Universidade Federal do Espírito Santo
Centro Tecnológico
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Dissertação de Mestrado

Lorrainy Rembiski Delfino

Proposta de um Modelo de Arquitetura e um Modelo de Maturidade e Aderência para a Internet das Coisas na Indústria.

Vitória, ES, Brasil
Julho 2020

Lorrainy Rembiski Delfino

Proposta de um Modelo de Arquitetura e um Modelo de Maturidade e Aderência para a Internet das Coisas na Indústria.

Esta dissertação de Mestrado foi submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica em nome do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requerimento parcial para a graduação em Mestre de Engenharia Elétrica.

Universidade Federal do Espírito Santo – UFES

Departamento de Engenharia Elétrica

Programa de Pós-Graduação

Supervisor: Anilton Salles Garcia

Vitória, ES, Brasil

Julho 2020

Ficha catalográfica disponibilizada pelo Sistema Integrado de Bibliotecas - SIBI/UFES e elaborada pelo autor

---

Rembiski Delfino, Lorrainy, 1995-
R385p Proposta de um Modelo de Arquitetura e um Modelo de Maturidade e Aderência para a Internet das Coisas na Indústria / Lorrainy Rembiski Delfino. - 2020.
98 f. : il.

Orientador: Anilton Salles Garcia.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Internet das Coisas na Indústria. 2. Modelos de Arquitetura de Referência. 3. Modelos de Maturidade. 4. Internet das Coisas. 5. Dispositivos Eletrônicos Inteligentes. I. Salles Garcia, Anilton. II. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. III. Título.

CDU: 621.3

Lorrainy Rembiski Delfino

Proposta de um Modelo de Arquitetura e um Modelo de Maturidade e Aderência para a Internet das Coisas na Indústria.

Esta dissertação de Mestrado foi submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica em nome do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requerimento parcial para a graduação em Mestre de Engenharia Elétrica.

Trabalho Aprovado. Vitória, ES, Brasil, 2 de julho , 2020:

Anilton Salles Garcia
Supervisor

Assinado digitalmente por: Ralf Luis De Moura
O tempo: 21-09-2020 07:33:14

Ralf Luis de Moura
Banca Examinadora

Gustavo Pessin
Banca Examinadora

Maxwell Monteiro
Banca Examinadora

Vitória, ES, Brasil

Julho 2020

Alguns infinitos são maiores que outros infinitos.

Agradecimentos

Primeiramente, gostaria de agradecer a Deus por me dar forças para prosseguir e concluir minha pesquisa. Em segundo lugar, quero agradecer à minha família, amigos, namorado, por me apoiarem e entenderem meus momentos de solidão e ausência durante a produção e conclusão da pesquisa. Além disso, quero agradecer ao meu supervisor, Anilton Garcia, e à meu co-supervisor, Ralf Moura, por me guiarem nos caminhos certos, mesmo quando não tive fé ou perdi-a me de entender para onde meu caminho seguia em minhas grandes imaginações. Sou grata a meus primos, Fabricia D. Rembiski e Carlos Magno C. de Souza, que me guiaram desde a minha graduação nesta barca e sempre estiveram presentes para responder às minhas perguntas, até mesmo as mais loucas, e como sempre dizemos: "Cada pedacinho do caminho é um pé a mais para chegar no sonho final, dure o tempo que durar, de um dia me tornar Tony Stark". Também sou grata por toda a assistência da equipe de recursos humanos e do suporte técnico do LabTel que me auxiliaram durante parte do tempo em que estive presente no laboratório, e sou a todos os meus colegas e amigos, que também estavam no caminho da pesquisa, motivando-me a não desistir, porque eles já haviam passado por aqueles momentos em que eu estava vivendo.

"Nunca devemos ter medo de ladrões ou assassinos.
São perigos externos e os menores que existem.
Temamos a nós mesmos.
Os preconceitos é que são os ladrões;
os vícios é que são os assassinos.
Os grandes perigos estão dentro de nós.
Que importância tem aquele que ameaça
a nossa vida ou a nossa fortuna?
Preocupemo-nos com o que põe em perigo a nossa alma.
(Victor Hugo, Les Misérables)

Abstract

Industry 4.0 encompasses several fields of action for the industrial infrastructure, regarding the technological instance. Today it is common to find the term Industrial Internet of Things (IIoT), as its designator. This term has a broad architecture of systems and applications that require flexible and software-definable capacity in order to solve industrial challenges, such as real-time performance, security, reliability, scalability and quality of service. In this context, some industrial consortia opted to develop these tools and link them to architectures for their own use, and made the progress of this action broaden up to the design of the Reference Architecture Model (RAM). This work aimed to characterize a qualification filter and check some of the RAM's functionalities, such as: security and privacy, scalability, standardization, interoperability, communication, semantic orientation and modularity, to generate a Maturity and Adherence Model (MMA) with a level of abstraction for these software attributes. It was also presented some RAMs produced by industrial consortia, independent companies and academics researchers to, together with MMA, produce a RAM with a high level of abstraction. Then, a RAM model was produced, based on the characteristics of the discussed RAMs and the generated MMA. A case study and analysis was performed with the application of MMA in the researched ADRs. The analysis of the results of the case study showed that of the RAMs presented, the Industrial Internet Reference Architecture (IIRA) obtained the best score regarding the tested functionalities. Another analysis carried out was the performance of the functionalities by the architectures, which demonstrated that security and privacy is the functionality that RAMs most invest in development.

Keywords: Industrial Internet of Things, Industry 4.0, Reference Architecture Model, Maturity and Adherence Model.

Resumo

A Indústria 4.0 engloba diversos campos de ação para a infraestrutura industrial, quanto a instância tecnológica. Hoje é comum encontrar o termo *Industrial Internet of Things* (em português Internet das Coisas na Indústria - IIoT), como designador da mesma. Esse termo possui uma arquitetura ampla de sistemas e aplicações que exigem capacidade flexível e definível por *software*, a fim de resolver os desafios industriais, como performance em tempo real, segurança, confiabilidade, escalabilidade e qualidade de serviço. Nesse contexto, alguns consórcios industriais optaram por desenvolver essas ferramentas e atrelá-las às arquiteturas para o seu uso próprio, e fez que o progresso desta ação ampliasse-se até a concepção do *Reference Architecture Model* (em português Modelo de Arquitetura de Referência - RAM). Este trabalho teve como propósito a caracterização de um filtro de qualificação e verificação de algumas das funcionalidades da RAM, tais como: segurança e privacidade, escalabilidade, padronização, interoperabilidade, comunicação, orientação semântica e modularidade, para gerar um Modelo de Maturidade e Aderência (MMA) com um nível de abstração para esses atributos de *software*. Apresentou-se, também, algumas RAMs produzidas por consórcios industriais, empresas independentes e pesquisadores da academia para, em conjunto com o MMA, produzir uma RAM com alto nível de abstração. Produziu-se, então, um modelo de RAM, com base nas características das RAMs discutidas e do MMA gerado. Realizou-se um estudo de caso e uma análise com a aplicação do MMA nas RAMs pesquisadas. A análise dos resultados do estudo de caso expôs que das RAMs apresentadas, o *Industrial Internet Reference Architecture* (sem tradução - IIRA) obteve a melhor pontuação quanto as funcionalidades testadas. Outra análise realizada foi a performance das funcionalidades pelas as arquiteturas, essa demonstrou que a segurança e privacidade é a funcionalidade que as RAMs mais investem em desenvolvimento.

Palavras-Chaves: Internet das Coisas na Indústria, Indústria 4.0, Modelos de Arquitetura de Referência, Modelo de Maturidade e Aderência.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Infraestrutura do amadurecimento de uma RAM. 28
Figura 2 – Designação de uma característica para a RAM. 28
Figura 3 – Estrutura do RAM do IIC, o *Industrial Internet Reference Architecture* (sem tradução - IIRA) (1). 30
Figura 4 – Formato abstrato para elaboração de modelo de maturidade. 32
Figura 5 – Estrutura Análise da IIoT proposta por (2). 35
Figura 6 – Infraestrutura conceitual da revisão sistemática da literatura de (3). . . 36
Figura 7 – Niveis de Maturidade do CMMI (4). 37
Figura 8 – Esquemático da ordem de metodologia da pesquisa. 40
Figura 9 – Arquitetura de desenvolvimento da pesquisa. 40
Figura 10 – RAMI 4.0 (5). 62
Figura 11 – Plataforma Predix (6). 64
Figura 12 – MindSphere (7). 66
Figura 13 – SEPICOM. 74
Figura 14 – Escala das RAMs quanto a aplicação do MMA4RAM. 85
Figura 15 – Escala do desenvolvimento das funcionalidades pelas RAMs com a aplicação do MMA4RAM. 85
Figura 16 – Carta de aceite de artigo produzido sobre este trabalho. 90

Lista de tabelas

Tabela 1 – Fatores considerados em Negócios e Tecnologia para implantação de um projeto com IoT. 24
Tabela 2 – MMA4RAM. 58
Tabela 3 – Continuação do MMA4RAM. 59
Tabela 4 – Referências das arquiteturas utilizadas na Tabela 5. 75
Tabela 5 – Aplicação do MMA nas RAMs apresentadas. 80
Tabela 6 – Somatório dos níveis de classificação das funcionalidades no MMA. . . 83
Tabela 7 – Somatório da performance das RAMs no MMA. 84

Lista de siglas

AIOTI	Alliance for IoT Innovation
API	Application Programming Interface
CMMI	Capability Maturity Model Integration
CPS	Cyber Physical Systems
CT	Comitê Técnico
IACS	Industrial Automation and Control Systems
IBM	International Business Machines
IEC	International Eletroctechnical Commission
IED	Intelligent Eletronic Devices
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IETF	Internet Engineering Task Force
IIAF	Industrial Internet Architecture Framework
IIC	Industrial Internet Consortium
IIoT	Industrial Internet of Things
IIRA	Industrial Internet Reference Architecture
IMSA	Intelligent Manufacturing System Architecture
IoT	Internet of Things
ISO	International Organization for Standardization
GE	General Electric
LNI 4.0	Labs Network Industrie 4.0
MMA	Modelo de Maturidade e Aderência
MMA4RAM	Modelo de Maturidade e Aderência for Reference Architecture Models
M2M	Machine to Machine

NFC	Near Field Communication
NFV	Network Function Virtualization
NIST	National Institute of Standarsand Technology
NIST SMS	NIST Smart Manufacturing Systems
OCF	Open Connectivity Foundation
ODN	Organização de Desenvolvimento de Normalização
OPC UA	Open Platform Communications Unified Architecture
OpenPnP	Open Plug and Play
PaaS	Platform as a Service
PLC	Programmable Logic Controllers
RAM	Reference Architecture Model
RAMI 4.0	Reference Architecture Model for Industrie 4.0
RFID	Radio Frequency IDentification
SaaS	Software as a Service
SCI	Sistemas de Controle Industrial
SCI 4.0	Standardization Council Industrie 4.0
SDN	Software Defined Network
SEI	Software Engineering Institute
SEMIoTICS	Smart End-to-end Massive IoT Interoperability, Connectivity and Security
SEPICOM	Segurança e privacidade, Escalabilidade, Padronização, Interoperabilidade, Comunicação, Orientação semântica e Modularidade
TI	Tecnologia da Informação
TIC	Tecnologias de Informação e Comunicação
TO	Tecnologia Operacional
UAF	Unified Architecture Framework
W3C	World Wide Web Consortium

Sumário

1 INTRODUÇÃO 15
1.1 Motivação 16
1.2 Objetivos 17
1.2.1 Objetivo Geral 17
1.2.2 Objetivos Específicos 17
1.3 Justificativa 18
1.4 Requerimentos do Sistema 19
1.5 Estrutura da Dissertação 20

2 REFERENCIAL TEÓRICO 21
2.1 Dispositivos Eletrônicos Inteligentes 21
2.2 Internet das Coisas 22
2.2.1 Internet das Coisas da Indústria 24
2.3 Modelos de Arquitetura de Referência 26
2.4 Modelos de Maturidade 30

3 TRABALHOS CORRELATOS 33

4 METODOLOGIA DA PESQUISA 39

5 MODELO DE MATURIDADE E ADERÊNCIA 41
5.1 Segurança e Privacidade 43
5.2 Escalabilidade 46
5.3 Padronização 47
5.4 Interoperabilidade 50
5.5 Comunicação 51
5.6 Orientação Semântica 53
5.7 Modularidade 55
5.8 Disposição do MMA4RAM 57

6 MODELOS DE ARQUITETURA E REFERÊNCIA 60
6.1 IIRA 60
6.2 RAMI 4.0 61
6.3 InSight 63
6.4 GEs Predix 64
6.5 Siemens MindSphere 65
6.6 OpenPnP 67

6.7 SEMIoTICS . . . 68
6.8 IBM Industry 4.0 . . . 69
6.9 NIST SMS . . . 70
6.10 IMSA . . . 71
6.11 Modelo RAM Proposto . . . 73
6.12 Estudo de Caso . . . 74

7 ANÁLISE DOS RESULTADOS . . . 81
7.1 Performance das RAMs no MMA4RAM . . . 81
7.2 Avaliação do SEPICOM e do MMA4RAM . . . 84

8 CONCLUSÃO . . . 87
8.1 Trabalhos Futuros . . . 88
8.2 Artigos Produzidos . . . 89

REFERÊNCIAS . . . 91

1 Introdução

O aumento do uso de novas tecnologias, como os dispositivos inteligentes e os *softwares* mais robustos, após a quarta revolução industrial (Indústria 4.0), resultou em uma expansão do setor de pesquisa para desenvolvimento de ferramentas, *hardware* e *software*, inteligentes e específicas para o ambiente industrial, esse movimento também ficou conhecido como *Industrial Internet of Things* (em português Internet das Coisas na Indústria - IIoT).

No decorrer dessa evolução, viu-se necessário uma ferramenta que obtivesse uma referência sobre as camadas industrias, para gerar um interligação para comunicação e, assim, acelerar os processos internos entre as camadas, tais como: manutenção de processos, resposta em tempo real, visualização do sistema como um todo, gráficos de evolução, pontos de falha nos processos, dentre outros.

Neste contexto, uma ferramenta promissora desenvolvida para resolver parte desses problemas industriais é o *Reference Architecture Model* (em português Modelo de Arquitetura de Referência - RAM), que emergiu como solução para o gerenciamento das camadas de organização industrial. Inicialmente, possui um alto nível de abstração e fornece uma estrutura de orientação para lidar com elementos-chaves de funcionalidades, a fim de formar um amplo sistema do qual as empresas possam usufruir para a montar a sua versão personalizada. Essa ferramenta, nos dias de hoje, é majoritariamente, desenvolvida por consórcios industriais a fim de apressar os seus processos internos [8].

No entanto, a rápida expansão e evolução das tecnologias fez com que as atuais RAMs não fossem mais suficientemente abrangente a ponto de cobrir todos estes novos aspectos, houve então a necessidade de evoluir com estas características para a adaptação durante a implantação e nos processos de uso. Este procedimento tem em vista prevenir os sistemas de falhas, tais como: durante uma expansão inesperada houver recurso de escalabilidade para atender, níveis de segurança para assegurar de invasões, comunicação entre dispositivos de diferentes distribuidores, entre outros.

Neste trabalho a tratativa dessas funcionalidades será por intermédio de um Modelo de Maturidade e Aderência (MMA), para qualificar e identificar nas RAMs que serão apresentadas, o nível presente das funcionalidades e, dessa forma, caso necessário, gerar alguma atualização ou melhoria para o processo. Visa-se propôr, também, a partir desse estudo um modelo RAM, que demonstre como uma RAM deve atuar para atender ao ambiente industrial. Para, principalmente, comprovar o quanto uma solução industrial está em conformidade com as arquiteturas de referências utilizadas.

A metodologia de desenvolvimento para essa pesquisa contará com o uso de ferramentas computacionais para gerar um estudo bibliográfico complexo. A partir disso, constituir as contribuições dessa dissertação que são dois sistemas complementares para serem inseridos em um ambiente industrial, sendo eles: o MMA e o modelo RAM. Como principal resultado, obtém-se os sistemas elaborados e um estudo de caso para demonstrar a aplicação do MMA nas RAMs que serão apresentadas.

1.1 Motivação

A *Internet of Things* (em português Internet das Coisas - IoT) é a categoria de tecnologia que conecta os objetos físicos através de redes com e sem fio, enquanto a IIoT é o que lida com as máquinas físicas complexas, que estão ligadas a sensores industriais e seu *software* relevante. A IIoT não apenas envolve a conexão entre máquinas, mas também possui uma unidade de interface humana e formas de inteligência para controle de sistemas, seja por humanos ou automaticamente pela própria inteligência.

Nos próximos anos, há uma grande chance da Indústria 4.0 substituir os trabalhos simples e repetitivos, como montagem de produção, administração, controle de qualidade e planejamento por modelos de serviços que não envolvam a mão de obra humana. Essas mudanças são sustentadas em parte pela inserção das Tecnologias de Informação e Comunicação (TIC) no ambiente, sendo um deles a IoT. A IoT, com o decorrer da sua evolução, contribuiu para a modernização e otimização de diversos ambientes, principalmente, o industrial, onde ficou conhecido como IIoT.

A transformação da IoT para a IIoT, gerou uma grande mudança em termos de eficiência e de continuidade de uma indústria em todo o mundo. E, nos dias de hoje, percebe-se que a tecnologia fornecida pela IIoT aumentará a quantidade de novas ofertas de produtos e modelos de negócios, a partir das vertentes de possibilidades que esta tecnologia poderá oferecer para o mercado.

As demandas tecnológicas industriais e de seus usuários, após esse crescimento, instauraram parte significante no desenvolvimento das novas tecnologias, por ser evidente como que a medida em que isso se integra aos alicerces industriais, obtém-se avanços na produtividade e na eficiência das fábricas. Por intermédio da análise dos dados de produção e de tempo, e das causas dos problemas de produção, a imediata manutenção é realizada e, assim, aumenta-se a produtividade. O controle e o monitoramento das operações e funcionalidades das máquinas de produção pode ser realizado através da Internet, na maioria dos casos, pois minimiza as falhas nos processos industriais e proporciona a eficiência das fábricas.

Uma das ferramentas utilizadas hoje para auxiliar a resolver esse conjunto de ações para a indústria são as RAMs. Devido à alta demanda das empresas na corrida para ascensão no

mercado, as diferentes RAMs existentes, hoje, são construídas e aplicadas pelos próprios consórcios industriais, de forma a gerar processos específicos para o seu ambiente. Esse fator dificulta a inserção ou adoção da RAM utilizada em outro ambiente industrial, por não possuir outras particularidades essenciais ou suas funcionalidades ainda não serem adaptáveis para aquele âmbito.

