

Definição e Aplicação de um Modelo de Maturidade para Manufatura Inteligente, sob a ótica da Indústria 4.0

Felipe Butelli Lunelli e Ivandro Cecconello

Resumo

A Manufatura Inteligente pode ser considerada uma das principais estratégias para as empresas se tornarem ainda mais competitivas dentro do cenário industrial atual. Diante de uma série de tecnologias lançadas no mundo industrial por causa da nova revolução industrial, a revolução 4.0, fica clara a importância de que uma estratégia de implantação para novas tecnologias à Manufatura deve ser estabelecida. O trabalho possui o objetivo de apresentar um modelo de maturidade adaptado, que utiliza como base de avaliação as tecnologias da Indústria 4.0 para implementação de uma Manufatura Inteligente. Complementando o objetivo principal, foi utilizado o modelo desenvolvido para realizar um diagnóstico em uma empresa de manufatura do segmento metalúrgico. O método utilizado foi a definição de um modelo de maturidade, adaptado conforme novos conceitos tecnológicos, medindo assim cada tecnologia habilitadora para uma Manufatura Inteligente. Os resultados obtidos possibilitaram demonstrar um diagnóstico da Manufatura, no conceito de integração vertical, no qual foi possível perceber a dificuldade estratégica da empresa avaliada em relação à Manufatura Inteligente. Os resultados apresentados possibilitarão a empresa construir o caminho e direcionar seus esforços, em relação aos investimentos em tecnologias rumo a uma Manufatura Inteligente.

Palavras-chave

Manufatura Inteligente; Indústria 4.0; Modelo de Maturidade; Tecnologias; Integração Vertical.

Definition and Application of a Maturity Model for Smart Manufacturing, from the perspective of Industry 4.0.

Abstract

Intelligent manufacturing can be considered one of the key strategies for companies to become even more competitive within today's industry landscape. Faced with a series of technologies launched in the industrial world because of the new industrial revolution, Revolution 4.0, it is clear that a deployment strategy for new manufacturing technologies must be established. The work has the objective of presenting an adapted maturity model, which uses as a basis of evaluation the Industry 4.0 technologies to implement an Intelligent Manufacturing. Complementing the main objective, we used the model developed to perform a diagnosis in a manufacturing company of the metallurgical segment. The method used was the definition of a maturity model, adapted according to new technological concepts, thus measuring each enabling technology for an Intelligent Manufacturing. The obtained results allowed to demonstrate a diagnosis of Manufacturing, in the concept of vertical integration, in which it was possible to realize the strategic difficulty of the evaluated company in relation to Intelligent Manufacturing. The results presented will enable the company to pave the way and direct its efforts on technology investments towards Smart Manufacturing.

Keywords

Smart manufacturing; Industry 4.0; Maturity Model; Technologies; Vertical Integration.

I. INTRODUÇÃO

A mecanização a vapor, que fez parte da primeira revolução industrial; a eletricidade, auxiliando a produção em massa na segunda revolução; a eletrônica, juntamente com a tecnologia da informação, maximizando a automação fazendo parte da terceira revolução [3] e, atualmente, a quarta revolução, com tecnologias como Internet Industrial das Coisas, Manufatura Inteligente e Manufatura baseada na Nuvem são, em partes, as portas de entrada para uma Fábrica Inteligente e requisitos da

nova revolução industrial, a Indústria 4.0 [1]. Nesta quarta revolução industrial surge uma série de tecnologias avançadas, como a Internet das Coisas (IOT), a qual é considerada um dos pilares para uma integração entre objetos, humanos, máquinas inteligentes e processos de fabricação, criando assim uma forma de inteligência para o negócio [2].

Observa-se que dentro de tantas tecnologias ofertadas, as empresas ainda possuem uma grande indecisão sobre o recurso financeiro exigido [2] e aplicado de maneira correta. Apesar da existência de um conhecimento inicial sobre a

Indústria 4.0, as empresas apresentam uma dificuldade de começar a implantação deste conceito [5]. A interação de produtos inteligentes juntamente com os sistemas de manufatura, através das novas tecnologias, propõe uma base sólida para uma nova era dentro da manufatura inserida na Indústria 4.0, as chamadas Fábricas Inteligentes [4].

As fábricas inteligentes proporcionam uma série de vantagens competitivas como: aumento da eficiência dos processos de manufatura, otimização dos processos, aumento da qualidade e redução de desperdícios e custos, porém percebe-se que existe uma dificuldade encontrada pelas empresas para implementar o conceito de Manufatura Inteligente [6].

Para que as empresas possam manter seus resultados positivos e sólidos no mercado, elas devem adotar estratégias para implementar tecnologias a fim de suas fábricas se tornarem inteligentes [6]. Este novo modelo de negócio, de fábricas inteligentes, ainda é recente para o setor de manufatura e, diante de toda esta mudança do conceito de manufatura industrial, é estratégico adotar um método para direcionar a implementação da I4.0 e, conseqüentemente, Manufaturas Inteligentes [7].

Muitas empresas falham ao não avaliarem sua competência para a implantação da I4.0 e, conseqüentemente, não conseguem implementar medidas estratégicas de forma coordenada [2], portanto, a adoção de modelos de maturidade e avaliação desta pode facilitar o direcionamento para uma transformação [9] rumo à Fábrica e Manufatura Inteligente.

O objetivo deste artigo é apresentar um modelo de maturidade adaptado, que utiliza como base as tecnologias da Indústria 4.0 para implementação de uma Manufatura Inteligente. Em complemento a este objetivo principal, foi utilizado o modelo desenvolvido para realizar um diagnóstico em uma empresa de manufatura do segmento metalúrgico.

II. REFERENCIAL TEÓRICO

A. Indústria 4.0

O termo Indústria 4.0 apareceu pela primeira vez na Alemanha, através de uma iniciativa de governantes alemães dentro de um plano de ação para inovação e tecnologia chamado *High-Tech Strategy 2020*. O objetivo era inserir novas tecnologias na indústria para aumentar a competitividade e produtividade da economia do país [10].

A indústria do futuro apresenta grandes ganhos na flexibilidade e produtividade, possibilitando a indústria manufaturar produtos customizados ou individualizados com custo de produções em massa [11], de forma ecológica e com alta qualidade [12].

Os objetivos da Indústria 4.0 possuem três características importantes: integração vertical, integração horizontal e integração digital de ponta a ponta [10]. A integração vertical consiste em fábricas conectadas em todos os níveis, desde os sinais de atuadores e sensores até o nível do Sistema Integrado de Gestão Empresarial (ERP), permitindo neste caso que as fábricas possam se reconfigurar de acordo com as situações [12], desta forma gerando assim uma integração entre os produtos e as máquinas [13].

A integração horizontal consiste em uma rede de informações entre a manufatura e toda sua cadeia de valor

transmitindo e gerando informações [12] em tempo real entre produto e processo, otimizando seu processo de produção e recursos [7]. A integração digital de ponta a ponta consiste em uma série de cadeias de atividades relacionadas, pois o processo de criação de valor é centrado no produto. E através da integração é possível que um modelo de produto contínuo e consistente seja utilizado em todos os processos, sendo assim, o efeito do *design* do produto pode ser previsto na produção e no serviço. Observa-se que esta integração de ponta a ponta permitirá que os dados dos produtos inteligentes, gerados e processados nos sistemas cibernéticos, podem assim orientar todo processo de fabricação de forma autônoma e em tempo real [11], possibilitando em tempo reduzido, a criação de um sistema de *design* puxado [14].

Percebe-se que a Indústria 4.0 necessita integrar verticalmente os subsistemas hierárquicos para possibilitar sistemas de produção reconfiguráveis e flexíveis, além de construir uma integração horizontal através das cadeias de valor, juntamente com a integração digital de ponta a ponta, devido à necessidade dos clientes por lotes pequenos ou unitários de produtos personalizados [12].

A integração entre o mundo virtual e o mundo real, também chamada de Sistemas Ciber-Físicos, apresenta uma grande oportunidade para implementação das Fábricas Inteligentes [15].

B. Manufatura Inteligente

Este novo modelo de negócio ainda é muito recente para o setor de manufatura diante de todas estas mudanças tecnológicas. Porém, uma Manufatura Inteligente pode ser considerada como a integração das máquinas, por meio de sensores, tecnologias para comunicação, modelagem de dados, controle, simulação e engenharia preditiva [16]. Dada como uma característica essencial para implantação da Indústria 4.0, a Fábrica Inteligente produz de forma totalmente eficiente e com menos interrupções que as atuais, fazendo com que as pessoas e máquinas se comuniquem em total harmonia [3]. Percebe-se então, que elas possibilitam uma produção flexível e adaptável, permitindo uma facilidade para gerenciar os problemas oriundos da produção, os quais possuem uma característica de mudança rápida em um mundo produtivo cada vez mais complexo [16].

