite a fabricação de componentes físicos usando uma variedade de materiais.

Após a criação desse modelo CAD, o planejamento do processo começa com o "fatiamento" do modelo em curvas de nível 2D, definindo as estruturas que suportam a peça e o tipo de deposição de material. Depois disso, a peça começa a ser fabricada. A fase final do processo, chamada de pós-processamento, começa quando a peça está pronta. Nessa fase, o produto recebe um acabamento diferente dependendo do tipo de tecnologia usada para imprimir.

Os materiais que são usados na manufatura aditiva incluem polímeros, metais, materiais cerâmicos e compósitos. Esses materiais variam de acordo com a aplicação que será desenvolvida e a categoria da manufatura aditiva. O titânio, o alumínio e o aço inoxidável são os metais mais usados, devido à demanda crescente por materiais mais leves e resistentes, principalmente no setor aeroespacial (REPORTS AND DATA, 2020).

Apesar de ser um avanço ainda distante, a indústria calçadista tem como principal gargalo a "montagem" de 'n' partes para compor um produto, com a manufatura aditiva pode se substituir algumas peças por uma única peça gerada por impressão, por exemplo.

As empresas podem obter muitos benefícios da manufatura aditiva. Alguns deles são:

a) Customização e versatilidade: A personalização é um grande benefício para as empresas porque o molde é criado em software. Essa tecnologia também permite a construção de objetos com uma variedade de materiais, diferente dos modelos tradicionais que limitam as matérias-primas usadas.

b) Reduzir despesas: A matéria-prima é geralmente mais importante em processos aditivos do que em processos tradicionais. Ainda há ganhos na produção, o que significa menos tempo gasto e mais produtividade.

c) Agilidade: Devido à sua base em um modelo virtual, a produção aditiva permite velocidades de fabricação mais altas e objetos com maior precisão.

d) Sustentabilidade: Como a manufatura aditiva usa menos material, ela é um aliado do meio ambiente.

2.12. Internet das Coisas (IoT)

A Internet, uma invenção revolucionária, está sempre se transformando em algum novo tipo de hardware e software, tornando-a inevitável para qualquer pessoa. A expressão “Internet das Coisas” foi usada pela primeira vez por um diretor executivo do MIT, Kevin Ashton, em 1999. Na época, os sensores estavam ficando mais baratos e mais digitalizados, o que fez Ashton começar a pensar no próximo passo lógico para as TIC. era: conectar as coisas via Internet (ASHTON, 2009).

A Internet das Coisas (IoT) é uma tecnologia que permite a conexão de diferentes dispositivos e objetos à internet, permitindo que esses objetos possam coletar e transmitir dados em tempo real. A Engenharia Mecânica está diretamente relacionada com a IoT, pois é responsável pelo projeto e desenvolvimento de máquinas e equipamentos que utilizam essa tecnologia para melhorar sua eficiência e desempenho.

A Internet das Coisas tem uma série de aplicações na Engenharia Mecânica, permitindo a coleta e análise de dados de sensores em tempo real, o monitoramento do desempenho de máquinas e equipamentos, a manutenção preditiva, a automação de processos e a melhoria da eficiência energética. Com ela, as máquinas podem se comunicar entre si e com sistemas de controle, permitindo a criação de sistemas inteligentes que podem se adaptar a diferentes condições e exigências.

Por exemplo, a IoT pode ser utilizada em máquinas e equipamentos industriais para monitorar o desempenho em tempo real e enviar dados para sistemas de análise de dados. Isso permite que os engenheiros mecânicos possam analisar esses dados para otimizar o desempenho das máquinas, identificar falhas antes que ocorram e realizar manutenção preditiva.

A Engenharia Mecânica também está envolvida na integração de sistemas de IoT em máquinas e equipamentos. Os engenheiros mecânicos precisam projetar equipamentos que possam se conectar à internet, integrando sensores e sistemas de comunicação em seus projetos.

Além disso, a Engenharia Mecânica também é responsável por garantir a segurança da IoT em máquinas e equipamentos, pois a integração de sistemas de IoT

pode aumentar o risco de ataques cibernéticos. Por isso, os engenheiros mecânicos precisam considerar a segurança desde o projeto inicial de máquinas e equipamentos.

Em resumo, a Engenharia Mecânica está diretamente relacionada com a Internet das Coisas, pois é responsável pelo projeto e desenvolvimento de máquinas e equipamentos que utilizam essa tecnologia para melhorar sua eficiência e desempenho.

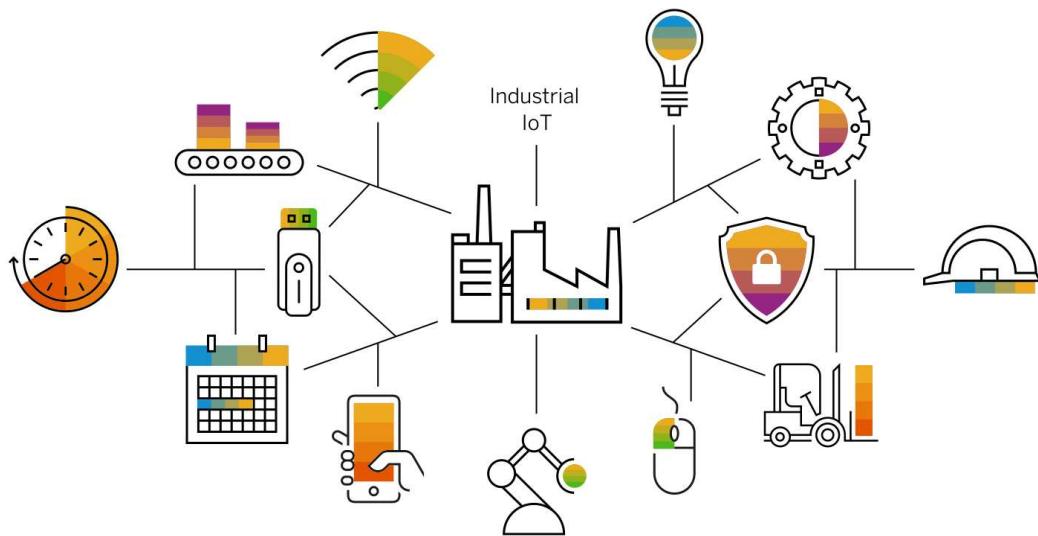
Segundo Farooq, Waseem e Mazhar (2015) a forma de comunicação que vemos agora é humano-humano ou humano-dispositivo, mas a Internet das Coisas promete um grande futuro para a internet onde o tipo de comunicação é máquina-máquina (M2M – Machine-to-machine).