Devido a isso, torna-se um fato preocupante e complexo para as empresas investidoras em compra de tecnologias, dado que elas não produzem suas próprias ferramentas. O fato de não existir um modelo completo que abranja as características e requisitos do ambiente industrial com qualidade, essencialmente, gera a necessidade de uma agilidade em atualizações de informações em suas esferas. A limitação das entidades e da academia de seguir a velocidade da revolução industrial, trás como consequência o desenvolvimento de RAMs por diversas empresas para o seu modelo de processo industrial próprio, a tentativa de aprimorar as existentes para o seu formato, ou, ainda, escalar as suas funcionalidades para adaptação ao modelo.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Esta dissertação, a partir de pesquisas bibliográficas, tem como objetivo desenvolver um MMA genérico, para que seja possível a caracterização por nível de abrangência das funcionalidades dos modelos RAMs para a IIoT; gerar um modelo de RAM, através de comparações com modelos existentes e do MMA produzido, e provar a proficiência do MMA nas RAM pesquisadas.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Fornecer um MMA, para qualificar o grau de funcionalidade e certificar as propriedades para os seguintes atributos de um modelo: orientação semântica, escalabilidade e modularidade, interoperabilidade, padronização, segurança e privacidade, e comunicação.
- Gerar uma introdução a aplicação de um MMA funcional para ferramentas de *software*.
- Avaliar diferentes estruturas de RAMs, em questões de formato; identificar requisitos, divisão de processos, técnicas de desenvolvimento e caracterização de propriedades industriais.
- Elaborar uma RAM abstrata.

- Estudar o caso da aplicabilidade do MMA com a implementação nas estruturas RAMs apresentadas.
- Contribuir com dois sistemas complementares que podem ser inseridos no ambiente industrial.
- Amadurecer as RAMs atuais com os pontos levantados pelo MMA.

1.3 Justificativa

A integração do mundo físico com virtual abre oportunidade para a criação de ambientes inteligentes. Dessa forma, a comunicação entre humanos e objetos se estende para entre objetos e objetos, também conhecido como IoT. O termo Indústria 4.0 é usado para representar o impacto econômico, enquanto a IIoT reflete as melhorias tecnológicas com o uso da IoT aplicadas na indústria.

A IIoT é uma novidade que revoluciona empresas e fábricas com foco no retorno do investimento. Na IIoT, todas as máquinas de uma fábrica estão conectadas a uma rede e os dados são coletados das máquinas para análise. Todas as máquinas possuem sensores interconectados, em que os dados produzidos são enviados em tempo próximo do real para um sistema de armazenamento em nuvem, através de uma rede de comunicação. Isso, colabora com o monitoramento das máquinas e ampara para que sua operação seja contínua e eficiente.

O conceito da Indústria 4.0 (onde 4.0 representa a quarta revolução industrial) surge quando o paradigma da IoT é mesclado com a ideia dos *Cyber Physical Systems* (em português Sistemas Ciber-Físicos – CPS). Originalmente definido na Alemanha, o conceito Industria 4.0 ganhou visibilidade global e, hoje, é universalmente adotado para abordar o uso de tecnologias da Internet para melhorar a eficiência da produção, por meio de serviços inteligentes em fábricas inteligentes. Em resumo, IIoT é um subconjunto de IoT específico para aplicações industriais. A fase de fabricação do ciclo de vida do produto é onde a IoT e a Indústria 4.0 se encontram, originárias da IIoT [9].

A partir dessa união de conceitos, percebe-se o aumento da difusão da IIoT na indústrias, como forma de otimizar os processos, eficiência e qualidade dos serviços internos ou produzidos para terceiros. Para isso, surge a necessidade de se obter formatos de controle de processos, segurança, capacidade de escalar ou modular, protocolos específicos, dentre outras características, que em conjunto formem uma arquitetura consolidada para a implementação geral, ou seja, a aplicação em diferentes âmbitos industriais. Atualmente, não se encontrou esse modelo de arquitetura para uso nas pesquisas realizadas. Assim como, também existe uma escassez de ferramentas que qualifiquem e amadureçam as funcionalidades de arquiteturas desenvolvidas por consórcio industriais.

Dessa forma, espera-se que com o trabalho produzido seja possível evoluir e amadurecer as arquiteturas atuais para modelos mais robustos, que possam suprir as necessidades industriais e, principalmente, acompanhar o crescimento dos setores industriais.

1.4 Requerimentos do Sistema

Esta pesquisa se baseou em RAMs existentes para formar uma comparação entre elas e uma estrutura abstrata própria, com o propósito, também, de gerar um MMA para implementação em arquiteturas existentes e, assim, garantir a confiabilidade, aplicabilidade e nível das propriedades inseridas nas RAMs. Algumas restrições e premissas foram necessárias para construir a comparação e o modelo, devido há algumas limitações impostas pelos recursos utilizados, dito isso, será mencionado ao longo do texto quando este fato ocorrer.

Por exemplo, o RAMI 4.0, é uma RAM desenvolvida por um conjunto de empresas da Plataforma Industrie 4.0, que propõe o uso do estado da arte da Tecnologia da Informação e da Comunicação (TIC) para auxiliar na reconfiguração e a capacidade de evolução dos sistemas industriais. Portanto, busca por tornar os processos industriais mais controláveis e gerenciáveis em condições de operações em tempo real, quando comportamentos com características de emergência surgem [10]. Para isso, o nível de segurança implantado no sistema é o de Segurança por *Design*, ou seja, é projetado para ser seguro e possui as normas de segurança VDI/VDE 2182 e IEC 62443 envolvidas no seu projeto. Ainda sobre as normas elas possuem categorias de segurança para a RAM, sendo elas [11]:

- Nível de Segurança 1: impedir a divulgação não autorizada de informações por meio de escutas ou exposição casual.
- Nível de Segurança 2: impedir a divulgação não autorizada de informações a uma entidade que as procure ativamente pelo uso de meios simples, com poucos recursos, habilidades genéricas e baixa motivação.
- Nível de Segurança 3: impedir a divulgação não autorizada de informações a uma entidade que as procure ativamente pelo uso de meios sofisticados com recursos moderados, habilidades específicas do *Industrial Automation and Control Systems* (em português Sistemas de Controle e Automação Industrial - IACS) e motivação moderada.
- Nível de Segurança 4: impedir a divulgação não autorizada de informações a uma entidade que as procure ativamente pelo uso de meios sofisticados com recursos ampliados, habilidades específicas do IACS e alta motivação.

No entanto, pode ser que alguma outra RAM não possua uma especificação de segurança como a apresentada e, também, o caso de uma RAM obter outras características de segurança que são superiores a esta circunstância.

1.5 Estrutura da Dissertação

Este capítulo traz uma introdução sobre as RAMs e os MMAs, e como esses assuntos tornaram a pauta dessa pesquisa através da seção 1.1 a 1.3, sobre como será procedido com as informações obtidas durante o desenvolvimento do assunto. Além disso, apresenta como as indústrias têm reagido a essa fase da Indústria 4.0 e a aceitação das novas tecnologias, como a IIoT, em vista do auto beneficiamento e a evolução da produtividade, a importância do estudo e do desenvolvimento das RAMs para o ambiente industrial, e, por fim, sobre os MMAs, qual o papel e a conveniência quanto ao uso deles. Após o capítulo de introdução aqui descrito, em segundo lugar, apresenta-se o capítulo Referencial Teórico, onde foram discutidos os principais princípios associados a este trabalho. Em seguida, descreveu-se os Trabalhos Correlatos, com um pouco sobre o que há de pesquisa cientifica desses assuntos na área acadêmica e industrial, e a Metodologia da Pesquisa, com quais os processos serão utilizados. Os capítulos cinco e seis caracterizam a configuração do MMA e do RAM para gerar a contribuição da pesquisa. Os últimos capítulos avaliam o sistema em diferentes cenários para explorar a melhor configuração, abordam-se os procedimentos que foram realizados para gerar os resultados finais e, por fim, a conclusão com os artigos produzidos e os trabalhos futuros.

2 Referencial Teórico

Previamente à argumentação sobre como aprimorar um sistema RAM com a união de características e funcionalidades de outros modelos, e o porquê de utilizar um MMA para elevar e aperfeiçoar suas propriedades, é necessário o entendimento sobre alguns princípios básicos para o crescimento desses conceitos na fase da Industria 4.0 e, atualmente, nas áreas da Tecnologia da Informação (TI) e da Tecnologia Operacional (TO). Entretanto, o foco deste trabalho é entender, reproduzir e provar como a junção entre o RAM e o MMA possuem uma aplicabilidade distinta e integrada. Além disso, todas as informações aqui apresentadas são gerais e podem ser aplicadas em diferentes áreas.

2.1 Dispositivos Eletrônicos Inteligentes

No início dos anos 80, surgiram os primeiros *Intelligent Eletronic Devices* (em português Dispositivos Eletrônicos Inteligentes – IEDs) como os *Programmable Logic Controllers* (em português Controladores Lógicos Programáveis – PLCs), Relés Digitais, Medidores Multifuncionais, Reguladores de Voltagem, entre outros. Os IEDs são dispositivos que incorporam um ou mais processadores, com capacidade de receber ou enviar dados/comandos de uma ou para uma fonte externa, e são considerados como pioneiros da integração de sistemas na automação industrial. Esses novos instrumentos iniciaram uma revolução nas práticas de proteção, controle e a automação de subestações e, também, geraram economias significativas com painéis de relés e de distribuição, maior nível de confiabilidade nos sistemas e recursos para solução de problemas [12].

Os IEDs transmitem as informações por intermédio de protocolos de comunicação pelas redes industriais (por exemplo DNP, Modbus, IEC 870-5) diretamente para um supervisório para o processamento dos dados. No entanto, os diversos fabricantes da época inseriam protocolos diferentes nos IEDs que dificultava a interoperabilidade e padronizava o uso dos dispositivos do mesmo fabricante nas indústrias [13].

A evolução dos sistemas demonstrou que os protocolos, apesar de seus avanços, estavam limitados em capacidade, velocidade, funcionalidades e serviços. A capacidade dos dispositivos de fornecer a taxa de transferência de dados necessária para o processamento limitava possíveis atuações e manutenções, e a exigência por um protocolo padrão, não proprietário e com alta velocidade aumentava com o progresso dos sistemas. À vista disso e contemporâneo com a grande disseminação da Internet, que detém as características buscadas, iniciou-se a transição para a integração dos IEDs as novas arquiteturas de redes [14].

Atualmente, os IEDs são abrangidos pelo conceito da IoT que engloba, não somente os dispositivos industriais, mas todos os objetos ou coisas com capacidade de agregar inteligência e cujo o ponto de convergência é a Internet, em uma de suas inúmeras definições. A IoT transforma os objetos tradicionais em inteligentes e beneficia os interessados no uso ao explorar suas funções fundamentais em diversos âmbitos como a computação ubíqua, sistemas embarcados, tecnologias de comunicação, redes de sensores, protocolos e aplicações por intermédio da Internet [15].

O uso das TICs nos setores empresariais busca aprimorar e automatizar os serviços de suporte aos negócios, e não os processos físicos que os geram. A habilidade da IoT de identificar as características do mundo físico e digitalizar traz mudanças indispensáveis para os processos corporativos, dado que a IoT tende a compreender várias aplicações [16] [17].

2.2 Internet das Coisas

As TICs desempenham um papel importante na melhoria do compartilhamento e processamento de informações no setor industrial. Uma busca crescente no desenvolvimento de tais tecnologias, permite que os responsáveis do sistema logístico e da cadeia de suprimentos recebam e compartilhem as informações eletrônicas relevantes de maneira confiável, precisa e em tempo real. Essas informações trocadas podem ser exploradas para melhorar o desempenho das operações logísticas e aumentar o lucro dos negócios. Por exemplo, as informações coletadas permitem que decisões complexas sejam resolvidas de maneira eficaz, de modo a fornecer respostas mais rápidas, prazos mais curtos e reduzir os custos para os prestadores de serviços de industriais [18].

A IoT é uma TIC reconhecida como solução clara e revolucionária, pelo formato como os objetos coletam e compartilham informações. Um fundamento básico da IoT é ter seus diferentes dispositivos configuráveis para que possam ser manipulados via Internet, pelos próprios usuários humanos ou por programas que espelhem os objetivos desses usuários. A IoT iniciou um efeito transformador em como os seres humanos interagem, não apenas com seu ambiente, mas também entre si. Os formatos com os quais se trabalha, com casas, veículos, serviços públicos, lojas, fábricas e, até mesmo, armamento, serão modificadas drasticamente. Cuidados com a saúde, educação e outros recursos serão oferecidos de uma maneira mais rápida, eficiente e que seja personalizado ao consumidor [19].

A IoT possui um conceito que envolve *hardware* e *software*, e que descreve a conexão onipresente à Internet para transformar objetos comuns em dispositivos conectados. A ideia principal por trás do conceito de IoT é implantar bilhões ou trilhões de objetos inteligentes capazes de monitorar o ambiente, transmitir e processar dados adquiridos e,

em seguida, enviar um *feedback* ao *backend* em que está inserido o caminho dos seus dados. A flexibilidade e a escalabilidade requeridas pelas comunicações da IoT são, normalmente, tratadas com o uso de *links* sem fio. No passado, as tecnologias sem fio em aplicações industriais eram baseadas em soluções *ad hoc*, por exemplo, e desenvolvidas individualmente para conectar peças móveis ou dispositivos de difícil acesso [9].

Nesse contexto, propuseram-se as arquiteturas e sistemas da IoT, para abstrair as especificações de tais dispositivos de aplicações e usuários finais, promover a interoperabilidade entre eles e contribuir e aumentar o desenvolvimento de aplicações de IoT. Essas arquiteturas, destinam-se, principalmente, a: oferecer suporte eficiente à heterogeneidade e dinâmica dos ambientes de IoT; fornecer abstrações sobre os dispositivos e serviços físicos para aplicações e usuários; fornecer mecanismos de gerenciamento e descoberta de dispositivos; permitir conectar esses elementos através da rede; gerenciar grandes volumes de dados; e abordar questões de segurança e escalabilidade, [19] e [9].

As RAMs podem ser entendidas como arquiteturas abstratas que englobam conhecimentos e experiências em um determinado domínio de aplicação. Assim, facilita e orienta o desenvolvimento, padronização, interoperabilidade e evolução de sistemas de *software* para esse domínio. O estabelecimento de RAM é uma questão importante na IoT, pois elas podem descrever os componentes essenciais e as opções de *design* para lidar com requisitos funcionais e não funcionais em ambientes de IoT [20].

A validação e os testes necessários com as RAMs da IoT, raramente, são mencionados pelos autores. A validação é o processo de avaliar vários requisitos do sistema durante a operação, para garantir que não ocorram falhas e alcance uma boa qualidade de serviço. Definir os requisitos da IoT, geralmente, é muito desafiador, pois existe uma alta dependência entre as realidades cibernética e física, o que torna esse processo muito complexo. Além disso, ao considerar o contexto industrial, a mesma validação aumenta em complexidade devido a todos os rigorosos padrões industriais que devem ser seguidos [21].

A adoção da IoT é impulsionada, principalmente, por fatores de negócios e tecnologia. Sem considerar esses fatores, nos estágios iniciais de *design* e implantação da adoção da IoT, a promessa dos muitos benefícios da IoT permaneceria ilusória. Para os negócios, ao considerar a implantação da IoT, as organizações avaliam as vantagens que a inserção pode angariar, pode ser feita essa avaliação no momento da implantação do projeto de IoT ou periodicamente para descobrir novas oportunidades nos negócios. Enquanto que o fator de tecnologia mostra as organizações e empresas que adotam a IoT como avaliar e selecionar as tecnologias mais adequadas para suas aplicações e situações únicas. A Tabela 1 apresenta os principais pontos dos dois fatores para a implantação de um projeto com a IoT [22].

Tabela 1 – Fatores considerados em Negócios e Tecnologia para implantação de um projeto com IoT.

Negócios	**Tecnologia**
A **Transformação** é a reinvenção de processos de negócios, produtos e orientações estratégicas, com o uso da IoT.	A **Escalabilidade** envolve a capacidade de conectar e usar uma quantidade significativamente alta de dispositivos. A **Conformidade** oferece suporte a implantações globais.
A **Eficiência** é a capacidade de aumentar a competência de várias funções de uma empresa, inclui-se a cadeia de suprimentos, o gerenciamento de clientes, entre outros fatores.	O **Gerenciamento** com dispositivos e infraestrutura de IoT implantados inclui o controle completo da infraestrutura ponta a ponta, de modo a incluir o *firmware*, sistemas operacionais, aplicativos e configurações de rede. A Confiabilidade das operações precisa ser considerada ao fazer escolhas de tecnologia.
A **Monetização** aprimora os modelos existentes ou cria. Isso, também, pode incluir a criação de novos modelos ou unidades de negócios.	A **Segurança** engloba cada componente da infraestrutura de IoT, inclui-se dispositivos, rede, serviços em nuvem e qualquer outro componente usado na infraestrutura de IoT. A **Privacidade** dos dados gerados tem valor para os negócios e/ou governo.
Os **Novos produtos e recursos** adicionam uma nova linha de produtos conectados ou funcionalidade de IoT aos produtos existentes. Esse ponto também pode incluir o aprimoramento da funcionalidade existente da IoT com o uso de recursos mais avançados.	A **Diversidade Arquitetônica** significa ter a capacidade de escolher a arquitetura certa, específica para a empresa, vertical e alinhada com os motivadores da empresa. A **Padronização** aborda a necessidade regras para que um conjunto diversificado de dispositivos e serviços possam interoperar.

2.2.1 Internet das Coisas da Indústria

A chegada da quarta revolução industrial, com o surgimento do conceito de fábricas inteligentes, trouxe muitos desafios para as organizações manufaturadoras tradicionais. Como parte de um mundo inteligente em rede, as fábricas inteligentes podem gerenciar a crescente complexidade de seus ambientes, serem menos propensas a interrupções e, também, capazes de realizar a produção com mais eficiência. Essa é uma mudança de padrão da manufatura controlada para a manufatura descentralizada, que já começou a ocorrer através da habilitação de comunicação sem barreiras entre recursos de manufatura, pessoas ou produtos individuais. O *backbone* dessa transformação é a integração dos padrões e tecnologias da IoT nos processos industriais. A eletrônica inteligente é incorporada aos sistemas de produção ao longo do ciclo de vida de um produto, para criar dinamicamente

uma rede de informações global ou interna, conhecida como IIoT [23].

O IIoT permite que as organizações de manufatura ampliem suas aplicações existentes e até concebam novas formas de operação. Como exemplo, além de realizar a mineração de dados em áreas tradicionais, como análise da integridade da máquina ou manutenção preditiva, algumas indústrias de manufatura já começaram a aplicar a *Big Data* e análises avançadas nos anos de dados coletados de processos e produtos por meio da IIoT, para resolver problemas críticos como o de baixa qualidade e dinâmica de produção [24].

O *Big Data* se refere ao processo de coleta, gerenciamento, processamento, análise e visualização de dados em constante evolução em termos de volume, velocidade, valor, variedade e veracidade. Nos sistemas da IIoT, ele surge devido a atividades internas e externas ilimitadas, relevantes para clientes, operações comerciais, produção e máquinas. Os processos de *Big Data* nos sistemas da IIoT gerenciam os dados coletados, com o uso de vários sistemas de armazenamento temporário e persistentes que fornecem instalações de armazenamento na memória, em rede e em larga escala distribuída nos sistemas da IIoT. Uma integração adequada dos processos de *Big Data* nos sistemas da IIoT maximiza a criação de valor e desenvolve modelos de negócios para maximizar o lucro [25].