Alta flexibilidade e capacidade de reconfigurar-se, são os objetivos principais de uma Fábrica Inteligente [12]. Dessa forma é possível atender os requisitos individuais dos clientes, como por exemplo, a customização e fabricação de lote unitário de uma forma totalmente rentável para as empresas [10]. As principais características técnicas das Fábricas Inteligentes são: recursos variados, roteamento dinâmico, conexões abrangentes, convergência profunda, auto-organização e Big-Data [16]. As Manufaturas Inteligentes possuem um sistema para conectar o mundo físico da manufatura com o mundo virtual, chamado de *Cyber-Physical Systems* (CPS) [11].

A Figura 1 representa o conceito geral de uma Manufatura Inteligente, onde é possível verificar duas camadas que são conectadas por uma interface: uma camada com os ativos e suas inteligências locais e a outra camada o espaço cyber com a inteligência do sistema [16].

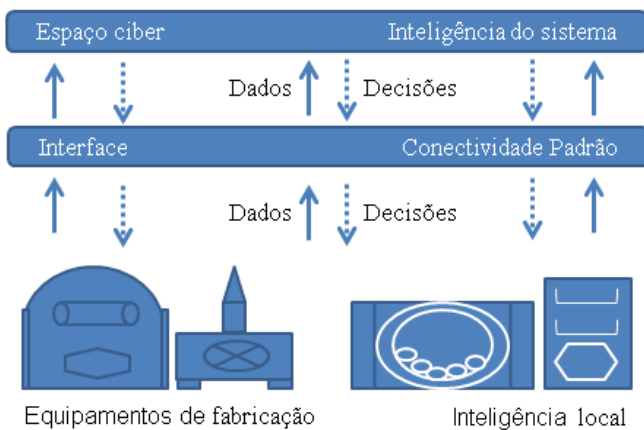


Figura 1 – Conceito geral de uma Fábrica Inteligente [16].

C. Tecnologias para Indústria 4.0 – Manufaturas Inteligentes

As tecnologias propostas para Indústria 4.0 podem ser separadas em dois eixos chamados de: tecnologias de ponta ou emergentes e tecnologias de base [18]. Na Figura 2 pode-se observar que as tecnologias de ponta apresentam quatro dimensões: cadeia de fornecedores inteligentes, trabalho inteligente, fábricas inteligentes e produtos inteligentes, que se relacionam diretamente às demandas operacionais e de mercado [18]. O eixo das tecnologias de base é o que fornece a conexão e a inteligência para as tecnologias de ponta, formando uma integração entre os dois eixos tecnológicos que são formadas pelas tecnologias: Big Data, IOT, Nuvem [18] [19] CPS e sensores inteligentes [19].

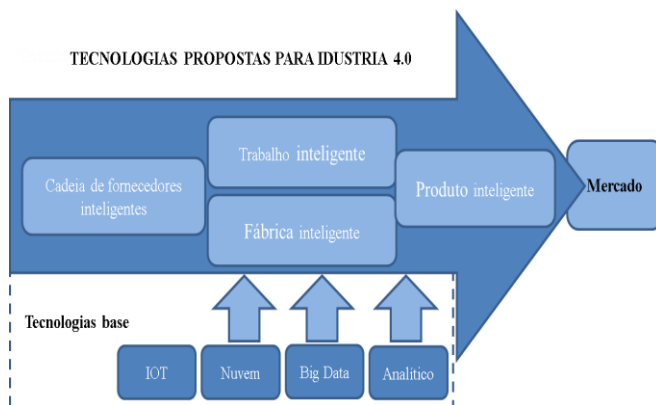


Figura 2 – Estrutura teórica das tecnologias da I4.0 [18].

A IOT, os Sistemas Cyber-físicos, a Computação na Nuvem, o *Big-Data*, a Manufatura Aditiva, os Sensores, A Economia de Energia e o Holograma são consideradas tecnologias chaves para implementação de Manufatura Inteligente [19]. As tecnologias como Manufatura Aditiva, Economia de Energia e Holograma necessitam que as tecnologias de base, observadas na Figura 2, estejam implementadas e desenvolvidas para iniciarem suas aplicações [19]. A Boston Consulting Group (BCG) apresenta nove tecnologias consideradas pilares para Indústria 4.0, as quais são: Robôs Autônomos, Simulação, Integração Horizontal e Vertical, IOT, Segurança Cyber, Nuvem, Manufatura Aditiva, Realidade Aumentada, Big-Data e Analítico [11].

Os Sistemas de Manufatura Inteligente (IMS) transformam a manufatura em um modelo de última geração, fornecendo serviços colaborativos, flexíveis, personalizados e

reconfiguráveis, possibilitando uma conexão [11].

A partir de uma pesquisa realizada nas plataformas Scopus, Web of Science, Taylor & Francis e Emerald utilizando os descritores: “*smart manufacturing*” e “*smart factory*” e “*industry 4.0*” e “*technologies*”, os artigos encontrados foram selecionados observando como orientação inicial o critério dos mais citados e após selecionados pelo autor deste trabalho. O Apêndice B apresenta um comparativo das tecnologias mencionadas nos artigos, selecionados pelo autor, que servem como chave para implantação da Indústria 4.0 e Manufaturas Inteligentes.

D. Internet das Coisas- IOT.

A Internet das Coisas é considerada um pilar tecnológico para as Manufaturas Inteligentes. Pode ser definida como a conexão de sensores e atuadores ao processamento local e à Internet, além de uma conexão com outras redes industriais para geração de valor independente [26]. A IOT é um conjunto de objetos físicos conectados em rede, Sistemas Cyber-Físicos, tecnologia da informação associadas e plataformas computacionais em nuvem. Permitem acesso em tempo real coletando, analisando e trocando informações sobre os processos de forma inteligente, garantindo melhor utilização dos recursos em todo ambiente industrial [29].

Observa-se que a IOT apresenta uma arquitetura dividida em quatro camadas: camada de detecção, a camada de rede, camada serviço e a camada interface [27]. A camada detecção utiliza tecnologias como RFID, sensores, atuadores, Bluetooth e Wi-Fi para coletar informações do ambiente físico [28]. Os dados coletados são transferidos para camada de rede através da internet, WLAN, WSN e intranet [28]. A camada de serviço atua após uma limpeza dos dados aplicando a lógica do negócio, obtendo conhecimento por mineração de dados, para que na camada interface, por meio de um centro remoto de dados, os resultados possam ser apresentados [27].

A Figura 3 apresenta uma arquitetura de soluções IOT em quatro estágios, onde as coisas estão conectadas com ou sem fio, em sensores e atuadores, capturando e controlando as coisas. Os sensores estão conectados a sistemas de aquisição de dados no estágio 2, para na sequência acrescentar sistemas de tecnologia da informação no estágio 3 e por fim, no estágio 4, conectar ao centro de dados remoto conhecido como nuvem [26].

E. Robôs Industriais e Colaborativos

A utilização de robôs na indústria não é um conceito recente para a Indústria 4.0 e eles são considerados um pilar importante para uma Manufatura Inteligente, pois possibilita aos processos de manufatura, automatizar e coordenar tarefas gerando uma redução nos custos e maior produtividade [30].

As Manufaturas Inteligentes são apoiadas por uma geração de robotização de baixo custo, incrementando a automação de todos os processos na fábrica [16]. Também chamados de *CoBots*, os robôs colaborativos são utilizados para realizar atividades repetitivas e não ergonômicas. Eles são desenvolvidos para interagir com operadores humanos através de sistemas de segurança confiáveis e tecnologias intuitivas de interação [31]. Nas indústrias, eles possibilitam eliminar operações repetitivas humanas, gerando maior produtividade, maior flexibilidade, menor custo e incremento de operações mais seguras [32].