Com os avanços contínuos em tecnologia e uma inovação em potencial, a IoT está surgindo como uma rede de computação global onipresente (FAROOQ, 2015), onde todos e tudo estarão conectados à Internet.

2.13. Fundamentos da Internet Industrial das Coisas e Sistemas de Manufatura Cibernética (IIoT; CIM)

Uma extensão da Internet das Coisas (IoT) que envolve os setores industriais é a Internet das Coisas Industrial (IIoT). A IIoT cresceu a partir de uma variedade de tecnologias e suas interconexões.

Figura 6: A Indústria e suas conexões e interconexões proporcionadas pela IloT.



Fonte 1: Adaptado de SAP, 2022.

Na manufatura, as primeiras tentativas de criar uma rede de “coisas” datam da década de 1970 e foram resumidas com o termo “Computer-Integrated Manufacturing” (CIM, Produção integrada por Computador).

Embora as ideias do CIM tenham agora aproximadamente 40 anos, a maioria dos desafios ainda prevalece hoje, por exemplo: a integração de processos gerenciais e de engenharia e a realização de automação flexível e altamente autônoma (JESCHKE, MEISEN, 2016).

Ela se concentra na comunicação entre máquinas, que é baseada em Big Data e Machine Learning, o que permite que as empresas tornem suas operações mais eficientes e otimizem o desempenho.

As teologias de interconexão e compartilhamento de informações machine-to-machine, são de grande valia na indústria calçadista. Como exemplo, essa comunicação reduz a necessidade de inúmeras planilhas de controle de produção e estoque. Ao invés disso os equipamentos já mostram o que o equipamento anterior irá fazer, está fazendo ou já fez, dando as etapas seguintes o poder de decisão antecipada, em caso de modificação por um problema ou mudança de meta.

Setores de preparação de tecidos, por exemplo, podem indicar claramente tudo aquilo que já foi preparado para o setor de corte, e caso um material não tenha condições de prosseguir por questões de qualidade, por exemplo, tanto o nível

estratégico poderá tomar decisões imediatas, como o setor produtivo poderá se adequar a nova realidade, que pode se alterar inúmeras vezes ao longo do dia.

2.14. Características e funcionalidades da IIoT

Podemos citar as seguintes características para a Internet Industrial das Coisas (IIoT):

a) **Conexão com outros dispositivos:** A Internet das Coisas (IIoT) conecta vários dispositivos para coletar e enviar dados, assim como o Internet das Coisas (IoT). A principal distinção reside no fato de que isso ocorre entre equipamentos industriais.

b) **Comunicação Máquina a Máquina (M2M):** Máquinas, sistemas e outros dispositivos industriais têm a capacidade de se comunicar entre si.

c) **Coleta e Transmissão de Dados:** A Internet das Coisas (IIoT) permite que os dados sejam enviados regularmente entre o sistema central e todos os dispositivos IoT integrados.

d) **Análise de Dados:** Os dados gerados pelos dispositivos IIoT podem ser analisados e aproveitados para melhorar a eficiência, a produtividade e a visibilidade quando administrados por um ERP moderno com recursos de IA e machine learning.

O Internet das Coisas (IIoT) tem várias aplicações em vários setores:

a) **Indústria:** A internet das coisas é uma combinação de máquinas inteligentes e análise de dados sofisticada. O objetivo é criar sistemas mais ágeis e eficientes que monitoram, coletam, modificam, analisam e fornecem dados essenciais para que as pessoas possam tomar decisões rápidas e confiáveis.

b) **Gestão de instalações:** O IoT pode otimizar as fases de produção.

c) **Monitoramento da cadeia de suprimentos:** A Internet das Coisas (IIoT) pode ser usada para manter um olho na cadeia de suprimentos.

d) **Assistência médica:** Na área da assistência médica, o IoT pode ser usado para melhorar a eficiência dos serviços.

e) **Varejo:** A Internet das Coisas (IIoT) pode ser usada no varejo para aumentar a eficiência das operações.

Há cinquenta anos, quando pensávamos em tecnologia industrial futurista, muitas vezes imaginávamos robôs cada vez mais ágeis, com mãos e pernas para melhor imitar a destreza humana. O que a ascensão da Internet das Coisas Industrial nos mostrou é que estávamos apenas parcialmente certos. Naturalmente, máquinas industriais e robôs tornaram-se mais sofisticados, mas onde o verdadeiro avanço veio, está na capacidade de esses dispositivos industriais existirem em uma rede conectada na qual eles podem coletar dados e conversar uns com os outros – e com os sistemas empresariais centrais – em tempo real. (SAP, 2022)

2.15. CIM (Computer Integrated Manufacturing)

Lee estabelece as bases para a compreensão técnica dos sistemas ciberfísicos, descrevendo-os como “integrações de computação e processos físicos”. A sua aplicação prática, no entanto, não tem apenas uma dimensão técnica, mas também uma dimensão humana no que diz respeito às pessoas que os utilizam, e uma dimensão organizacional no que diz respeito à estrutura econômica que a cerca.