Normalmente, as plataformas de IIoT obtém suporte dos CPS, são os sistemas de produção em mecatrônica avançada que apresentam características inteligentes, controlam os processos de fabricação no chão de fábrica e provém interfaces de comunicação padrão entre máquinas, tais como comunicação *Machine to Machine* (em português Maquina a Máquina – M2M), conectividade e interoperabilidade para o *networking* horizontal e vertical entre os dispositivos e as plataformas [21].

Como observação, é preciso destacar que o paradigma da IIoT não se destina a substituir aplicativos tradicionais de automação, mas visa aumentar o conhecimento sobre o sistema físico de interesse. Como consequência, a IIoT (pelo menos hoje) não está relacionada às aplicações de controle no nível do campo, onde o tempo de reação limitado (isto é, determinismo) deve ser garantido. Pelo contrário, como declarado anteriormente, os aplicativos IIoT, inclui-se as atividades de supervisão, otimização e previsão, geralmente são agrupados em *Clouds* digitais de fabricação.

Os projetos de sistemas da IIoT envolvem em si sete princípios básicos. Em primeiro lugar, a interoperabilidade deve ser garantida entre diferentes tecnologias, como CPPS, dispositivos de IoT e sistemas de computação. Em segundo, as tecnologias de virtualização em todos os níveis devem ser consideradas para o recebimento e fornecimento de serviços eficientes nos sistemas da IIoT. A virtualização varia em termos de plataformas, redes, dados, sistemas operacionais e aplicativos. Em terceiro, a descentralização deve ser conduzida para garantir que sistemas da IIoT sejam altamente distribuídos. A descentralização pode

ser em processamento e armazenamento de dados em todo o sistema. Em quarto, os sistemas da IIoT devem fornecer *feedback* em tempo real a todas as partes interessadas. Em quinto, a orientação ao serviço deve ser garantida, de modo que todas as funções do sistema sejam implementadas na forma de arquitetura orientada a serviços. Em sexto, a abordagem modular deve ser adotada para a implementação do sistema. Por fim, a segurança em todo o sistema deve ser considerada como princípio básico [25].

Para entender o *design* de um sistema complexo como esse, necessita-se identificar quais os pontos principais de aplicação deste conceito na indústria, dado que a emergência da IIoT revolucionou quase todos os aspectos da indústria moderna. E, assim, os setores primários de aplicação da IIoT são [19]:

- Infraestrutura: dispositivos inteligentes necessitam de uma que seja flexível, confiável, eficiente e resiliente.
- Cadeia de Suprimentos: monitoramento dos produtos em todo o seu processamento pela própria ou outras empresas.
- Controle de Processos: monitorar e controlar para garantir que as operações da fábrica estejam corretas e prevenir quanto a falhas nos processos.
- Manutenção: reduzir tempo de paradas e consumo de energia, seja ela reativa quando houver a falha ou preventiva com agendamento de manutenções periódicas.

2.3 Modelos de Arquitetura de Referência

Para as indústrias de hoje, os novos desafios não surgem apenas do impulso pela evolução e produtividade dos concorrentes mas, também, de ciclos mais curtos de inovação nos diferentes campos da tecnologia (sendo que este é o gerador os resultados dos anteriores) e, também, precisam lidar com as novas percepções dos clientes e os seus desejos de individualização dos produtos, bem como a digitalização que se processa rapidamente no domínio da fabricação industrial discreta. Para superar esses desafios, novas soluções no campo da produção industrial precisam ser desenvolvidas e prontamente implementadas [26]. Devido a isso, os produtos se tornaram cada vez mais individualizados e para isso se requer de uma cadeia de produção extremamente flexível, presumivelmente adaptável e simultaneamente eficiente nas indústrias.

Até o presente momento, a indústria e os serviços da área de informação foram vistos como independentes. No entanto, a jornada de transformação para desenvolvimento de capacitação para prover serviços e soluções para aumentar a produção, como a RAM, tornou-se recentemente um dos tópicos mais relevantes para setor de TI. Descreveu-se

uma nova referência e uma mudança no *design* dos sistemas, tornando-os disponíveis como serviços industriais. Essa transformação, envolve não apenas a inovação das ofertas de serviços, mas também a capacidade dos fabricantes de operar esses sistemas baseados em serviços e que exigem grandes mudanças na arquitetura corporativa da TI e da TO [27].

O gerenciamento dos sistemas de IIoT resulta, principalmente, na junção do controle de quatro fatores: de uma rede de sensores; da infraestrutura de rede do *backbone* interno e externo; dos *softwares* aplicados e dos protocolos de rede. Possibilita, desse modo, refinar as características do sistema, como: confiança, performance em tempo real, qualidade do serviço, segurança, escalabilidade, entre outros. A solução para melhorar a dinâmica de controle é prover ao sistema de IIoT uma RAM, para elaborar melhor suas necessidades e componentes com os ajustes de parâmetros internos, também, conhecido como capacidade de definição por *software* em algumas literaturas antes do surgimento do termo [28].

Normalmente, a palavra arquitetura é utilizada para designar um campo multidisciplinar responsável por projetar e desenhar espaços físicos, como casas, edifícios e até torres, leva-se em consideração as necessidades humanas de higiene, conforto e espaço. Mas quando se fala em tecnologia da informação, o termo adquire outro significado. A arquitetura de TI é a parte da tecnologia da informação responsável por planejar, estruturar, desenvolver e monitorar soluções tecnológicas com base nas necessidades de negócio de uma empresa. Essas soluções podem ser: a implantação de um novo sistema, a manutenção de um serviço, o manuseio de dados estruturados e entre outros produtos e tecnologias. Em vista disso, a RAM é uma tecnologia considerada própria para a arquitetura de TI.

A RAM é utilizada para fornecer aos projetos arquitetônicos a capacidade para a derivação e realização de arquiteturas abstratas de sistemas. Uma RAM pode ser vista, também, como uma linguagem comum, onde todos os projetos da IIoT podem se basear. É um guia que garante um mínimo de padronizarão das soluções. Os benefícios desse RAM incluiriam uma discussão estimulada sobre os sistemas relevantes e a abrangência dos projetos, assim como o apoio de todas as partes interessadas na necessidade de uma derivação fácil de uma arquitetura de sistema abstrata [29].

Nos dias de hoje, as RAMs constituem em si um imenso *backbone* para qualquer sistema intensivo de *software* (quando o *software* desempenha um papel essencial no *design*, construção e implementação do sistema) e, também, são fundamentais para determinar a qualidade do sistema como em performance, modularidade e manutenção. Decisões efetuadas no nível da arquitetura permitem, facilitam ou interferem diretamente na execução dos objetivos de negócios, bem como nos requisitos funcionais e de qualidade do sistema [30].

Em vista disso, as RAMs se referem a um tipo específico de arquitetura de *software* por

unificar um conjunto de sistemas, para formar uma arquitetura para um determinado domínio, ou seja, seu objetivo é ser uma orientação para o desenvolvimento, padronização e evolução dos sistemas. Sua proposta é prover um modelo com uma ou diversas perspectivas do sistema, sendo que estas mostraram componentes relevantes, funções e interconexões, a Figura 1 demonstra como uma RAM é formada. A partir de diversas características, seleciona-se as que são necessárias para cumprir os requisitos de determinado âmbito industrial e, por fim, amadurece-se essas características. Por se transformar em algo indispensável para as indústrias, uma diversidade de RAMs já foram criadas para atender a diferentes domínios, e tornaram-se base para o desenvolvimento dos sistemas [31].

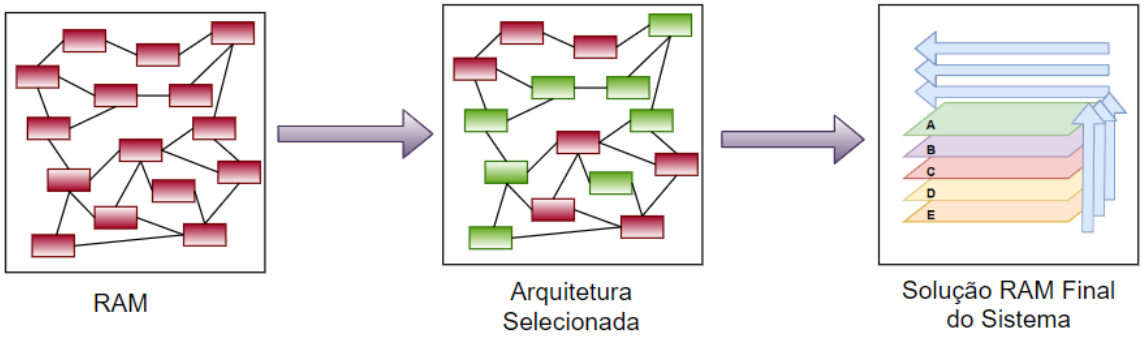


Figura 1 – Infraestrutura do amadurecimento de uma RAM.

Por conseguinte, para selecionar as características que serão partes do RAM em seu formato abstrato, elas passam por um processamento para identificar, principalmente, se há algum papel na estrutura final para mesma, ou em outros possíveis arranjos de arquitetura. A Figura 2 apresenta os passos do processamento de uma funcionalidade para uma RAM [32]. Considera-se que o momento crucial dessas etapas seja a inserção dos dados para a configuração, pois é neste ponto que se indica quais as limitações de uso dessa característica.

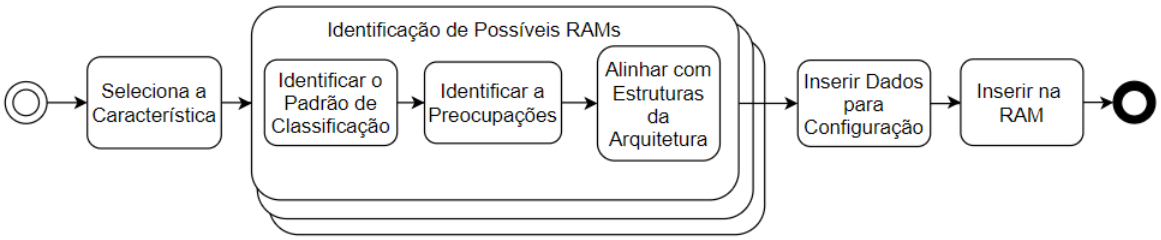


Figura 2 – Designação de uma característica para a RAM.

Segundo [33], existem alguns fatores derivados da estrutura atual que precisam ser considerados pelo desenvolvedor de uma RAM desde as etapas iniciais de crescimento, tais como:

- A RAM deve ser aberta e distribuída com características de ponta a ponta, acesso

neutro, interoperabilidade de sistemas heterogêneos, resiliência a interrupções físicas da rede e camadas distintas.

- RAMs que movimentam o comportamento inteligente entre as extremidades das redes, usuários, terminais e outros componentes. Obter um serviço de transparente e responsável com novos métodos de segurança precisam ser integrados em toda a estrutura.
- Com base no pareamento de nós, as RAMs devem ser descentralizadas por natureza. A comunicação entre dispositivos pode ocorrer em qualquer lugar e momento; portanto, deve ser feita de maneira ad-hoc e sem fio.
- RAMs que serão utilizadas como orientação a eventos, tecnologia de computação em nuvem, em operações desconectadas e para sincronização.
- Analisar como a concorrência procede e participa da evolução, incentivar o uso de mecanismos de mercado para ter agilidade na manutenção.

Atualmente, há vários órgãos industriais, de pesquisa e de padronização que estão envolvidos no desenvolvimento dos requisitos tecnológicos para a IIoT. Em nível internacional, as atividades de padronização para a IIoT resultam em um cenário bastante heterogêneo. Isso significa que existe um grande número de várias iniciativas de padronização que coexistem, tais como: as Organizações de Desenvolvimento de Normalização (ODN), a *International Electrotechnical Commission* (em português Comissão Eletrotécnica Internacional - IEC), União Internacional de Telecomunicações, o *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (em português Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos – IEEE), o *Internet Engineering Task Force* (sem tradução – IETF) e o *World Wide Web Consortium* (sem tradução - W3C) ou parcerias, como por exemplo Comitê Técnico Conjunto ISO e IEC (ISO / IEC JTC 1). Além das ODNs internacionais, que obtêm forte apoio dos comitês nacionais e regionais designados (por exemplo, Instituto Alemão de Padronização, Instituto Europeu de Padrões de Telecomunicações), existem outras iniciativas da indústria e de plataformas abertas que contribuem para IIoT, como por exemplo a *Industrial Internet Consortium* (sem tradução - IIC), arquitetura que será apresentada no capítulo 6 é demonstrada na Figura 3; o *Open Connectivity Foundation* (sem tradução - OCF); Plataforma Industrie 4.0; o *Standardization Council Industrie 4.0* (sem tradução - SCI 4.0), o *Labs Network Industrie 4.0* (sem tradução - LNI 4.0) e a *Alliance for IoT Innovation* (sem tradução - AIOTI) [34].

No entanto, esses modelos são voltados para indústrias dos seus criadores e, assim, tornam-se específicas para aquele local por obter baixa abstração, de forma a gerar uma dificuldade de para implantar esse mesmo modelo em outras indústrias. Em vista desses fatos, surge a necessidade de uma arquitetura de referência robusta e plena, para que seja possível

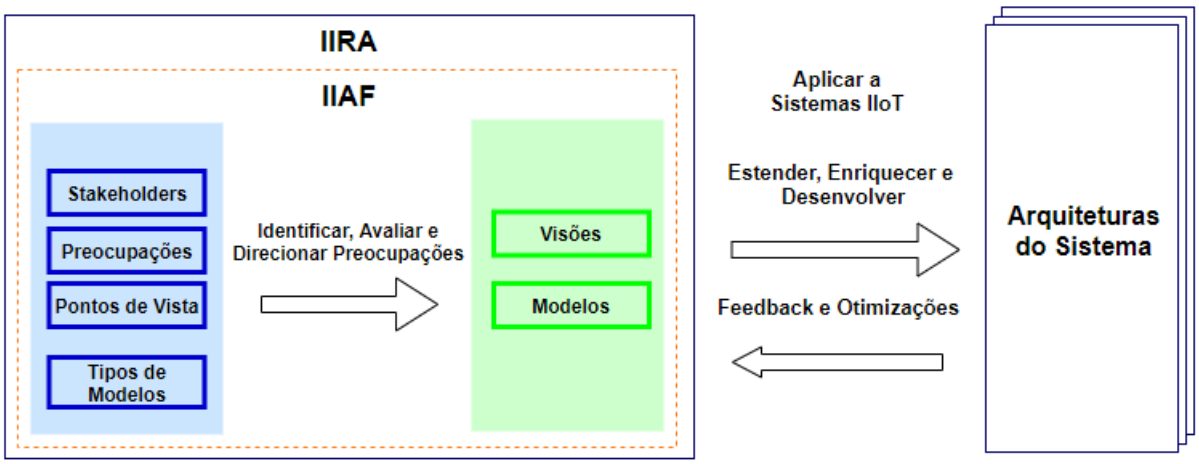


Figura 3 – Estrutura do RAM do IIC, o *Industrial Internet Reference Architecture* (sem tradução - IIRA) [1].

a implantação em diversos âmbitos industriais. Assim, a RAM demonstra ser um fator crucial, mas que ainda necessita de muito estudo e desenvolvimento.

2.4 Modelos de Maturidade

Os modelos de maturidade foram projetados para avaliar a maturidade (como competência, capacidade e nível de sofisticação) de um domínio selecionado com base em um conjunto de critérios abrangente. Os modelos de maturidade proliferaram em vários domínios desde que o conceito de medição de maturidade foi introduzido com o *Capability Maturity Model Integration* (em português Integração do Modelo de Maturidade por Capacidade - CMMI) pela *Software Engineering Institute* (em português Instituto de Engenharia de *Software* - SEI) [35]. Modelos de maturidade são estruturas utilizadas como ferramentas de melhoria de processo, que descrevem o processo em níveis de sofisticação, com o intuito de orientar o esforço de melhoria, portanto, pode ser considerado como um indicativo de sofisticação, estabilidade e frequência com que as práticas, técnicas e procedimentos padrões, relacionados a uma área específica são adotados [36].

O princípio geral de todos os modelos é de avaliar a abordagem coletiva de quaisquer produtos ou serviços em que estejam envolvidos. Assim, implicam no uso de ferramentas para medir os pontos fortes e fracos de qualquer recurso e abordar soluções para melhorias. Em vista disso, o modelo de maturidade direciona os seus aplicadores a entender qual o estágio atual de maturidade a tecnologia utilizada por eles está. Um gerenciamento deste conhecimento fornecerá algumas informações para a empresa que, correntemente, designará os desafios que devem ser cumpridos para um progresso sólido da tecnologia [37].

Na indústria, este tipo de informação possui um grande valor para organização das características da arquitetura, tais como: a prevenção de ataques ao sistema com quebra

dos protocolos de segurança, ter o conhecimento de até que ponto o sistema pode ser sobrecarregado, em quais regimentos estão padronizados as arquiteturas, qual os meios e as velocidades das comunicações utilizadas, e se há interoperabilidade entre os dispositivos.

Os referidos modelos obtiveram importância, principalmente, ao tornar como seu objetivo ser um modelo aplicável a diferentes estruturas. Em vista disso, inclui-se a necessidade da avaliação quanto a natureza resultante do projeto no qual será empregado o modelo, para isso existem três classificações: descritivo, prescritivo e comparativo [35].

No descritivo a aplicação do modelo é vista como encontros de ponto único, sem nenhuma provisão para melhorar a maturidade ou fornecer relacionamentos ao desempenho, ou seja, avalia apenas o estado atual. O comparativo busca comparar as práticas semelhantes entre as organizações, a fim de comparar a maturidade em diferentes setores e pode utilizar o *benchmarking* com estratégia para obter melhores resultados. E, por fim, o prescritivo enfatiza os relacionamentos do domínio com o desempenho dos negócios e indica como abordar a melhoria da maturidade para afetar positivamente o valor dos negócios, ou seja, permite o desenvolvimento de um roteiro para melhoria [35] [37].

Portanto, argumenta-se que, embora esses tipos de modelo possam ser vistos como distintos, eles representam fases evolutivas do ciclo de vida de um modelo. Primeiro, um modelo é descritivo, para que seja alcançado um entendimento mais profundo da situação do domínio em que se encontra. Em seguida, evolui para prescritivo e, assim, a partir do entendimento sólido da situação atual, gera melhorias substanciais e replicáveis para a continuidade no uso. E, por fim, o comparativo deve ser aplicado em uma ampla variedade de organizações, a fim de obter dados suficientes para permitir uma comparação válida.

A estrutura de desenvolvimento padrão é proposto para formar uma base sólida, para orientar o desenvolvimento de um modelo pela primeira fase descritiva e, em seguida, permitir a evolução do modelo através das fases prescritiva e comparativa em um determinado domínio. No entanto, a fase prescritiva obterá um desenvolvimento mais amplo que as outras por ser o objetivo deste trabalho. Além disso, propõe-se que, embora as decisões dentro das fases desta estrutura possam variar, as próprias fases podem ser refletidas em uma metodologia consistente, capaz de ser aplicada em várias áreas. Dito isso, a Figura 4 mostra como é criado um modelo de maturidade em um formato abstrato com destaque para a fase de prescrição.