The 4 Stage IoT Solutions Architecture

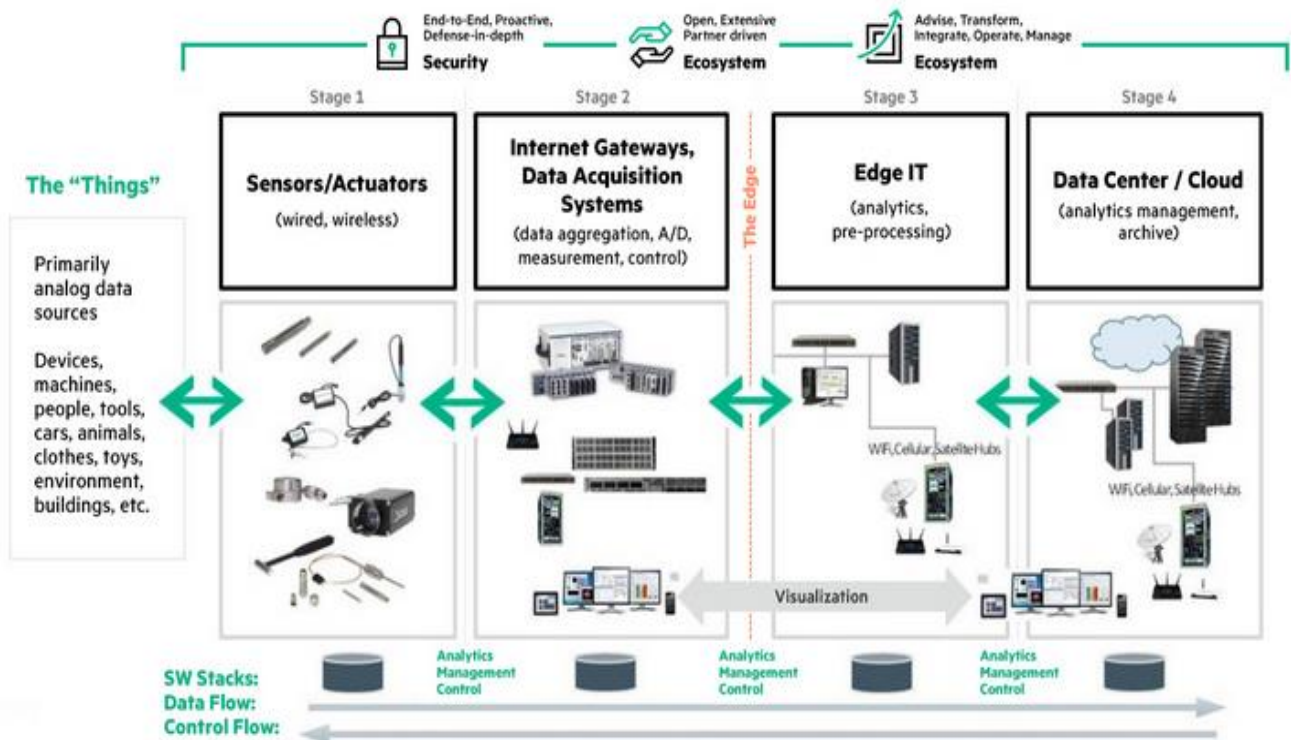


Figura 3 – Arquitetura de soluções IOT de quatro estágios [28].

F. Big-Data e Analítico

O termo Big-Data consiste em um conjunto de ferramentas que possuem capacidade de lidar com expressiva quantidade de dados, identificando tendências e padrões e coletar resultados inestimáveis [33]. As Manufaturas Inteligentes hoje possuem uma grande quantidade de sensores coletando dados e informações que são processados e analisados pelo Big-Data, o qual proporciona às operações de manufatura, oportunidades para aprimorarem seu desempenho e otimizar os recursos da fábrica [34].

Observa-se que um conceito importante para o Big Data são as características chamadas de 5V's, que são volume, velocidade, variedade, veracidade [35] e valor [36]. O volume é a quantidade de dados que as empresas coletam e utilizam para apoiar suas decisões em todas as operações [35]. A velocidade refere-se rapidez com que os dados são criados, analisados e processados de inúmeras fontes, e, além disso, um processo periódico em que os dados são atualizados constantemente também chamados de extração, transformação e carga [37]. A variedade é a habilidade que o Big-Data tem para gerenciar dados de diferentes estruturas e formas, por exemplo, dados de categoria estruturados, semiestruturados e não estruturados [38].

A veracidade é a confiabilidade dos dados, ou seja, a precisão que os dados possuem [39]. Por fim, o valor conceitua-se em transformar os dados diferentes em valor econômico para a empresa, identificando o que realmente possuem e transformar em dados para análise [40].

G. Simulação

A Simulação da manufatura resume-se em um conjunto de ferramentas, técnicas e *softwares* que possibilitam modelar, adaptar e realizar simulações dos sistemas de produção reais [43]. Observa-se que a simulação utiliza os dados em tempo real que espelham o mundo físico e transformam em um modelo virtual, possibilitando simular os processos e produtos da manufatura. Ela pode atuar gerando cronogramas de operações *on-line* e modelos de simulações usados para interferir e alterar os sistemas de produção atual [22]. A simulação de processo apoia o planejamento e produção da fábrica e melhora seus indicadores de eficiência global. As simulações podem ser utilizadas para planejamento de novas linhas e instalações, implementação inicial e ajustes das operações [22].

A Figura 4 [42] apresenta os objetivos da simulação de processo que se concentram na melhoria da eficiência global dos processos de manufatura, tendo como principal resultado a maximização do lucro.

Os sistemas CPS, que criam uma conexão entre o mundo real e o cibernético, fazem com que máquinas realizem tarefas e enviem informações para um *software*, que é a evolução da simulação, chamada de *Digital Twin*. Sendo assim, é um modelo de simulação do sistema produtivo representado fisicamente, conceituando a inteligência do sistema, otimizando os processos na manufatura [51]. O *Digital Twin* apresenta as soluções para um sistema de manufatura real permitindo otimizar os processos produtivos, caracterizando-o com um sistema inteligente que recebe inúmeras

informações digitais do processo e as disponibiliza através de modelos de dados e simulações [52].

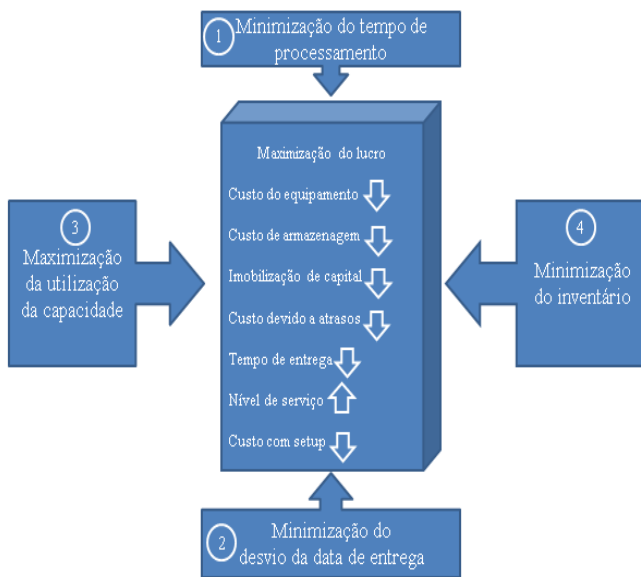


Figura 4 – Objetivos da simulação de processo [42].

H. Computação na nuvem

O armazenamento, a computação e o *software* baseados em nuvem, são definições que conceituam o termo nuvem. Terceirizar o armazenamento interno pela nuvem traz uma redução de custos administrativos e aquisição de *softwares*. Já a terceirização do *software* em nuvem traz objetivamente uma redução dos licenciamentos e a computação em nuvem abre uma porta para as empresas explorarem novos conhecimentos de análise de dados. [11]

Devido à grande quantidade de dados necessários para analisar, a nuvem é uma excelente ferramenta para auxiliar a processar a enorme quantidade de dados, visto que os computadores tradicionais possuem dificuldade em processar esta extensa massa de dados [44]. A nuvem serve como uma rede de servidor virtualizado com alta capacidade de computação e armazenamento *online*, dando suporte ao Big-Data [12].

A nuvem é conhecida como um serviço de armazenagem *online* que oferece interface com aplicativos que não exigem instalação [44], sendo assim um sistema onde aplicativos, dados e programas são armazenados em um server virtual e podem ser acessados remotamente de forma online [21].

I. Manufatura Aditiva

Inicialmente muito utilizada somente para protótipos, tinha como objetivo fornecer o produto fisicamente, de forma rápida para auxiliar o processo de desenvolvimento de produto das empresas [45]. A Manufatura Aditiva (MA) é uma tecnologia que pode minimizar os custos e o tempo de fabricação de produtos [19].

