

UNIVERSIDADE ABERTA

INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO



**ARQUITETURA DE SISTEMAS VIÁVEIS APLICADA À
MANUTENÇÃO 4.0**

**Rafael Albuquerque Câmara
1700058**

Mestrado em Informação e Sistemas Empresariais

Proposta de Dissertação orientada pelo
Professor Doutor Henrique São Mamede e coorientada pelo Professor Doutor Vitor
Duarte dos Santos

Outubro/2019

Resumo

Face ao crescente processo da quarta revolução industrial de forma contínua nos dias atuais, as grandes indústrias para se manterem competitivas e ativas no mercado são obrigadas a inovar seu processo de manufatura industrial, aperfeiçoando o processo de produção fabril por meio de novas tecnologias interconectadas e autônomas.

No processo de manufatura de uma fábrica, a diversidade e a complexidade de componentes vêm aumentando progressivamente com a evolução da tecnologia, e com isso a detecção e análise de falhas torna-se cada vez mais difícil de controlar na automação fabril, principalmente no meio de tanta informação e volume de dados que é gerada atualmente por máquinas interligadas em redes, sensores e a Internet.

Visto que a redução do tempo, o aumento da qualidade e a diminuição do custo para fabricação de produtos industrializados são os maiores catalisadores de uma empresa de sucesso para a Era atual chamada Manutenção 4.0, esse trabalho propõe ilustrar um modelo de Arquitetura de Sistemas de Informação onde, utilizando o Modelo de Sistemas Viáveis, seja possível realizar ajustes de forma automática nos subsistemas relacionados com sistemas Ciber-físicos e Sistemas de Execução de Fabricação (comumente conhecidos como MES - *Manufacturing Execution System*) dentro do modelo de Manufatura Digital e, adicionalmente, mitigar as falhas de máquinas através de análises preditivas de volumes massivos de dados utilizando algoritmos com funções inteligentes e *Data Mining* (DM), a fim de estabilizar automaticamente toda a cadeia de sistemas de forma rápida e eficaz.

Palavras-chave: Manutenção 4.0; Modelo de Sistemas Viáveis; Sistemas Ciber-físicos; Sistemas de Execução de Fábrica (MES); Manufatura Digital; Data Mining

Abstract

Face of the growing process of the fourth industrial revolution continuously these days, the great industries to remain competitive and active in the market are forced to innovate their industrial manufacturing process, perfecting the manufacturing process through new interconnected and autonomous technologies.

In the manufacturing process of a factory, the diversity and complexity of components has been steadily increasing with the evolution of technology, and thus the detection and analysis of failures becomes increasingly difficult to control in factory automation, especially in the midst of so much information and data volume which is currently generated by machines connected to networks, sensors and the internet.

Since time reduction, quality enhancement and cost reduction for manufacturing of industrial products are the major catalysts of a successful company for the current Era called Maintenance 4.0, this paper proposes to illustrate an Information Systems Architecture where, using the Viable Systems Model, it is possible to perform automatic adjustments in the subsystems related to Cyber-physical Systems and Manufacturing Execution Systems (commonly known as MES) within the Digital Manufacturing model and, in addition, to mitigate machine failures through of predictive analyzes of massive volumes of data using algorithms with intelligent functions and Data Mining (DM) in order to automatically stabilize the entire system chain quickly and efficiently.

Keywords: Maintenance 4.0; Model of Viable Systems; Ciber-physical systems; Manufacturing Execution Systems (MES), Digital Manufacturing; Data Mining

Índice Geral

Resumo.....	ii
Abstract.....	iii
Índice de Figuras.....	v
Índice de Tabelas	vi
Lista de Abreviaturas, Siglas e Acrónimos.....	vii
1 INTRODUÇÃO.....	8
1.1 Motivação.....	11
1.2 Problema da investigação.....	11
1.3 Objetivos do Trabalho.....	12
1.4 Metodologia	12
2 Enquadramento teórico.....	14
2.1 Conceitos da Indústria 4.0.....	14
2.2 Internet dos Serviços.....	16
2.3 Princípios de <i>Design</i> I4.0	16
2.4 Arquiteturas para a Manutenção 4.0.....	18
2.5 Manutenção 4.0: da visão à implementação	19
2.6 Arquitetura de Sistemas Viáveis	26
3 Metodologia	30
3.1 <i>Design Science Research</i>	30
3.2 Estratégia de investigação.....	31
4 Modelo de Sistema Viável proposto para Manutenção 4.0.....	33
5 Validação do modelo proposto	44
5.1 Coleta de dados	45
5.2 Procedimentos para análise.....	46
5.3 Apresentação e análise dos dados	47
5.4 Análise dos dados apresentados.....	50
6 Conclusão.....	52
6.1 Contribuições.....	52
6.2 Limitações do trabalho desenvolvido.....	53
6.3 Trabalho futuro.....	53
Bibliografia.....	54

Índice de Figuras

Figura 1 - Modelo de pirâmide com 5 níveis	10
Figura 2 - Etapas do processo DSR adaptados ao trabalho proposto.....	13
Figura 3 - Os 4 estágios da Revolução Industrial.....	15
Figura 4 - Definições do método de pesquisa.....	19
Figura 5 - Estratégia de implementação com Blue Ocean e I4.0	20
Figura 6 - Modelo Y e a Indústria 4.0.....	21
Figura 7 - Processamento de dados e blocos de fluxo de informações.....	23
Figura 8 - Um framework categórico de manufatura para a Indústria 4.0.....	25
Figura 9 - Interface entre os sistemas ERP, MES, SCADA e a planta de manufatura	26
Figura 10 - Um modelo de sistema viável para uma corporação	28
Figura 11 - Arquitetura VSM adaptada para Manutenção 4.0.....	38
Figura 12 - Divisão de assuntos na fábrica "inteligente"	40

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Comparação das fábricas atuais com fábricas I4.0.....	15
Tabela 2 - Princípios de design de cada componente da Indústria 4.0.....	16
Tabela 3 - Diretrizes da Ciência do Design	30

Lista de Abreviaturas, Siglas e Acrónimos

AP	Avaliação de prognósticos
AS	Avaliação de Saúde
CBM	Condition Based Maintenance
CPS	Cyber Physical System
DE	Deteção de Estado
ERP	Enterprise Resource Planning
GC	Geração consultiva
I4.0	Indústria 4.0
IHM	Interface Homem Máquina
IoS	Internet of Services
IoT	Internet of Things
JSON	Javascript Object Notation
M4.0	Manutenção 4.0
MD	Manipulação de Dados
MES	Manufacturing Execution System
RFID	Radio-Frequency Identification
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
SI	Sistemas de Informação
TIC	Tecnologias da Informação e Comunicação

1 INTRODUÇÃO

O setor industrial vigente sofre mudanças constantes e atualizações de processos a uma velocidade sincronizada com modelos de negócio nunca antes visto em tempos anteriores, cujo processo de produção era sequencial, orientado a falhas e que não necessitava alterações para ter sucesso numa produção fabril. O homem, a máquina e a produção propriamente dita constituem, juntas, a força de uma rede independente e inteligente[1]. Atualmente, esse modelo monolítico já não suporta a dinâmica do mercado perante a integração e rapidez necessária ao cliente, fornecedor e à produção para se manter “vivo” no mercado mundial.

Neste cenário a produção industrial, para se manter ativa, necessita ser continuamente sincronizada com as novas tecnologias oferecidas no mercado atual a fim de se manter flexível, eficiente, e integrada com parceiros, clientes e fornecedores. e tudo isso de forma a proporcionar ao setor industrial maior lucratividade e qualidade a um custo aceitável e reduzido, através do uso das tecnologias relacionadas com a denominada Indústria 4.0.

A Indústria 4.0 é uma fábrica “inteligente” onde os componentes digitais estão todos interligados com máquinas, ferramentas, robôs, homens, produtos acabados e semiacabados e matérias-primas em uma única rede totalmente integrada, flexível e orientada a modelos de negócio [1].

No contexto de fábricas “inteligentes”, o processo de manufatura nas indústrias requer uma maior atenção na manutenção preditiva de máquinas com o avanço da tecnologia e complexidade dos componentes, alinhado ao uso contínuo de propriedades dos computadores para controlar e monitorizar as propriedades dinâmicas de um bem físico dentro da fábrica[2].

Para manter essa automação industrial de forma estável e com riscos mínimos, a arquitetura deve ser implementada de forma contínua e totalmente integrada, que não divida os sistemas de forma isolada e sem muitas camadas

hierárquicas para evitar lacunas e falhas de comunicação na plataforma dos SI's existentes no ambiente corporativo, como é em alguns casos das arquiteturas tradicionais nas organizações atuais [3].

Uma vez solucionada essa arquitetura e definidos os requisitos necessários para implementar novas tecnologias ligadas à Manutenção 4.0, diversas dessas novas tecnologias que podem ser implementadas e adequadas à realidade da indústria, a fim de obter mais-valias, melhor desempenho e qualidade no processo de produção fabril, nomeadamente à análise preditiva de falhas de máquinas. [4]

Isso traz como consequência uma série de sistemas a serem parametrizados e regulados constantemente e que exige, em algumas delas, intervenção manual constante devido à ausência de um sistema ou conjunto de sistemas que se autorregule e que lide com as variáveis dos processos de negócio no ambiente corporativo. Há uma preocupação constante em regular de maneira adequada para o modelo industrial corrente ou qualquer novo modelo que seja acoplado ao já existente, isso se o modelo tradicional permitir, o que geralmente não ocorre dessa forma.

Para ajudar a resolver esta questão, neste trabalho é proposto um modelo de arquitetura inteligente, flexível e completamente autossustentável, baseando-se no Modelo de Sistemas Viáveis (MSV) de Stafford Beer [5], e que esteja ligada com as tecnologias de Manutenção Preditiva [6], com o objetivo de modernizar o processo de manufatura e torná-lo cada vez mais eficaz e autônomo no que diz respeito ao processo de configuração, análise e monitorização de falhas de peças/máquinas.

Pretende-se criar uma arquitetura de SI única, ilustrando a automatização de parte do processo de manufatura, nomeadamente ao processo de monitorização dos equipamentos industriais, configuração e reposição destes em caso de iminência de falhas por meio de uma análise preditiva e posterior requisição de compra de peças/máquinas sem a intervenção humana, caso necessitar, auxiliando na tomada de decisões antes de ocorrer falhas em máquinas industriais.

Para que esse processo de automação seja bem definido é preciso, primeiramente, classificar e definir uma taxonomia para os diversos tipos de dados e informações geradas nos processos de negócio através do fluxo de informações de uma fábrica.

As organizações com estruturas hierárquicas são mais eficientes e melhor coordenadas, devido ao facto das linhas de autoridade serem bem definidas [7]. Adicionalmente, em [5] é afirmado que a maioria segue esse padrão de hierarquia de informações e, com isso, o mais usado para tal abordagem é o modelo em Pirâmide. Nesse modelo retratam-se as informações, tarefas e responsabilidades de acordo com o nível de hierarquia existente nas organizações, conforme Figura 1, onde se ilustra a relação entre essas grandezas.



Figura 1 - Modelo de pirâmide com 5 níveis. (Adaptado de [5])

Após a classificação dessas informações, torna-se necessário e possível a mineração desses dados para finalmente operar, através de um fluxo de informações e lógicas de inteligência artificial, de forma autónoma, flexível e sincronizando sempre com as novas regras de negócio impostas pela organização.

1.1 Motivação

O presente trabalho propõe uma arquitetura de sistemas viáveis genérica para o uso na M4.0 (Manutenção Preditiva), onde a implementação desta (não coberta por este trabalho) permitirá reduzir os impactos negativos na operação industrial causados por falhas de configuração manual, falhas de máquinas (através de análise preditiva de dados) e integrações instáveis entre subsistemas, sincronizando sempre o fluxo de negócio com o fluxo de dados de forma mais rápida e eficaz.

Outro fato motivador é de tornar as indústrias europeias mais competitivas, com mais autonomia nos processos de fabricação que sofrem com o deficit de mão-de-obra, devido ao envelhecimento avançado da população nesses países.