Os sistemas CAD/CAM, como setor suportado por computador dentro do CIM, garantem todas as atividades e funções abrangidas por ambos os sistemas CA, com conectividade e ligações diretas a outros sistemas CAx (KURIC, 2002).

As tecnologias CAD/CAM constituem a base para a construção da chamada “Fábrica do Futuro”. Um papel fundamental neste processo é a construção de um banco de dados comum de informações de engenharia que possa ser vinculado às informações de produção (controle). Posteriormente, essas informações constituem a base para a gestão informatizada completa do empreendimento (KURIC, 2002). CAD/CAM também pode ser definido como uma tecnologia que trata do uso de computadores digitais para executar determinadas funções nas etapas de pré-produção e na própria produção.

A Produção Integrada por Computador (CIM - Computer Integrated Manufacturing) é um conceito e uma abordagem que visa unificar todas as funções e processos de fabricação de uma empresa por meio da utilização de tecnologia da informação e sistemas computacionais. O principal objetivo do CIM é aprimorar a

eficiência, qualidade e flexibilidade na produção, ao mesmo tempo em que reduz custos e prazos.

A CIM engloba uma ampla variedade de atividades relacionadas à fabricação, como o desenvolvimento de produtos, planejamento da produção, gerenciamento do estoque, programação das máquinas, controle de qualidade, rastreamento dos produtos e muito mais. Abaixo estão alguns dos principais componentes e características da CIM:

a. Integração de Sistemas: A CIM envolve a integração de todos os sistemas produtivos em uma única rede ou plataforma computacional. Isso inclui sistemas auxiliados por computador (CAD - Computer-Aided Design) para o projeto dos produtos, sistemas auxiliados por computador (CAM - Computer-Aided Manufacturing) para programar as máquinas, sistemas de controle do estoque, sistemas de controle da qualidade e outros.

b. Compartilhamento de Dados: Um dos fundamentos da CIM é o compartilhamento eficiente de dados entre todos os departamentos e processos envolvidos na fabricação. Isso garante que todas as partes tenham acesso às informações necessárias em tempo real.

c. Automação de Processos: A CIM procura automatizar diversos processos de fabricação, desde a programação de máquinas até o acompanhamento de produtos. Isso diminui a necessidade de intervenção humana e reduz erros ao mínimo.

d. Produção Flexível: A CIM permite que as máquinas e os processos sejam reconfigurados rapidamente para atender às demandas do mercado. A produção sob demanda e personalizada requer isso.

e. Rastreamento e Controle de Qualidade: Os sistemas de rastreamento do CIM permitem acompanhar o progresso de um produto ao longo do processo de fabricação. Os sistemas de controle de qualidade também são usados para garantir que os produtos atendam aos padrões definidos.

f. Redução de Custos: Mesmo que a implementação inicial da CIM possa ser cara, no final, ela geralmente resulta em custos mais baixos para a produção, melhorando a eficiência e diminuindo o desperdício.

g. Tempo de Resposta Rápida: A CIM permite que as empresas ajustem a produção conforme necessário para atender às mudanças nas demandas dos clientes.

Por fim, a Produção Integrada por Computador (CIM) é uma abordagem que integra todos os aspectos da produção por meio de sistemas de computador e tecnologia da informação para tornar as fábricas mais eficientes, flexíveis e adaptáveis. Como resultado, a produção é mais rápida, com menos custos, de melhor qualidade e com maior capacidade de atender às demandas variáveis do mercado.

2.16. Machine Learning

As estruturas de código aberto disponíveis tornaram o desenvolvimento e a implementação de modelos de Machine Learning (ML, em português, Aprendizado de Máquina) muito mais simples. Como resultado, vários domínios usam algoritmos de aprendizado de máquina avançados., mas a disponibilidade de dados específicos continua sendo uma das principais barreiras para se entrar no mundo de Machine Learning.

Pode ser extremamente difícil encontrar domínios com conjuntos de dados específicos. A coleta e monetização de dados é o foco de várias empresas líderes, como o Google e o Facebook (Amini, 2023). As empresas se esforçam para melhorar seus processos de design e fabricação de produtos para obter vantagem competitiva por meio da utilização de recursos disponíveis, dados e ferramentas de análise avançadas e o campo de engenharia mecânica e manufatura não é uma exceção.

De forma semelhante, o aprendizado de máquina (ML) visa aprender automaticamente relacionamentos e padrões importantes a partir de exemplos e observações, em vez de codificar o conhecimento em computadores (Bishop 2006). Os sistemas inteligentes com capacidades cognitivas semelhantes às humanas recentemente cresceram graças aos avanços do Machine Learning.

Essas capacidades interferem em nossas vidas pessoais e profissionais, e podem alterar as interações em rede nos mercados eletrônicos de todas as maneiras imagináveis. Essas informações ajudam as empresas a tomar decisões sobre produtividade, engajamento e retenção de funcionários (Shrestha et al. 2021).

Os algoritmos de Machine Learning e Deep Learning são uma grande ferramenta na engenharia de materiais e mecânica, porque podem prever as propriedades de um material, projetar novos materiais e descobrir novos mecanismos

além da intuição (Guo, 2021). Quando a complexidade estrutural de novos materiais aumenta, e o problema de design de materiais para maximizar seus comportamentos mecânicos é um desafio e podem exigir áreas de design consideráveis que são intratáveis para abordagens convencionais.