Impressão 3D, como também é chamada, consiste em uma tecnologia na qual as peças são fabricadas através da fusão das camadas finas, empilhando camadas de material plástico ou metal. MA permite uma nova abordagem que é a manufatura do *design* permitindo aos engenheiros de produto, uma liberdade de criação e projetos sem restrições geométricas ou de fabricação [34].

Através de um modelo matemático 3D, um produto físico

pode ser impresso sem a utilização de nenhuma ferramenta de corte, facilitando e eliminando a dificuldade de produzir peças com geometrias complexas [46]. A Manufatura Aditiva possibilita às fábricas oferecerem produtos com conceito de customização em massa aos clientes finais e, o conceito de produção *Just-In-Time* da manufatura, tende a tornar-se um modelo *Just-In-Production*, no qual os produtos são impressos de acordo com seu pedido [34]. A Figura 5 apresenta as oportunidades e limitações tecnológicas da Manufatura Aditiva.

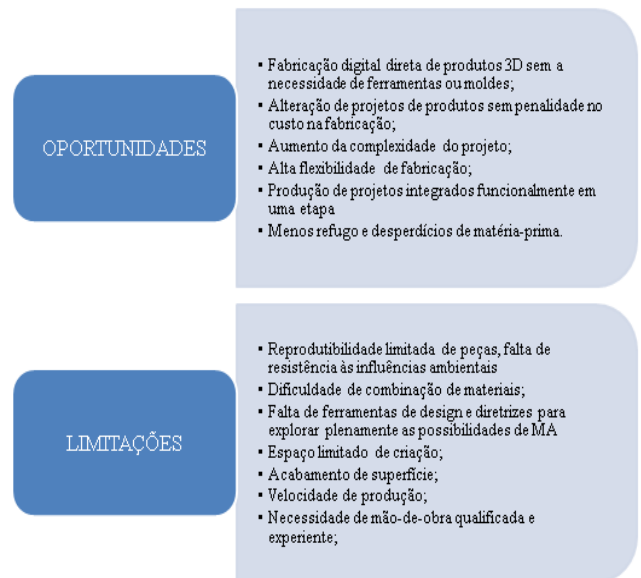


Figura 5 – Oportunidades e limitações tecnológicas da Manufatura Aditiva – Adaptado de [45].

J. Sistemas Ciber-Físicos (CPS)

Os CPS são uma combinação integrada, entre a computação e os processos físicos da manufatura, criando um sistema capaz de reagir a qualquer informação gerada instantaneamente [21]. Suas principais características são o acesso facilitado à informação, a manutenção preventiva, a tomada de decisão e as rotinas de otimização [21].

De acordo com [47] definiu-se uma arquitetura chamada de 5C para orientar a implementação de um sistema CPS, conforme apresentado na Figura 6. No nível (1), conexão inteligente, é a aquisição de dados das máquinas e componentes através de sensores ou de sistemas de manufatura (ERP, MES, SCM) [47]. O nível (2), conversão dos dados para informações, é nível onde se pode observar as máquinas com autoconsciência [47].

O nível (3), ciber, atua como ponto central de informações do modelo que recebe informações de todas as máquinas, forma uma rede de máquinas e por meio da grande quantidade de informações coletadas, realiza uma análise. O nível (4), cognição, é onde um profundo conhecimento do sistema controlado é apresentado para apoiar a tomada de decisões e assim, priorizar as demandas com o objetivo de otimizar o processo. Por fim, o nível (5), configuração, consiste no retorno das informações do ciberespaço para o espaço físico, executando a autoconfiguração, o ajuste e a otimização para aplicar decisões corretivas e preventivas ao processo de manufatura [47].

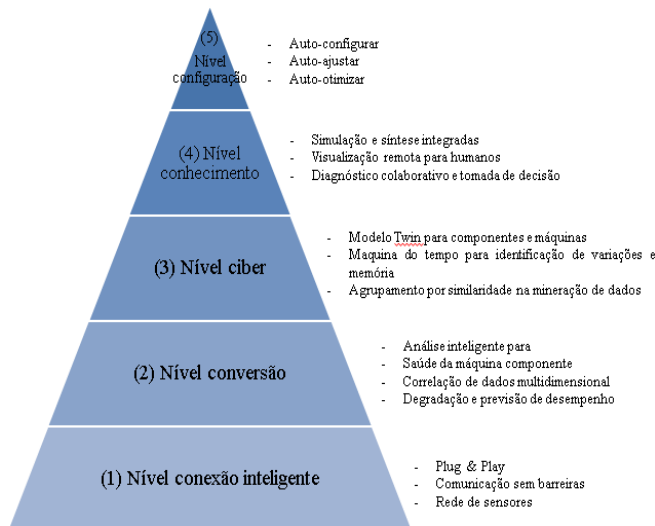


Figura 6 – Arquitetura 5C para implementação de um Sistema Ciber-físico – Adaptado de [47].

K. Realidade virtual e Aumentada

A realidade virtual e aumentada pode ser aplicada em diferentes processos na manufatura. Ela se caracteriza basicamente por uma tecnologia que une uma cena real vista pelo usuário e uma cena virtual gerada por computador, incrementando o número de informações [48]. Esta tecnologia é aplicada dentro das seguintes áreas [49]:

- Instalações e montagens na manufatura;
- Manutenção e assistência remota;
- Treinamento para novos colaboradores;
- Controle de qualidade;
- *Design* e prototipagem;
- Gerenciamento de segurança;
- Logística e gerenciamento de estoques.

As tecnologias disponíveis de visualização para realidade aumentada são: visores montados na cabeça (*headmounted displays* - HMDs), dispositivos portáteis (*handheld devices* - HHDs) e telas estáticas ou projetores. Atualmente a tecnologia mais utilizada nas indústrias são os visores montados na cabeça, pois possibilitam ao usuário visualizar o mundo real em conjunto com informações virtuais, mas com as mãos livres [50].

L. Gerenciamento e Melhoria da Eficiência Energética

Para as Manufaturas Inteligentes serem competitivas na I4.0, a redução de custos da manufatura é uma estratégia crucial. Através do gerenciamento de energia, pode-se encontrar uma maneira de conseguir esta redução [56]. A revolução 4.0 proporciona uma redução expressiva nos custos de manufatura, a partir da implementação das tecnologias descritas até então, porém uma estratégia que vem sendo adotada para viabilizar essa redução também é elaborando um processo de Gerenciamento e Melhoria da Eficiência Energética da fábrica [53]. Observa-se que as informações e dados *online* referente ao consumo de energia pelas máquinas, são premissas importantes para minimizar os desperdícios das Manufaturas Inteligentes [54].

Em uma Manufatura Inteligente, o monitoramento de eficiência energética apresenta as seguintes características [55]:

- Configurar e atingir metas de desempenho de energia;

- Avaliar a fábrica e comparar com outras;
- Estabelecer uma linha de base de energia e prever economias a partir dela;
- Visualizar aumentos não esperados de consumo;
- Conhecer o impacto de cada equipamento ou área da fábrica;
- Monitorar o impacto das medidas de eficiência.
- Verificar seu gasto de energia;
- Enviar alertas de consumo excedido;
- Prever consumo de energia para diferentes perfis operacionais do negócio;
- Mitigar a demanda de pico, economizando custos com cobranças por capacidade de rede.

Um sistema de medição inteligente (IOT) para energia é proposto por [54] e apresenta as seguintes características:

- Monitoramento em inúmeros pontos na fábrica;
- Medições contínuas;
- Leitura automatizada de medidores;
- Múltiplos parâmetros mensurados;
- Medição do consumo de tempo de uso em períodos de ponta e fora de ponta;
- Habilidades computacionais;
- Conexão ao sistema de gerenciamento de energia;
- Gerenciamento automatizado e remoto.

M. Produtos inteligentes

Os produtos inteligentes são conceituados por possuírem algum grau de tecnologia da informação e comunicação embarcado, o que permite algum nível de gerenciamento de dados, informações e processos [20]. A classificação das habilidades dos produtos inteligentes é conceituada como inteligência “*off-board*” no qual o produto não possui capacidade de tomar decisões, por exemplo, RFID e, “*on-board*”, no qual o produto pode tomar decisões e possuir capacidade de interagir com o ambiente e o usuário [17].

O produto inteligente possui as seguintes definições: única identidade, armazenamento e retenção dados, comunicação de forma efetiva com o ambiente e usuário e tomada decisões relevantes para o seu próprio destino [17].