Alguns autores [38], denominam como Modelos Mistos, um formato simplificado, dos Modelos de Maturidade. Sendo constituídos por um questionário sobre a melhores práticas de desenvolvimento e com a resposta na Escala *Likert* e, conforme a pontuação obtida, a empresa é classificada em uma escala de maturidade. Esses modelos proporcionam uma análise quantitativa elaborada a partir da percepção das pessoas que executam o processo

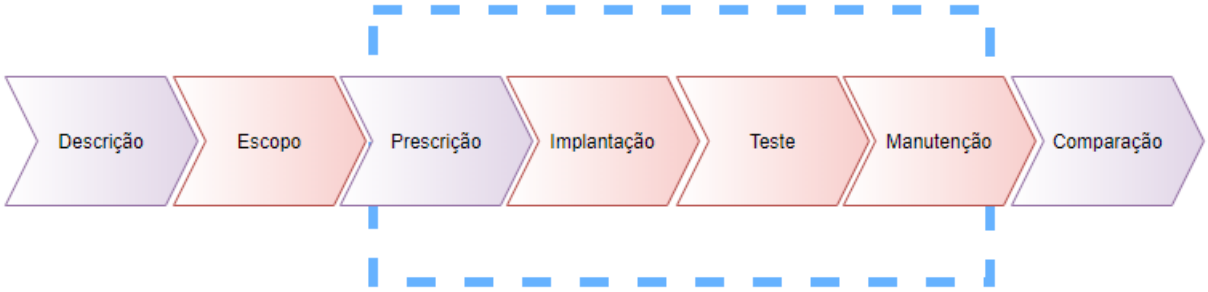


Figura 4 – Formato abstrato para elaboração de modelo de maturidade.

e, assim, apresenta uma baixa complexidade de aplicação. Neste trabalho, a explicação anterior será utilizada para formar a parte de aderência do modelo de maturidade, apenas o conceito pois a configuração será diferente.

3 Trabalhos Correlatos

O estudo de trabalhos correlatos é um ponto significativo para a concepção de uma abordagem viável, competitiva e com diferenciais. Nesta seção são apresentados alguns dos estudos desenvolvidos por outros pesquisadores sobre a IIoT, a RAM e os Modelos de Maturidade.

Quando o assunto é a IIoT, nas pesquisas realizadas, grande parte dos autores buscam por entender e solucionar a inclusão dela nas indústrias, ou seja, demonstram que é uma tecnologia provedora de eficiência, mas que possui desafios para a implantação. E, também, alguns apresentam sobre quais as necessidades e os problemas que com a aplicação da IIoT serão resolvidos ou, até mesmo, já foram projetados e estão em uso para prova de conceito.

O paradigma da IoT tem transformado a forma como as pessoas interagem com os objetos ao seu redor. Abre caminho para a criação de infraestruturas amplamente conectadas para oferecer suporte a serviços inovadores e promete melhorar a flexibilidade e a eficiência. Tais vantagens são atraentes para diferentes setores, sendo o industrial um deles. Nos últimos anos, assistiu-se a IoT entrar no mercado industrial com soluções projetadas propositadamente.

Portanto, em [9] é esclarecido sobre os conceitos gerais da IoT, a IIoT e a Indústria 4.0. Destaca-se, principalmente, as oportunidades de aplicação da IIoT e os desafios para a sua realização, tais como a necessidade de eficiência energética, desempenho em tempo real, coexistência de sistema, interoperabilidade, segurança e privacidade. E, por fim, propicia uma visão geral sistemática dos esforços de pesquisa e possíveis orientações para solucionar os desafios da IIoT.

Por outro lado, [34] discute em seu trabalho como a indústria europeia tem recebido as inovações digitais e as tecnologias da IoT. Como que as indústrias irão tratar a heterogeneidade apresentada pelo setor da TI ao aplicar as soluções de IIoT para, dessa forma, atender aos requisitos definidos para os sistemas e produção modernos quanto a flexibilidade, configuração e comportamento colaborativo. Esses requisitos específicos demostram a falta de padrões de arquitetura no campo industrial, especialmente sobre à conectividade e interoperabilidade na IoT. Assim, os autores consolidam na pesquisa as lacunas e as necessidades de padronização para a IIoT, com a avaliação de quinze arquiteturas e tecnologias integradas, com o propósito de introduzir uma posição da urgente necessidade de novas normas e padrões para a visão futura da transformação impulsionada pela IoT.

As pessoas, as organizações e a sociedade, têm passado por uma enorme revolução tecnológica e determinística para o cotidiano e o trabalho. As redes nos permitem estar conectados, independentemente do momento, e trocar e compartilhar informações com que for necessário. Esta nova etapa envolve o setor industrial e representará um desafio para todas as empresas e organizações, dado que dentro dessas novas coalizões, homens e máquinas operam como iguais no trabalho em direção a seus objetivos específicos. Em vista disso, [39] explora as possibilidades de uma abordagem científica mais holística sobre essas novas relações entre homem e máquina. E, também, algumas das perspectivas atuais da produção industrial, com a introdução da IIoT, os CPSs e a Indústria 4.0, como a necessidade de desenvolver uma tratativa centrada em rede para produção e organização em redes globais.

Os sistemas de gerenciamento de produção baseados na Indústria 4.0 e na IIoT conectam unidades de produção descentralizadas e fontes de informação para aumentar a produtividade e a flexibilidade. Em relação a isso, [40] desenvolveu uma solução baseada em IIoT para garantir uma conexão em tempo real entre produtos e linhas de montagem. O algoritmo proposto de configuração do tempo do ciclo dinâmico leva em consideração a complexidade variável do produto, com base nas informações em tempo real fornecidas por sensores sem fio inteligentes e um Sistema de Posicionamento Interno.

Por fim, detectar falhas em tempo real é uma grande preocupação dos sistemas de supervisão em ambientes industriais. A capacidade de detectar, isolar e diagnosticar uma falha permite o gerenciamento avançado de ativos, em particular a manutenção preditiva, que traz o aumento da eficiência e da produtividade. Devido a isso, [41] projeta e implementa uma plataforma de detecção de falhas em tempo real, com base em um modelo de referência da IIoT. A detecção de falhas é baseada em métodos estatísticos controlados por dados.

A RAM é tratada por muitos autores como a forma de solucionar alguns problemas da aplicação da IIoT na indústria, portanto, muito deles propõem soluções de RAM para implantação, realizam comparações entre arquiteturas prontas, selecionam ferramentas que podem ser utilizados na RAM, dentre outros. No entanto, ao propor a solução não demonstram um embasamento para isso, apenas apontam o problema que será desenlaçado.

Após o super ciclo do setor de mineração, as empresas necessitaram se reinventar e encontrar novos métodos para reduzir custos e melhorar a produtividade. A IIoT e o *Advanced Analytics* (em português Análise Avançada) apresentam oportunidades para tornar as empresas de mineração mais digitais e inteligentes; consequentemente, mais produtivas. Assim, [2] produziu uma estrutura de IIoT e *Advanced Analytics* para ser usada como guia e facilitador para a adoção da IIoT na indústria de mineração. A intenção, principal, da estrutura é resumir as camadas envolvidas nos processos da IIoT e da *Advanced Analytics* e, também, ilustrar os grupos de camadas e criar uma linguagem comum para melhorar a

comunicação entre os conceitos utilizados, Figura 5.

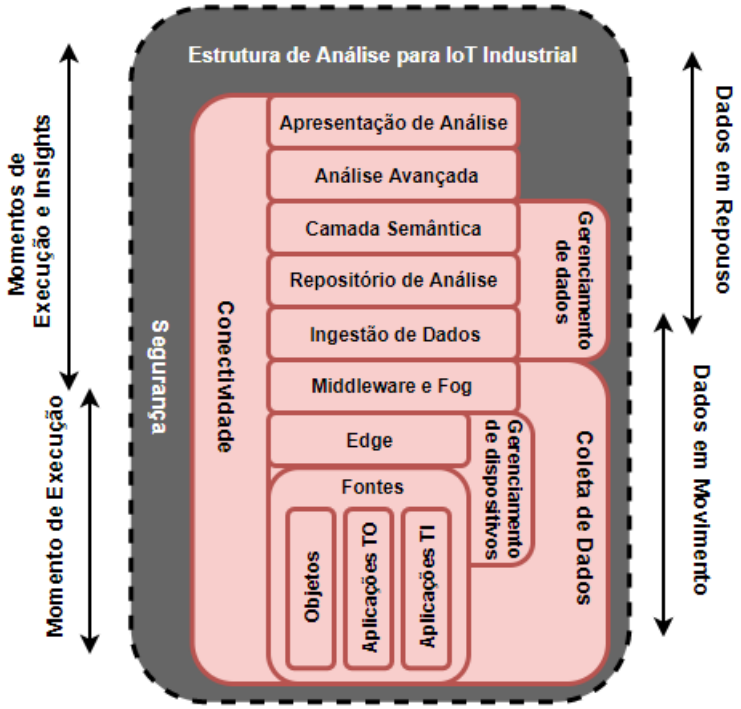


Figura 5 – Estrutura Análise da IIoT proposta por [2].

Enquanto que [42] introduz a sua RAM denominada de *OpenPnP*, essa arquitetura foi desenvolvida para solucionar problemas voltados a atribuição de funções em *softwares* de Sistemas de Controle Industrial (SCI). Dado que esses são sistemas complexos que gerenciam processos de produção críticos, ou seja, possuem necessidade de instalação, configuração e integração de diversos sensores, atuadores e controladores. A arquitetura, portanto, oferece neutralidade em relação a fornecedores para automatizar as atribuições de função. Na pesquisa, traz ainda um caso de uso em que reduz o esforço de configuração e integração em até 90% e escalar até dezenas de milhares de sinais comunicados por segundo para grandes sistemas industriais da IIoT.

Nos dias de hoje, o processo de desenvolvimento da modelagem de uma arquitetura sofre com o imediatismo de aplicação do projeto em uma indústria. Em vista disso, [43] analisa um padrão internacional emergente chamado de *Unified Architecture Framework* (em português Estrutura de Arquitetura Unificada - UAF), seu propósito de aplicação é realizar a leitura das arquiteturas da IIoT, para auxiliar o integrador de sistemas a desenvolve-los de forma interoperável e com rastreabilidade de requisitos em diferentes pontos de vista. Apresenta um caso de uso sendo este o mapeamento da IIRA para mostrar a aplicação do UAF na modelagem de arquiteturas da IIoT.

No mesmo momento, [44] apresenta um estudo com a análise de alguns RAMs, o IIRA e o RAMI 4.0, para realizar uma verificação de compatibilidade com o propósito de gerar uma combinação entre os modelos, e contribuir com uma arquitetura para o ecossistema

da IIoT aprimorada. O autor ainda deixa extremamente claro a importância do uso das RAMs para moldar a flexibilidade, a autonomia e a adaptabilidade dos sistemas industriais a outros recursos como tecnologias digitais e a internet, e, assim, conseguir auxiliar no aumento do desempenho das operações de fabricação.

O surgimento dos conceitos de CPS e *Big Data* permitem que a fabricação se torne mais inteligente e competitiva entre as nações. Muitos pesquisadores propuseram novas soluções com *Big Data*, de forma a permitir a geração de ferramentas para as aplicações de fabricação em três direções: produto, produção e negócios. Dessa forma, em uma análise mais avançada, [3] apresenta uma revisão sistemática da literatura sobre o *Big Data* na fabricação, onde identificou os seis principais fatores para a aplicação, sendo eles: integração do sistema, dados, predição, sustentabilidade, compartilhamento de recursos e *hardware*. E, com base nos requisitos de fabricação, nove componentes essenciais do ecossistema de *Big Data* foram capturados: ingestão de dados, armazenamento, computação, análise, visualização, gerenciamento, fluxo de trabalho, infraestrutura e segurança. A Figura 6 mostra possíveis soluções de *software* escolhidas pelo autor para os fatores e componentes encontrados.

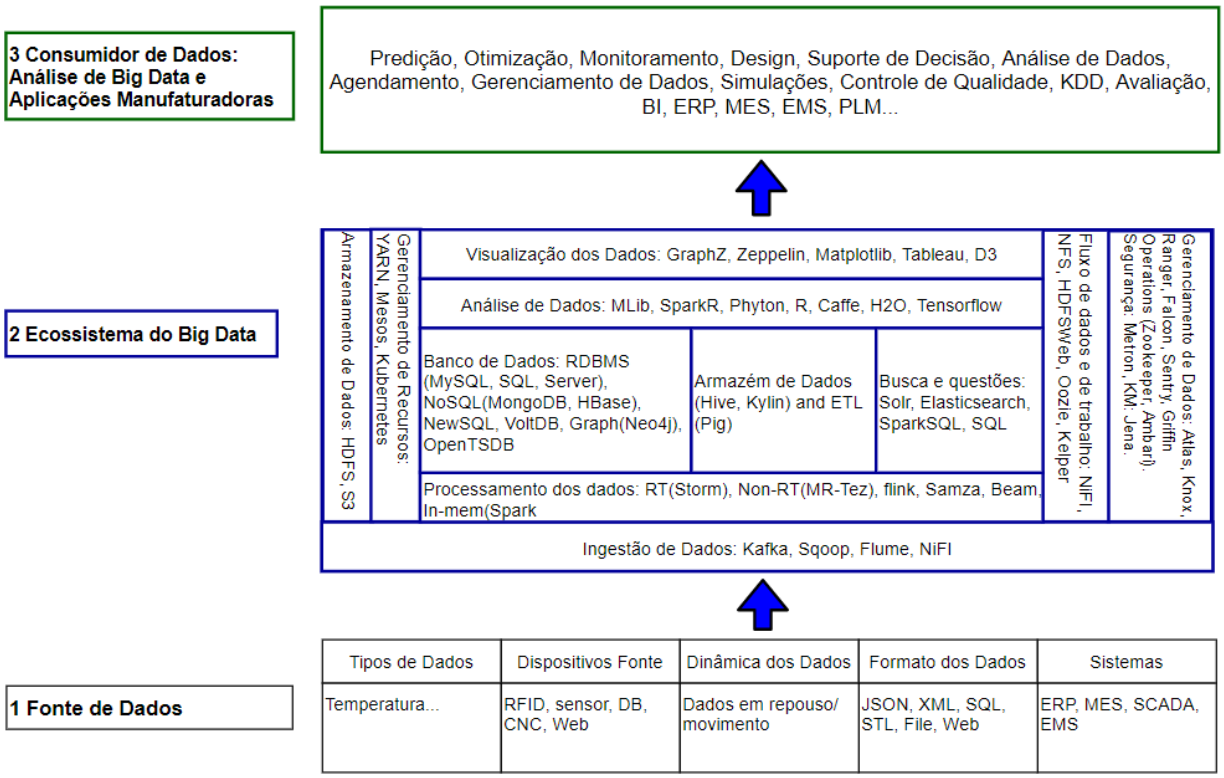


Figura 6 – Infraestrutura conceitual da revisão sistemática da literatura de [3].

E, por fim, os trabalhos encontrados sobre os Modelos de Maturidade, em sua maioria, abordam como aprimorar o modelo pioneiro desenvolvido pela SEI, estratégias de aplicação em projetos, como formular um modelo de maturidade para um domínio e o desenvolvimento de um modelo com padrões vinculados a grandes ODNs. Esses pontos podem ser

considerados uma inversão a espiral evolutiva a que se usa neste projeto, dado que o MMA proposto será desenvolvido através da conceituação das características escolhidas.

Dessa forma, tem-se em [4] um panorama sobre os métodos pioneiros em maturidade desenvolvidos pela SEI, o *Capability Maturity Model Integration* (sem tradução – CMMI), para aprimorar os procedimentos e a qualidade de *softwares* a partir da sua maturidade, e o *Team Software Process* (em português Time de Processamento de *Software* – TPS), que apresenta um guia de como alcançar esses processos. O principal *insight* do CMMI é que é possível melhorar o produto de uma organização, com atendimento e ajuste aos processos que a organização usa para criar o produto. Portanto, o termo melhoria de processo é usado para se referir ao esforço do CMMI. A dimensão de maturidade usado pelo CMMI é demonstrada na Figura 7.

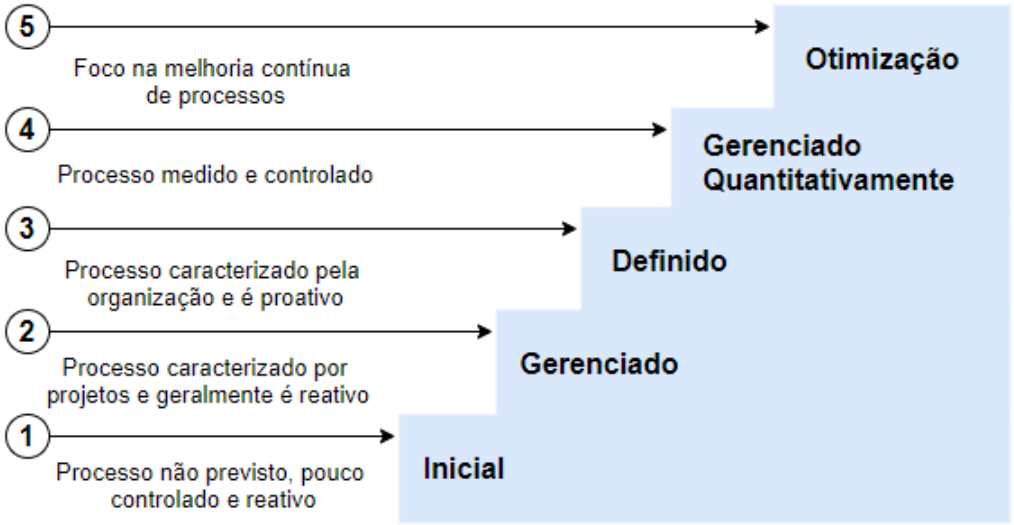


Figura 7 – Niveis de Maturidade do CMMI [4].

Os autores de [35] também abordam o CMMI, sobre como os profissionais e acadêmicos desenvolveram vários modelos de maturidade a fim de medir a competência de vários domínios, mas que não houve um esforço para generalizar as fases para aplicação em qualquer domínio. Dessa forma, propõe uma metodologia e descreve as principais fases do desenvolvimento de modelos genéricos. A metodologia proposta é ilustrada com o auxílio de dois modelos avançados de maturidade nos domínios de gerenciamento de processos de negócios e de conhecimento.

Enquanto isso, [45] realizou um estudo exploratório para investigar os padrões *International Organization for Standardization* (em português Organização Internacional para Padronização - ISO), principalmente o ISO 9001, para o gerenciamento da qualidade na perspectiva da indústria de *software*. O objetivo do seu trabalho é examinar a aplicabilidade das diretrizes genéricas de qualidade dos padrões ISO no processo, produção e organização do *software*, visto que as estruturas da ISO foram estudadas e compreendidas

para isso. Diferentes comparações são desenvolvidas e refinadas para descobrir a correlação ou contraste entre os padrões ISO e com outros modelos de maturidade, dessa forma, o CMMI também entrou nesse estudo.