Na indústria o ML pode revolucionar produtos e processos, com uma capacidade de processamento de dados quase infinita e o conjunto certo de dados, criam-se sistemas que alavancam o desenvolvimento e a produção de bens.

Os modelos de aprendizado de máquina treinados a partir de conjuntos de dados de materiais consideráveis que relacionam estrutura, propriedades e funcionamento em vários níveis hierárquicos forneceram novos caminhos para a exploração rápida dos espaços de design para resolver esse problema. Uma abordagem de design de materiais baseada em Machine Learning depende da coleta ou geração de um grande conjunto de dados, que deve ser pré-processado adequadamente. Isso requer o uso de um modelo de ML adequado, bem como o conhecimento fundamental dos campos de ciência dos materiais e física (Guo, 2021).

Abaixo temos a Tabela 1 lista os principais bancos de dados existente hoje. Eles contemplam uma vasta literatura de testes de laboratório e uma variedade sem igual de materiais.

Tabela 01: Bancos de dados de materiais de alto rendimento com recursos mecânicos.

Base de dados	Categoria de Materiais	Recursos mecânicos	URL
AFLOW	Ligas; Compostos inorgânicos	Propriedades elásticas	http://www.aflowlib.org/
Materials Project (MP)	Compostos inorgânicos; materiais nano porosos.	Propriedades elásticas.	https://materialsproject.org/
MATDAT	Aços; alumínio e ligas de titânio; metais de solda; etc.	Propriedades estáticas; comportamentos de fadiga; comportamento; estresse-tensão não linear; comportamentos cíclicos de estresse-deformação.	https://www.matdat.com/

MatWeb	Polímeros; metais; cerâmica; semicondutores; fibras; etc.	Propriedades elásticas; força; dureza; dureza; etc.	http://www.matweb.com/
MatMatch	Metais; compósitos; cerâmica; polímeros; copos; etc.	Propriedades elásticas; força; dureza; dureza; etc.	https://matmatch.com/
MakeItFrom	Metais; polímeros; cerâmicas.	Propriedades elásticas; força; dureza; dureza; etc.	https://www.makeitfrom.com/
NIMS materials database (MatNavi)	Polímeros; materiais inorgânicos; metais.	Propriedades elásticas; força; dureza; etc.	https://mits.nims.go.jp/en/

Fonte: Adaptado de Dou, 2021.

Aprimoramentos recentes no Machine Learning abrem novas perspectivas para criar estratégias de design de materiais sem precedentes e resolver problemas mecânicos de longo prazo.

3. APLICAÇÕES

Cabe-nos, após essa revisão da bibliografia, uma sugestão de aplicação destas ferramentas e tecnologias na indústria real. Nos inserindo nesta empresa através da equipe de melhoria contínua numa indústria de calçados, sediada em Picada Café no Rio Grande do Sul e com filias em Morada Nova – CE (unidade da qual faço parte), Garibaldi – RS, Quixeré – CE, Las Flores (Argentina), um e-commerce em Novo Hamburgo – RS e 02 escritórios de negócios em São Paulo – SP.

A indústria dispõe de soluções industriais completas, com equipamentos de última geração e processos que seguem os mais exigentes padrões mundiais, garantindo alta qualidade na produção de calçados para diversas marcas., que são referência de calçados no Brasil e no mundo, estão inseridas em todo o mercado global.

As etapas iniciais, que são a programação da produção baseada nas vendas, processo de recepção separação e preparação de materiais para corte e corte das matérias primas, serão as abordadas a seguir.

3.1. Programação de Produção

O departamento de Programação de Produção se utiliza de ferramentas “manuais”, ou seja, a equipe que recebe o montante dos pedidos do cliente e programa quando e onde determinados produtos serão cortados, costuras, montados e acabados.

Uma solução de Business Intelligence (BI) já está em implantação e o próximo passo para essa programação, seria a inserção de Machina Learnig aliada a IAs (inteligências artificiais) de BI, isso tudo alimentado por uma base de dados de mais de 20 anos de experiencia.

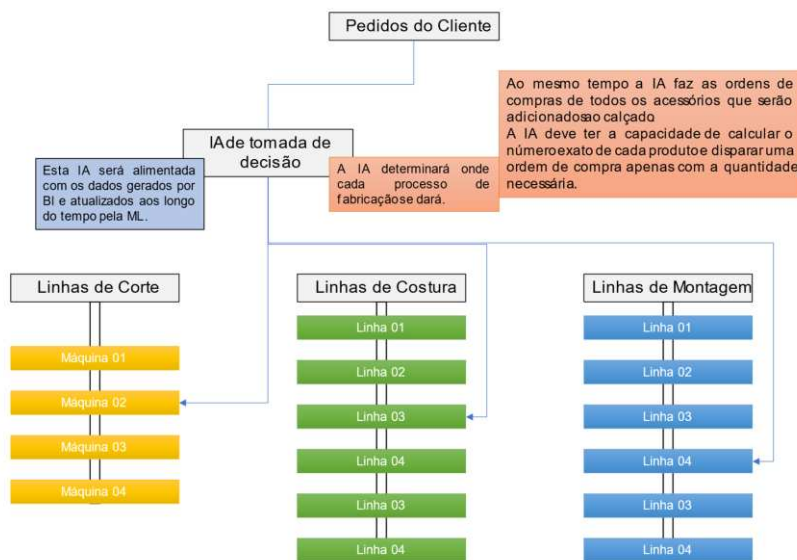
Business Intelligence ou BI é a estratégia que faz o processo de coleta e transformação de dados em informação clara e valiosa. Ela possibilita que relatórios e análises preditivas sejam feitas com maior rapidez

e profundidade, gerando insights para a operação que ajudam na tomada de decisão (Business I..., 2021).