III. MÉTODO

Este trabalho objetiva apresentar um modelo de maturidade para Manufatura Inteligente, através da avaliação das tecnologias chaves para manufatura. Para isso foi realizado uma pesquisa de autores conforme Apêndice B, descrita no referencial teórico. A partir dos descritores identificados, utilizando como orientação os artigos mais citados em cada plataforma, foram selecionados dez artigos pelo autor e excluídos os demais por não conectarem diretamente com o tema abordado. Para avaliar e ranquear a maturidade, este artigo baseou-se no modelo proposto por [58], [47], [20] e [41]. Para conceituar os níveis de maturidade, foi utilizada a escala proposta por [7].

A Tabela 2 demonstra um comparativo das tecnologias destacadas e propostas para I4.0 por [58] e as tecnologias propostas por este trabalho. Pode-se assim observar que o modelo proposto substitui as tecnologias Integração Horizontal e Vertical que é um conceito que utiliza as tecnologias para realizarem esta integração, e Segurança Digital por: Gerenciamento e Melhoria da Eficiência Energética e Produtos Inteligentes, os quais fazem parte

também do conceito de Integração Vertical e Horizontal.

Tabela 2.
Comparativo das tecnologias entre modelos.

Modelo de [58] para tecnologias da I4.0	Modelo proposto para Manufatura Inteligente
Sistemas Ciber-Físicos	Sistemas Ciber-Físicos
Integração Horizontal e Vertical	Robôs Industriais e Colaborativos
IOT	IOT
Robôs Autônomos	Produtos Inteligentes
Simulação	Simulação
Big-Data	Big-data e Analítico
Computação na Nuvem	Computação na Nuvem
Manufatura Aditiva	Manufatura Aditiva
Segurança Digital	Gerenciamento e Melhoria da Eficiência Energética
Realidade Aumentada	Realidade Virtual e Aumentada

O modelo [58] recebeu uma alteração para o pilar tecnológico de Sistemas Ciber-Físicos adaptada de [47], alterando as definições para o ranqueamento desta tecnologia.

A Tabela 3 apresenta o quadro do modelo proposto com as tecnologias para implementação de uma Manufatura Inteligente, com os respectivos níveis de maturidade.

Tabela 3.
Modelo de maturidade para Manufatura Inteligente.

Tecnologias	Inexistente	Realizado	Gerenciado	Estabelecido	Previsível	Otimizado
Internet das Coisas	0	1	2	3	4	5
Robôs Industriais e Colaborativos	0	1	2	3	4	5
Big-data e Analítico	0	1	2	3	4	5
Simulação	0	1	2	3	4	5
Computação na Nuvem	0	1	2	3	4	5
Manufatura Aditiva	0	1	2	3	4	5
Sistemas Ciber-Físicos	0	1	2	3	4	5
Realidade Virtual e Aumentada	0	1	2	3	4	5
Gerenciamento e Melhoria da Eficiência Energética	0	1	2	3	4	5
Produtos inteligentes	0	1	2	3	4	5

A. Avaliação de maturidade para Sistemas Ciber-Físicos.

Para a avaliação dos níveis de maturidade, utilizou-se a proposta de [47], o qual apresenta uma arquitetura chamada 5C. Assim sendo, a avaliação desta tecnologia nos cinco níveis é proposta da seguinte maneira:

- a) Nível 0 – Inexistente;

- b) Nível 1 – Realizado: Conexão Inteligente, aquisição de dados das máquinas através sensores apropriados (tipo e especificação) ou dados obtidos por sistemas de controle de manufatura como: ERP e MES. Necessário um método contínuo e sem fio para gerenciar a coleta de dados e transferir ao servidor;
- c) Nível 2 – Gerenciado: Conversão de dados em informações, mecanismos são utilizados para conversão dos dados em informações, são máquinas com inteligência local. Informações geradas com conceito preditivo são geradas, como por exemplo, análise inteligente da vida dos componentes da máquina, previsão de vida útil, avaliação da degradação. Máquinas e componentes com autoconsciência;
- d) Nível 3 – Estabelecido: Ciber, é como se fosse o *hub* central de informações onde recebe informações de todas as máquinas conectadas para formar uma rede de máquinas. O desempenho de uma máquina pode ser comparado com as outras e informações do seu comportamento atual e passado podem gerar informações futuras sobre e prever comportamentos. Algoritmos como, matriz de correspondência, método de similaridade de trajetória ou métodos estocásticos são usados para correspondência de padrões e gerar o comportamento futuro.
- e) Nível 4 – Previsível: Conhecimento, sistema de suporte a decisão através de prioridades e decisões otimizadas. Informações que foram analisadas são apresentadas aos usuários para apoiarem as decisões, desde informações comparativas, status individual da disponibilidade da máquina e decisões da prioridade de tarefas a executar, visando otimização do processo. Gráficos de informações apropriados são importantes para reproduzir o conhecimento aos usuários.
- f) Nível 5 – Otimizado: Configuração, é o *feedback* do ciberespaço para o espaço físico. O controle de supervisão é executado, tornando as máquinas autoconfiguráveis e auto adaptáveis. Um sistema de controle de resiliência (RCS) é utilizado para tomar decisões corretivas e preventivas do nível cognição para as máquinas controladas.

B. Avaliação maturidade para Gerenciamento e Melhoria da Eficiência Energética.

Para a tecnologia Gerenciamento e Melhoria da Eficiência Energética, os níveis de maturidade foram conceituados conforme [41]. Os cinco níveis de maturidade são avaliados da seguinte maneira:

- a) Nível 0 – Inexistente;
- b) Nível 1 – Realizado: nível de campo, registro de consumo de energia levando em conta formas elétricas e não elétricas. Utilização de dispositivos energeticamente eficientes, motores, conversores de frequência, soft-starters, dispositivos de comunicação e proteção, fontes, medidores multifuncionais, acionamentos e disjuntores enviando dados.
- c) Nível 2 – Gerenciado: nível de controle, gerenciamento de energia orientado por máquina, no qual exibe e testa sua energia. Coleta, agrega e prepara os dados de consumo de energia do nível campo. Propõe a otimização com auxílio de funções avançadas de

controle de processos e gerenciamento de ativos. Permite o controle de cargas baseados em prioridades; monitoramento do limite de demanda; consumo de energia por batelada; cálculos de demanda e monitoramento do limite de demanda.

- d) Nível 3 – Estabelecido: análise e controle da energia, visualizar os dados de consumo com valores característicos, apresentação gráfica, arquivamento dos dados de energia e relatórios gerados (por unidade, lote, seção da planta, etc).
- e) Nível 4 – Previsível: nível gerencial, planejamento e aquisição de energia, controle e monitoramento de energia, combinação inteligente de gerenciamento de carga e sistemas tarifários dependentes de tempo de carga permitindo minimizar custos de aquisição.
- f) Nível 5 – Otimizado: comunicação do nível gerencial com gerenciamento de ciclo de vida do produto (PLM) e sistema integrado de gestão empresarial (ERP).

C. Avaliação maturidade para Produtos Inteligentes

Na tecnologia Produtos inteligentes, para a avaliação dos níveis de maturidade foi utilizada a proposta de [20], o qual apresenta as principais definições e propriedades para produtos inteligentes.

Assim sendo a avaliação da maturidade desta tecnologia é proposta da seguinte maneira:

- a) Nível 0 – Inexistente:
- b) Nível 1 – Realizado: Identificação. Inteligência *off-board* do produto, ou seja, o produto não pode tomar uma decisão, possui informação limitada através de um número de identificação único, por exemplo, códigos de barra ou códigos de matriz de dados.
- c) Nível 2 – Gerenciado: Identificação e memória. Inteligência *off-board* do produto, ou seja, o produto não pode tomar uma decisão, por exemplo RFID, mas possui alguma capacidade de armazenamento.
- d) Nível 3 – Estabelecido: Identificação, memória e processamento de dados. O produto possui uma inteligência embarcada com capacidade de tomada decisão. Produto com RFID/NFC e micro controlador para processar dados, possibilitando ao produto operar seu próprio processo de fabricação e logística.
- e) Nível 4 – Previsível: Identificação, memória, processamento de dados e interação. Produtos que interagem uns com os outros por uma comunicação sem fio bidirecional. Neste nível é alcançada a comunicação e reconfiguração, *Machine-To-Machine* (M2M).
- f) Nível 5 – Otimizado: comunicação do nível gerencial com gerenciamento de ciclo de vida do produto (PLM) e sistema integrado de gestão empresarial (ERP). É capaz de participar ou tomar decisões relevantes para seu próprio destino. Tem capacidade de aprender e interação humanoide.