O uso adequado do Sistema Ciber-Físico e a Internet das Coisas (IoT) permite impulsionar o desenvolvimento de tecnologias industriais, com o objetivo de reduzir o tempo de desenvolvimento de produtos e da força de trabalho necessária para esta produção, otimizando sempre o tempo e aumentando a eficácia da produção e adicionalmente uma redução de custos no processo produtivo [8].

1.2 Problema da investigação

Diante do processo de crescimento contínuo da quarta revolução industrial, as indústrias são forçadas a inovar seus processos de fabricação e manufatura industrial para permanecerem competitivas e atuantes no mercado atual, aumentando a qualidade da produção e reduzindo cada vez mais os custos e perdas. O problema de investigação deste trabalho é como modelar uma arquitetura com visões de análise preditiva de dados a fim de permitir uma tomada de decisão de forma preventiva em relação ao mau funcionamento de máquinas industriais, se porventura houver iminência de ocorrer falhas.

1.3 Objetivos do Trabalho

Espera-se que o resultado da dissertação seja uma vantagem para a implementação de soluções autônomas focadas na Manutenção 4.0, mais precisamente para quem deseja obter uma arquitetura com visões de análise preditiva de dados a fim de permitir uma tomada de decisão de forma preventiva em relação ao mau funcionamento de máquinas industriais, se porventura houver iminência de ocorrer falhas.

Entre os principais interessados a usufruírem deste trabalho estão desde arquitetos, gestores de projetos, gerentes de manufatura, desenvolvedores e analistas de *Big Data* que porventura estiverem interessados em automatizar toda ou parte da estrutura de manufatura de sua organização, tornando-a mais digital e competitiva em termos de conectividade, qualidade de fabricação, redução de tempo e custo do processo fabril.

O principal artefacto produzido como resultado deste trabalho será um modelo de arquitetura de Sistema de Informação, com capacidade de auto adaptação de acordo com as variáveis de ambientes de subsistemas.

1.4 Metodologia

A metodologia utilizada nesta investigação é o *Design Science Research* (DSR), por forma a idealizar uma nova arquitetura de Sistemas de Informação que seja útil para àqueles que irão implementá-la utilizando tecnologias disseminadas na Manutenção 4.0, levando em consideração nessa escolha diversos fatores, tais como: objetivos principais da investigação, o objeto a ser investigado, tipo de análises e resultados desejados para o trabalho científico [9].

Este trabalho de natureza científica procura defender, através de artefactos arquiteturais de infraestrutura de Sistemas com tecnologias disruptivas de Manutenção Preventiva [6] e adaptadas com o Modelo de Sistemas Viáveis [5], tendo como objetivo a criação de uma solução arquitetural única para manutenção e prevenções de máquinas nos processos de manufatura

industrial. Com isso, a pesquisa busca validar, identificar e solucionar os problemas aqui levantados.

Para analisar a DSR e compilar os resultados da pesquisa, o método usado foi o de rever o conteúdo relativo à DSR considerados de maior importância para o campo. Foram analisados diversos artigos e jornais científicos mais recentes dos últimos 10 anos e que possuem conteúdo científico direcionado à Manutenção 4.0.

O modelo de processos DSR possui 6 estágios principais, conforme ilustrado abaixo [9]:

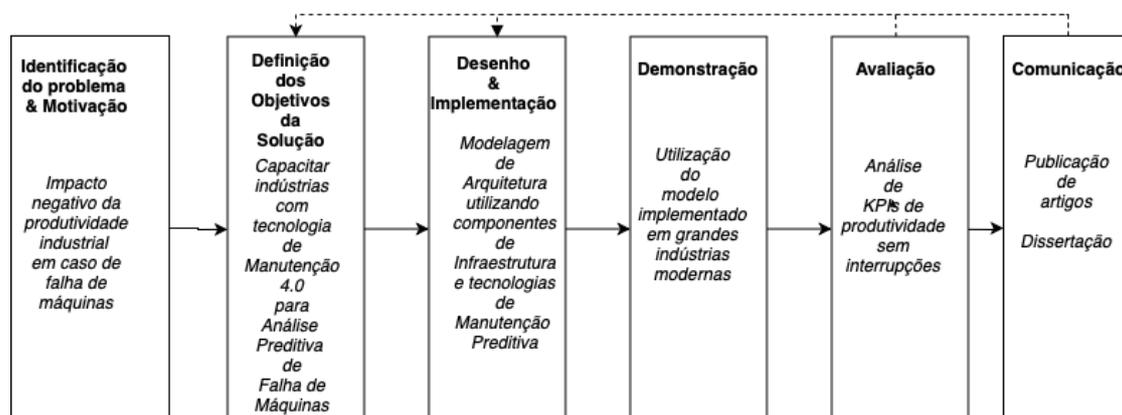


Figura 2 - Etapas do processo DSR adaptadas ao trabalho proposto. (Adaptado de [9])

A competitividade industrial impulsiona as indústrias a serem mais eficazes e com uma produtividade de qualidade, tornando a produção contínua e sem interrupções a principal motivação desta dissertação.

Em seguida, a análise preditiva através de Data Mining [2] e processos autônomos [5] para a produção de informações relevantes para tomada de decisões antecipadas (compra de máquinas, substituição de peças) são os objetivos principais do modelo proposto.

2 Enquadramento teórico

No capítulo anterior são definidos alguns conceitos básicos de classificação de informações, com a taxonomia definida em [5], bem como a problemática do trabalho e a estrutura metodológica do modelo a ser proposto como solução para otimizar setores de manufatura industrial no que diz respeito à manutenção preditiva usando tecnologias emergentes da Manutenção 4.0.

Neste capítulo é centrado nos conceitos, definições e práticas ligadas à Manutenção 4.0, tais como: Indústria 4.0 e seu processo evolutivo; arquiteturas, tecnologias e metodologias voltadas para a evolução da manutenção preditiva com o processo de manufatura atual; princípios e modelos de fluxos de informações sobre uma arquitetura que utiliza dados para geração consultiva de informações relevantes.

2.1 Conceitos da Indústria 4.0

A indústria 4.0 pode ser definida como sendo uma fábrica inteligente com todos os seus componentes conectados em rede desde pessoas até máquinas e produtos [10], de forma a ter uma integração flexível e inteligente entre clientes, parceiros, fornecedores e produtos com eficiência. Esse modelo visa sempre a redução de custos, aumento de performance e qualidade de produção através de processos automatizados [11].

É possível também identificar diversos benefícios do uso de conceitos e tecnologias da I4.0 [2], principalmente em termos de adaptação a novos modelos de negócio de forma rápida e sem grandes modificações, devido à sua arquitetura flexível, e com isso tornando as indústrias cada vez mais competitivas no cenário atual do mercado mundial, tais como:

“1. Os sistemas em rede fornecem conectividade para processamento descentralizado de informações; 2. A miniaturização progressiva permite um baixo custo e sensores e atuadores de alto desempenho; 3. Auto-ID para fabricação de produtos personalizados cria identificação única e links para o virtual mundo; 4. Dispositivos de campo inteligentes usando software que permite para a distribuição dinâmica global da funcionalidade é uma parte integrante da integração do sistema; 5. Gerenciamento de dispositivos móveis (MDM): homem-máquina interfaces para operação intuitiva de sistemas sem treinamento especial.” [1]

Existe um contexto histórico em que o autor em [1] subdivide a revolução industrial dos tempos atuais em 4 estágios, conforme ilustra a figura abaixo:

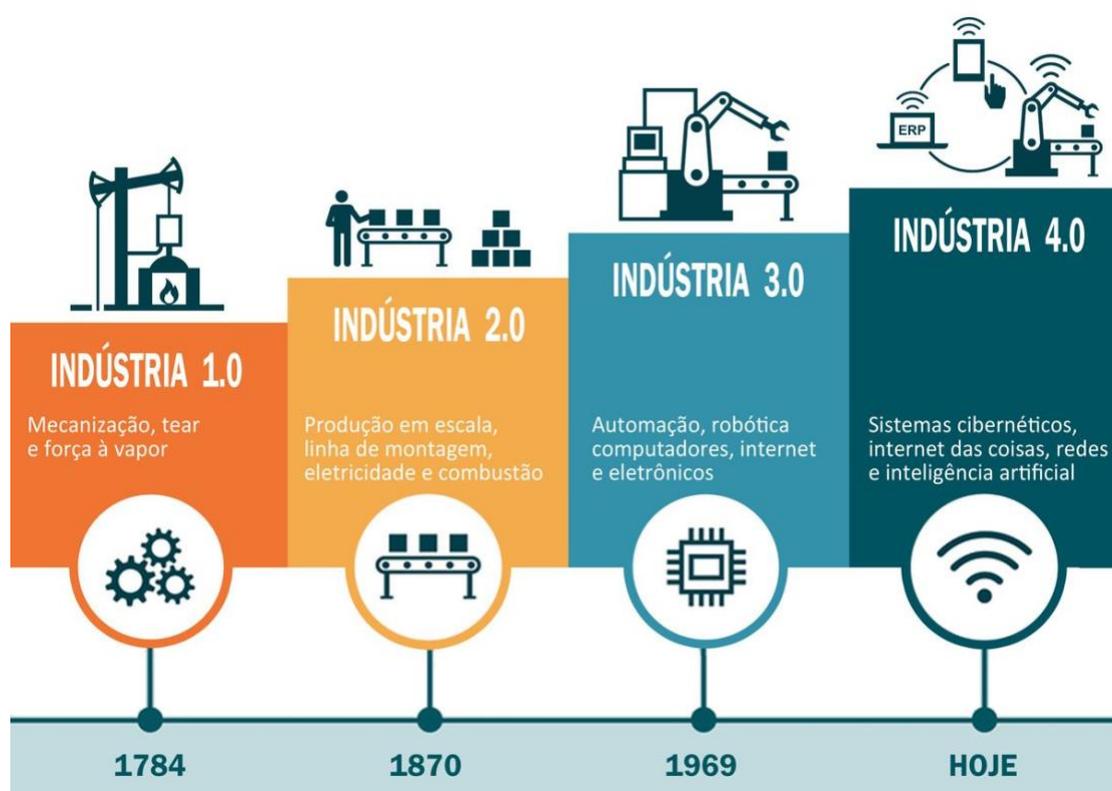


Figura 3 - Os 4 estágios da Revolução Industrial. (Adaptado de [1])

Na Tabela 1 ilustra-se o comparativo entre a utilização de Componente, Máquina e Sistema de Produção nas indústrias atuais com a I4.0, tendo sempre como ação a prevenção e análise preditiva destes três elementos.

Tabela 1 - Comparação das fábricas atuais com fábricas I4.0 (Adaptado de [1])

	Origem dos dados	Indústria atuais		Indústria 4.0	
		Atributos	Tecnologias	Atributos	Tecnologias
Componente	Sensor	Precisão	Sensores inteligentes & Detecção de Falhas	Auto consciente Prevenção automática	Monitorização da Degradação & Previsão de Vida Útil Restante
Máquina	Controlador	Produtividade e performance	Monitorização baseada em Condições & Diagnósticos	Auto consciente Prevenção automática Auto comparativa	Tempo de atividade com monitorização preditiva de Integridade
Sistema de Produção	Sistema em rede	Produtividade OEE	Operações Enxutas: Redução de trabalho e Desperdício	Auto configurável Auto manutenível Auto-organizado	Produtividade livre de preocupações

Alguns autores como em [1] e [8] defendem que a Indústria 4.0 é a nova Revolução Industrial do século XXI, pois permite uma visão autônoma e uso da tecnologia para produzir serviços e produtos de forma mais inteligente, atrativa, rápida e flexível com as necessidades do mercado atual, focando sempre na redução de custos e aumento na eficiência. Em contrapartida, haverá em torno de 5 milhões de tipos de trabalhos que poderão vir a ser extintos devido a esse processo de digitalização nas principais nações industrializadas até 2020 [1]. Adicionalmente, estima-se uma redução drástica na procura por produtos onde a qualidade é duvidosa e feita por tecnologia ultrapassada, ocasionando assim um prejuízo na indústria desatualizada devido sua ineficiência e altos custos operacionais [1].