A ideia é alinhar os pedidos do cliente a capacidade produtiva de cada linha de costura ou montagem. A programação é baseada na expertise dos funcionários presentes na equipe da empresa, o que requer constante tomada de decisões que podem ser falíveis. Hoje, com IAs cada vez mais capazes e adaptáveis, se pode modificar e adaptar uma IA para desempenhar um papel que um ser humano faz hoje, de maneira muito eficiente e rápida.

Transformar a base de dados, distribuída em fontes e tipos diferentes, planilhas, gráficos e dados do sistema utilizado em algumas áreas em um banco de dados unificado e com as mesmas métricas, é o passo crucial nesse empreendimento. Tudo isso pode ser compilado em dados unificados através das ferramentas de BI. Com essa compilação pode se “treinar” uma IA, para que a mesma desenvolva tomadas de decisões e modifique seus parâmetros iniciais de tomada de decisão através de ML.

Figura 7: Esquema de uma programação elaborada por IA.



Fonte: Criada pelo autor, 2023.

Sabemos que apesar de a maioria dos modelos de calçados terem processo similares, as linhas de produção possuem funcionários com capacidades e

desempenho diferentes, até porque as linhas se preparam para produzir modelos específicos ao longo do tempo.

Baseado em nisso, uma IA pode tomar a decisão de, por exemplo, programar que um modelo “A”, deve ser direcionado para a linha “01” de costura e a linha de “10” de montagem.

O exemplo acima é apenas uma visão reduzida de tudo que poderia ser feito. Pode-se realizar a implementação de inúmeras ferramentas e desenvolver muitas atividades automatizadas.

3.2. Almoxarifado de Materiais

Uma das etapas de programação por IA, serão a aquisição de matérias primas e a quantificação dessas. Levando em conta os dados estabelecidos nos manuais de consumo e quantidade de matérias, é fácil calcular quanto de cada material será necessário para uma determinada quantidade de pares de um modelo.

Um exemplo que será continuado na seção seguinte, são os tecidos que serão usados posteriormente na confecção dos calçados. Apesar de não ser um dos itens de maior valor agregado, é talvez a matéria prima que gera a maior quantidade de desperdício, pois mesmo se usando máquinas de corte programadas, ainda há dificuldades intrínsecas aos materiais.

Hoje a empresa está iniciando um processo de manipulação de material, que será preparado para corte, de maneira automatizada, mas antes disso há algumas etapas.

Primeiro deve haver um inventário de materiais catalogando o tipo, a quantidade e a posição de armazenamento de cada peça, rolo ou qual seja a apresentação do material. Um sistema de leitura de QR Code pode ser facilmente utilizada na recepção e as peças que forem sendo utilizadas precisam ter o registro de quanto ainda resta de material, para que numa eventual necessidade de compra, solicite-se apenas o complemento.

Um sistema de BI consegue facilmente registrar e apresentar esses dados em tempo real, para que uma IA de tomada de decisão defina quanto se precisa

comprar de um material para uma quantidade solicitada de um modelo de calçado pedida pelo cliente.

Após isso o material será preparado. Geralmente tecidos vem em rolos metrados de acordo com os pedidos do comprador e para se gerar uma maior eficiência no momento do corte, esses tecidos precisam ser enfiados. Enfiar nada mais que dobrar o tecido que vem em rolos para camadas sobrepostas, que aumentam a eficiência e velocidade de corte.

Com a aquisição de máquinas de enfiado automáticas, o processo passa a ter uma qualidade, eficiência e controle muito acima da média, podendo se criar enfiados a uma velocidade muito maior, com menos funcionários e com um controle dimensional e de uso de material excelentes. Além de que, geram dados que serão usados para melhorar o processo ao longo do tempo com a ajuda do Machine Learning.

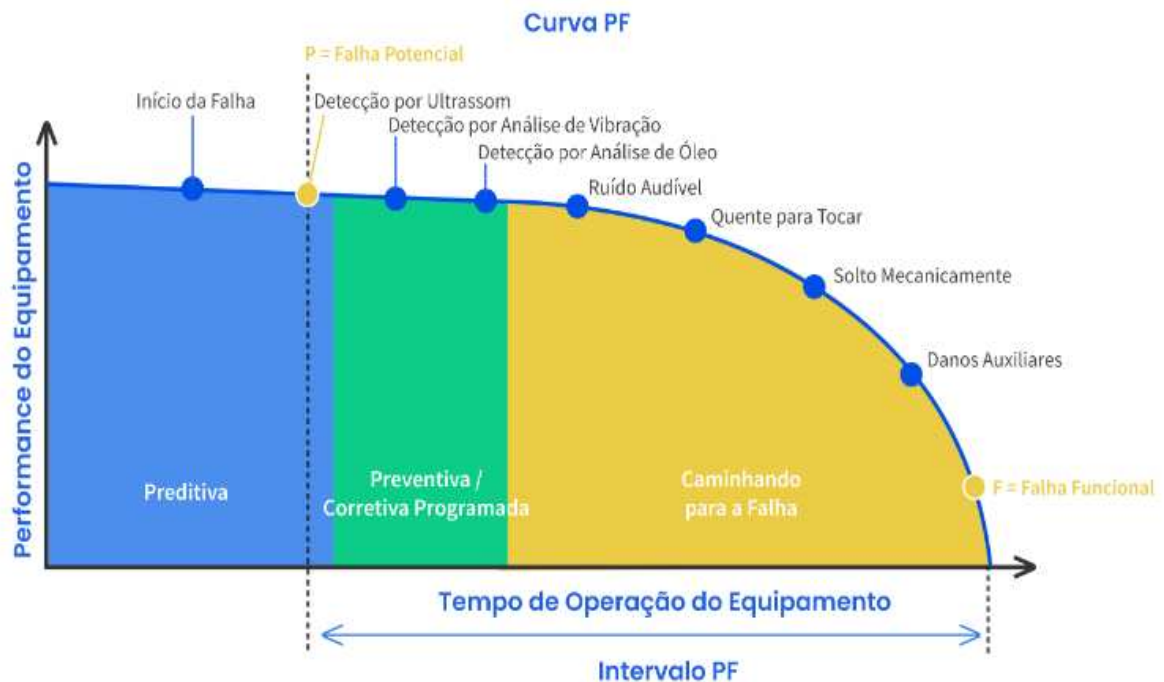
Podem se criar sistemas de monitoramento de produção usando esses equipamentos conectados a uma rede integrada, uma IIoT, que nos mostrará, em tempo real a produtividade, a eficiência e o consumo.