IV. RESULTADOS

O modelo proposto para Manufatura Inteligente foi aplicado em uma empresa fornecedora de fundidos usinados para indústria automotiva pesada e máquinas agrícolas.

Por meio da aplicação do modelo proposto, a empresa conseguiu mensurar o seu nível de maturidade em relação às tecnologias para uma Manufatura Inteligente e assim utilizar a avaliação para uma futura orientação a elaboração de um

roteiro para implementação da I4.0.

A. Contextualização da empresa

A Empresa está localizada no estado do Rio Grande do Sul – Brasil, Serra Gaúcha. É fornecedora de peças fundidas e usinadas para indústria automotiva pesada e setor de máquinas agrícolas. Possui uma área construída de 18.000 m² e atualmente conta com 300 funcionários. A empresa possui processos de fundição, moldagem em areia verde, acabamento, pintura, usinagem e montagem.

Atualmente, observa-se que a empresa não apresenta em sua estratégia o interesse em relação à Indústria 4.0, bem como à Manufatura Inteligente. Há um desconhecimento por parte da gestão e dos colaboradores, salvo alguns profissionais da Engenharia, os quais conhecem os conceitos de forma superficial desta nova revolução industrial. Dentro deste cenário percebe-se que um modelo de maturidade que realize uma avaliação das tecnologias chaves para uma Manufatura Inteligente pode ser o norteador inicial para a empresa implementar a Indústria 4.0.

B. Aplicação do modelo de maturidade proposto

Para avaliar a empresa, uma análise foi conduzida e realizada pelo autor deste trabalho, com auxílio de engenheiros de processo e produto, profissionais das áreas de Tecnologia e Informação e da área de Manutenção e Automação. Uma planilha foi elaborada para verificar e registrar a avaliação do nível de maturidade para Manufatura Inteligente. O Apêndice A apresenta o resumo da avaliação executada para cada tecnologia avaliada, o nível estabelecido e a sugestão de melhoria para elevar a empresa para o próximo nível de maturidade. A Figura 7 apresenta os resultados em formato gráfico para melhor visualização da situação real da manufatura.

Observou-se por meio dos resultados, que a empresa apresentou um nível de maturidade médio-baixo, pontuação sete, para um máximo de cinquenta. Percebe-se que a empresa apresenta situações pontuais e isoladas de implantação das tecnologias à manufatura inteligente, porém, não é possível observar um plano estratégico estruturado de implantação, sendo as soluções criadas sem análises e avaliações com um direcionamento a nova era digital da manufatura.

A tecnologia IOT, apresentou o nível mais alto de maturidade, nível dois, porém observa-se que esta tecnologia aparece como consequência de projetos isolados e pontuais, realizados pelo setor de TI e Engenharia. Também fica evidente, a falta de conhecimento das áreas de apoio em relação à revolução industrial, tal situação justificada também por uma falta de conhecimento da gestão em relação à I4.0.

Portanto, evidencia-se que existe um grande trabalho a ser feito pela empresa rumo à Manufatura Inteligente. Tal qual pode ser orientado com base nos resultados do modelo de maturidade apresentado e assim a empresa poderá aplicar e direcionar melhor os recursos financeiros para as tecnologias mencionadas, começando então a dar seus primeiros passos rumo a Indústria 4.0.

V. CONCLUSÃO

Este trabalho buscou apresentar um modelo de maturidade adaptado, que utiliza como avaliação as tecnologias da Indústria 4.0 para implementação de uma Manufatura Inteligente. No método, foi apresentada a construção do

modelo de maturidade adaptado de [58] e na sequência o modelo foi aplicado para avaliação de maturidade de uma empresa fornecedora de fundidos para indústria automotiva.

A metodologia utilizada foi baseada no referencial teórico, que por meio de uma pesquisa das tecnologias habilitadoras para Manufaturas inteligentes, selecionou-se dentre os artigos mais conceituados, as principais tecnologias para a implantação de uma Manufatura inteligente, que totalizam dez. Para o modelo de maturidade, realizou-se uma adaptação pelo autor, do modelo criado por [58] o qual utilizou os níveis propostos por [7] como base para conceituar os cinco níveis de avaliação de maturidade.

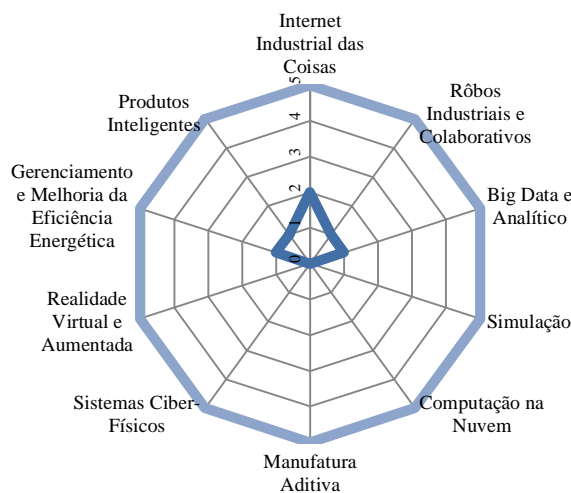


Figura 7 – Resultado da avaliação de maturidade.

O modelo foi aplicado em uma empresa que fornece peças fundidas usinadas em ferro fundido para o setor automotivo, com objetivo de aplicar e validar o modelo, medindo o nível de maturidade da empresa para uma Manufatura Inteligente.

Com os resultados do modelo aplicado pode-se verificar a situação real da empresa em relação à Manufatura Inteligente, e percebeu-se claramente que tecnologias como, por exemplo, a IOT, a qual apresenta um nível maior de maturidade em relação às outras, apresenta maior facilidade de implantação na empresa, visto que alguns projetos foram implantados pelo setor de Usinagem, com auxílio das áreas de apoio de TI e Engenharia, mas não foi possível evidenciar um projeto estruturado para a implantação desta tecnologia em relação à manufatura. Por meio do MES, a empresa conseguiu atingir o nível dois na avaliação, porém observa-se que a tecnologia está implantada de forma superficial somente no setor de usinagem e não vem sendo utilizada de forma concreta pela gestão da manufatura.

Tecnologias como RA, CPS, MA, Computação na Nuvem e Simulação apresentaram um nível baixo de desenvolvimento na empresa, bem como o conhecimento entre os colaboradores, resultado que é impactado pela falta de uma estratégia e conhecimento das tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0. Observou-se também que a integração vertical e horizontal, utilizada pelo autor [58] como uma tecnologia habilitadora, é proposta pelo autor deste trabalho como um conceito, o qual se caracteriza por um conjunto de tecnologias, por exemplo: IOT, Big Data, Computação na Nuvem, ERP,

MES, CPS.

Portanto, o modelo é útil para realizar o diagnóstico do atual cenário da manufatura e servir de instrumento para desenvolver planos estratégicos e táticos para implementação da Manufatura Inteligente.

Sendo assim, o modelo pode servir como orientação para empresas, direcionando seus esforços em relação aos investimentos de tecnologias para Manufatura Inteligente e na sequência proporcionar a implantação de uma Fábrica Inteligente. Além disso, o modelo proposto, por meio da ferramenta radar, pode suportar o controle e medir a evolução das diferentes tecnologias empresas de manufatura.