2.2 Internet dos Serviços

A Internet dos Serviços ou *Internet of Services* (IoS) é caracterizada como um ambiente de computação distribuído [12] que provê o fornecimento total ou parcial de seus serviços através da Internet. A IoS pode ser consistida por participantes "online", infraestrutura de serviços, modelos de negócios e os serviços propriamente ditos da empresa para provimento do processo de negócio. Estes serviços podem ser utilizados de forma individual ou combinados entre si, de forma a prover um valor agregado ao negócio e fornecido por um ou mais fornecedores. [10]

2.3 Princípios de *Design* I4.0

Os princípios de *design* para a Indústria 4.0 é sustentada por 6 pilares que compõe a tecnologia para essa nova era, que são [10]:

Tabela 2 - Princípios de design de cada componente da Indústria 4.0 (Adaptado de [10])

	Sistemas Ciber-Físicos	Internet das Coisas	Internet de Serviços	Fábrica Inteligente
Interoperabilidade	X	X	X	X
Virtualização	X	-	-	X
Descentralização	X	-	-	X
Capacidade em tempo real	-	-	-	X
Orientação de serviço	-	-	X	-
Modularidade	-	-	X	-

Estes princípios são essenciais para a interconectividade, sincronismo e fluxo de informações entre o homem, a máquina e os processos que envolvem toda a cadeia de produção industrial, neste caso. A seguir uma breve explicação de cada um destes princípios [10]:

- **Interoperabilidade:** Citado como um dos principais facilitadores da Indústria 4.0, a interoperabilidade visa facilitar a comunicação através de padrões definidos entre os dispositivos que conectam os humanos às máquinas através de CPS, IoT e IoS;
- **Virtualização:** é a capacidade do CPS de realizar monitorização de processos físicos e simular todas as atividades destes processos em um ambiente virtual. Com isso, os utilizadores das plantas virtuais podem receber notificações de falhas, avisos e indicadores de máquinas e sensores;
- **Descentralização:** uma das características principais dos sensores IoT e processos IoS na manufatura de uma indústria é que são totalmente auto gerenciáveis, pois permitem parametrizações personalizadas de cada dispositivo, o que conduz a uma autogestão de cada atividade e passo-a-passo a ser executado dentro de uma cadeia de produção industrial. Com isso, torna-se dispensável (ou opcional) o planeamento e controle central;
- **Capacidade em tempo real:** é a capacidade de prover informações em tempo real para tomada de decisões, e esta tarefa é bem dirigida por dispositivos CPS e SCADA no chão de fábrica, conduzindo a coleta instantânea destes dados para uma mineração e transformação destes em informação útil, relevante e preditiva;
- **Orientação de serviço:** é a capacidade de tornar disponível, flexível e interoperável os serviços de empresas, CPS e humanos através da IoS. Com isso, um processo disponibilizado no IoS pode ser utilizado tanto para uma planta de fábrica como para outro processo completamente distinto ou fisicamente distante;
- **Modularidade:** são aqueles sistemas capazes de auto adaptar-se em meio a mudanças internas (sistemas, parametrizações) ou externas

(meio ambiente em que executam). São perfeitamente adaptáveis em períodos sazonais, onde as regras de negócio de determinados processos são constantemente alteradas.

2.4 Arquiteturas para a Manutenção 4.0

Tendo como base os conceitos, princípios e benefícios da I4.0, podemos pensar em seguida, na integração de todos os componentes e informações como sendo um todo, pensando em um modelo de arquitetura ideal para um funcionamento estável num dado Sistema de informação (SI), onde a sua falta pode acarretar em inconsistências no SI, riscos de falhas e, conseqüentemente, pode vir a ocasionar uma parada total em uma dia de produção de uma organização. Para se ter um fluxo de informações consistente e estável entre diferentes equipamentos e componentes em uma solução de automação, deve-se focar em novas tecnologias e esquecer os modelos tradicionais de arquitetura de automação que têm como base a divisão em camadas. Esse tipo de modelo pode vir a ser um grande gargalo, pois acaba por criar “ilhas” isoladas de Sistemas de Informação, o que pode ocasionar criação de obstáculos que limitam os acessos a algumas informações do sistema como um todo [3].

Para otimizar os processos de negócio através de uma nova arquitetura que utilize de forma inteligente as novas tecnologias emergentes no mercado, é feita uma análise geral da topologia da arquitetura atual da organização, de forma a identificar os sistemas utilizados, tipos de protocolo e a comunicação desses sistemas entre si [3]. Em seguida, verifica o quão adaptável os sistemas legados se encontram para receber as tecnologias oferecidas e implementadas na Manutenção 4.0, percebendo a adesão e suporte destes com as essas novas tecnologias.

Por fim, é utilizado o método denominado de Aplicação de Protocolo de Pesquisa [3], que consiste em coletar informações de arquitetura através de especialistas de cada área tecnológica e obter dessa forma informações da topologia de arquitetura corrente a fim de identificar barreiras e mitigar os riscos

e impactos para receber as tecnologias oriundas do I4.0. Uma vez identificados os requisitos necessários, são pesquisadas soluções para ultrapassar essas barreiras e evoluir para a implantação dessas novas tecnologias na plataforma atual da organização. O diagrama abaixo ilustra as três fases descritas acima.



Figura 4 - Definições do método de pesquisa. (Adaptado de [3])

Esse método de pesquisa tem como objetivo principal levantar requisitos e integrar as soluções e funções existentes em uma única plataforma integrada, flexível e adaptável para as novas tecnologias oferecidas pela Manutenção 4.0.

2.5 Manutenção 4.0: da visão à implementação

Uma vez arquitetada a solução voltada quem tem como objetivo aderir aos requisitos da Indústria 4.0, a organização analisa os componentes aderentes e elenca as novas tecnologias que seriam de mais-valia para a organização, tendo em vista a redução de custos, eficiência e qualidade na produção [4].

Entre as tecnologias voltadas para a Manutenção 4.0 dentro de uma indústria [4][6][2], estão:

- RFID (*Radio Frequency Identification*): são sensores de rádio frequência com identificação automática [4];

Um dos principais conjuntos de componentes de uma “Fábrica Inteligente” são os denominados Sistemas Ciber-Físicos (comumente conhecido como CPS, sigla em inglês), que consiste em peças de hardware e software de sistema de produção intensiva conectados através da internet e capazes de comunicarem entre si e também com outros componentes dotados da mesma tecnologia de comunicação “inteligente” por meio de RFID, Wi-Fi ou protocolos específicos da Internet-das-Coisas, onde carregam suas informações de características e qualidades. Dessa forma, o CPS permite a monitorização física de objetos e processos através da criação de uma simulação virtual dos diversos elementos do mundo físico, descentralizando assim o controle de decisão com diversos dispositivos autônomos[2].

O conjunto de sistemas voltados para a Manufatura Digital [13], tais como o MES e CPS [4], se combinam com as demais tecnologias oferecidas para a Manutenção 4.0 e formam o denominado Modelo Y (Figura 5 abaixo), que consiste em um modelo estratégico (organizado em forma de braços como um Y) que auxilia no processo de manufatura utilizando as tecnologias disruptivas de forma eficaz e eficiente.

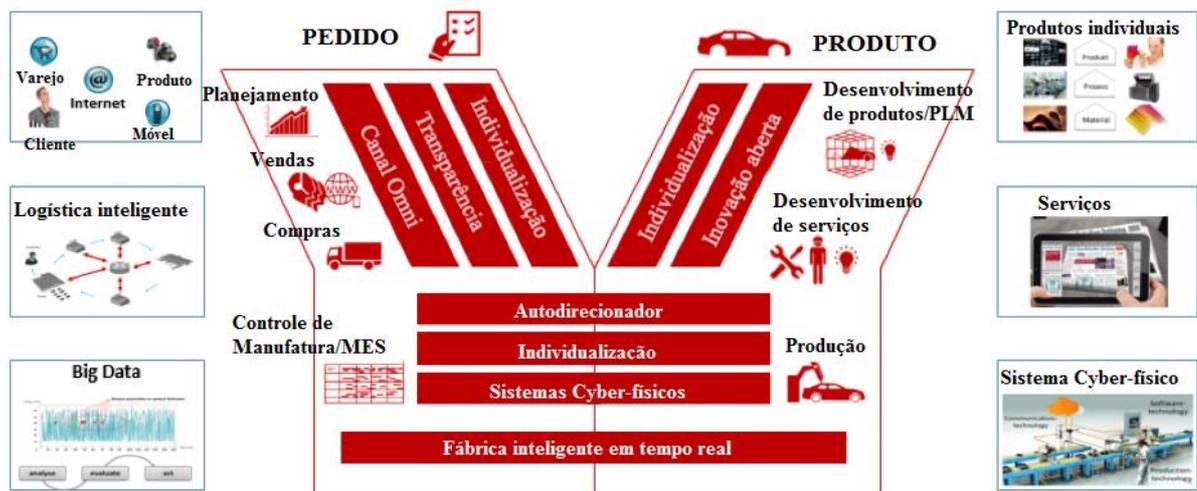


Figura 6 - Modelo Y e a Indústria 4.0. (Adaptado de [4])

Foi observado que as arquiteturas de *software* voltadas para a área industrial devem ser centradas e focadas no produto, onde adicionalmente as funções de logística ligadas ao MES devem ter acesso às características e qualidades do produto através do banco de dados [4]. Isto leva à existência de outra

tecnologia significativa ligada à Manutenção 4.0 para análises preditivas através de um volume massivo de dados de todo o processo produtivo da indústria: o tão conhecido *Big Data* [4].

Numa fábrica “inteligente”, os dados massivos são obtidos de diversas origens do chão de fábrica onde é feita sua análise e finalmente envia uma notificação para cada pessoa responsável toda vez que há uma anomalia ou uma falha é prevista ocorrer [14].

Outro exemplo interessante do uso de tecnologias voltadas para a Manutenção 4.0 ou simplesmente CBM (Manutenção baseada em Condição) é a ferramenta *Watchdog Agent*, que consiste num sistema de manutenção “inteligente” (IMS) com uma visão para desenvolver uma abordagem sistemática em prognósticos avançados para permitir que produtos e sistemas atinjam confiabilidade e alto desempenho com falhas tendendo a zero [15]. São algoritmos capazes de receber dados, processá-los e extrair características que permite detetar possíveis ocorrências de falhas e estima a vida útil restante de uma máquina [6].

A implementação de tais abordagens já referidas anteriormente exige uma arquitetura bem estruturada e impulsionada através do uso de infraestruturas das tecnologias emergentes de Tecnologias da Informação e Comunicação (TIC), tais como: Internet das Coisas (IoT), Computação em nuvem, análise avançada de dados e realidade aumentada.

A ISO 13374 [16] define um padrão de comunicação de dados para este tipo de arquitetura de sistemas, onde o fluxo destes dados começa no topo da arquitetura, e os dados de configuração de monitoramento são especificados para os vários sensores que monitoram o equipamento e, finalmente, resultam em ações a serem tomadas pela equipe de manutenção e operações. Este fluxo é ilustrado abaixo:

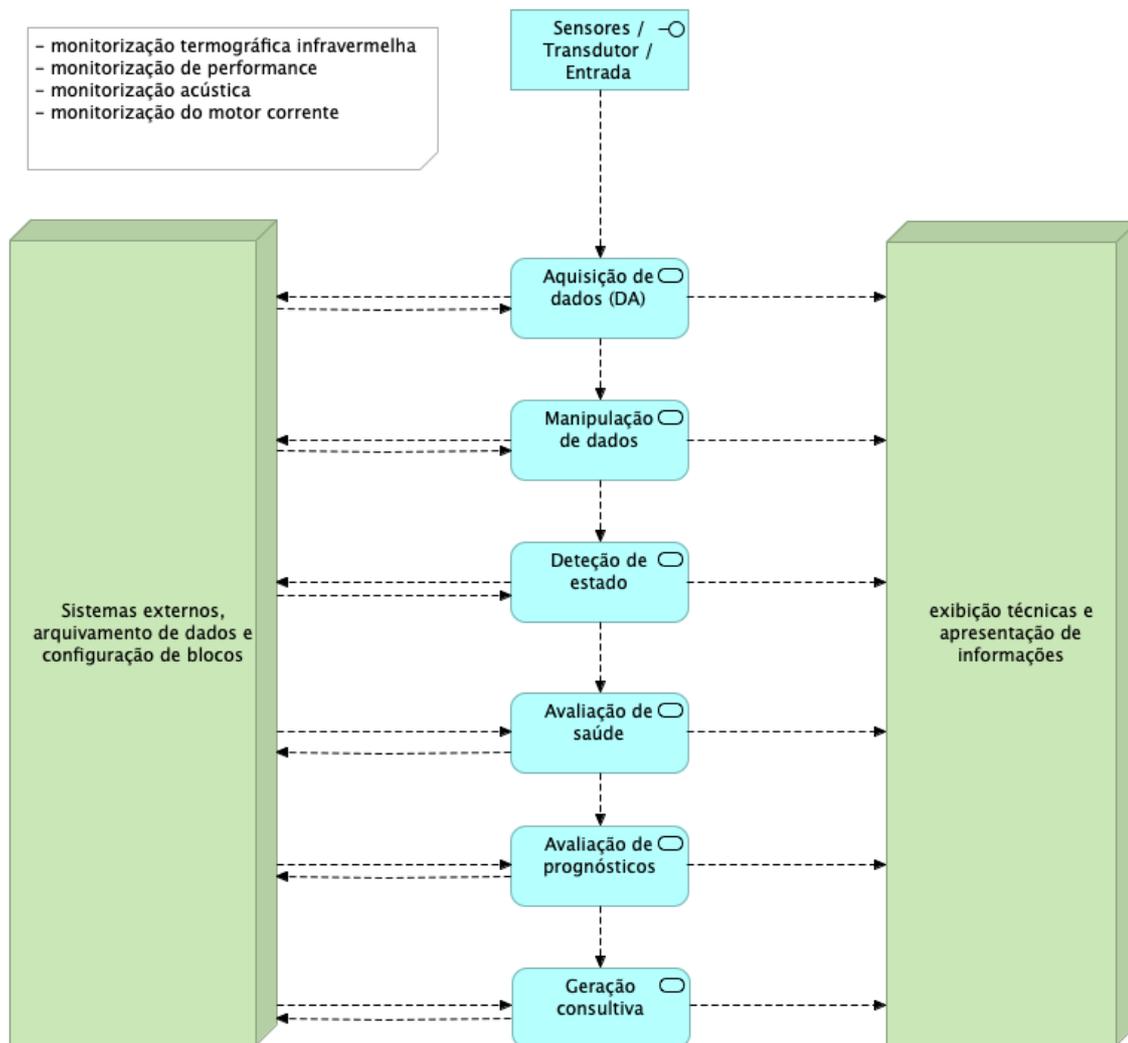


Figura 7 - Processamento de dados e blocos de fluxo de informações. (Adaptado de [14])

Neste modelo é utilizado o padrão de “Arquitetura de Sistema Aberto para Manutenção Baseada em Condições” (OSA-CBM) [6], onde a coleta, extração e uso de dados compreende sete camadas genéricas para atingir um sistema de camadas bem construídas, mas atualmente considera seis blocos funcionais que são:

- Aquisição de dados (AD): fornece o acesso a dados digitalizados de sensores ou transdutores e regista esses dados;
- Manipulação de dados (MD): realiza as transformações de sinal único e / ou multicanal e aplicação de algoritmos de extração de recursos especializados aos dados coletados;

- Deteção de estado (DE): executa o monitoramento da condição comparando recursos com valores esperados ou limites operacionais e retornando o indicador de condições e / ou alarmes;
- Avaliação de saúde (AS): determina se a saúde do sistema está sofrendo degradação, considerando a tendência no histórico de saúde, status operacional e histórico de manutenção;
- Avaliação de prognósticos (AP): projeta o estado de integridade atual do ativo no futuro considerando uma estimativa de perfis de uso futuros;
- Geração consultiva (GC): fornece recomendações relacionadas a ações de manutenção e modificação da configuração de ativos, considerando o histórico operacional, perfis de missão atuais e futuros e restrições de recursos.

Na arquitetura OSA-CBM, o fluxo de dados é feito através de blocos funcionais vizinhos, como podemos ver na Figura 7. Porém, caso haja necessidade, pode obter-se informações de blocos que não estejam próximos [6].

A arquitetura OSA-CBM propõe a criação de um sistema funcional capaz de implementar um sistema de manutenção inteligente e preditivo, englobando a grande variedade de tecnologias atuais direcionadas para a Manutenção 4.0, tais como: Internet das Coisas (IoT), Mineração de dados, Sistemas inteligentes e tudo relacionado com a evolução dos Sistemas Ciber-Físicos (CPS) [6].

Existe também uma arquitetura voltada para a Manutenção 4.0 denominada de Estrutura Categórica para Manufatura [8], que consiste numa matriz de nove aplicações (atuando desde a baixa até alta inteligência de automação complexa), originada do cruzamento de três tecnologias de nível de inteligência com a atuação em três seções de nível de engenharia para o setor de manufatura industrial, conforme exibido na matriz abaixo:

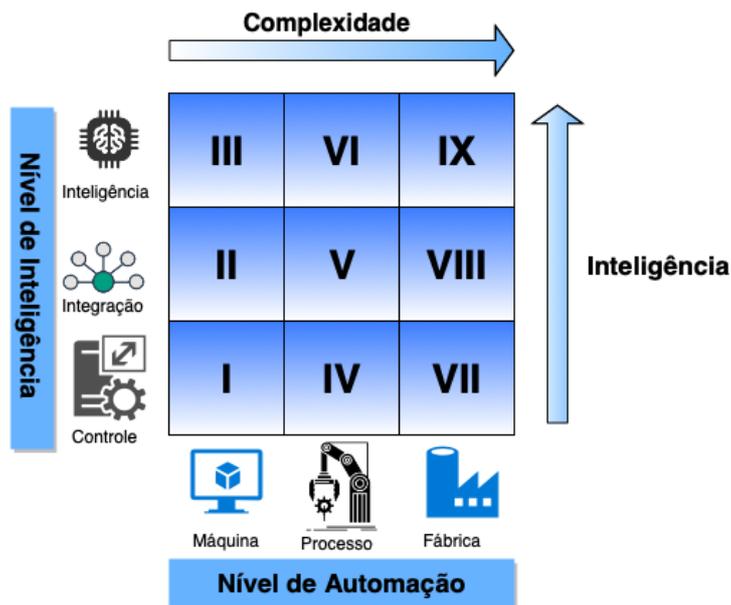


Figura 8 - Uma framework categórico de manufatura para a Indústria 4.0. (Adaptado de [8])

A *framework* (conjunto de conceitos e códigos de sistemas de informação usados para resolver uma situação de um determinado contexto em comum) funciona em sequência, como o exemplo anterior OSA-CBM. A uma interconexão controlada de cada sistema e equipamentos de I a IX como ilustrado na matriz, onde no sistema I são definidas configurações de máquinas com níveis de controles simples até se chegar à alta complexidade do sistema IX, que é definida como tecnologia de inteligência em um processo de fabricação industrial. Com esta estrutura, este tipo de fábrica oferece desde ajustes automáticos (como modelos de Sistemas Viáveis, que veremos a seguir) até manutenção preditiva, conscientização antecipada e outras aplicações com tecnologias voltadas para a Manutenção 4.0 [8].

Para uma melhor compreensão do fluxo de dados de um processo de manufatura de uma indústria com Manutenção 4.0, é ilustrado no modelo abaixo [17] a comunicação desde o chão de fábrica (sistemas MES, CPS) até um sistema interno para aquisição de peças, geralmente um ERP:

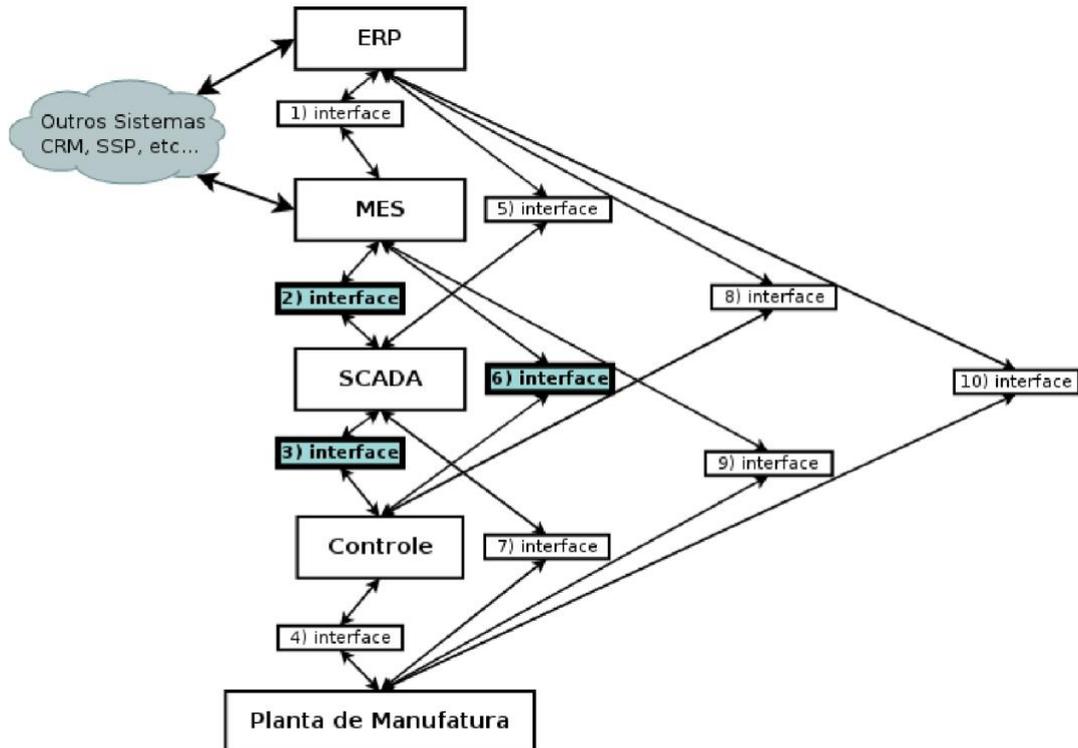


Figura 9 - Interface entre os sistemas ERP, MES, SCADA e a planta de manufatura. (Adaptado de [15])

Com esse tipo de relacionamento é possível, por exemplo, gerar arquivos no formato padrão XML (*eXtensive Markup Language* - Linguagem de Marcação Extensível) e utilizá-los como forma de comunicação entre sistemas distintos, transmitindo assim dados e respostas de processos que necessitam de monitorização [17].

2.6 Arquitetura de Sistemas Viáveis

O Modelo de Sistema Viável é composto por cinco componentes principais:

1. **Operações e Atividades principais (Sistema 1):** composto por uma coleção de sistemas operacionais, cada um contendo uma área de atividade operacional e orientados para a execução de operações. Eles devem se comunicar diretamente com o ambiente externo e entre si.
2. **Canais de informação/Coordenação (Sistema 2):** permite que atividades principais (Sistema 1) se comuniquem umas com as outras e, adicionalmente, permite ao Sistema 3 monitorar e coordenar as atividades com o Sistema 1. Resumindo, coordena o Sistema 1 para se manter estável.

3. **Estrutura e Controle/Gerenciamento (Sistema 3):** é um subsistema de MSV que estabelece regras, recursos, direitos e responsabilidades ao Sistema 1 e fornece uma ligação entre os Sistemas 4 e 5. É no Sistema 3 que se garante a otimização e qualidade dos processos para alcançar o objetivo principal da organização.
4. **Visão Inteligência (Sistema 4):** é a execução de funções inteligentes aos processos operacionais da organização, dado como pré-requisito o conhecimento prévio pelo Sistema 4 de todo o ambiente operacional da organização bem detalhado.
5. **Política de decisões (Sistema 5):** regula qualquer variável instável, gerada pelas interações entre o Sistema 3 e 4, utilizando-se das diversas políticas de decisões, responsabilidades e demandas da organização como um todo.