Nesse ponto há algo muito útil para gestores de manutenção, engenheiros mecânicos estão diretamente inseridos nessa gestão. Com equipamentos modernos e conectados, pode o gestor planejar e promover manutenções que se baseiem não só em preventivas, mas também em manutenções preditivas, pois com a ajuda de IA, pode se traçar o comportamento de peças e equipamentos ao longo do tempo.

Como descrevi na Tabela 01, fabricantes de usuários possuem uma ampla gama de bancos de dados com as características mecânicas e seus comportamentos a determinados esforços, isso gera uma riqueza de detalhes do comportamento de equipamentos e seus componentes ao longo de sua utilização. Essa informação pode gerar uma previsão com um grau de assertividade nunca visto antes, o Machine Learning nos auxilia no entendimento desses dados. Podemos criar rotinas de manutenções preventivas e preditivas.

Manutenções preditivas é a ação que se baseia na alteração de parâmetros de condição ou desempenho e é monitorada de forma sistemática (BALDISSARELLI, 2019). A manutenção preditiva também pode ser chamada de manutenção sob condição ou manutenção baseada no estado do equipamento. É baseado na tentativa de determinar o estado futuro de um sistema ou equipamento verificando e analisando as tendências das variáveis do equipamento usando dados coletados ao longo do tempo por uma instrumentação específica.

Figura 8: Curva de Falha Potencial.



Fonte 2: Cyrino, [s.d.]

Como demonstrado anteriormente, o método preditivo indica que a intervenção é necessária com base no estado atual dos recursos. Essa avaliação pode ser realizada por meio de observação, monitoramento ou rastreamento de medidas (BALDISSARELLI, 2019).

Esse acompanhamento pode ser feito de três maneiras diferentes.

a) Essa técnica é muito subjetivo e depende muito das ações de trabalho qualificado do mantenedor, onde por meio dos sentidos, o tato, o olfato, a audição e a visão podem detectar qualquer anormalidade dentro do equipamento.

b) Objetivo: é alcançado ou acompanhado por medições realizadas com instrumentos ou equipamentos especiais. Esses produzem resultados que são arquivados e comparados com o histórico do equipamento, ou parâmetros básicos, que determinam o que a manutenção deve fazer.

c) Contínuo: é uma abordagem usada para rastrear defeitos ou falhas, principalmente em equipamentos de alta responsabilidade. As pessoas geralmente o associam a dispositivos que fazem coisas, como notificar o operador ou técnico quando atingem um valor limite.

Com o desenvolvimento da eletrônica e dos sistemas digitais, a oferta de sistemas de monitoração aumentou significativamente, aumentando assim o leque de aplicações. Como resultado, os custos desses sistemas também diminuiram (PINTO, 2010).

3.3. Corte Automático

Após a confecção dos enfiados de tecidos, eles seguem para as etapas seguintes, que são as etapas de corte, as etapas no plural, pois podem haver mais de uma etapa a depender da complexidade do modelo.

Hoje com os equipamentos de ponta disponíveis, com capacidade de realizar o corte de milhares de dezenas de milhares de peças por dia, com pouquíssima intervenção humana, fica fácil monitorar e controlar o processo.

Hoje a programação de corte nas máquinas automáticas se utilizando funcionários programando com softwares semelhantes ao CAD. Os softwares 2D para o seguimento são bem avançados, mas que ainda passam pela ação humana.

Levando em conta grande base de dados geradas por esses softwares, poderia facilmente ser criada uma ferramenta de ML interligada a uma IA que poderia colher dados, de trajetória, de desempenho de corte de cada material específico, das velocidades e pressões de corte que podem ser usadas, para que essa IA pudesse gradativamente definir, de maneira autônoma, todos os parâmetros envolvidos no corte.

Ela conseguiria prever falhas e percas de fio de navalhas, prever e programar manutenções da própria máquina, adequando sua programação de produção ao número de peças que precisa produzir ao longo das semanas e assim sucessivamente.

Aqui entrariam novamente as ferramentas de manutenção citadas na seção anterior. Podendo se criar diagrama de falhas para os mais diversos componentes e sistemas. Algo muito relevante também seria a criação de métricas para avaliar a eficiência de corte. Isso de terminaria o quanto de material está realmente sendo utilizado e sofrendo agregação de valor.

Em um futuro além também podem ser implantadas soluções de robótica e automação que criam linhas produtivas onde se coloca um tecido em rolos no início e no final saem peças cortadas com perfeição e de altíssima qualidade.