VI. BIBLIOGRAFIA

- [1] Robert Gao, et al., “Cloud-enabled prognosis for manufacturing,” *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, vol. 64, no. 2, pp. 749-772, 2015.
- [2] Andreas Schumacher; Selim Erol; Wilfried Sihn, “A maturity model for assessing Industry 4.0 readiness and maturity of manufacturing enterprises,” *Procedia Cirp*, vol. 52, pp. 161-166, 2016.
- [3] Markus Hammer, “Digitization Perspective: Impact of Digital Technologies in Manufacturing,” *In: Management Approach for Resource-Productive Operations*, Springer Gabl, pp. 27-68, 2019.
- [4] Germany Trade and Invest Industrie 4.0, “Smart Manufacturing for the Future,” *GTAI*, 2014 [S.I].
- [5] Zoltán Rajnai; István Kocsis, “Assessing industry 4.0 readiness of enterprises,” *In: 16th World Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics (SAMII)*, IEE, pp. 225-230, 2018 [S.I].
- [6] David R. Sjödin, et al., “Factory Implementation and Process Innovation,” *Research-Technology Management*, vol. 61, no. 5, pp. 22-31, 2018.
- [7] Ebru Gokalp; Umut Sener; P. Erhan Eren, “Development of an assessment model for industry 4.0: industry 4.0-MM,” *In: International Conference on Software Process Improvement and Capability Determination*. Springer, Cham, pp. 128-142, 2017.
- [8] Pai Zheng, et al., “Smart manufacturing systems for Industry 4.0: Conceptual framework, scenarios, and future perspectives,” *Frontiers of Mechanical Engineering*, vol. 13, no. 2, pp. 137-150, 2018.
- [9] Kartal Yagiz Akdil; Alp Ustundag; Emre Cevikcan, “Maturity and readiness model for industry 4.0 strategy,” *In: Industry 4.0: Managing The Digital Transformation*, Springer, Cham, pp. 61-94, 2018.
- [10] K Henning Kagerman; Wolfgang Wahlster; Johannes Helbig, “Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0. Final report of the Industrie 4.0 Working Group,” *Forschungsunion, ACATECH*, vol. 8, 2013 [S.I].
- [11] K Lichtblau, et al., “IMPULS-industrie 4.0-readiness,” *Impuls-Stiftung des VDMA, Aachen-Köln*, 2015.[S.I]
- [12] Shiyong Wang, et al., “Implementing Smart Factory of Industrie 4.0: An Outlook,” *International Journal of Distributed*, vol. 12, no. 1 pp. 3159805, 2016.
- [13] Yang Lu, “Industry 4.0: A survey on technologies, applications and open research issues,” *Journal of Industrial Information Integration*, vol. 6, pp. 1-10, 2017.
- [14] Michael Sony, “Industry 4.0 and lean management: a proposed integration model and research propositions,” *Production & Manufacturing Research*, vol. 6, no. 1, pp. 416-432, 2018.
- [15] Shiyong Wang, et al., “Towards smart factory for industry 4.0: a self-organized multi-agent system with big data based feedback and coordination,” *Computer Networks*, vol. 101, pp. 158–168, 2016.

- [16] Andrew Usiak, "Smart manufacturing," *International Journal of Production Research*, vol. 56, no. 1-2, pp. 508-517, 2018.
- [17] Ducan Mcfarlane, et al., "Auto ID systems and intelligent manufacturing control," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 16, no. 4, pp. 365-376, 2003.
- [18] Alejandro Germán Frank; Lucas Santos Dalenogare; Néstor Fabián Ayala, "Industry 4.0 technologies: Implementation patterns in manufacturing companies," *International Journal of Production Economics*, vol. 210, pp. 15-26, 2019.
- [19] Hyoung Seok Kang, et al., "Smart manufacturing: Past research, present findings, and future directions," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, vol. 3, no. 1, pp. 111-128, 2016.
- [20] Fabian Bertelsmeier; Stefan Schone; Ansgar Trächtler, "Development and design of intelligent product carriers for flexible networked control of distributed manufacturing processes," *In: 2016 24th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED)*, IEEE, pp. 755-760, 2016 [S.I].
- [21] Ercan Oztemel; Samet Gursev, "Literature review of Industry 4.0 and related technologies," *Journal of Intelligent Manufacturing*, pp. 1-56, 2018.
- [22] Alexandre Moeuf, et al., "The industrial management of SMEs in the era of Industry 4.0," *International Journal of Production Research*, vol. 56, no. 3, pp. 1118-1136, 2018.
- [23] Ray Y. Zhong, et al., "Intelligent manufacturing in the context of industry 4.0: a review," *Engineering*, vol. 3, no. 5, pp. 616-630, 2017.
- [24] Keliang Zhou; Taigang Liu; Lifeng Zhou, "Industry 4.0: Towards future industrial opportunities and challenges," *In: 2015 12th International conference on fuzzy systems and knowledge discovery (FSKD)*, IEEE, pp. 2147-2152, 2015.
- [25] Reimund Neugebauer, et al., "Industrie 4.0-From the perspective of applied research," *Procedia CIRP*, vol. 57, no. 1, pp. 2-7, 2016.
- [26] Jessica Leber, "General Electric's San Ramon Software Center Takes Shape MIT Technology Review," Available at: <http://www.technologyreview.com/news/507831/general-electric-pitches-an-industrial-internet/>, Access at: 18 Jul. 2019, 2012 [S.I].
- [27] Li Da Xu; Wu He; Shancang Li, "Internet of things in industries: A survey," *IEEE Transactions on industrial informatics*, vol. 10, no. 4, pp. 2233-2243, 2014.
- [28] T. Bradicich, "The Intelligent Edge: What It Is, What It's Not, and Why It's Useful," *Hewlett Packard Enterprise*, Available at: <https://www.hpe.com/us/en/insights/articles/the-intelligent-edge-what-it-is-what-its-not-and-why-its-useful-1704.html>, Access at: 18 Jul. 2019, 2017 [S.I].
- [29] Hugh Boyes, et al., "The industrial internet of things (IIoT): An analysis framework," *Computers in Industry*, vol. 101, pp. 1-12, 2018.
- [30] Thuy Duong Oesterreich, Frank Teuteberg, "Understanding the implications of digitisation and automation in the context of Industry 4.0: A triangulation approach and elements of a research agenda for the construction industry," *Computers in Industry*, vol. 83, pp. 121-139, 2016.
- [31] David Romero, et al., "Towards an operator 4.0 typology: a human-centric perspective on the fourth industrial revolution technologies." *In: International conference on computers and industrial engineering (CIE46)*, Proceedings, 2016 [S.I].
- [32] Ling Li, "China's manufacturing locus in 2025: With a comparison of "Made-in-China 2025" and "Industry 4.0"," *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 135, pp. 66-74, 2018.
- [33] Ray Y Zhong, et al., "Big data analytics for physical internet-based intelligent manufacturing shop floors," *International journal of production research*, vol. 55, no. 9, pp. 2610-2621, 2017.
- [34] Behzad Esmaeilian; Sara Behdad; Ben Wang, "The evolution and future of manufacturing: A review," *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 39, pp. 79-100, 2016.
- [35] Michael Schroeck, et al., "Analytics: The Real-World Use of Big Data," *IBM Global Business Service*, vol. 12, no. 2012, pp. 1-20, 2012.
- [36] Yaoxue Zhang, et al., "A survey on emerging computing paradigms for big data," *Chinese Journal of Electronics*, vol. 26, no. 1, pp. 1-12, 2017.
- [37] Ahmad Ghazal, et al., "BigBench: towards an industry standard benchmark for big data analytics," *In: Proceedings of the 2013 ACM SIGMOD international conference on Management of data*, ACM, pp. 1197-1208, 2013 [S.I].
- [38] Avita Kkatal; Mohammad Wazid; R. H. Goudar, "Big data: issues, challenges, tools and good practices," *In: 2013 Sixth international conference on contemporary computing (IC3)*, IEEE, pp. 404-409, 2013 [S.I].
- [39] Li Da Xu, Lian Duan, "Big data for cyber physical systems in industry 4.0: A survey," *Enterprise Information Systems*, vol. 13, no. 2, pp. 148-169, 2019.
- [40] J Dijkstra, "Oracle: big data for the enterprise Oracle". *White Paper*, 2012 [S.I].
- [41] Siemens, "Energy Management and Energy Optimization in the Process Industry," *White paper, Siemens, Sector Industry, IA AS S MP 7*, 2011 [S.I].
- [42] Jens F. Lachenmaier; Heiner Lasi; Hans-Georg Kemper, "Simulation of production processes involving cyber-physical systems," *Procedia CIRP*, vol. 62, pp. 577-582, 2017.
- [43] Michele Ciavotta; Andrea Bettoni; Gabriele Izzo, "Interoperable meta model for simulation-in-the-loop," *In: 2018 IEEE Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS)*, IEEE, pp. 702-707, 2018.
- [44] D. Nuñez; G. Fernández; J. Luna, "Cloud system," *Procedia Computer Engineering*, vol. 62, pp. 149-164, 2017.
- [45] Christian Weller; Robin Kleer; Frank T. Piller, "Economic implications of 3D printing: Market structure models in light of additive manufacturing revisited," *International Journal of Production Economics*, vol. 164, pp. 43-56, 2015.
- [46] Samuel H. Huang, et al., "Additive manufacturing and its societal impact: a literature review," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 67, no. 5-8, pp. 1191-1203, 2013.
- [47] Jay Lee; Behrad Bagheri; Hung-An Kao, "A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems," *Manufacturing letters*, vol. 3, pp. 18-23, 2015.
- [48] Valerio Elia; Maria Grazia Gnoni; Alessandra Lanzilotto, "Evaluating the application of augmented reality devices in manufacturing from a process point of view: An AHP based model," *Expert systems with applications*, vol. 63, pp. 187-197, 2016.
- [49] InGlobe. (2017). <http://www.inglobetechnologies.com/smart-manufacturing-ar-industry-4-0>. Access at: 05 Jul. 2019 [S.I].
- [50] A. Syberfeldt, et al., "Support systems on the industrial the shop-floors of the future – operators perspective on augmented reality," *Procedia CIRP 44*, pp. 108-113, 2016.
- [51] Murat M. Gunal, "Simulation for the Better: The Future in Industry 4.0," *In: Simulation for Industry 4.0*. Springer, Cham, pp. 275-283, 2019 [S.I].
- [52] Stefan Boschert; Roland Rosen, "Digital twin - the simulation aspect," *In: Mechatronic Futures*. Springer, Cham, pp. 59-74, 2016 [S.I].