O modelo é composto por cinco componentes (subsistemas) principais para seu funcionamento, conforme ilustrado a seguir:

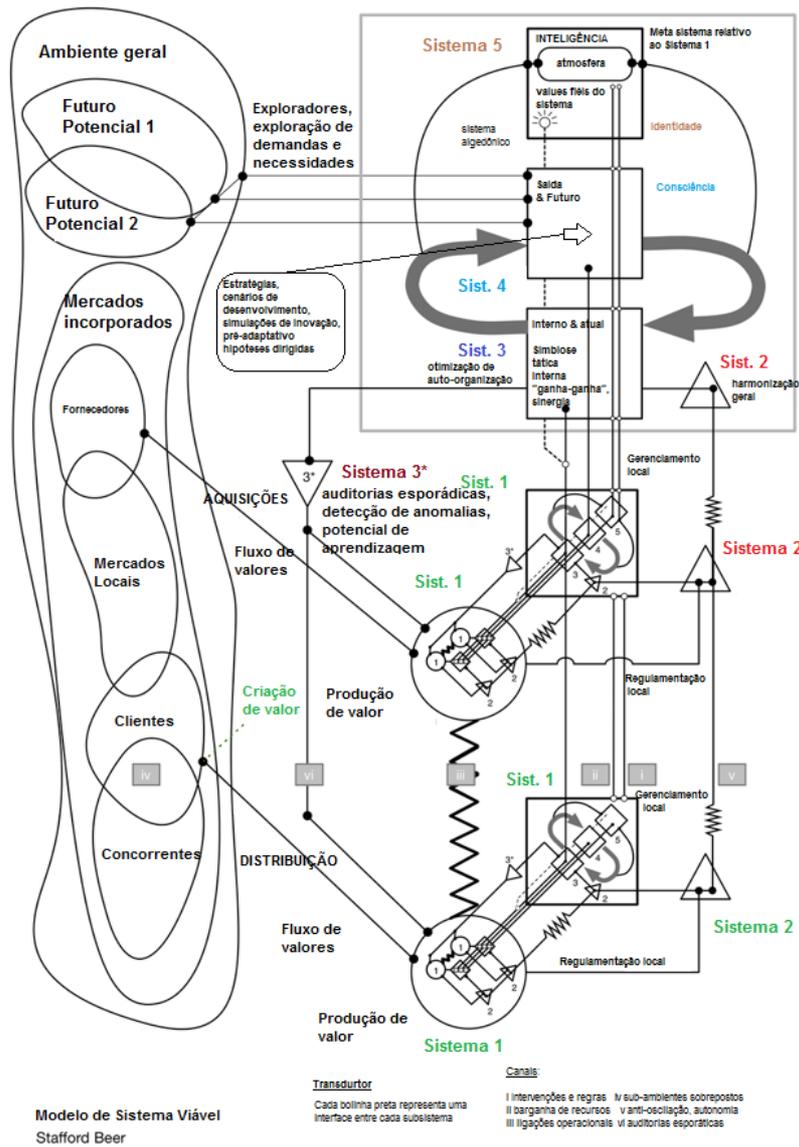


Figura 10 - Um modelo de sistema viável para uma corporação. (Adaptado de [5])

Esses cinco componentes são:

1. Operações e Atividades principais (Sistema 1);
2. Canais de informação/Coordenação (Sistema 2);
3. Estrutura e Controle/Gerenciamento (Sistema 3);
4. Visão Inteligência (Sistema 4);
5. Política de decisões (Sistema 5).

Nesse processo de modelação ou remodelação de negócios, a tecnologia constitui o meio principal de fornecimento de um "sistema nervoso" que

forneça o suporte necessário aos objetivos da organização em geral, sem o ónus da burocracia.

É proposto em [5] como poderia ser um modelo de sistema cuja a manutenção e ajuste é feita de forma automática, por sistemas dotados de conhecimento dos processos e informações de uma empresa, através da mineração de dados e autorregulação de configurações dos sistemas de manufatura de acordo com as regras de modelo de negócio inseridas (novas ou existentes) no contexto do Sistema de Informação corporativo em geral ou para parte de um processo de negócio.

3 Metodologia

3.1 *Design Science Research*

As validações necessárias foram feitas baseadas no *framework* das 7 principais diretrizes da Ciência do *Design*, que são:

Tabela 3 - Diretrizes da Ciência do Design (Adaptado de [5])

Diretrizes	Descrição
1- <i>Design</i> como artefacto	A pesquisa em Ciência do <i>Design</i> deve produzir um artefacto viável na forma de uma ideia, um modelo, um método ou uma instanciação.
2- Relevância do Problema	O objetivo da pesquisa em ciência do design é desenvolver soluções baseadas em tecnologia para problemas de negócios importantes e relevantes.
3- Avaliação de <i>design</i>	A utilidade, a qualidade e a eficácia de um artefacto de <i>design</i> devem ser rigorosamente demonstradas por meio de métodos de avaliação bem executados.
4- Contribuições de pesquisa	A pesquisa efetiva em ciência do design deve fornecer contribuições claras e verificáveis nas áreas do artefacto de <i>design</i> , fundamentos de design e / ou metodologias de design.
5- Rigor de Pesquisa	A pesquisa em Ciência do Design depende da aplicação de métodos rigorosos, tanto na construção quanto na avaliação do artefacto de <i>design</i> .
6- <i>Design</i> como um processo de pesquisa	A busca por um artefacto efetivo requer a utilização dos meios disponíveis para alcançar os fins desejados enquanto satisfaz as leis do ambiente problemático.
7- Comunicação de Pesquisa	A pesquisa em ciência do <i>design</i> deve ser apresentada de forma eficaz tanto para o público orientado para a tecnologia quanto para o orientado pela administração.

Neste trabalho, foi utilizado o modelo de sistemas viáveis e válido para ilustrar e exemplificar a arquitetura proposta. A arquitetura exemplificada é composta por componentes baseadas em tecnologia para problemas de negócio no

ambiente industrial, mais precisamente para aquelas onde é praticado o modelo de Manutenção 4.0.

3.2 Estratégia de investigação

De acordo com as pesquisas sistemáticas de forma crítica, se busca sempre a metodologia que mais se adequa ao processo de investigação de Sistemas de informação. A escolha de uma opção mais adequada leva em consideração diversos fatores, tais como: objetivos principais da investigação, o objeto a ser investigado, tipo de análises e resultados desejados para o trabalho científico [9].

Dito isso, temos como principal alvo deste trabalho a construção de um diagrama de modelo de arquitetura para sistemas de informação baseada em modelo de Sistemas Viáveis, onde este será integrado com sistemas Ciberfísicos utilizados nas tecnologias de implantação para a Indústria 4.0.

As etapas de pesquisa podem ser descritas conforme segue os passos abaixo:

- Primeiramente, se faz necessária a classificação dos sistemas de informação em forma de taxonomia, utilizados para os processos de negócio na organização, onde estes servirão de entradas (artefactos) para a aplicabilidade do modelo de Sistema Viável [5]. O resultado desta modelagem será uma arquitetura que reflita o modelo de Sistema Viável face aos componentes computacionais da organização;
- Em seguida, após a modelagem da taxonomia de sistemas, a pesquisa segue com configurações de regras e objetivos de cada componente na arquitetura proposta. O resultado final dessa etapa é um modelo de arquitetura integrando todos os componentes (dada suas respectivas tarefas) de forma adequada e viável;
- Na sequência, após a modelagem e integração desses componentes, é obtido como resultado principal a arquitetura de Sistemas Viáveis. Nesse passo o modelo proposto é validado através de um questionário on-line (direcionada a peritos da área de Sistemas de Informação com

especialidade em tecnologias emergentes da Indústria 4.0) composto de perguntas sobre os conceitos, definições, adaptação e aplicabilidade do modelo proposto no âmbito industrial;

- Finalmente, é acoplado o modelo de Sistemas Viáveis com a arquitetura de sistemas Ciber-físicos conectados a sensores de máquinas industriais que requer monitoramento de falhas e requisição automática de compra para reposição de peças, se porventura estiver na iminência de falhar. O resultado disso tudo será um grande modelo de arquitetura onde envolve o modelo de Sistemas Viáveis integrado com modelo dos sistemas Ciber-físicos e MES.

Para alcançar os objetivos citados acima, a estratégia de investigação aplicada foi a *Design Science* [9], onde consiste na criação de algo novo. Há um planejamento cauteloso e uma previsão dos resultados desejados com bastante atenção. Neste processo, existem 6 etapas a serem seguidas: identificação e motivação do problema, definição dos objetivos para uma solução, projeto e desenvolvimento, demonstração, avaliação e comunicação.

4 Modelo de Sistema Viável proposto para Manutenção 4.0

Dada a difícil manutenção de grandes sistemas monolíticos corporativos, onde suas complexas parametrizações são ajustadas diariamente de forma manual (até mesmo em organizações que já utilizam tecnologias emergentes de TIC), esse conjunto sistêmico vira alvo fácil para um possível estrangulamento geral em suas integrações, subsistemas e ajustes. Adicionalmente, este cenário caótico poderá vir a refletir diretamente no negócio, forçando a parar por exemplo uma produção fabril e causando prejuízos financeiros enormes, caso não seja detetada a falha antes de parar completamente o funcionamento da máquina industrial.

A proposta oferecida neste trabalho é a criação de uma arquitetura única e adaptável à realidade do ambiente da organização, baseada em Modelos de Sistemas Viáveis (MSV) (já proposto em [5]) e adaptado às novas tecnologias ligadas à Manutenção 4.0. O MSV ou VSM (termo em inglês, de *Viable System Model*), onde atuaria nesse contexto como um auxílio ao processo de diagnóstico e análise de problemas na organização e ao processo de redesenho organizacional no que visa os modelos de negócio.

Devido as suas principais características de autorregulação e autoconfiguração ao ambiente e processos, acredita-se que o modelo MSV seja perfeitamente adaptável com as tecnologias de Manutenção 4.0, pois essas características são bastante úteis e utilizadas onde necessita-se de constante análise e reconfiguração de indicadores de performance e padrão de qualidade para peças ou equipamentos reajustados em um setor de manufatura na indústria.

Com a ajuda da metodologia de Protocolo de Pesquisa [3], do formato estratégico do Modelo Y [4] e de processos de negócio disruptivos definidos através de estratégias Blue Ocean [4], a infraestrutura e a definição de processos a ser utilizada dentro da manufatura da indústria é definida e moldada com o objetivo de otimizar o processo de produção fabril, mesclando

equipamentos industriais já existentes com as tecnologias emergentes da Manutenção 4.0 e adaptando-se com o novo modelo proposto neste trabalho.

Em linhas gerais, a produção industrial tem hoje como foco a tecnologia para ajudar a catalisar a qualidade e redução de custos dos produtos manufaturados. Essa tecnologia se alinha perfeitamente com todos os envolvidos em uma produção fabril através do conceito e aplicabilidade da Manutenção 4.0.

No contexto de fluxo de dados de forma contínua e integrada, se necessita de uma arquitetura que se adeque perfeitamente aos sistemas legados existentes na organização e que seja adaptado para aceitar essas novas tecnologias oriundas da Indústria 4.0. Atualmente isso é um problema pois os sistemas apresentam diversas camadas onde muitas vezes estão isolados de todo o fluxo de negócio ou funções comuns, causando muitas vezes gargalos de informações, inconsistência e até mesmo falhas. Conseqüentemente, isso acarreta em impactos negativos para a operação de produção numa indústria e levando a sérios prejuízos financeiros.

Para mitigar e até mesmo sanar esse tipo de problema em certos casos, é proposta uma arquitetura voltada para I4.0 que visa ser autorregulável e autônoma a fim de prever e ajustar os sistemas e subsistemas de informação da organização, tornando dessa forma o sistema e, conseqüentemente, a operação industrial estável com alta disponibilidade produtiva.

A ideia da Manutenção 4.0 juntamente com o MSV tem como base automatizar e dinamizar a camada intermediária entre a fábrica e as partes superiores do modelo Y (vide Figura 5 acima), visando criar uma organização autorregulável capaz de agir de forma independente num meio ambiente específico, sendo esse “meio ambiente” tudo aquilo que envolve o processo de negócio em termos tecnológico, econômico, político, sociocultural e ecológico, dados os dados massivos (*Big Data*) da produção industrial é ajustado em tempo real essas variáveis através *Data Mining* (procedimento analítico que consiste em explorar uma quantidade massiva de dados, objetivando uma procura

sistemática de padrões consistentes)[2] e de lógicas de algoritmos com funcionalidades inteligentes, como é citado no componente do “Sistema 4” a seguir [5].

A proposta de arquitetura de um sistema viável que nos possibilite ter um Sistema de Informação que seja completamente adaptável às mudanças e de forma autónoma seria uma fonte de redução de riscos e custos, aumento de qualidade, tanto no processo de negócio quanto em celeridade de produção fabril.