4. CONCLUSÕES

Através das páginas deste trabalho, busca-se avaliar o ganho que conhecimentos de áreas, as vezes pouco relevantes aos nossos olhos como Engenheiros Mecânicos, serão imprescindíveis para nosso desempenho na indústria como um todo.

Soluções de integração de M2M (máquina para máquina) já são realidade, sistemas avançados já tem a capacidade de implementar soluções de maneira autônoma e eficaz. É muito notório que entender esses sistemas e implementá-los em nossos projetos e estudos é crucial. O desenvolvimento de máquinas e equipamentos, para a indústria calçadista, por exemplo, ainda é muito carente de integração e interconexão, o que dificulta muitas vezes a tomada de decisão, pois dados indispensáveis não foram gerados, pela ausência de sensoriamento e criação de bancos de dados.

Em um ambiente de competitividade tão elevado, como o calçadista o é, as empresas precisam se modernizar gerencial e tecnicamente. Automatizando processos e etapas tanto quanto for possível, com produção na casa de milhões de pares ao ano, cada centavo realmente importa.

Desenvolver sistemas ciberfícos é urgente, equipamentos que não só executem, mas que gerem dados para que as equipes (ou IAs) analisem e criem soluções para acelerar os processos e reduzir custos. Sabe-se que os investimentos são necessários quando se quer atingir o sucesso e ter o melhor produto.

Os Engenheiros Mecânicos, munidos com todo o nosso conhecimento base da Mecânica como ramo científico, somos peças importantíssimas, pois sistemas virtuais não conseguem executar tarefas humanoides, por exemplo.

Cabe ao Engenheiro Mecânico ou ao estudante de engenharia, estar atualizado e dominando todas as ferramentas e inovações propostas pela Indústria 4.0.

REFERÊNCIAS

AMINI, M, KOOSHA S., ALI, R. **Machine Learning Model Towards Evaluating Data gathering methods in Manufacturing and Mechanical Engineering**, in: International Journal of Applied Science and Engineering Research. Volume 15, Issue 4 – 2023.

BAHETI, R., Gill, H.: **Cyber-physical systems**. In: The Impact of Control Technology, pp. 161– 166 (2011).

BALDISSARELLI, Luciano; FABRO, Elton. **Manutenção Preditiva na indústria 4.0**. Scientia cum industria, v. 7, n. 2, p. 12-22, 2019.

BISHOP, C. M. **Pattern recognition and machine learning (Information science and statistics)**. Springer-Verlag New York, Inc. 2006.

BISHOP, Robert H. **Mechatronic Systems, Sensors, and Actuators: Fundamentals and Modeling**. CRC. November 19, 2007.

BOLAND, Angela; CHERRY, Gemma; DICKSON, Rumona (Ed.). **Doing a systematic review: A student's guide**. Sage, 2017.

BRAGA, Luísa Miranda. **Manufatura aditiva: uma análise de aplicações atuais**. Projeto de Graduação - PUC-Rio, [S. l.], 2017.

BURGERS, Christian; BRUGMAN, Britta C.; BOEYNAEMS, Amber. **Systematic literature reviews: Four applications for interdisciplinary research**, in: Journal of Pragmatics, v. 145, p. 102-109, 2019.

DALENOGARE, L. S. **A Indústria 4.0 no Brasil: um estudo dos benefícios esperados e tecnologias habilitadoras**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2018.

DUDUKALOV E. V., MUNISTER V. D., ZOLKIN A. L., LOSEV A. N., KNISHOV, A. V. **The use of artificial intelligence and information technology for measurements in mechanical engineering and in process automation systems in Industry 4.0**. J. Phys.: Conf. Ser. 2021.

FALCÃO, Ana Carolina R. A. **Sistematização dos Pilares da Indústria 4.0: Uma Análise Utilizando Revisão Bibliográfica Sistemática**. Orientador: Prof. Dr. Mateus Cecílio Gerolamo. São Carlos. 2019.

FAROOQ, M. U. WASEEM, M. MAZHAR, S. **A Review on Internet of Things (IoT)**. International Journal of Computer Applications (0975 8887). Volume 113 - No. 1, March 2015.

FIGUEIRA, Ricardo Jorge Costa de M. **CAD/CAE/CAM/CIM**. Instituto Politécnico Do Porto - Instituto Superior De Engenharia Do Porto - Departamento De Engenharia Informática - Projeto Licenciatura Em Computadores E Sistemas. 2002/2003.

FISCHER, M., HEIM, D., HOFMANN, A., JANIESCH, C., KLIMA, C., & WINKELMANN, A. (2020). **A taxonomy and archetypes of smart services for smart living**. Electronic Markets, 30(1), p. 131–149, 2020.

GABEL, F. **Some studies in machine learning using the game of checkers - Arthur L. Samuel** (1959). Artificial Intelligence for Games: Seminar. July 10, 2019.

GEISBERGER, E., BROY, M. **agendaCPS: Integrierte Forschungsagenda Cyber-Physical Systems**. Springer, Berlin. 2012.

GUO, L., YANG, Z., YU, Chi-Hua., BUEHLER, M. J. **Artificial intelligence and machine learning in design of mechanical materials for Materials Horizons Mater. Horiz.**, p. 1153–1172, 2021.

HAMROL, A., GAWLIK, J., SŁADEK J. **Mechanical Engineering In Industry 4.0**. Poznan Univeristy of Technology, Poland - Cracow University of Technology, Poland. Management and Production Engineering Review - Volume 10. Number 3. September 2019, p. 14–28. 2019.

IŽOL, Peter a Michal FABIAN. **CAD/CAM systémy v technologickom procese obrábania**. Vyd. 1. Košice: Technická univerzita v Košiciach, Strojnícka fakulta, 2006. ISBN 80-807-3489-5.