Por conseguinte, [37] discute os modelos direcionados a gestão do conhecimento e a à gestão corporativa do conhecimento. Em como uma escassez na comunicação e orientação com o cliente provoca que a continuidade do negócio possua uma estratégia inadequada, dado que normalmente o motivo principal é venda do produto fabricado e não o interesse do consumidor. Assim, propõe que a orientação com o comprador seja realizada e se torne uma categoria de nome Processo Chave nas áreas existentes dos Modelos de Maturidades para, dessa forma, promover o valor e a retenção do cliente a longo prazo.

O *Big Data* é considerado uma ferramenta tecnológica atual e com alto índice competitivo para quem a utiliza no mercado da economia digital. No entanto, a capacidade de obter o sucesso com o uso é voltada para o nível de maturidade da organização aplicado ao sistema. Um modelo de maturidade é uma ferramenta que avalia a situação em relação a dimensões-chave específicas do sistema, onde os seus níveis indicam a capacidade atual de uma organização e o estado desejável. Para este seguimento de estudo, [46] revisou a literatura existente para alcançar três objetivos: primeiro, fornecer uma visão abrangente sobre os modelos de maturidade existentes e como seria sua aplicação em *Big Data*; segundo, identificar os modelos de maturidade existentes para *Big Data* existentes e resumir os modelos mais utilizados; terceiro, destacar as limitações dos modelos de maturidade de *Big Data* existentes.

Com base nesses referenciais, verificou-se o quão relevante é o estudo da IIoT, do MMA e, especialmente, as RAMs, e quais são as principais características de cada estrutura para integrá-las de modo a formar um sistema complexo e confiável para o ambiente industrial. Visto que, com o conhecimento das necessidades industriais selecionados pela IIoT, das melhores práticas com o MMA e o funcionamento e modelagem das RAMs existentes, ocorre-se as variações para a inserção de novas funcionalidades e propriedades dos sistemas industriais, e inclusive torna possível o desenvolvimento de uma estrutura genérica, ampla e abrangente.

4 Metodologia da Pesquisa

Por meio de pesquisas e estudos bibliográficos sobre ambientes industriais, verificou-se um elevado índice de iterações a respeito de problemas pela a falta de um sistema computacional integrado, que englobasse o gerenciamento pleno de uma indústria, para solucionar problemas como comunicação, manutenção, acionamento, análise dos dados dos dispositivos ou recursos industriais. Esse sistema computacional é conhecido com RAM, e este necessita de ferramentas para complementar o crescimento da infraestrutura tais como as características e fundamentos da IIoT e o MMA para garantir o aprimoramento do sistema.

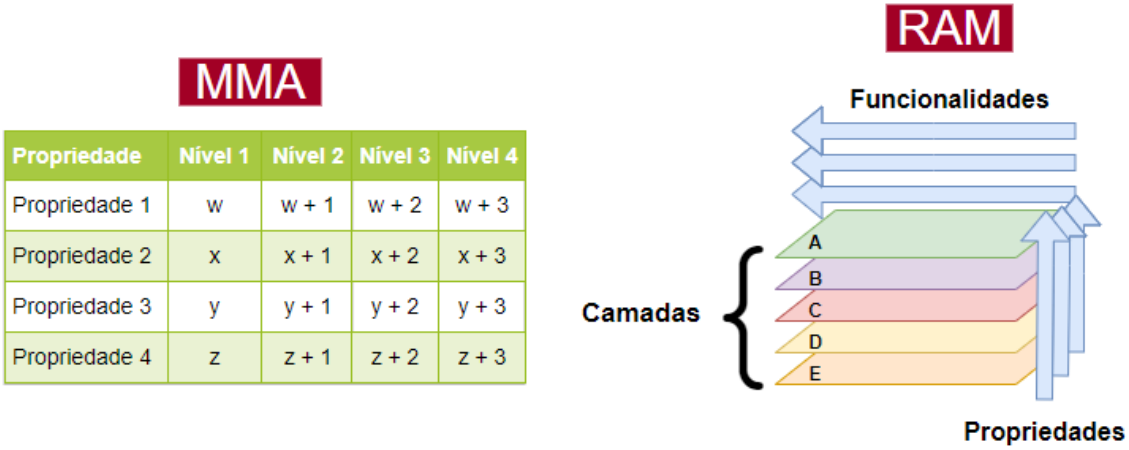
Dessa forma, as ferramentas de pesquisa que serão utilizadas englobam o uso de ferramentas de pesquisa computacionais para gerar estudos bibliográficos complexos. Assim, a pesquisa proposta pode ser classificada como exploratória e experimental [47].

A metodologia adotada para o desenvolvimento da aplicação proposta será fundamentada nos estudos e comparações bibliográficas. O MMA seguirá uma espiral evolutiva na qual cada novo complemento da característica visará aumentar a complexidade da solução proposta, aproximado-se do objeto de estudo final. Por conseguinte, na solução final, o RAM, será realizada a modelagem da solução com estudos sobre quais plataformas tecnológicas irão melhor contribuir para o progresso da aplicação e será complementado com o MMA produzido, para que no estudo de caso o MMA possa ser aplicado e garantir a sua confiabilidade através dos RAM apresentados.

De acordo com a Figura 8, seguem-se os procedimentos, distribuídos em etapas, para alcançar a solução do projeto. As primeiras etapas almejam chegar no desenvolvimento da explicação para a proposta de solução, por intermédio de pesquisas bibliográficas executadas e, dessa forma, poder verificar a direção que os pesquisadores atuais buscam e quais pontos sobre a IIoT, o MMA e o RAM estão sem solução ou incompletos.

No decorrer dos próximos capítulos, a partir do estudo realizado, será formulado o MMA com as seguintes características selecionadas: Segurança e Privacidade, Escalabilidade, Padronização, Interoperabilidade, Comunicação, Orientação Semântica, Modularidade. A seguir, considera-se os fatores como as restrições impostas por outros sistemas e o acolhimento de questões em aberto que são cruciais para o desempenho de uma RAM a infraestrutura será formada, como simula a Figura 9. Portanto, a partir da definição da proposta de solução, uma arquitetura de prosseguimento com o projeto será modelada para que uma evolução de alto desempenho seja alcançada, o MMA de cada característica selecionada seja modelado e os requisitos para a RAM validados.

Figura 8 – Esquemático da ordem de metodologia da pesquisa.



Propriedade	Nível 1	Nível 2	Nível 3	Nível 4
Propriedade 1	w	w + 1	w + 2	w + 3
Propriedade 2	x	x + 1	x + 2	x + 3
Propriedade 3	y	y + 1	y + 2	y + 3
Propriedade 4	z	z + 1	z + 2	z + 3

Figura 9 – Arquitetura de desenvolvimento da pesquisa.

Para as etapas finais, no momento a seguir da modelagem realizada, constituíra-se o estudo de caso da solução proposta que irá gerar resultados para análise, a contribuição e a conclusão final do esforço do trabalho. Após finalizar esses processos, espera-se que o projeto esteja finalizado e com uma alta performance de execução.

5 Modelo de Maturidade e Aderência

Este capítulo apresentará a caracterização das algumas das funcionalidades essenciais selecionadas para o ambiente da IIoT, e formará o MMA individual delas com os requisitos necessários para classificar as arquiteturas. No final do capítulo o MMA completo, que será designado como *MMA for RAM* (em português MMA para RAM - MMA4RAM), será disposto, para que no capítulo seguinte um estudo de caso seja realizada nas arquiteturas pesquisadas. As seguintes funcionalidades serão utilizadas: segurança e privacidade, estabilidade, padronização, interoperabilidade, comunicação, orientação semântica e modularidade, que foram selecionadas pelos motivos a seguir.

Um sistema confiável deve ser seguro; caso contrário, falhas arbitrárias podem ser injetadas nele e violam as suposições básicas dos projetistas do sistema. A segurança e privacidade, refere-se ao cumprimento dos níveis de segurança pretendidos para dados, serviços e infraestrutura, aborda questões relacionadas disponibilidade, confidencialidade, integridade e autenticidade, bloqueio, gerenciamento de identidade, governança e conformidade de proteção dos dados. Na IIoT, o reconhecimento da importância da Segurança é alto. No entanto, proteger os sistemas IIoT, especialmente a camada de detecção e desempenho, ainda apresenta vários desafios em aberto, muitos dos quais decorrem das restrições de recursos dos microdispositivos. Por exemplo, embora os padrões de rede para tais dispositivos incluam provisões, para vários modos de segurança, eles dificilmente são implementados [48].

Uma definição intuitiva de escalabilidade é o que se chama escalabilidade de tamanho: se diz que um sistema distribuído aumenta de tamanho quando seu desempenho não diminui, ou diminui apenas, ligeiramente, quando o número de usuários ou máquinas aumenta significativamente. Quando ocorrem problemas de escalabilidade de tamanho, a primeira linha de defesa é fornecer mais recursos: memória, armazenamento, capacidade de computação ou largura de banda da rede, dependendo de qual é o gargalo. Uma abordagem mais fechada é empregar replicação ou particionar os dados ou cálculos, de forma que a carga possa ser dividida entre vários componentes. Somente quando isso falha é forçado a redesenhar o sistema [48].

O rápido crescimento da IIoT dificulta os esforços de padronização, embora desempenhe um papel importante no desenvolvimento e disseminação da IIoT. A padronização na IIoT visa reduzir as barreiras de entrada, para novos provedores de serviços e usuários, melhorar a interoperabilidade de diferentes aplicativos ou sistemas e permitir que produtos ou serviços tenham um desempenho de alto nível. Os padrões internacionais são, normalmente,

usados para atividades que cruzam domínios, recursos e requisitos desenvolvidos em nível internacional. Quando considerada a arquitetura da Internet, a abundância de padrões de baixo nível em teoria não é um problema, desde que as várias soluções possam ser integradas ao Protocolo de Internet [49].

Hoje, o setor industrial, é dominado por soluções proprietárias de vários fornecedores e domínios. Em um ambiente totalmente interoperável, qualquer dispositivo IIoT será capaz de se conectar a qualquer outro dispositivo ou sistema e trocar as informações necessárias. A interoperabilidade entre os dispositivos e sistemas IIoT ocorre em vários graus em diferentes camadas na pilha do protocolo de comunicação do dispositivo. Além disso, a interoperabilidade total em todos os aspectos de um produto técnico nem sempre é viável, necessária ou desejável. A essência da discussão sobre interoperabilidade para IIoT é a padronização e a adoção de protocolos que especificam detalhes de comunicação [49].

Para concretizar esse crescimento potencial, as tecnologias e inovações emergentes e os aplicativos de serviço precisam crescer, proporcionalmente, para atender às demandas do mercado e às necessidades dos clientes. Além disso, os dispositivos precisam ser desenvolvidos para atender às necessidades do cliente em termos de disponibilidade em qualquer lugar e a qualquer hora. Para isso a comunicação trás os novos protocolos que serão necessários para compatibilidade de comunicação entre os dispositivos heterogêneas [15].

A orientação semântica se refere à capacidade de extrair conhecimento de forma inteligente de diferentes máquinas, para fornecer os serviços necessários. A extração de conhecimento inclui a descoberta, o uso de recursos e informações modelados. Além disso, inclui o reconhecimento e a análise de dados, para dar sentido à decisão certa de fornecer o serviço exato. A semântica representa o cérebro da IIoT, quando envia demandas para o recurso correto [15].

E, por fim, a modularidade tem como princípio desenvolver sistemas que podem se adaptar de forma flexível às mudanças de requisitos, ao substituir ou expandir os módulos individuais, o que facilita a adição ou remoção de módulos de produção. Esses sistemas modulares podem, portanto, ser facilmente ajustados no caso de flutuações sazonais ou alterações nas necessidades de produção do produto, como no caso da incorporação de novas tecnologias [50].

A partir dessas argumentações, definiu-se essas funcionalidades para iniciar a construção do MMA4RAM.

5.1 Segurança e Privacidade

Garantir a segurança e a privacidade dos sistemas da IIoT é uma tarefa desafiadora, dado que estes integram TICs para permitir a interconexão entre dispositivos industriais, em vista disso a proteção dos sistemas contra ataques cibernéticos é crucial. Além disso, os ataques cibernéticos podem causar não apenas atraso e incerteza nas informações, mas, também, problemas quanto a segurança para humanos, meio ambiente e máquinas. Portanto, são necessárias abordagens de gerenciamento de segurança apropriadas para garantir a segurança dos ambientes IIoT. Uma adversidade de segurança para a IIoT é analisar as conexões entre todos os diferentes componentes, nos níveis físico e cibernético e as possíveis vulnerabilidades que surgem dessas conexões, para limitar o acesso não autorizado e mitigar possíveis ataques de segurança. Por exemplo, um dispositivo pode ser atacado através da exploração de um componente conectado a esse dispositivo [51].

Em resposta a isso, a segurança da IIoT deve ser abordada de maneira proativa. Essa abordagem requer, por um lado, o desenvolvimento de novos sistemas (ou a análise dos sistemas existentes) que seguem os princípios de segurança por projeto, ou seja, desenvolvimento e análise com base na engenharia de requisitos de segurança; e, por outro lado, abordar a segurança como um alvo móvel, onde novos ataques desenvolvidos e novas vulnerabilidades podem ser identificados, e seu impacto no ambiente da IIoT é analisado. Todavia, é importante que se desenvolva métodos que permitam identificar requisitos de segurança, modelar e analisar em ambientes IIoT com base em requisitos de segurança e, também, para permitir a identificação de caminhos de ataque que um invasor poderia explorar e fornecer a análise do impacto que eles têm [52], [53].

Nas últimas décadas, o poder da computação se tornou mais acessível, a capacidade de memória aumentou e as baterias recarregáveis aumentaram a sua vida útil. No entanto, esse novo campo de dispositivos de IoT costuma ter recursos limitados para tornar a produção em massa mais acessível. Isso reduz a capacidade computacional, a capacidade de memória e o tamanho da bateria de um nó na borda, de modo a criar uma interseção intrigante de inovações e restrições tecnológicas [54].

Os sistemas da IIoT trarão complexidade sem precedentes em seus projetos, portanto, é necessário ter um entendimento geral de como o sistema IIoT está estruturado. Esses sistemas são compostos por vários nós de borda da IIoT conectados por pontos de acesso (para agregação e análise de dados) para formar redes maiores. Esses nós de borda podem assumir a forma de sensores ambientais, atuadores, trava de segurança ou sensores de proximidade e podem executar funções atualmente inimagináveis para esses sistemas. Todos os dispositivos nesses sistemas devem ser projetados com segurança, dos nós de borda aos pontos de acesso e além [55].

Em vista disso, deparou-se em análise que a segurança e a privacidade necessitam de cinco características que são fundamentais para formar os níveis do MMA, sendo elas: a memória, a criptografia, a validação de mensagens, a segurança da física do dispositivo e os parâmetros de segurança [52], [53] e [54]. Essas características sustentam os princípios básicos da segurança e privacidade que são: a disponibilidade, a integridade, a confidencialidade e a autenticidade.

A disponibilidade, a integridade e a confidencialidade são conhecidas por formar uma tríade da segurança da informação [56]. A Disponibilidade significa que usuários autorizados têm acesso aos sistemas e recursos necessários, a integridade significa que os dados são protegidos contra alterações não autorizadas para garantir que sejam confiáveis e corretos e, por fim, a confidencialidade significa que dados, objetos e recursos são protegidos contra visualização não autorizada e outros acessos. A Autenticidade complementa por ser a garantia de que uma mensagem, transação ou outra troca de informações é proveniente da fonte que afirma ser, de modo que, principalmente, envolve prova de identidade.

A memória é protegida pelo uso de uma unidade de proteção de memória, que obtém a capacidade de designar regiões da memória diferentes e limita o acesso por meio de políticas de acesso à memória, de modo que somente determinadas funções possam acessar a memória em determinadas regiões, e restringe o acesso a outras áreas. Diferentes tipos de memória devem ser usados em uma arquitetura de nó seguro. O código necessário para inicializar o dispositivo e executar operações mínimas deve ser armazenado na memória somente leitura, pois não deve ser modificado, exceto em um ambiente confiável.

A criptografia é essencial para garantir a confidencialidade dos dados. Se um invasor não conseguir decifrar uma mensagem, o conteúdo dos dados permanecerá intacto. Uma grande preocupação com os dispositivos IIoT é se eles têm ou não os recursos para empregar esquemas de criptografia fortes. A força da criptografia nas camadas mais baixas também afetará a força criptográfica nas camadas de rede mais altas, de modo que possam até ser *tradeoffs* (sem tradução) por dispositivos, mas a depender de seus recursos e dos recursos das redes. Outra forma é o provisionamento e o descomissionamento de dispositivos. Portanto, diferentes tipos de técnicas criptográficas devem ser examinados para uso nesses dispositivos, a fim de fornecer o nível de segurança apropriado necessário para um dispositivo.

Toda mensagem recebida por um dispositivo deve ser validada, para indicar que é a mensagem correta que foi enviada. Isso pode ser feito através do uso de redundância cíclicas de checagem, códigos de autenticação de mensagens ou esquemas de criptografia autenticados. A validação de mensagens é uma etapa muito importante quando as informações enviadas podem substituir os dados atuais, como programas ou chaves criptográficas. Se essas mensagens não forem validadas, os dados podem ser corrompidos durante a transmissão

devido a ruídos ou ataques maliciosos. Depois de validados, os dados podem ser usados para atualizar os parâmetros armazenados, executar os comandos para a coleta de sensores ou permitir que os comandos do atuador prossigam.

Para proteger um sistema contra ataques físicos dos dispositivos, várias precauções devem ser levadas em consideração no *design* de um dispositivo. Por exemplo, a segurança física deve começar nas fases de fabricação e produção dos dispositivos IIoT. Se um dispositivo for violado e o código malicioso for adicionado a um dispositivo durante esse período, é provável que haja mais segurança. Os dispositivos necessitam de ter alguma proteção contra adulteração para proteger os dados sensíveis que podem estar contidos internamente. Assume-se que o provisionamento inteligente de informações seguras na rede é realizado para que a corrupção de um dispositivo produza utilidade adicional limitada na corrupção de outros dispositivos na rede. O Provisionamento de dispositivos da IIoT contribui para que somente dispositivos permitidos possam fazer parte da rede, e opera em conjunto com o descomissionamento que evita que dispositivos não mais utilizados continuem cadastrados e com permissão de acesso, o que pode ocasionar em lacunas na segurança e na privacidade.

Um nó sensor da IIoT seguro é projetado nominalmente para ser de baixo custo, com economia de energia e confiabilidade. Para atingir todos esses objetivos, certos parâmetros de segurança de *design* devem ser considerados e configurados, sendo elas: sincronização e *clock*, gerenciamento de energia, chave de gerenciamento, procedimento de reinicialização, modulação, entre outros. A padronização dos níveis de segurança dos dispositivos da IIoT permitirá um maior senso de confiança entre os dispositivos e garantirá que redes maiores sejam mais seguras, dado que a segurança foi projetada como uma base, em vez de uma reflexão tardia.