Assim a Manufatura Digital (simulação de ambiente real de manufatura através de um ambiente virtual digitalizado e analisado através de indicadores e outros dados) [13] seria implementada numa indústria moderna mais automatizada, integrada e preventiva, permitindo assim uma tomada de decisão gerencial e da manufatura de forma mais assertiva, principalmente em termos de redução de custo utilizando as análises preditivas do *Big Data* para prever possíveis falhas de máquinas do processo de produção industrial, consoante aos dados coletados [18].

Com os conceitos e tecnologias proporcionadas pela Indústria 4.0, surgiu a possibilidade de desenvolver processos inovadores de manutenção para atender às exigências de qualidade e produtividade do mercado atual, o que chamamos neste trabalho de Manutenção 4.0. O sistema de manutenção ligado à manufatura industrial deve ser capaz de executar tarefas como: coleta de dados, monitorização, análise, planeamento, execução e apresentação de informações. Deve ser também levado em consideração o uso de todos componentes necessários do universo *IoT* e *IoS* (Internet dos Serviços, com aplicações ligadas à rede para serviços específicos no processo de produção, neste caso), como: sensores, atuadores, rede, processadores, *middleware* (aplicação que fornece serviços de *softwares*), banco de dados e sistemas corporativos e aplicativos [19].

Por meio dos cinco componentes referidos anteriormente no modelo de Sistemas Viáveis e estes, por sua vez, ligados à sistemas Ciber-Físicos em

peças de máquinas na linha de produção através de sensores “inteligentes” [20], é pretendido neste trabalho propor um modelo de arquitetura que seja capaz de identificar previamente peças ou máquinas que necessitam ser substituídas antes de falhar e prejudicar o processo de produção industrial, efetuando automaticamente a requisição de novas peças conforme fluxo do processo proposto em [21]. Desta forma, o sistema autônomo tornará estável toda a cadeia de manufatura e subsistemas que são utilizados no processo produtivo, sem interrupções por falhas de máquinas e/ou sistemas.

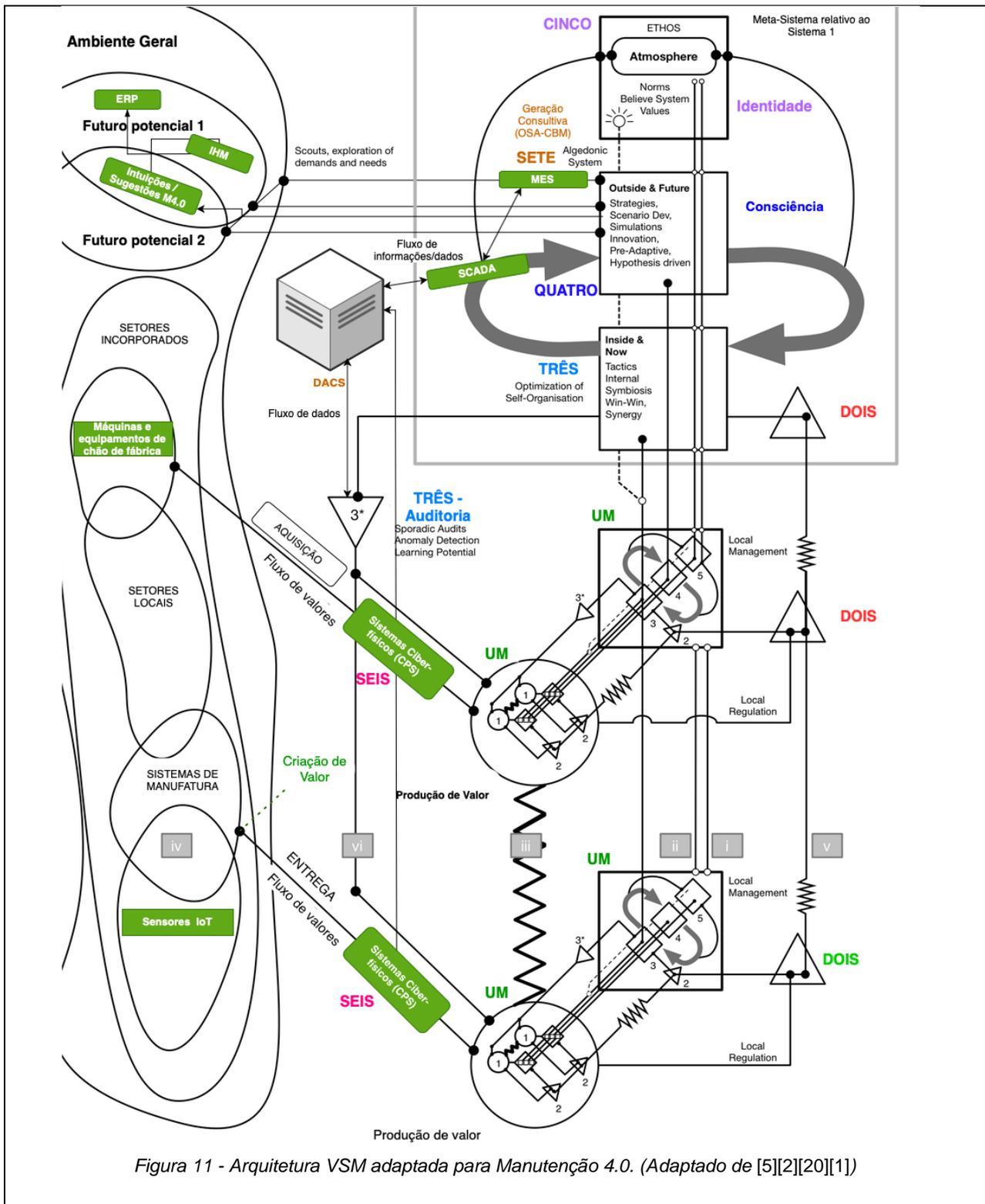
A nova arquitetura propõe ajudar a reduzir o gargalo da integração entre subsistemas e suas parametrizações manuais alinhadas ao negócio e, adicionalmente, prever paradas de produção fabril através de análise preditiva de dados de máquinas que precisam de substituição de peças.

Será representado neste modelo o fluxo do processo automático de análise, configuração e requisição de peças/máquinas em caso de falhas, que é compreendido por 7 etapas, sendo as duas últimas o complemento de tecnologias de I4.0 com as etapas anteriores definidas em [5]:

- I. Classificação de informações, a fim de categorizar (taxonomia) o tipo de cada informação existente na organização;
- II. Execução e validação das operações e atividades da organização, batizada de **Sistema 1**, onde se define uma coleção de sistemas operacionais, cada um compreendendo uma área de atividade operacional e suas execuções para o processo da organização, neste caso a manufatura industrial;
- III. Canais de informação/Coordenação (Sistema 2), para a orquestração das análises e configurações do Sistema 1 e 3, a fim de que as atividades recursivas do Sistema 1 sejam executadas com sucesso e as validações do Sistema 3 estejam alinhadas com as atividades do Sistema 1;
- IV. Estrutura e Controle/Gerenciamento (Sistema 3), é o modelo de Sistema Viável propriamente dito, onde nessa etapa será validado e

- monitorado os Sistemas 1 e 2 a fim de que sejam ajustados para direcionar a organização para seu objetivo corrente;
- V. Visão/inteligência (Sistema 4), onde todo o ambiente de operação da organização é conhecido pelo sistema e gerido, de forma autônoma e inteligente, suas funções operacionais;
 - VI. Na Política de decisões (Sistema 5), será executado para regular qualquer variação instável, gerada pelo fluxo de informações entre o Sistema 3 e 4;
 - VII. Os Sistemas Ciber-Físicos (**Sistema 6**) irão coletar dados através de dispositivos de IoT ou Internet das Coisas (tradução do inglês), que são dispositivos interconectados em redes e internet para coletar dados gerados em todos os níveis do processo de produção e usá-los em benefício da produtividade [14], [20]. Estes dispositivos ficam instalados nas máquinas e componentes, de forma inteligente e assertiva, a fim de armazená-los em massa no processo de produção (*Big Data*) e esses dados serem trafegados para o Sistema 7;
 - VIII. Os Sistemas de Execução de Fábrica (MES) (**Sistema 7**) irão receber e armazenar nos DACS (Servidores de Controle e Aquisição de Dados) [17] os dados massivos oriundos do Sistema 6 através de mecanismos de injeção de dados para posterior mineração de informações e, através do Sistema 4, será feita uma análise preditiva dessas informações armazenadas para a tomada de decisão através de sistemas SCADA (também chamado “Controle Supervisório e Aquisição de Dados”, são sistemas utilizados para monitorização, controle e registro de eventos em estados dos sistemas)[17], no caso de iminência de falhas de peças/máquinas. Uma vez sugerido a substituição da peça/máquina (através da funcionalidade de “Geração Consultiva”[6] da arquitetura OSA-CBM no Sistema 7) e aprovada a sua compra, o sistema irá disponibilizar as informações da peça avariada automaticamente para o sistema de Manufatura da indústria.

Abaixo segue o modelo adaptado para a Manutenção 4.0 no processo de manufatura industrial:



Conforme ilustrado no modelo VSM adaptado, segue abaixo o fluxo de dados até a geração de informações úteis para tomadas de decisão:

- a. O Sistema 1 adaptado para M4.0, diferente do modelo VSM original, recebe os dados de máquinas operacionais do ambiente industrial através do seguinte fluxo abaixo, padronizado pelo modelo OSA-CBM [6]:
- i. Sensores (pressão, temperatura, rotação, vibração entre outros relacionados com o nicho industrial) [22] [23] coletam os dados das máquinas no processo de Aquisição de Dados (AD);
 - ii. Em seguida, estes dados são enviados para serem processados através de avaliações prognósticas no processo de Manipulação de Dados (MD) no CPS;
 - iii. Os Sistemas Ciber-Físicos (CPS), por sua vez, entregam os dados manipulados para o Sistema 2.
- b. O Sistema 2 executa recursivamente a análise e coleta realizada pelos CPS's [2], bem como as seguintes atividades:
- agindo como um gerenciador de disponibilidade: avaliando constantemente a disponibilidade de todos os equipamentos;
 - gerenciador de configurações locais: realizando, se necessário, autoconfiguração local em caso de divergência de parâmetros de configuração ótima do equipamento;
 - monitorização e auditoria de eventos do sistema em geral.

Neste sistema, é validado se os dados coletados no Sistema 1 obedecem aos critérios de aceitação para o funcionamento de uma máquina saudável dentro dos padrões de funcionamento estável no setor de manufatura. É através de indicadores de Prognósticos e Gestão de Saúde ou PHM (dispositivos de monitoramento acoplado ao equipamento) [6][23] que são geradas as estimativas baseadas

em modelo para fornecer avaliações de saúde oportunas e precisas dos equipamentos elegíveis para análise no chão de fábrica.