JANIESCH, C., ZSCHECH, P., HEINRICH, K. **Machine learning and deep learning**. Electron Markets 31, p. 685–695. 2021.

JESCHKE, S. BRECHER, C. Houbing SONG, H. RAWAT, D. B. (Editors). **Industrial Internet of Things: Cybermanufacturing Systems**. Springer, 2017.

KAMM, Lawrence J. **Understanding electro-mechanical engineering: an introduction to mechatronics. Includes bibliographical references and index**. ISBN 0-7803-1031-4. TJI63.12.K35. 1995.

KRÁL', Ján. **Príprava výroby s využitím CAx technológií**. Vyd. 1. Košice: Technická univerzita v Košiciach, Strojnícka fakulta, 2010.

KURIC, I., MATUSZEK, J., DEBNÁR, R. **Computer Aided Process Planning in Machinery Industry**. Politechnika Lodzka, Bielsko Biala, 1999.

KURIC, Ivan. **Počítačom podporované systémy v strojárstve**. Vyd. 1 Žilina: EDIS, 2002.

MARTINS, Juliana. **Desenvolvimento de um sistema para monitoramento e controle de máquinas CNC aplicando conceitos da INDÚSTRIA 4.0**. Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação Mestrado em Engenharia e Ciências Mecânicas da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia e Ciências Mecânicas. Joinville. 2019.

PANNAGA, N. GANESH, N. GUPTA, R. **Mechatronics - An Introduction to Mechatronics**. International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT). Vol. 2 Issue 8, August, 2013.

PINTO, Alan Kardec, XAVIER, Julio Aquino Nascif. **Manutenção função estratégica**. qualitymark editora, 2010.

PORSANI, Rodolfo N. SILVA, Bruno B. HELLMEISTER, Luiz Antonio V. **Revisão teórica da história da manufatura aditiva e das propriedades dos principais insumos e estruturas de preenchimento nas impressoras 3D FDM OPEN MATERIAL**. 2º Congresso Internacional - IIV Workshop – DM Design e Materiais. 2017.

RAGULSKIS, M. JIANG, H. QUAN, Q. FEDARAVICIUS, A. XIE, G. **Mechatronics and Mechanical Engineering in Cyber-Physical Systems**. Advances in Mechanical Engineering. Juny, 2014.

RODRIGUES, J. **Business Intelligence: entenda o que é e como o BI agiliza sua tomada de decisão**. resultadosdigitais.com.br, 2022. Disponível em: <https://resultadosdigitais.com.br/marketing/business-intelligence-bi/>. Acesso em: 14/11/2023.

SADÍLEK, Marek. **CAM systémy v obrábění I**. 2., dopl. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2010.

SCHWAB, K. **A Quarta Revolução Industrial**. Edipro. São Paulo. 2016.

SETIYO, M. PURNOMO, T. YUVENDA, D. BIDDINIKA, M. CHE, S. NOR, A. SAMUEL, D. KOLAKOTI, A. CALAM, A. **Industry 4.0: Challenges of Mechanical Engineering for Society and Industry**. P. 3-6. 2021.

SHRESTHA, Y. R., KRISHNA, V., & VON KROGH, G. **Augmenting organizational decision-making with deep learning algorithms: Principles, promises, and challenges**. *Journal of Business Research*, 123, p. 588–603. 2021.

SILVA, Antônio L. A. FEITOSA, A. D. ALBUQUERQUE, R. M. de, XAVIER, A da S. **Manufatura Aditiva: Caracterização e Comparação com os Processos de Produção Existentes**. XXXVIII ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO - “A Engenharia de Produção e suas contribuições para o desenvolvimento do Brasil”. Maceió, Alagoas, Brasil, 16 a 19 de outubro de 2018.

SILVEIRA, Luiz Antonio Perotti da. **A importância da ferramenta CAE para pesquisa e desenvolvimento de produtos**. 2021. 21 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Unopar, Ponta Grossa, 2021.

TOMIC, D. **The Benefits and Challenges with Implementation of Internet of Things (IoT) in Manufacturing Industry**. Degree project in technology and economics, second cycle, 30 credits. STOCKHOLM, SWEDEN 2017.

NOVÁK, D. **Možnosti využití CAx systémů v průmyslové praxi [online]**. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. 2016.

VOLPATO, N.; CARVALHO, J. **Introdução à manufatura aditiva ou impressão 3D**. *In: MUNHOZ, A. L. J. et al. Manufatura Aditiva: Tecnologias e aplicações da impressão 3D*. 1.ed. São Paulo: Blucher, p. 15-29. 2018.

JAŁOWIECKI, Andrzej, KŁUSEK, Paweł, SKARKA, Wojciech. **The Methods of Knowledge Acquisition in the Product Lifecycle for a Generative Model's Creation Process, Procedia Manufacturing**. Volume 11, 2017, Pages 2219-2226, 2017.

PENHAKI, Juliana de R. **SOFT SKILLS NA INDÚSTRIA 4.0**. Programa de Pós-Graduação em Tecnologia e Sociedade, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Área de Concentração: Tecnologia e Sociedade. Curitiba. 2019.

WIESNER, S., Hauge, J.B., Thoben, KD. (2015). **Challenges for Requirements Engineering of Cyber-Physical Systems in Distributed Environments**. In: Umeda, S., Nakano, M., Mizuyama, H., Hibino, H., Kiritsis, D., von Cieminski, G. (eds) *Advances in Production Management Systems: Innovative Production Management Towards Sustainable Growth*. APMS 2015. IFIP Advances in Information and Communication Technology, vol 460. Springer, Cham. 2015.