Após esses esclarecimentos, para atender os requisitos, a maturidade da segurança e privacidade, em conformidade com as etapas de de disponibilidade, integridade, confidencialidade e autenticidade, possui as seguintes especificações por nível [51], [52], [53], [54] e [55]:

- Nível 1: deve-se obter a memória desprotegida; sem criptografia, validação de mensagens e segurança para a camada física; e parâmetros de segurança estáticos para a disponibilidade.
- Nível 2: deve-se obter o registro de dados e a memória protegida; criptografia e segurança para camada física baixa; ainda sem validação de mensagens e parâmetros de segurança estáticos para a integridade.
- Nível 3: deve-se obter a segurança contra adulteração, registro de dados, memória protegida e executa em ambiente confiável; criptografia, segurança para camada física e validação de mensagens média; e parâmetros de segurança ajustáveis para a confiabilidade.

- Nível 4: deve-se obter a segurança contra adulteração, registro de dados, memória protegida e executa em ambiente confiável; criptografia, segurança para camada física e validação de mensagens alta; e parâmetros de segurança ajustáveis para a autenticidade.

5.2 Escalabilidade

A Escalabilidade é definida como a capacidade do sistema de crescer e acomodar mais recursos necessários para uma operação eficaz. Em relação a um sistema da IIoT, um sistema escalável deve ser capaz de se comunicar com um número crescente de nós, bem como uma quantidade crescente de dados a serem trocados entre eles. Sob essas condições, o sistema precisa garantir sua capacidade de resposta em tempo real, de modo a evitar o aumento da latência da rede e a diminuição da taxa de transferência. A escalabilidade possui uma preocupação importante para aplicações da IIoT, dado que a quantidade de interações de serviços pode inesperadamente aumentar exponencialmente de tamanho em vista ao grande número de nós interconectados [57].

Muitas plantas industriais podem ter dezenas de milhares de malhas de controle e aplicações para manter o desempenho desejado em operação. Essas diferentes aplicações de controle industrial têm diferentes requisitos de tempo de ciclo. Para as aplicações de controle de movimento e as de *loop* de controle rápido, o requisito de tempo de ciclo pode atingir 1ms e 10ms, respectivamente. Para as aplicações de entrada e saída de alta velocidade, o tempo de ciclo necessário para executar essa funcionalidade chega a 100s [58]. Isso implica em uma grande quantidade de dados que precisam ser gerenciados, por exemplo, filtragem, pré-processamento nos dispositivos de borda ou próximo a eles antes de serem enviados para a nuvem.

Uma das principais vantagens de uma implementação da IIoT é sua flexibilidade na integração de novos equipamentos ao sistema, devido a isso o requisito de escalabilidade é fundamental a ser atendido. No caso de aumentar o número de nós, pode-se usar dispositivos físicos e ferramentas de simulação que imitam o mesmo comportamento. Em relação à quantidade de dados produzidos, eles podem ser testados em três perspectivas diferentes: primeira, aumentar a taxa de amostragem de um sensor para validar se não há perda de informação; segundo, aumentar a quantidade de dados enviados para a nuvem com o uso de algoritmos de processamento no nível do nó; terceira, aumentar o número de serviços de análise de dados disponíveis em um servidor para pós-processar os dados do sensor como uma forma de teste [21].

No entanto, essas perspectivas refletem em diferentes aspectos, sendo eles: primeiro, nomeação e endereçamento - a escalabilidade do endereço do dispositivo da rede existente

deve ser sustentável; segundo, comunicação e rede de dados - a conexão de novas redes e dispositivos não deve comprometer o desempenho das redes, dispositivos e transmissão de dados existentes, apesar do alto nível de interconexão entre um grande número de dispositivos e componentes de sistema; e terceiro, provisionamento e gerenciamento de serviços - devido ao grande número de opções de serviços ou execução de serviços disponíveis e à necessidade de lidar com recursos heterogêneos [58].

A análise sobre a escalabilidade, voltada para os requisitos da IIoT, apresentou que existem quatro fatores a serem atendidos, para que haja um alto desempenho da arquitetura, sendo eles: o fluxo de controle explícito, a separação entre controle e computação, a descentralização e a transparência da localização. E, existem quatro tipos de esquemas de interações de serviços para flexibilizar e satisfazer os fatores expostos: interações diretas de serviço, interações indiretas de serviço, interações de serviço orientada a eventos e interações exógenas de serviço [57].

Após esses esclarecimentos, para atender os requisitos, a maturidade da escalabilidade possui as seguintes especificações por nível [57], [59] e [60]:

- Nível 1: obter o fluxo de controle explícito, a separação entre controle e computação, a descentralização e a transparência da localização por interações diretas.
- Nível 2: obter o fluxo de controle explícito, a separação entre controle e computação, a descentralização e a transparência da localização por interações indiretas.
- Nível 3: obter o fluxo de controle explícito, a separação entre controle e computação, a descentralização e a transparência da localização por interações orientada a eventos.
- Nível 4: obter o fluxo de controle explícito, a separação entre controle e computação, a descentralização e a transparência da localização por interações exógenas.

5.3 Padronização

A IIoT oferece um grande número de soluções maduras para otimizar os processos de produção ao longo de todo o ciclo de vida, e obter mais transparência no chão de fábrica, ou seja, ler o estado atual das máquinas de produção e outros sistemas de controle industrial para, assim, emitir alertas, enviar notificações ou executar manutenção e operações de monitoramento. No entanto, nesses processos existem grandes desafios emergentes, uma das principais razões é a falta de informações de alta qualidade na forma de padrões técnicos de IIoT, que podem fornecer aos engenheiros os requisitos e as especificações detalhados para troca de dados, processamento e comunicação entre o CPS. Portanto, o desenvolvimento dos padrões de arquitetura necessários para a IIoT se tornou importante para facilitar a interoperabilidade e facilitar a implementação dos sistemas [34].

A padronização é um passo significativo para que uma tecnologia seja amplamente suportada e aceita. É interessante notar que a maioria das atividades de padronização anteriores se concentrou em domínios muito específicos, de modo a resultar em um desenvolvimento disjuntivo e redundante. Além disso, a padronização, também, possui um foco em facilitar a interoperabilidade, ou seja, quanto mais padronizado mais acessível se torna a interoperabilidade. Dessa forma, a padronização se torna uma dimensão que engloba as outras funcionalidades e auxilia no desenvolvimento das mesmas.

O processo de padronização precisa enfrentar vários desafios; atualmente, existem inúmeros organismos de padronização e iniciativas de consórcios concorrentes em todas as camadas da pilha IIoT, estes se referem a uma variedade de requisitos fragmentados, que em alguns casos são inconsistentes e oponentes. As atividades de padronização em andamento incluem padrões horizontais, para garantir a interoperabilidade; padrões verticais, para identificar requisitos de aplicações individuais e casos de uso; e atividades promocionais, apoiadas por consórcios industriais e grupos governamentais [9].

Em geral, a padronização, pode ajudar a progredir no entendimento, desenvolvimento e resiliência da IoT. Vários organismos de padronização da indústria e da academia, juntamente com várias federações, como o IIC, o IEEE e o *National Institute of Standars and Technology* (em português Instituto Nacional de Padrões e Tecnologia - NIST); empreenderam esforços de padronização para IIoT de várias perspectivas. Por exemplo, a IIC divulgou documentos e relatórios técnicos que fornecem orientações sobre o entendimento de arquiteturas, técnicas, segurança e bancos de testes para IIoT. Além disso, o NIST divulgou padrões sobre sistemas sem fio industriais e sistemas de controle industrial, entre outros, que desempenham papéis críticos na IIoT. O recente progresso de padronização do NIST fornece orientações para a implantação da comunicação sem fio em várias plantas e fábricas industriais, de forma a melhorar a produção e reduzir os custos. E, a IIC especificou operações de fábricas e instalações, sistemas de controle e redes de retorno para o ecossistema de comunicação sem fio [51].

Uma outra questão é a heterogeneidade do cenário de padronização e os fornecedores tradicionais, que dificultam cada vez mais a dinâmica global dos padrões de IIoT, com a distribuição de dispositivos com protocolos fixos e de difícil integração. No entanto, devido evolução dos conceitos da IIoT e à constante mudança dos objetivos no campo industrial, é complexo definir quais os padrões relevantes dentre muitos existentes. Além disso, o desenvolvimento e a consolidação de padrões são ainda mais difíceis pelo fato de o cenário da IIoT ser muito fragmentado. Assim, as soluções emergentes são denotadas com um alto nível de heterogeneidade das ferramentas aplicadas e, muitas vezes, tornam-se diversas e não cumprem os padrões desenvolvidos [61].

Portanto, deparou-se em análise com a necessidade da padronização em seis particula-

ridades são fundamentais para a formalização e interoperabilidade do sistema, sendo elas: o *middleware*, interfaces para o usuário, objetos inteligentes, aplicações inteligentes, comunicação e semântica.

A padronização do *Middleware* se concentra nos conceitos da tecnologia industrial de *middleware* e nos requisitos de arquitetura de sistema distribuído, como o suporte a capacidade de conectar e produzir, para fornecer especificações e funcionalidades para a arquitetura de soluções quanto ao middleware industrial, com o foco em mecanismos de segurança e transferência de dados, incluem-se os registros e as autenticações de forma segura de objetos e aplicações inteligentes. A padronização voltada a interfaces do usuário inclui informações sobre módulos de *hardware* e *software* que fazem interface com humanos, e que são utilizadas para auxiliar na transmissão de informações e acionar operações de máquinas de produção reconfiguráveis e auto adaptáveis.

A padronização quanto aos objetos inteligentes se concentra em objetos, entidades, componentes inteligentes gerais e sistemas *plug-and-play* (em português conectar e ligar); para, assim, harmonizar as tecnologias de interface industrial para os objetos inteligentes e as aplicações de *software* industrial; contribuir com padrões focados em processos reconfiguráveis em ecossistemas de produção; padronizar a identidade e os conceitos de gerenciamento de objetos inteligentes. A padronização quanto aplicações inteligentes se concentram em aplicações de *software* puros que fornecem um valor agregado para dispositivos conectados, ou outras aplicações inteligentes, e que se comunicam por meio da indústria middleware.

A padronização na comunicação tem propósito de gerar interoperabilidade entre vários sistemas, e inclui objetivos referentes a vários protocolos de comunicação industrial, bem como procedimentos de transferência de mensagens e arquivos em tempo real. A padronização na semântica contém objetivos que tratam da modelagem de informações, e representação do conhecimento, ontologias e vocabulários, de forma a descrever o processamento de dados e sua topologia, como por exemplo, localização e armazenamento de dados.

Após esses esclarecimentos, para atender os requisitos, a maturidade da padronização possui as seguintes especificações por nível [9], [34], [51] e [61]:

- Nível 1: obter a padronização do *middleware* e das interfaces para o usuário.
- Nível 2: obter a padronização do *middleware*, das interfaces para o usuário e da comunicação.
- Nível 3: obter a padronização do *middleware*, das interfaces para o usuário, da comunicação e da semântica.

- Nível 4: obter a padronização do *middleware*, das interfaces para o usuário, da comunicação, da semântica; dos objetos e das aplicações inteligentes.

5.4 Interoperabilidade

A interoperabilidade é outro desafio para a IIoT devido à necessidade de trabalhar com diversas tecnologias heterogêneas que pertencem a plataformas diferentes. A interoperabilidade deve ser considerada pelos desenvolvedores de aplicações e pelos fabricantes de dispositivos para a IIoT, para garantir a prestação de serviços a todos os clientes, independentemente das especificações da plataforma de *hardware* que eles usam. Por exemplo, a maioria dos *smartphones* atualmente suporta tecnologias de comunicação comuns, para garantir a interoperabilidade em diferentes cenários. Além disso, os programadores da IIoT devem criar suas aplicações para permitir adicionar novas funções sem causar problemas ou perder funções e, também, manter a integração com diferentes tecnologias de comunicação [15].

A diversificação é resultado de muitos mecanismos, geralmente alguns protocolos personalizados em uso devido à natureza das soluções que foram desenvolvidas ao longo do tempo. Muitos dos padrões são uma reflexão tardia após o desenvolvimento da solução real, enquanto em outros casos o padrão não é genérico o suficiente para adoção. Com a introdução de mais padrões, há definitivamente uma rotatividade no ciclo de adoção. O avanço da IIoT ou, em geral, do M2M pode ser possível que as aplicações e soluções sejam criadas com foco na interoperabilidade em todas as camadas da pilha de aplicações [62].

Houve tentativas de solucionar alguns os problemas de interoperabilidade com: publicações de padrões, arquiteturas, estruturas de referência; definição protocolos, padrões de dados; utilização de linguagens abstratas para definição de interfaces e utilizar ontologias semânticas. O desafio da interoperabilidade não pode ser resolvido apenas por uma especificação de padrões, ou por um protocolo na camada de aplicação, ou, até mesmo, por uma linguagem específica de domínio comum; deve ser uma combinação de todas elas. De fato, a carência de interoperabilidade pode criar objetos completamente isolados, enquanto, essencialmente, esses objetos deveriam trocar dados entre eles [63].

A interoperabilidade é, fundamentalmente, estruturada em seis características, sendo elas: interoperabilidade técnica, interoperabilidade semântica, interoperabilidade sintática, interoperabilidade dinâmica, interoperabilidade de serviço e interoperabilidade para a comunicação [63], [64].

A interoperabilidade técnica denomina a conectividade física estabelecida entre o objeto para poder trocar bits e bytes, ou seja, trata-se da compatibilidade física e de *software* dos dispositivos, inclui-se os protocolos utilizados para a comunicação entre os dispositivos.

Enquanto, a interoperabilidade semântica elabora os contextos e as informações que podem ser trocados. Refere-se a padrões e unidades comuns, por exemplo, quando sensores são utilizados, é esperado que eles se comuniquem com os dispositivos usando as mesmas unidades.

Na interoperabilidade sintática os dados podem ser trocados em formatos padronizados, pois os mesmos protocolos e formatos são suportados. Este é o formato da mensagem através da qual a comunicação ocorre, é a chave para a comunicação. Por exemplo, usar o XML para transmitir informações. Por outro lado, na interoperabilidade dinâmica, as informações, usabilidade, aplicabilidade, conhecimento, podem ser trocados. Existe um foco para as mudanças contextuais, e os eventos são considerados como objetos de integração.

Quanto a interoperabilidade para a comunicação, esta se concentra na capacidade de trocar os dados e usar as informações como um objeto de integração, ou seja, formato e sintaxe dos dados. E, por fim, sobre a interoperabilidade de serviço, esta é voltada para a troca de serviços entre os *softwares*, dispositivos, máquinas, e outros que realizam serviços, em como eles irão realizar as entregas necessárias para a operação da indústria.

Após esses esclarecimentos, para atender os requisitos, a maturidade da interoperabilidade possui as seguintes especificações por nível [62], [63] e [64]:

- Nível 1: obter interoperabilidade técnica e interoperabilidade para comunicação.
- Nível 2: obter interoperabilidade técnica, interoperabilidade para comunicação e interoperabilidade semântica.
- Nível 3: obter interoperabilidade técnica, interoperabilidade para comunicação, interoperabilidade semântica e interoperabilidade sintática.
- Nível 4: obter interoperabilidade técnica, interoperabilidade para comunicação, interoperabilidade semântica, interoperabilidade sintática, interoperabilidade de serviços e interoperabilidade dinâmica.

5.5 Comunicação

As tecnologias de comunicação são indispensáveis para a IIoT, dado que vários serviços da IIoT exigem "conectividade"por meio de redes de comunicação. Portanto, as redes de comunicação representam um grande papel para a implantação de vários serviços de IIoT. A abordagem vertical da comunicação pode otimizar as funções das redes e do processamento de informações para aplicações específicas. No entanto, as funções comuns nessas aplicações não podem ser fornecidas por uma plataforma comum nessa abordagem. Por exemplo, as redes de comunicação precisam ser implantadas e operadas individualmente para cada

aplicação. No entanto, no formato horizontal, a rede de comunicação e o processamento de informações são fornecidos como plataformas para vários serviços [65].

Por conectar dispositivos heterogêneos, as tecnologias de comunicação da IIoT, necessitam fornecer serviços inteligentes específicos. Normalmente, os nós da IIoT devem operar com baixo consumo de energia na presença de links de comunicação com perdas e ruidos. Exemplos de protocolos de comunicação usados para a IoT são *Wi-Fi, Bluetooth, IEEE 802.15.4, Z-wave e LTE-Advanced*. Algumas tecnologias de comunicação específicas também estão em uso, como *Radio Frequency IDentification* (em português Identificação por Rádio Frequência – RFID), *Near Field Communication* (em português Comunicação por Campo Próximo - NFC) e largura de banda ultra larga. O RFID foi a primeira tecnologia utilizada em M2M, para realizar leituras através de etiquetas com o leitor RFID [15].

Alguns dispositivos IIoT, geralmente, são de baixo custo e possuem recursos limitados, como baixa conexão de rede, energia e limitação de processamento. Os protocolos de comunicação são críticos para organizar os fluxos de dados e determinar como a IIoT interage. A IIoT requer novos protocolos flexíveis para dispositivos heterogêneos e restritos, ao contrário dos protocolos de comunicação comuns. Mais especificamente, os dispositivos restritos são insuficientes para atender às altas demandas da comunicação por protocolos de transferência [66].

No cenário das aplicações de IIoT, as redes de comunicações existentes precisarão manter muitas conexões e sessões específicas de dispositivos para cada subscrito da IIoT (um subscrito que possui um conjunto de dispositivos da IIoT). Isso será uma sobrecarga para a rede e para o subscrito da IIoT. Esse arranjo de dispositivos interconectados massivos impõe inúmeras restrições e desafios que necessitam de controle, como: consumo de largura de banda, perda de pacotes de mensagens, consumo de energia, tempo de resposta e confiabilidade [67].

A perda de pacote de mensagens necessita que o foco esteja na transmissão de dados entre os sensores no nó *gateway* até o servidor, para isso, realiza-se a atribuição e manutenção da identidade de cada dispositivo na rede. O consumo de largura de banda é solucionado com esclarecimento de como os protocolos funcionam em redes sem fio restritas e de baixa qualidade, de modo que não haja a comunicação sem o reconhecimento de contexto dentro e através de vários tipos de redes IIoT, para manter as despesas gerais de comunicação dentro de limites para transmissão.

O tempo de resposta ocorre com a variação do tráfico de dados, ao medir o desempenho dos protocolos em dispositivos restritos e, também, com a manutenção das conexões e sessões diferentes para cada dispositivo IIoT, garante-se a eficiência. O consumo de energia em nós pode ser contido com a seleção de qual dos protocolos mapeados é mais

adequado para a área em que será aplicado, como também a manutenção das conexões em dispositivos heterogêneos para manter baixo o consumo. A confiabilidade é realizada com o cumprimento da segurança e criticidade dos dispositivos em suas diversas necessidades de comunicação, seja em redes de baixa ou alta qualidade, ou por camadas de segurança no acesso a rede.