- c. O Sistema 3 controla e envia os dados auditados do Sistema 2 para o DACS (conjunto de servidores de controle e aquisição de dados), onde executam as seguintes atividades:
- i. armazenam dados massivos (coletados através de sensores *IoT* [19] e enviados pelos CPS's) dos equipamentos de forma indexada e otimizada por assuntos (categorias) em base de dados, através de mecanismos de injeção de dados;
 - ii. realiza análise e comparação de dados gerando informações úteis através de processos de mineração de dados ou *Big Data* [2], de forma categorizada e junto com os dispositivos de *IoS* (*Internet Of Services*) ligados aos equipamentos, a fim de relacionar qualquer tipo de dados útil para tornar o ambiente sempre estável no processo de produção industrial, conforme ilustrado a seguir:

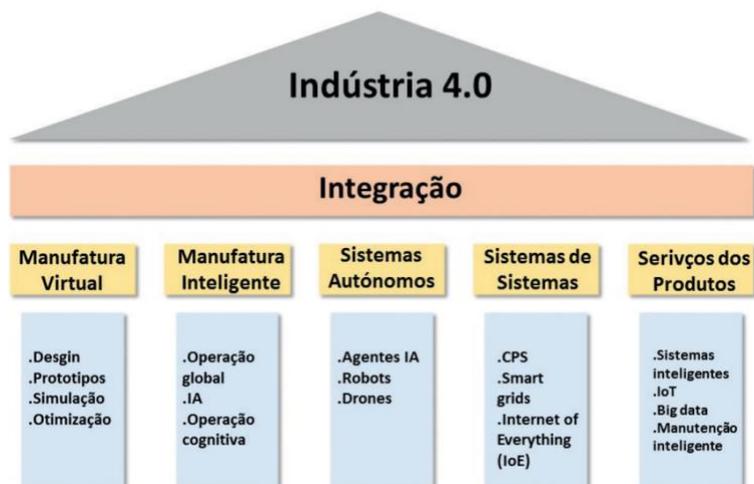


Figura 12 - Divisão de assuntos na fábrica "inteligente". (Adaptado de [2])

- d. No Sistema 4, os dados recebidos dos CPS's por sensores *IoT* e armazenados no DACS passam por diversos estágios de processamento da seguinte forma e de acordo com o modelo OSA-CBM sugerido em [6]:

- i. Os dados são filtrados nos sistemas SCADA [17] de acordo com as necessidades do processo de manufatura, nomeadamente na análise de tendências e alarmes, e só então manipulados os dados (MD) [6] pelo Sistema 4 usando taxonomia de métodos de agrupamento onde, nesta etapa, são propostos a utilização dos métodos de particionamento (como o *k-means*, que consiste basicamente na técnica de mineração de dados por deteção de anomalias através de dados históricos e divergentes [24]), métodos hierárquicos agrupados e divisivos [25] com o objetivo de explorar estes dados através da metodologia analítica [19];
 - ii. Em seguida, através de algoritmos de mineração de dados e Big Data utilizando técnicas de comparação de classes [24], onde através de técnicas do método *k-means* [24] é avaliado o estado (DE) [6] do equipamento, analisando (AS e AP) os dados persistidos no DACS com os dados divergentes (possíveis anomalias) coletados no PHM;
 - iii. Uma vez detetado o estado de saúde da máquina industrial (AS)[6], em seguida é gerado e enviado para o Sistema 7 o resultado da avaliação sobre a situação [AP] [6] divergente encontrada.
- e. O Sistema 5 continua atuando conforme o Modelo de Sistema Viável original, em busca constante de anomalias de acordo com variáveis pré-definidas para o funcionamento correto de cada equipamento. Adicionalmente, é recebido através do MES informações sobre todas as atividades de produção no chão de fábrica de forma detalhada desde o pedido até o produto final [17], permitindo assim a autorregulação de processos em tempo real através do VSM;
- f. O Sistema 6 compreende todos os sistemas e equipamentos de coleta de informações, tais como os sistemas Ciber-Físicos (CPS) e os sensores “inteligentes”, que têm como diferencial funcionalidades como

a auto monitorização e autoconfiguração para otimizar o monitoramento de processos complexos [20], características estas em conformidade com o modelo VSM original.

g. O Sistema 7 consiste em prover informações de geração consultiva (GC) [6] conforme etapas abaixo:

- i. Inicialmente, as informações geradas através de dados originados do MES [17] (sistemas que intermediam o fluxo de informações entre o chão de fábrica e o ERP) em conjunto com o histórico de informações recebidas do DACS (enviadas através do Sistema 5) geram informações estatísticas com as probabilidades de falhas de um determinado equipamento industrial, onde os dados de PHM [6] encontram-se abaixo dos padrões determinados previamente pela manufatura;
- ii. Em seguida, essas informações (em complemento com relatórios dos sistemas SCADA [17]) são exibidas em painéis de IHM (Interface Homem Máquina)[17] para uma diagnóstico mais detalhados sobre os equipamentos que necessitam de manutenção e os que precisam ser substituídos;
- iii. Adicionalmente, o sistema ERP da indústria obtém as mesmas informações estatísticas de máquinas com iminência a falhas, através da interface MES-ERP [17] por meio de troca de mensagens utilizando arquivos XML ou JSON [5]. Com isso, é disparado automaticamente uma notificação para aprovação de compra no sistema ERP (módulo que controla as compras de peças da manufatura) com a quantidade e modelo exato da peça ou equipamento a ser substituído;
- iv. Sendo aprovada a solicitação de compra, o processo no sistema ERP segue o fluxo de aquisição da peça ou equipamento a ser substituído. Dessa forma, é possível evitar uma parada total no

processo de produção industrial, que poderia resultar em horas ou dias de espera por uma reposição.

Acredita-se ser importante ressaltar que o fluxo de aprovação de compra de uma peça/máquina a ser substituída será aprovada pelo gerente da área de Manufatura, e este irá decidir se deve ou não ser feita a aquisição sugerida. A partir daí o processo será o fluxo normal de compras da própria organização, não havendo mais participação da arquitetura proposta.

Adicionalmente, espera-se que a solução proposta seja um contributo viável para quem deseja uma Manufatura Digital em sua indústria, onde o risco de parada de produção por falha de máquinas e equipamentos tendo a ser bastante reduzida com a implementação desta arquitetura.

5 Validação do modelo proposto

A investigação aplicada neste trabalho tem como objetivo validar o modelo proposto no capítulo 4 (Arquitetura VSM adaptada à Manutenção 4.0 [5][2][20][1]), com o aval de peritos renomados da área de pesquisa aqui exposta. Todas as perguntas expostas buscam validar a questão principal do trabalho, que é:

“Será possível uma arquitetura com visões de análise preditiva de dados a fim de permitir uma tomada de decisão de forma preventiva em relação ao mau funcionamento de máquinas industriais, se porventura houver iminência de ocorrer falhas?”

Cada questão propõe um objetivo de validação específico e sempre centrada na questão principal, conforme detalhado a seguir:

- Questão 1 é “O modelo proposto apresenta falhas perceptíveis?": o objetivo desta questão é entender se há falhas de processo ou fluxo de dados que impeçam o seu perfeito funcionamento, se implementado conforme modelo proposto.
- Questão 2 é “O modelo apresenta erros de concepção?": procura-se nesta questão validar quanto aos conceitos aplicáveis ao uso correto das tecnologias oferecidas para Manutenção 4.0 em um modelo autossustentável que é o VSM.
- Questão 3 é “O modelo apresenta falhas quanto à aplicabilidade sugerida?": procura-se identificar aqui se há falhas no que diz respeito ao processo de manutenção preditiva de equipamentos industriais, identificando a iminência de falhas antes de ocorrer de fato.
- Questão 4 é “O modelo lhe parece aplicável no universo industrial, nomeadamente no setor de manufatura?": o objetivo específico desta questão é validar de o modelo se enquadra para o processo de negócio e fluxo de informações no uso correto voltado ao processo produtivo da manufatura na indústria.

- Questão 5 é “O modelo aparenta suportar atingir os objetivos que levaram à conceção do mesmo?”: com esta questão objetiva-se alguma falha ou ausência de tecnologia oferecida pela Manutenção 4.0 que não suporte o processo de manutenção preditiva proposto.
- Questão 6 é “No modelo proposto, aparenta ser possível a sua implementação tanto em termos de infraestrutura (sensores inteligentes, fluxo de dados, armazenamento massivo entre outras tecnologias disponíveis para Manutenção 4.0) quanto de desenvolvimento dos subsistemas de informação propostos (sistemas de 1 a 7)?”: é desejado com esta questão identificar se há falhas ou impossibilidades no uso e conceitos do modelo, nomeadamente na infraestrutura dos equipamentos da Manutenção 4.0 (integrados com a maquinaria industrial) e os sistemas de informação que orquestram estes equipamentos.
- Questão 7 é “O modelo proposto parece ser aplicável a diversos segmentos da indústria (genérico) ou apenas para alguns setores de mercado específico?”: objetiva-se especificadamente com esta questão validar se o modelo suporta o processo de negócio para manutenção preditiva de equipamentos na manufatura industrial, seja esta indústria de qualquer segmento de mercado.

5.1 Coleta de dados

A coleta de dados foi iniciada no dia 17 de setembro de 2019, onde foram obtidas respostas de 4 peritos de Tecnologias de Informação nas áreas de Mineração de Dados, *Big Data* e tecnologias relacionadas com a Indústria 4.0. São eles:

- Dr. **Pedro Ruivo**: Professor Assistente Convidado da Universidade Nova de Lisboa – IMS (Lisboa, PT);
- Dr. **Victor Hugo Costa de Albuquerque**: Professor da Universidade de Fortaleza, membro Sênior da IEEE e líder do

Grupo de Pesquisa em Informática Industrial, Eletrônica e Saúde (Fortaleza-CE, Brasil). É também membro dos conselhos de Sensores e Biometria da IEEE e Editor Associado dos seguintes órgãos: *Applied Soft Computing, Measurement, IEEE Access, Computational Intelligence and Neuroscience, International Journal of Computers and Applications, Journal of Nanomedicine and Nanotechnology Research, Journal of Mechatronics Engineering, Progress in Human Computer Interaction*;

- Dr. **António Jorge do Nascimento Morais**: Professor Auxiliar do Departamento de Ciências e Tecnologias da Universidade Aberta de Lisboa (Uab) e vice-coordenador do curso de Licenciatura em Engenharia Informática da Uab;
- Dr. **Miguel Mira da Silva**: Professor Associado de Sistemas de Informação no Departamento de Engenharia Informática do Instituto Superior Técnico (IST) em Lisboa e Coordenador do Mestrado em Informação e Sistemas Empresariais na Universidade Aberta de Lisboa. Adicionalmente, é responsável do grupo de investigação em transformação digital no INOV.

Através de e-mails e videoconferência foi possível obter com os especialistas aspetos importantes para o refinamento do questionário em geral.

5.2 Procedimentos para análise

Foi utilizado o recurso de formulários oferecido pela universidade através do pacote Office 365: o *Microsoft Forms*. Com esta ferramenta foi possível coletar as respostas tanto por dispositivos móveis (telemóvel, *tablets*, etc.) quanto por computador e ainda prover informações precisas sobre os resultados das respostas do questionário e estimativa do tempo médio que cada participante levou para responder o questionário por completo.

5.3 Apresentação e análise dos dados

A primeira pergunta do questionário é de classificação, portanto não foi computada para este capítulo de exibição dos dados coletados. As demais questões foram contabilizadas e com alto grau de validação, pois trata-se de um público-alvo de peritos na área. O tempo médio de resposta do questionário foi de 11 minutos e 37 segundos.

1- O modelo proposto apresenta falhas perceptíveis?

Dada a análise dos peritos, todos concordam que não há falhas de processo ou fluxo de dados que impeçam seu funcionamento no estado normal caso seja implementado.



2- O modelo apresenta erros de concepção?

Nesta questão, todos concordam que não há erros conceituais no modelo proposto, orientados ao uso das tecnologias dentro do contexto de Manutenção 4.0.



3- O modelo apresenta falhas quanto à aplicabilidade sugerida?

Os peritos em sua unanimidade assumem terem identificado falhas quanto ao uso do modelo proposto para análise preditiva da vida útil para máquinas industriais.



4- O modelo lhe parece aplicável no universo industrial, nomeadamente no setor de manufatura?

Todos os peritos concordam que o modelo proposto é perfeitamente aplicável para o setor de manufatura no processo de produção industrial, enquadrado no processo de negócio para este fim.



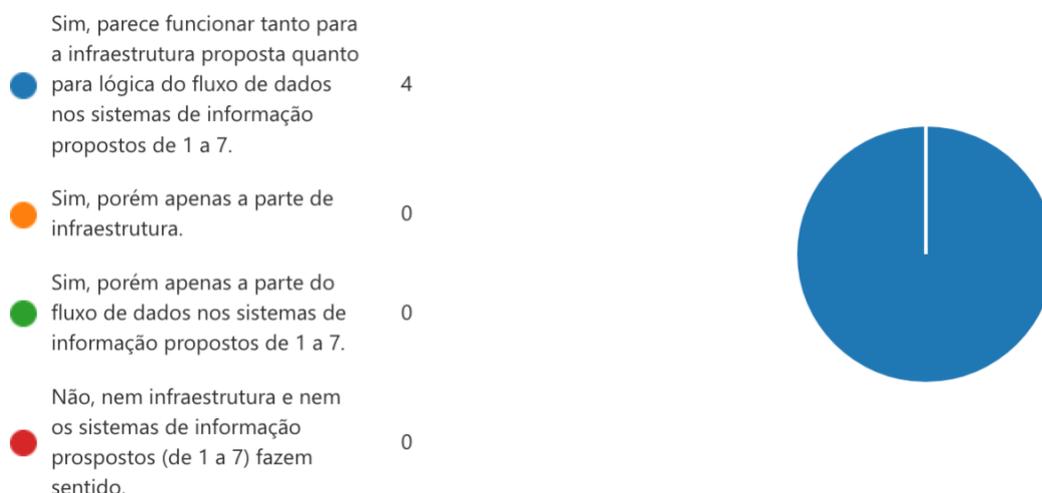
5- O modelo aparenta suportar atingir os objetivos que levaram à conceção do mesmo?