- [53] Milovan Medojevic, et al., “Energy management in industry 4.0 ecosystem: a review on possibilities and concerns,” *Annals of DAAAM & Proceedings*, vol. 29, 2018.
- [54] Fadi Shrouf; Giovanni Miragliotta, “Energy management based on Internet of Things: practices and framework for adoption in production management,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 100, pp. 235-246, 2015.
- [55] Electricity metering and monitoring guide - *Office of Environment and Heritage*, 2016 [S.I].
- [56] Milovan Medojevic, et al., “Energy management in industry 4.0 ecosystem: a review on possibilities and concerns,” *Annals of DAAAM & Proceedings*, vol. 29, 2018.
- [57] Sameer Mittal, et al., “A critical review of smart manufacturing & Industry 4.0 maturity models: Implications for small and medium-sized enterprises (SMEs),” *Journal of manufacturing systems*, vol. 49, pp. 194-214, 2018.
- [58] Jaime Schneider, “Medição do nível de maturidade do uso de tecnologia em um ambiente da indústria 4.0” *Tese (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade de Caxias do Sul*, 116f. 2018.

VII. APÊNDICES

Apêndice A.**Resultado da avaliação do modelo de maturidade aplicado.**

Tecnologias	Nível	Evidências	Sugestão p/ próximo nível
Internet das Coisas	2	A rede industrial é somente por cabos ethernet. Não existe uma rede sem fio industrial na manufatura. Algumas máquinas estão conectadas a rede, como por exemplo, as máquinas do setor de usinagem, devido a existir um sistema MES implantado neste setor. Na fundição, a máquina de moldagem está conectada a rede, porém sem sistema MES somente apresenta um supervisório simples.	Uma integração completa das máquinas e comunicação entre elas, coletando e gerando informações.
Robôs Industriais e Colaborativos	1	Atualmente conta com um robô, desenvolvido para o processo de acabamento das peças realizando a operação de rebarbação da peça fundida. Existem projetos futuros para aquisição de mais robôs. Não existem robôs colaborativos e nenhuma iniciativa ainda para esta tecnologia.	Utilizar robôs colaborativos em seus processos, mesmo que de forma isolada e gerar informações visuais para humanos encontrarem o erro.
Big-Data e Analítico	1	A empresa não possui conhecimento sobre Big Data. O sistema MES está instalado nas máquinas de usinagem, gera informações analíticas, porém a empresa não as utiliza para analisar ou tomar decisões. A empresa utiliza uma ferramenta de BI da TOTVS chamada GOODATA, que possui a capacidade de organizar as informações e dados para possibilitar análises e interpretações para gestão.	Necessário uma abrangência maior nos setores de manufatura. Utilizar o analítico para tomada de decisões na manufatura. Estabelecer um corpo técnico para explorar o Big-Data nos processos de manufatura.
Simulação	0	O conhecimento de simulação não é conhecido pela empresa. Nenhum tipo de contato com a tecnologia foi realizado, somente alguns profissionais da área de engenharia que conhecem e possuem interesse próprio da tecnologia.	Implantar software de simulação de processos, para alterações de <i>layout</i> , fluxo produtivo. Multiplicar o conhecimento dentro da empresa.
Computação na Nuvem	0	Existe um servidor local, onde todos os sistemas informatizados rodam nele mesmo. Não existem projetos para hospedagem de sistemas na nuvem por enquanto. O sistema ERP roda no servidor local, assim como o MES e o BI.	Migração de processos que rodem na nuvem. Disseminação desta tecnologia nos setores de apoio a manufatura, para que possam executar migrações independentes.
Manufatura Aditiva	0	A empresa está em fase inicial de conhecimento da tecnologia. Existe um contato com o fornecedor para elaborar projetos sistema de alimentação para peças fundidas através da impressora 3D, porém ainda esta em fase piloto. A engenharia tem o conhecimento e compreensão de software de CAD.	Aquisição de uma impressora 3D e multiplicação do conhecimento da tecnologia pela empresa. Utilização em desenvolvimentos, protótipos e melhoria de processos.
Sistemas Ciber-Físicos	0	Casos pontuais de coleta de dados, como por exemplo, máquinas apresentam sensores para coletar dados de produtividade das máquinas, no caso sistema MES. Sensores que coletam informações como, pressão, temperatura, vibrações não foram evidenciados. O processo de usinagem que possui sistema MES instalado nas máquinas coleta dados e leva para um ambiente fora da máquina gerando informações de produtividade. A empresa possui conhecimento sobre a tecnologia e não foram identificados projetos com intuito de conhecê-la.	Através dos dados coletados, converte-los em informações. Máquinas devem apresentar uma inteligência local. Gerar informações preditivas e análise de vida útil dos componentes das máquinas.
Realidade Virtual e Aumentada	0	A empresa está em fase inicial de contato com a tecnologia. Fornecedores da tecnologia visitaram a empresa e demonstraram o produto. A engenharia está utilizando o <i>software trial</i> para desenvolver uma aplicação de realidade aumentada com objetivo substituir as instruções de trabalho no setor de acabamento.	Possuir equipamento e softwares de RA na empresa, e apresentar algum setor com a tecnologia implantada.
Gerenciamento e Melhoria da Eficiência Energética	1	Empresa possui somente um sistema para controle de demanda dos horários de ponta. Não existe coleta de dados de dispositivos elétricos como motores, etc. O monitoramento é somente para controle da demanda contratada e não ultrapassar os valores contratados.	Controle de gerenciamento de energia orientado por máquina. Controle de carga baseado em prioridades, cálculos de demanda e monitoramento.
Produtos Inteligentes	1	Os produtos são identificação através de um código de barras que é colocado no rack de embalagem final do cliente. O código de barras possui informações do total de peças contidas na embalagem, <i>part number</i> , código da empresa e cliente final.	Aplicação de etiqueta RFID durante os processos para que os produtos possuam capacidade de armazenamento de informações.

Apêndice B.

Tecnologias para fábricas inteligentes.

Autores	Sensores, Atuadores e PLC	Controle de Supervisão e Aquisição de dados	MES	ERP	Melhoria e Monitoramento de Energia	Robôs	Comunicação M2M	Manufatura aditiva	Computação na Nuvem	Internet das Coisas	Big Data	Analítico	Sistema Multi-agente (MAS)	Sistemas Ciber-Físicos (CPS)	Simulação	Realidade Virtual e Aumentada	Segurança cibernética	Holograma	Produtos Inteligentes
Frank, Dalenogare e Ayala. (2019) [18]	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X			X	X			X
Wang, Wan, Li e Zhang. (2015) [12]	X		X	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X		X	X		X
Zhong, Xu ,Klotz e Newman. (2017) [23]	X		X	X		X	X		X	X	X	X		X	X	X			X
Moeuf, Pellerin, Lamouri, Giraldo e Barbaray. (2017) [22]	X		X	X		X	X		X	X	X	X		X	X	X	X		
Oztemel e Gursev. (2018) [21]	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X
Zheng, Ang, Sang, Y. Zhong, Liu, Liu, Mubarak, Yu e Xu. (2018) [8]	X			X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X			
Zhou, Liu, Zhou (2015) [24]	X					X	X		X	X	X	X		X	X				X
Neugebauer, Hippmann, Leis e Landherr (2016) [25]	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X			
Kang, Lee Choi, Kim, Park, Son, Hyun, Kim, e Noh. (2016) [19]	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X		X		X		X	X
Mittal, Khan, Romero e Wuest (2018) [57]	X		X	X	X		X	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X