Após esses esclarecimentos, para atender os requisitos, a maturidade da comunicação possui as seguintes especificações por nível [65], [66] e [67]:

- Nível 1: obter o controle do consumo de largura de banda e do tempo de resposta.
- Nível 2: obter o controle do consumo de largura de banda, do tempo de resposta e da perda de pacotes de mensagens.
- Nível 3: obter o controle do consumo de largura de banda, do tempo de resposta, da perda de pacotes de mensagens e do consumo de energia.
- Nível 4: obter o controle do consumo de largura de banda, do tempo de resposta, da perda de pacotes de mensagens, do consumo de energia e da confiabilidade.

5.6 Orientação Semântica

A compreensão de uma situação, ou contexto, potencialmente, permite que serviços e aplicações tomem decisões inteligentes e respondam à dinâmica de seus ambientes. Os dados coletados por diferentes sensores e dispositivos são, geralmente, multimodais e de natureza diversa, em vista disso a qualidade dos dados pode variar com os diferentes dispositivos ao longo do tempo e da localização. A diversidade, a volatilidade e a onipresença tornam a tarefa de processar, integrar e interpretar os dados do mundo real uma tarefa desafiadora.

A Semântica na IIoT se refere à capacidade de extrair conhecimento de forma inteligente por diferentes máquinas para fornecer os serviços necessários. A extração de conhecimento inclui a descoberta e o uso de recursos e informações de modelagem. Além disso, inclui o reconhecimento e a análise de dados para dar sentido à decisão correta de fornecer o serviço mais otimizado [15].

Definir uma ontologia e usar descrições semânticas para os dados os tornarão interoperáveis, para os usuários e as indústrias que compartilham e usam a mesma ontologia. No domínio da IIoT, as diferentes indústrias precisam ter um acordo comum sobre definições ontológicas. A maioria das estruturas atuais de ontologias e da descrição semântica no domínio da IIoT é definida no contexto de diferentes projetos e aplicação. Para alcançar a interoperabilidade semântica da escala global, estruturas comuns de anotação semântica, definições de ontologia e adaptação são questões-chave.

A adição de semântica a diferentes níveis de IoT garante que os dados provenientes de diferentes fontes sejam acessíveis de maneira inequívoca, e possam ser processados em diferentes domínios e usuários. Os dados de observação ou medição coletados no mundo real podem ser descritos semanticamente, para facilitar o processamento e a integração em relação ao conhecimento do domínio e outros recursos existentes no mundo cibernético; recursos e componentes na estrutura de IIoT podem ser descritos com o uso de anotações semânticas para permitir a descoberta e o gerenciamento eficazes deles; em um nível superior, os serviços da IIoT e suas interfaces, também, podem ser descritos semanticamente para permitir a descoberta e composição do serviço, bem como o acesso escalável aos dados da IIoT [68].

Em análise, a orientação semântica, cinco circunstâncias são fundamentais para uma aplicação, sendo elas: interoperabilidade semântica, integração de dados, acesso e abstração de dados, pesquisa e descoberta de recursos e serviços, e raciocínio e interpretação semântica.

A interoperabilidade semântica significa que diferentes indústrias podem acessar e interpretar os dados sem ambiguidade. Os dispositivos, os sistemas e as máquinas precisam trocar dados entre si e com usuários na internet, ou outros meios de comunicação. Fornecer descrições de dados inequívocas de uma forma que possa ser processada e interpretada, por máquinas e operadores dos *softwares*, é um facilitador essencial das comunicações e interações automatizadas de informações na IIoT.

A integração dos dados parte do princípio em que os dados podem ser combinados com outros dados para criar abstrações diferentes do ambiente, ou podem ser integrados à cadeia de processamento de dados em uma aplicação existente para dar suporte ao reconhecimento do contexto e da situação. Descrições semânticas podem suportar essa integração, de modo a permitir a interoperabilidade entre diferentes fontes; no entanto, a análise e o mapeamento entre os diferentes modelos de descrição semântica ainda são necessários, para facilitar a integração de dados da IIoT com os conhecimentos de outros domínios existentes [69].

A abstração de dados na IIoT tem como preocupação a forma como os dados do mundo físico são representados e gerenciados. Com as descrições semânticas, os dados dos sensores podem ser caracterizados em diferentes níveis de abstração. Isso é realizado com o raciocínio semântico oferecido pelas linguagens de consulta semântica. O acesso a dados na IoT pode ser implementado em níveis baixos, com o uso de linguagens de programação e sistemas operacionais de baixo nível. Consequentemente, a heterogeneidade dos dispositivos e das redes (sensores) torna o acesso a dados através das redes uma tarefa complexa [70].

Na IIoT, um recurso pode ser referido como um dispositivo ou uma entidade que pode fornecer dados ou executar atuação, e um serviço é uma entidade de *software* que expõe a

funcionalidade de seu recurso correspondente. Os mecanismos de pesquisa e de descoberta permitem localizar recursos ou serviços, que fornecem os dados relacionados a uma entidade de interesse no mundo físico. Pesquisa e descoberta estão entre as funcionalidades mais importantes necessárias na IIoT. A anotação semântica dos recursos e serviços da IIoT e o processamento e análise dos dados anotados semanticamente são elementos essenciais, para apoiar os métodos de pesquisa e descoberta de recursos, serviços e entidades reais do mundo físico com diferentes atributos e funcionalidades.

O formalismo de representação do conhecimento usado no conjunto de tecnologias semânticas da *web* permite um raciocínio lógico capaz de inferir novas informações, ou de conhecimentos a partir de proposições e regras existentes. O raciocínio semântico é um instrumento importante no domínio da IIoT para vários propósitos, como a descoberta de recursos, abstração de dados e extração de conhecimento. Os algoritmos de inferência reais são, geralmente, implementados nos raciocínios disponíveis, para que os desenvolvedores da IIoT não precisem se preocupar com as complexidades do próprio processo de raciocínio [71].

Após esses esclarecimentos, para atender os requisitos, a maturidade da orientação semântica possui as seguintes especificações por nível:

- Nível 1: obter interoperabilidade semântica e integração de dados.
- Nível 2: obter interoperabilidade semântica, integração de dados, acesso e abstração de dados.
- Nível 3: obter interoperabilidade semântica, integração de dados, acesso e abstração de dados, e raciocínio e interpretação semântica.
- Nível 4: obter interoperabilidade semântica, integração de dados, acesso e abstração de dados, raciocínio e interpretação semântica, e pesquisa e descoberta de recursos e serviços.

5.7 Modularidade

A Indústria 4.0 e as tecnologias digitais inteligentes subjacentes podem apoiar a sustentabilidade, permitindo que os fabricantes adotem uma abordagem modular para *design*, engenharia, fabricação e entrega de produtos. O *design* modular do produto, por sua vez, oferece vantagens como menor tempo de colocação no mercado, menor complexidade e custos de produção, maior qualidade do produto, maior vida útil do produto e eficiência de materiais e recursos. A presença favorável da IIoT, da CPS e dos recursos de interoperabilidade permitem a modularização física de equipamentos de produção, instalações ou, até

mesmo, toda a rede de produção, condições que permitem que as instalações de produção sejam facilmente convertidas e usadas para produtos ou processos alternativos sem a alta de reengenharia ou custos de uma nova automação [72]. A evolução da modularidade surgiu devido a mudanças na dinâmica do mercado e nas preferências do cliente, que resultaram na criação de uma maior modularidade nos projetos de produtos. Os clientes se tornaram mais conscientes e exigentes, pois preferem comprar produtos que atendam à sua percepção das características, funções e capacidades do produto [73].

Existem duas perspectivas distintas do uso da modularidade: a modularidade no *design* e modularidade na produção. O primeiro visa decompor produtos complexos em unidades funcionais completas do subsistema, que podem ser projetadas e fabricadas de forma independente; isso permite a construção de diferentes produtos pela combinação dos subsistemas, de modo a reduzir a complexidade e integrar as funcionalidades. O segundo é caracterizado por organizar os processos de produção em grupos padronizados para que possuam poucas ligações organizacionais, para permitir o reequilíbrio e o ferramental com pouca perda de funcionalidade, em vista de cada módulo de produção funcionar como uma unidade autônoma [74].

Os dispositivos modulares são caracterizados por seus subconjuntos, formam uma unidade consistente que pode ser facilmente identificada, desmontada e remontada. Menos módulos implicam menos tempo para montagem e desmontagem e, assim, reduzem os custos dos produtos gerados e do ciclo de vida. Por outro lado, uma estrutura de *design* de produto precisa ser decomposta em muitos módulos, o que pode aumentar o número de módulos que permitem a criação de produtos mais novos ou variações. Portanto, é uma permuta entre ter módulos menores para facilitar a manutenção e mais módulos para gerar variações maiores de produtos por um longo período [73].

Portanto, em análise a modularidade, cinco circunstâncias são fundamentais para uma aplicação, sendo elas: a terceirização, a padronização, a generalidade, as funcionalidades e o grau de interdependência.

Quando não possível toda a produção internamente, a terceirização permite a transferência de atividades de engenharia e montagem para externos, de modo a reduzir o investimento necessário para as indústrias e as complexidades entre as operações de produção. A padronização permite a recombinação entre os dispositivos sem uma adaptação elaborada de interfaces e, assim, gera uma produção de muitos itens finais através da reconfiguração de um conjunto comparativamente menor de entradas. Na perspectiva da produção, grupos padronizados caracterizam os módulos de produção. Isso permite a minimização de alterações de configurações nas máquinas, mesmo com mais variações de produtos.

A generalidade determina o nível dos módulos dos dispositivos que são comuns a diferentes

produtos. É, geralmente, construída através da padronização e refletido nos componentes e na estrutura arquitetônica. Os primeiros estudos que tratam da modularidade expressaram esse conceito em termos de semelhança de componentes em um determinado sortimento de produtos. As funcionalidades expressam a capacidade e a habilidade de executar uma tarefa ou função, em vista que muitos módulos podem ter uma ou mais funcionalidades de acordo com o *design*. Um mapeamento dos dispositivos pela sua estrutura funcional é realizado para determinar os componentes físicos e especificar as interfaces dissociadas entre os componentes.

O grau de interdependência representa a independência estrutural que os módulos têm entre si. A modularização dos dispositivos significa que ele se decompõe em módulos quase independentes, o que possibilita o desenvolvimento simultâneo de módulos a serem executados de forma autônoma por estruturas organizacionais fracamente acopladas. A interdependência entre módulos pode ser ativada por decisões de funcionalidade e padronização, quanto mais independência eles tiverem, mais autonomia e capacidade de acoplamento e desacoplamento os módulos terão.

Após esses esclarecimentos, para atender os requisitos, a maturidade da modularidade possui as seguintes especificações por nível [73], [72] e [74]:

- Nível 1: obter a terceirização e a padronização.
- Nível 2: obter a terceirização, a padronização e as funcionalidades.
- Nível 3: obter a terceirização, a padronização, as funcionalidades e a generalidade.
- Nível 4: obter a terceirização, a padronização, as funcionalidades, a generalidade e o grau de interdependência.

5.8 Disposição do MMA4RAM

Nesta seção consta a Tabela 2 com o MMA4RAM completo, o seu formato é de nivelamento, sendo o nível 1 o menor e com pouca complexidade e o nível 4 o maior e com alta complexidade, para ser utilizado e pontuado pelos usuários em decisões de projeto em sistemas de RAM para a IIoT.

Tabela 2 – MMA4RAM.

Funcionalidades	Nível de Maturidade			
	Nível 1	Nível 2	Nível 3	Nível 4
Segurança e Privacidade	deve-se obter a memória desprotegida; sem criptografia, validação de mensagens e segurança para a camada física; e parâmetros de segurança estáticos para a disponibilidade.	deve-se obter o registro de dados e a memória protegida; criptografia e segurança para camada física baixa; ainda sem validação de mensagens e parâmetros de segurança estáticos para a integridade.	deve-se obter a segurança contra adulteração, registro de dados, memória protegida e executa em ambiente confiável; criptografia, segurança para camada física e validação de mensagens média; e parâmetros de segurança ajustáveis para a confiabilidade.	obter a segurança contra adulteração, registro de dados, memória protegida e executa em ambiente confiável; criptografia, segurança para camada física e validação de mensagens alta; e parâmetros de segurança ajustáveis para a autenticidade.
Escalabilidade	obter o fluxo de controle explícito, a separação entre controle e computação, a descentralização e a transparência da localização por interações diretas.	obter o fluxo de controle explícito, a separação entre controle e computação, a descentralização e a transparência da localização por interações indiretas.	obter o fluxo de controle explícito, a separação entre controle e computação, a descentralização e a transparência da localização por interações orientada a eventos.	obter o fluxo de controle explícito, a separação entre controle e computação, a descentralização e a transparência da localização por interações exógenas.
Padronização	obter a padronização do *middleware* e das interfaces para o usuário.	obter a padronização do *middleware*, das interfaces para o usuário e da comunicação.	obter a padronização do *middleware*, das interfaces para o usuário, da comunicação e da semântica.	obter a padronização do *middleware*, das interfaces para o usuário, da comunicação, da semântica; dos objetos e das aplicações inteligentes.

Tabela 3 – Continuação do MMA4RAM.

Funcionalidades	Nível de Maturidade			
	Nível 1	Nível 2	Nível 3	Nível 4
Interoperabilidade	obter interoperabilidade técnica e interoperabilidade para comunicação.	obter interoperabilidade técnica, interoperabilidade para comunicação e interoperabilidade semântica.	obter interoperabilidade técnica, interoperabilidade para comunicação, interoperabilidade semântica e interoperabilidade sintática.	obter interoperabilidade técnica, interoperabilidade para comunicação, interoperabilidade semântica, interoperabilidade sintática, interoperabilidade de serviços e interoperabilidade dinâmica.
Comunicação	obter o controle do consumo de largura de banda e do tempo de resposta.	obter o controle do consumo de largura de banda, do tempo de resposta e da perda de pacotes de mensagens.	obter o controle do consumo de largura de banda, do tempo de resposta, da perda de pacotes de mensagens e do consumo de energia.	obter o controle do consumo de largura de banda, do tempo de resposta, da perda de pacotes de mensagens, do consumo de energia e da confiabilidade.
Orientação Semântica	obter interoperabilidade semântica e integração de dados.	obter interoperabilidade semântica, integração de dados, acesso e abstração dedados.	obter interoperabilidade semântica, integração de dados, acesso e abstração dedados, e raciocínio e interpretação semântica.	obter interoperabilidade semântica, integração de dados, acesso e abstração dedados, raciocínio e interpretação semântica, e pesquisa e descoberta de recursos e serviços.
Modularidade	obter a terceirização e a padronização.	obter a terceirização, a padronização e as funcionalidades.	obter a terceirização, a padronização, as funcionalidades e a generalidade.	obter a terceirização, a padronização, as funcionalidades, a generalidade e o grau de interdependência.

6 Modelos de Arquitetura e Referência

Este capítulo apresentara uma breve descrição de cada uma das RAMs selecionadas, para realizar uma comparação entre elas, elaborar um modelo completo e, por fim, um estudo de caso com a aplicação do MMA4RAM sobre as RAMs, para demonstrar a eficiência do modelo e a aderência para estes tipos de arquitetura industrial. Visa-se ênfase em determinadas características das arquiteturas, como estrutura de implantação, camadas, padrões e, principalmente, qual o segmento industrial que a RAM beneficia com a sua atuação, seja na manufatura, na análise dos dados, ou o setor de negócios. Quanto aos casos de uso e aplicações, as arquiteturas referenciadas apenas disponibilizam quanto aos tipos de indústrias que possuem caso de uso da sua arquitetura e o progresso, mas não as identificam como forma de segurança e confidencialidade dos dados.

6.1 IIRA

O *Industrial Internet Reference Architecture* (sem tradução – IIRA) é uma arquitetura aberta baseada em padrões para sistemas IIoT, atualmente sua versão é a 1.9. O IIRA maximiza seu valor por ter ampla aplicabilidade do setor para impulsionar a interoperabilidade, mapear as tecnologias aplicáveis e orientar a tecnologia e o desenvolvimento de padrões. A descrição e a representação da arquitetura são genéricas e com um alto nível de abstração para suportar a ampla aplicabilidade necessária do setor. O IIRA destila e abstrai características, combinações e padrões comuns dos casos de uso definidos pelo *Industrial Internet Consortium* (sem tradução – IIC) e em outros lugares. Ainda está em desenvolvimento, será refinado e revisado continuamente à medida que o *feedback* for coletado de sua aplicação nos bancos de testes desenvolvidos pelo IIC, bem como na implantação no mundo real dos sistemas IIoT. O *design* do IIRA também pretende transcender as tecnologias disponíveis hoje e, assim, identificar lacunas tecnológicas com base nos requisitos de arquitetura. Por sua vez, isso impulsionará os esforços de desenvolvimento de novas tecnologias pela comunidade industrial da Internet [1].

Os arquitetos de sistemas podem usar o IIRA sistematicamente como um modelo de arquitetura, para definir seus requisitos exclusivos de sistema IIoT e projetar arquiteturas concretas para resolvê-los. O uso dessa abordagem comum para o *design* da arquitetura auxilia na implementação consistente da arquitetura em diferentes casos de uso em vários setores industriais, de forma a atender aos requisitos exclusivos do sistema. Igualmente importante: ajuda a alcançar um entendimento e comunicação comuns do sistema geral entre seus diversos *stakeholders*, o que ajudará na implantação do sistema e aumentará

significativamente a interoperabilidade do sistema nos setores industriais.

A complexidade do sistema requer uma estrutura para identificar e classificar as preocupações dos *stakeholders* em categorias apropriadas. Essa estrutura permite uma avaliação sistemática de tais sistemas, bem como a resolução necessária para arquitetar e construir esses sistemas. Para atender a essa necessidade, o IIC usou "ISO / IEC / IEEE 42010: 2011" para definir seu *Industrial Internet Architecture Framework* (sem tradução - IIAF). O IIAF identifica convenções, princípios e práticas para uma descrição consistente das arquiteturas IIoT. Essa estrutura de arquitetura baseada em padrões facilita a avaliação mais fácil e a resolução sistemática e eficaz das preocupações das partes interessadas. Serve como um recurso valioso para orientar o desenvolvimento, a documentação e a comunicação sobre o IIRA.

O IIRA documenta o resultado da aplicação do IIAF à classe pretendida de sistemas de interesse: os sistemas da IIoT. Primeiro, identifica e destaca as preocupações arquitetônicas mais importantes, comumente, encontradas nos sistemas da IIoT e nos setores industriais, e as classifica em pontos de vista, juntamente, com seus respectivos *stakeholders*. Em seguida, descreve, analisa e, quando apropriado, fornece orientação para resolver essas preocupações nesses pontos de vista, de modo a resultar em certas representações da arquitetura abstrata. Os pontos de vista do IIRA foram definidos através da análise de vários casos de uso da IIoT desenvolvidos pela IIC e em outros lugares, em vista de identificar os *stakeholders* relevantes dos sistemas da IIoT e determinar o enquadramento adequado das preocupações. Esses quatro pontos de vista são: negócios, usabilidade, funcionalidade e implementação. Esses quatro pontos de vista formam a base para uma análise detalhada de ponto de vista por ponto de vista de conjuntos individuais de preocupações do sistema IIoT. Os arquitetos que adaptam os pontos de vista da Internet industrial como base de sua arquitetura, e podem estendê-los ao definir pontos de vista adicionais para organizar as preocupações do sistema com base em seus requisitos específicos.