As tecnologias utilizadas no modelo estão em conformidade com as praticadas na instalação de processos industriais voltados para a Manutenção 4.0, assim afirmam todos os peritos através do resultado desta resposta.



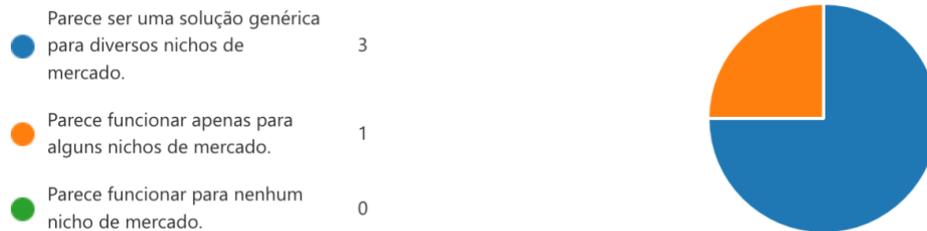
6- No modelo proposto, aparenta ser possível a sua implementação tanto em termos de infraestrutura (sensores inteligentes, fluxo de dados, armazenamento massivo entre outras tecnologias disponíveis para Manutenção 4.0) quanto de desenvolvimento dos subsistemas de informação propostos (sistemas de 1 a 7)?

O uso da infraestrutura (conexões, integrações e arquitetura) e Sistemas de Informação (descritas entre os sistemas de 1 a 7 no modelo) estão, segundo a resposta dos peritos, em conformidade com as melhores práticas adotadas para a aplicabilidade da Manutenção 4.0, tanto em termos de equipamentos quanto no fluxo de informações até o seu destino e propósito final.



7- O modelo proposto parece ser aplicável a diversos segmentos da indústria (genérico) ou apenas para alguns setores de mercado específico?

Nesta questão um dos peritos acredita que o modelo é aplicável para apenas alguns nichos de mercado, onde este afirma que modelos não testados geralmente apresentam alguma inconsistência para casos particulares. Em contrapartida, o restante dos três peritos em sua maioria afirma ser uma solução genérica para diversos segmentos de mercado no âmbito industrial.



5.4 Análise dos dados apresentados

Dada a compilação do resultado das respostas do questionário para a validação do modelo proposto, conclui-se que é possível a arquitetura e implementação de um modelo “inteligente” para análise preditiva de máquinas e equipamentos industriais, onde sua iminência de falhar é detetada por um fluxo sincronizado de sensores “inteligentes”, dados e informações sugestivas e preditivas, com o objetivo de solucionar paradas imediatas num processo de produção industrial, com a substituição antecipada destas peças.

Verificou-se adicionalmente que, por unanimidade das respostas dos peritos convidados, é um modelo VSM válido e adaptado à Manutenção 4.0 que possivelmente pode ser implementado de forma genérica em setores de manufatura, sem falhas de fluxo e para qualquer nicho de mercado.

Para o caso de exceções de adaptação do modelo ao negócio em específico, é possível adaptar-se de forma simples devido à sua

natureza flexível por ser um modelo de Sistema Viável de fácil modificação.

6 Conclusão

Dado o modelo proposto e o fluxo de informações arquitetado entre os Sistemas de Informação de 1 a 7, acredita-se que (através da validação e aprovação dos peritos) é possível implementar um modelo de Sistema Viável capaz de adaptar-se às tecnologias emergentes citadas da Manutenção 4.0, além de prover informações preditivas precisas sobre o estado da vida útil máquinas e equipamentos industriais monitorizadas bem como as sugestões de trocas/melhorias em cada equipamento monitorizado.

De acordo com a análise dos dados aqui apresentados, acredita-se que o modelo seja válido e adaptável ao universo industrial, mais precisamente no processo de negócio da manufatura em diversos nichos de mercado. Com isso, entende-se que os objetivos deste trabalho em relação ao provimento de um modelo de SI adaptado à Manutenção 4.0 em indústrias foram atingidos, possibilitando assim uma produção industrial mais eficaz e sem interrupções inesperadas por falhas de máquinas.

6.1 Contribuições

A contribuição principal deste trabalho é a proposta de uma arquitetura de SI ideal para as indústrias que procuram inovar no setor de manufatura de sua organização, tendo sempre como informações as configurações ideais (resiliente a mudanças) e a monitorização de falhas no ambiente industrial por funções inteligentes ligadas a sistemas autônomos através de modelos de Sistemas Viáveis.

Além disso, as análises preditivas do modelo proposto, que é ligado às tecnologias oferecidas na Indústria 4.0 através de sistemas Ciber-físicos, proporciona ao processo de manufatura mais segurança e fluidez sem interrupções inesperadas na fabricação de produtos por motivos de falhas de equipamentos ou peças de máquinas. Isso graças à essa análise preditiva e inteligente efetuadas pelo modelo de Sistemas Viáveis e controladas por MES, que identifica a iminência da ocorrência de falhas e sugere uma requisição de compra com informações da peça/máquina avariada.

6.2 Limitações do trabalho desenvolvido

O fato de estarmos atravessando uma revolução industrial atualmente, que é a 4ª revolução ou Indústria 4.0 [13], faz com que as implementações nesse campo ainda se encontrem em fases iniciais em grande parte do mundo. Com isso a exploração das tecnologias de produção com as tecnologias de informação ainda está amadurecendo e se torna difícil encontrar trabalhos mais voltados para essa área.

Além disso, dado o elevado custo e a complexidade de sistemas inteligentes se conectarem com sistemas já existentes nas fábricas, a implementação de tecnologias para a manutenção preditiva nem sempre é uma tarefa simples e muitas vezes carregada de aversões a mudanças dos próprios funcionários que utilizariam a tecnologia e também as limitações da infraestrutura existentes na companhia [6].

Apesar de haver cenários implementados da vida real do modelo de Sistemas Viáveis [26], não foi encontrado neste trabalho de investigação implementações com SI's e muito menos com as tecnologias recentes da Indústria 4.0 voltadas para a Manutenção 4.0.

6.3 Trabalho futuro

A ideia imediata e principal que sugere este trabalho é a implementação da arquitetura de Sistemas de Informação proposta em grandes indústrias com necessidade de inovar no processo de manutenção preditiva na manufatura industrial. Em seguida, gerar os resultados de antes e depois da implementação e analisar os ganhos obtidos na produção do processo fabril como um todo.

Bibliografia

- [1] D. Vuksanović, J. Ugarak, e D. Korčok, «Industry 4.0: the Future Concepts and New Visions of Factory of the Future Development», 2016, n. October, pp. 293–298.
- [2] L. M. Pires, «Manutenção na Indústria 4.0», 2018.
- [3] M. Saturno, V. Moura Pertel, F. Deschamps, e E. De Freitas Rocha Loures, «Proposal of an Automation Solutions Architecture for Industry 4.0», em *DEStech Transactions on Engineering and Technology Research*, 2018, n. icpr.
- [4] A. Scheer, «Whitepaper - Industry 4.0 : From vision to implementation», n. September, 2015.
- [5] A. Selin e V. Santos, «An architecture for a viable information system», 2018.
- [6] A. Chacada *et al.*, «Maintenance 4.0 - Intelligent and Predictive Maintenance System Architecture», 2018.
- [7] S. Johnson, «What Are the Advantages & Disadvantages of Hierarchical Structure? | Chron.com», 2019-01-25, 2019. [Em linha]. Disponível em: <https://smallbusiness.chron.com/advantages-disadvantages-hierarchical-structure-66002.html>. [Acedido: 24-Fev-2019].
- [8] J. Qin, Y. Liu, e R. Grosvenor, «A Categorical Framework of Manufacturing for Industry 4.0 and beyond», *Procedia CIRP*, vol. 52, pp. 173–178, 2016.
- [9] Ken Peffers, Tuure Tuunanen, Marcus A. Rothenberger, e Samir Chatterjee, «A Design Science Research Methodology for Information Systems Research», *J. Manag. Inf. Syst.*, vol. 24, n. 3, pp. 45–77, 2007.
- [10] D. Horton, G. Prain, e G. Thiele, «Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios: A Literature Review», *Soc. Sci.*, n. January, 2015.
- [11] N. Kazantsev, «Benefits of Industry 4.0 experiments as envisioned by BMW, Bosch, Volkswagen and other automotive manufacturers», n. July 2017, 2018.
- [12] E. Aitenbichler *et al.*, «Shaping the Future Internet», *Ubiquitous Comput. Commun. J.*, vol. Special Is, n. September, pp. 1–7, 2009.
- [13] M. Cardoso e R. Coradine, *Caminhos da Manufatura: Uma abordagem à Manufatura Digital*, 1.a ed. São Paulo, 2016.
- [14] D. A. Rossit, F. Tohmé, e M. Frutos, «Industry 4.0: Smart Scheduling», *Int. J. Prod. Res.*, n. November, pp. 0–29, 2018.
- [15] L. Liao, H. Wang, e J. Lee, «A reconfigurable watchdog Agent® for machine health prognostics», *Int. J. COMADEM*, vol. 11, n. 3, pp. 2–15, 2008.
- [16] I. Standard, M. Vibration, I. Standard, S. E. Cie, e I. Standard, «International Standard», vol. 2004, 2004.
- [17] Y. K. Lopes, «Integração dos Níveis MES, SCADA e Controle da Planta de Manufatura com Base na Teoria de Linguagens e Autômatos», Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC, 2012.
- [18] E. Souza, *Entenda Sobre Indústria 4.0: A Quarta Revolução Industrial que estamos vivendo Hoje!* 2018.
- [19] H. Algabroun, M. U. Iftikhar, B. Al-najjar, e D. Weyns, «Maintenance 4.0 Framework Using Self- Adaptive Software Architecture», *Proc. 2nd Int. Conf. Maint. Eng. IncoME-II 2017 Univ. Manchester, UK*, pp. 1–11, 2017.

- [20] A. Schütze, N. Helwig, e T. Schneider, «Sensors 4.0 - Smart sensors and measurement technology enable Industry 4.0», *J. Sensors Sens. Syst.*, vol. 7, n. 1, pp. 359–371, 2018.
- [21] Y. Lu, F. Riddick, e N. Ivezic, «Advances in Production Management Systems. Initiatives for a Sustainable World», 2016.
- [22] D. Jarrell, D. Sisk, e L. Bond, «Prognostics and condition based maintenance (CBM) a scientific crystal ball», ... *WA, Int. Congr. Adv. Nucl. ...*, n. May, pp. 1–8, 2002.
- [23] M. Baybutt, C. Minnella, A. Ginart, P. W. Kalgren, e M. J. Roemer, «Improving digital system diagnostics through Prognostic and Health Management (PHM) technology», *AUTOTESTCON (Proceedings)*, n. June 2014, pp. 537–546, 2007.
- [24] L. Kwao, J. K. Panford, e J. Ben Hayfron-acquah, «COMPARATIVE ANALYSIS OF K-MEANS DATA MINING AND OUTLIER DETECTION APPROACH FOR NETWORK-BASED INTRUSION DETECTION», n. May, 2018.
- [25] W. Lefebvre-Ulrikson, G. Da Costa, L. Rigutti, e I. Blum, «Data Mining», *Atom Probe Tomogr. Put Theory Into Pract.*, n. June, pp. 279–317, 2016.
- [26] R. Espejo, A. Gill, e J. Á. A. Carvalho, «The viable system model as a framework for understanding organizations», *Malhotra, Y. (Eds.), Knowl. Manag. Virtual Organ. Idea Gr. Publ. 2000.*, n. October 2011, pp. 350–364, 1997.