6.2 RAMI 4.0

Um grupo de colaboradores de diferentes empresas europeias se uniram para promover um modelo de arquitetura de referência para a Indústria 4.0, que ficou conhecido como *Reference Architecture Model for Industrie 4.0* (sem tradução - RAMI 4.0). As principais finalidades apresentadas por essa arquitetura são as representações de diferentes aspectos industriais em um modelo singular (com o uso de integrações verticais e horizontais e engenharia *end-to-end*) e a geração do conhecimento sobre quais padrões e casos industriais utilizar em uma arquitetura de referência [5].

O RAMI 4.0, destaca-se com sua combinação entre o ciclo de vida e o fluxo de valor,

utiliza uma abordagem hierarquicamente estruturada para a definição de componentes fundamentais para a Indústria 4.0 e, consequentemente, desenvolve uma arquitetura para o gerenciamento de dados, com a finalidade de minimizar o número de padrões e normas envolvidas em suas camadas. Entretanto, utiliza como base as seguintes normas [5]:

- IEC 63088: Produção Inteligente – Modelo de Arquitetura de Referência para Indústria 4.0.
- IEC 62890: Gerenciamento do Ciclo de Vida para Produtos e Sistemas.
- IEC 62264: Integração de Sistemas de Produção na Empresa (MES/MOM).
- IEC 61512: Controle de Batelada – Processos Produtivos em Lote.

As camadas dessa arquitetura são dispostas em três eixos, como mostra a Figura 10. O eixo vertical representa as camadas com os pontos de vista, como: negócios, funcional, informação, comunicação, integração e componentes. No eixo horizontal esquerdo estão os ciclos de vida e os fluxos de valores que cada produto possui. E por fim, no eixo horizontal direito é representado a localização das funcionalidades e das responsabilidades dentro das fábricas [5].

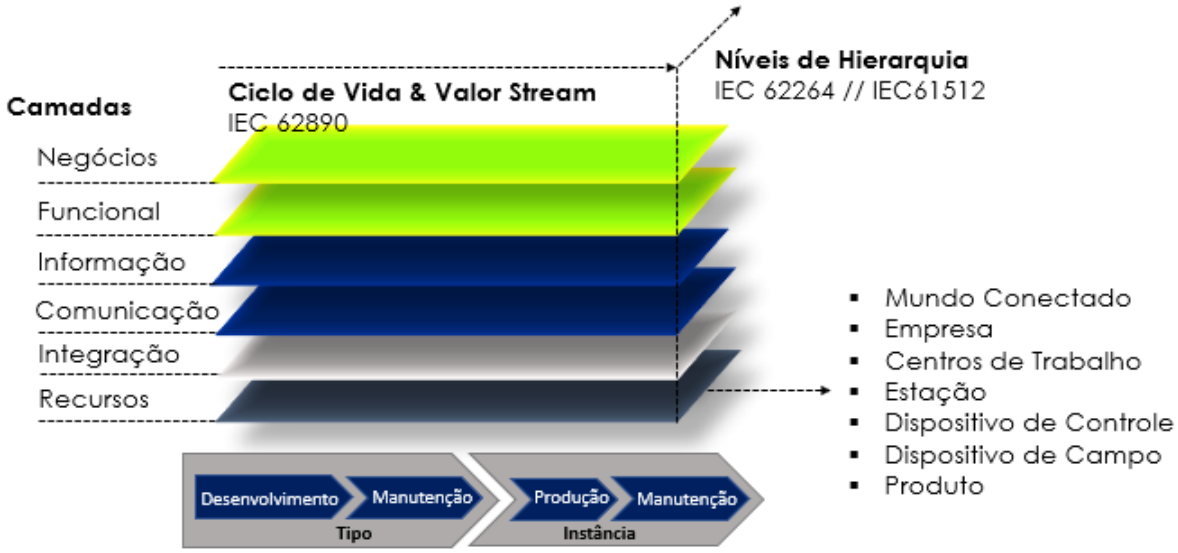


Figura 10 – RAMI 4.0 [5].

Uma particularidade apresentada por esse modelo de arquitetura de referência, que deve receber uma consideração maior, é o fato de a camada de componentes do eixo vertical necessitar que no processo de virtualização absolutamente todos os componentes do mundo físico estejam no mundo virtual. Dado que seus dados se relacionam nas três dimensões da gestão, caso o componente seja removido do mundo físico suas informações serão mantidas no virtual para uso, se caso necessário, em alguma das outras duas dimensões [11].

O RAMI 4.0 trabalha em união com os Componentes da Indústria 4.0, conhecidos como componentes I4.0. Portanto, cada grupo de dispositivos gerenciado é tratado como um componente I4.0, que detém a semântica das informações e o controle para a formação das células de produção que operam de forma flexível, interoperáveis e descentralizada. Em vista disso, com os componentes padronizados no sistema, é possível entender uma aplicação de gerenciamento e o controle de uma linha de produção [11].

6.3 InSight

O *InSight*, é uma RAM em formato de *software* de monitoramento e diagnóstico remoto da SUEZ, que combina dados e análises avançadas para ajudá-lo a tomar melhores decisões de negócios, reduzir o tempo de inatividade não planejado e reduzir os custos operacionais. O *InSight* é uma plataforma baseada em assinatura, que usa tecnologia de monitoramento remoto seguro para obter informações cruciais nas mãos dos operadores essenciais, de modo a garantir que as operações e os processos sejam executadas da maneira suave e eficiente possível.

O *InSight* utiliza várias fontes de dados - da entrada manual de dados à entrada automática através de sensores sem fio e controladores integrados - para fornecer uma imagem completa de uma operação. Uma vez que os dados são capturados, são armazenados com segurança na Internet industrial da SUEZ, para permitir a visualização dos usuários, diagnosticar, alertar e relatar a ampla variedade de informações de seus sites. Esses dados são facilmente acessíveis em telefones celulares, *tablets* e computadores para fornecer visibilidade sempre e onde for necessário. Pode fazer parte de uma nova configuração ou pode ser facilmente adaptado a qualquer planta existente, em terra ou no mar [75].

A implementação do *InSight* nos sites simplificou e padronizou as estruturas de relatórios diários, semanais e mensais, de forma a eliminar a necessidade de vários relatórios diários redundantes. Facilitou a criação de um sistema para monitorar os estoques de produtos no local, otimizar o uso de produtos e fornecer controle aprimorado. Além de fornecer o custo total de operação, também, ajudou na identificação de oportunidades de redução de custos e na implementação completa do rastreador do plano de geração de valor da SUEZ, que agora é uma parte indispensável da interação da SUEZ com o usuário. Além disso, ajudou a melhorar o valor das horas trabalhadas no local, e inclui a automação do trabalho rotineiro do site por meio de ferramentas e instrumentos *online*.

Além disso, o poderoso recurso de geração de alarmes ajuda a alertar a equipe operacional sobre quaisquer problemas, mesmo quando eles estiverem fora do local. A função de tendências e gráficos ajuda a comparar os vários parâmetros ao longo de um período, e facilita o destaque das oportunidades de melhoria ou otimização do processo para as

equipes de operações e gerenciamento. Desde a sua implementação, o *InSight* se tornou parte integrante das instalações do cliente, para proporcionar eficiência, economia de custos e redução no tempo de inatividade [76].

6.4 GEs Predix

A *General Electric* (sem tradução – GE) empacotou sua ampla experiência no setor na industrial para formar a abrangente uma plataforma de IIoT compreensiva, a Predix. A plataforma Predix foi criada especificamente para obter *insights* e resultados industriais específicos, em mercados industriais diversos e altamente regulamentados. Em vez de assumir toda a carga, as empresas podem utilizar a plataforma Predix para criar aplicações em sua infraestrutura e aprender com a implantação da plataforma em suas próprias operações de fabricação e de TI.

A plataforma Predix equipa as organizações industriais com tudo o que precisam para criar, implantar com segurança e executar aplicativos IIoT com rapidez, de ponta a nuvem, de modo a transformar os dados de ativos em *insights* acionáveis. Os atributos chaves da plataforma Predix, como demonstra a Figura 11, são: construir em torno de um gêmeo digital centrado em ativos, criar *insights* acionáveis a partir de dados e análises de ativos; fornecer uma arquitetura abrangente de ponta a nuvem, para otimizar as cargas de trabalho em diferentes infraestruturas operacionais; oferecer suporte de controle e desenvolvimento de alta produtividade; executar aplicações *Software as a Service* (em português *Software* como Serviço – SaaS) para aumentar a confiabilidade e a disponibilidade dos ativos [6].

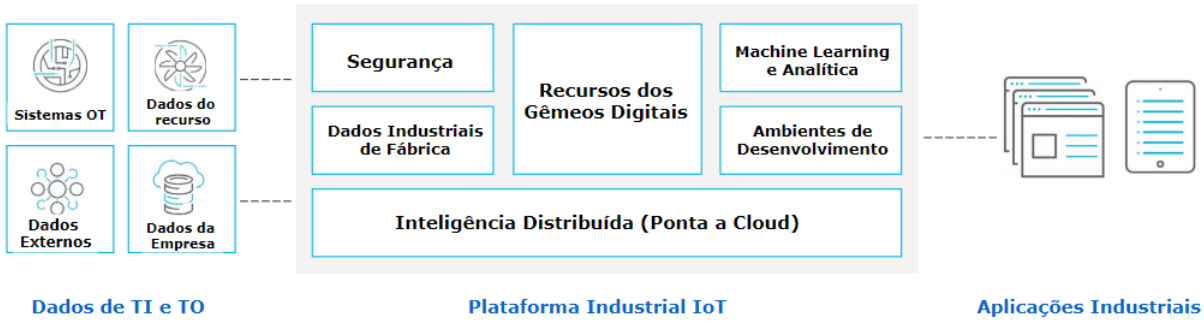


Figura 11 – Plataforma Predix [6].

A GE investiu na criação de recursos que podem oferecer resultados em muitos setores diferentes. Esses resultados variam desde a redução do tempo de inatividade não planejado à produção aprimorada de ativos e eficiência operacional. As empresas também podem criar serviços diferenciados que geram novas fontes de receita. A plataforma Predix incorpora décadas de experiência no domínio operacional como recursos industriais essenciais, projetados especificamente para os requisitos exclusivos das empresas industriais, para

melhorar as operações, reduzir custos e desenvolver e monetizar novos serviços orientados a dados.

A Predix é uma plataforma segura e otimizada para múltiplas cargas de trabalho industriais. O Predix *Cloud* fornece elasticidade em grande escala, disponibilidade de missão crítica e suporte de segurança para dados em repouso e em movimento. O Predix *Cloud* pode lidar com grandes quantidades de informações da internet industrial, além de gerenciar os SLAs dos clientes, segurança, suporte, governança, conformidade e controles de exportação. Os principais elementos do Predix *Cloud* incluem abstração e automação escaláveis da infraestrutura de nuvem pública, componentes principais da plataforma como serviço, camada robusta de malha de dados e um conjunto definido de serviços de tempo de execução, armazenamento e desenvolvimento. O *Cloud* é apenas um dos diversos serviços que Predix oferece.

6.5 Siemens MindSphere

O *MindSphere* é uma arquitetura com o sistema operacional de IoT aberto, baseado em nuvem, desenvolvido pela Siemens, que permite às empresas conectar sistemas físicos, baseados na *Web* e corporativos em um local central. Ao suportar vários protocolos simultaneamente, o *MindSphere* simplifica os desafios de conectividade que a maioria dos setores enfrenta, de modo a possibilitar que cada empresa se transforme em uma empresa digital. E, também, permite uma poderosa análise e visualização dos dados, para que os usuários possam obter informações para fazer alterações com impacto real na produtividade. Com o uso de uma *Platform as a Service* (em português plataforma como serviço - PaaS), engloba um ecossistema de parceiros rico (e em expansão) que está a desenvolver e entregar novos aplicações para os diversos setores industriais do mundo, como mostra a Figura 12.

Com o *MindSphere*, os usuários podem aproveitar o profundo conhecimento e domínio da Siemens em automação e serviços digitais. De fato, a Siemens é fornecedora líder de automação, e fornece operação crítica e tecnologia de automação por meio de implantações globais. A plataforma *MindSphere* está focada no suporte à IoT Industrial, projetado para ser tolerante a falhas e altamente escalonável, com uso de uma arquitetura de micros serviços para fornecer *Application Programming Interfaces* (em português interfaces de programação de aplicativos - APIs) que podem ser usadas em uma ampla variedade de combinações para criar aplicativos e funcionalidades que atendam às necessidades do usuário. Os usuários, também, ganham flexibilidade e funcionalidades personalizada com aplicações modulares, além de atualizações mais rápidas e econômicas, e o desenvolvimento ágil [77].

Figura 12 – MindSphere [7].

O *MindSphere* fornece componentes principais prontos para uso, necessários para começar a gerenciar e visualizar os dados coletados. Esses componentes principais são a base para começar. A estrutura da aplicação e os componentes comuns da aplicação oferecem APIs e complementos que permitem a construção da estrutura necessária. O *MindSphere* usa um conceito federado de lagos de dados para o gerenciamento de dados. Os lagos de dados retêm grandes quantidades de dados brutos, de várias fontes e em sistemas federados, até que sejam necessários. Aplicações ou serviços podem consumir dados e contextualizá-los com qualquer outro tipo de dados nos lagos de dados. Os conjuntos de dados são organizados em dados brutos, preparados e processados, e resultados analíticos. A plataforma fornece separação para as fases de desenvolvimento, teste, pré-produção e produção. Os lagos de dados podem ser usados, também, como um mecanismo para compartilhar dados na plataforma para uso em qualquer serviço ou aplicação autorizado [7].

Para otimizar e personalizar os recursos de uma instância do *MindSphere*, a Siemens criou um rico ecossistema de capacitação de aplicativos e gerenciamento. Os engenheiros da Siemens estão a desenvolver ativamente aplicações analíticas e específicos do setor, que permitem às empresas transformar e visualizar seus dados de maneiras inovadoras. Além dos engenheiros da Siemens, qualquer desenvolvedor pode obter acesso às tecnologias de capacitação de aplicações e gerenciamento para projetar e iniciar aplicações.

6.6 OpenPnP

O *OpenPnP* é uma arquitetura escalável que permite muitas implementações diferentes, mas garante a interoperabilidade através das fronteiras do fornecedor para permitir o *Plug and Play* (em português conectar e ligar - PnP) de vários fornecedores. A arquitetura é projetada em grande parte com base nos requisitos do cliente final em todo o setor. Devido a isso, o *OpenPnP* é potencialmente aplicável a muitos sistemas, promete-se um amplo impacto na automação industrial. As principais inovações do *OpenPnP* são: usar técnicas padronizadas de descoberta de rede para dispositivos de campo industriais; equipar dispositivos de campo com modelos de informação projetados anteriormente para controladores; transferir parâmetros de configuração automaticamente para dispositivos; conectar automaticamente dispositivos com controladores; e, por fim, auxiliar substituição do dispositivo de campo [42].

Para validar o desempenho da arquitetura e a escalabilidade alcançável, como estudo de caso, criou-se e analisou-se um exemplo de implementação com base em várias bibliotecas comerciais e de código aberto. Posteriormente, integrou-se o *software* de controle da ABB e os dispositivos de *hardware* para facilitar a transferência de tecnologia. A implementação de quase produção permitiu validar a redução de esforço no comissionamento. No caso médio, a arquitetura pode reduzir o tempo de configuração e integração de um dispositivo de campo de aproximadamente 9,5 minutos para 0,5 minutos, o que pode acumular até um esforço de uma pessoa por ano para uma planta grande. O uso do *OpenPnP* e subjacentes, mostrou que mesmo os dispositivos com recursos limitados podem suportar dezenas de parceiros de comunicação, e até 40.000 sinais por segundo em um determinado cenário.

A RAM *OpenPnP* permite uma redução significativa dos esforços de configuração e integração durante o comissionamento de plantas industriais. A arquitetura incorpora a comunicação e descoberta do OPC UA e se baseia em vários padrões internacionais para os parâmetros do dispositivo. Isso permite aplicações PnP de vários fornecedores. O *OpenPnP* pode beneficiar profissionais e pesquisadores. Os profissionais recebem um modelo para implementar aplicativos IIoT que suportam PnP neutro em relação ao fornecedor. Isso permite comissionamento mais rápido de sistemas com o uso de dispositivos de diferentes fornecedores.

Com sua escalabilidade e interoperabilidade, o *OpenPnP* é aplicável a muitos tipos diferentes de sistemas de controle e, portanto, pode afetar potencialmente muitas instalações existentes e futuras. Os fornecedores de dispositivos de campo podem usar o recurso PnP como valor agregado aos seus produtos. Os clientes podem solicitar a conformidade do *OpenPnP* de seus fornecedores para poder otimizar seus processos de comissionamento. Os pesquisadores podem usar a base do *OpenPnP* para melhorar ainda mais a configuração e a integração [42].

6.7 SEMIoTICS

O objetivo geral do *Smart End-to-end Massive IoT Interoperability, Connectivity and Security* (sem tradução – SEMIoTICS) é desenvolver uma estrutura orientada a padrões, construída sobre plataformas de IoT existentes, para permitir e garantir atuação segura e confiável, e o comportamento semi autônomo em aplicações de IoT/IIoT. A estrutura do SEMIoTICS oferece suporte à adaptação dinâmica inteligente de várias camadas, e inclui objetos inteligentes heterogêneos, redes e nuvens. Para atender às necessidades de complexidade e escalabilidade em domínios horizontais e verticais, o SEMIoTICS desenvolveu e integrou redes inteligentes programáveis e mecanismos de interoperabilidade semântica.

A visão da SEMIoTICS em fornecer uma rede inteligente, segura, escalável, heterogênea e baseada em dados de IoT é fundamentada em dois recursos principais: a abordagem orientada a padrões, como soluções reutilizáveis para problemas comuns e componentes básicos da arquitetura, os padrões são aproveitados no SEMIoTICS para codificar dependências comprovadas entre propriedades de segurança, privacidade, confiabilidade e interoperabilidade de objetos inteligentes individuais e propriedades correspondentes de orquestrações, e como resultado, permite a verificação do comportamento correto no tempo de execução e na criação; o segundo recurso é a inteligência incorporada em várias camadas, a adaptação eficaz e o comportamento autônomo nas camadas de borda e na infraestrutura serão alcançados coma análise inteligente localmente, de acordo com cada camada, para permitir uma reação rápida, semi autônoma e uma inteligência ampliada em níveis mais altos [78].

A estrutura de RAM, o SEMIoTICS, visa alavancar componentes genéricos da arquitetura combinados na estrutura em camadas, a fim de fornecer uma Inteligência Integrada em todas as camadas da estrutura, com os mecanismos que permitem a verificação dos padrões em todas as camadas. A estrutura criada com base no padrão SEMIoTICS será capaz de suportar diversos cenários, com foco específico nos casos de uso de energia inteligente, assistência médica e sensoriamento inteligente. A sua arquitetura lógica consiste em três camadas: a camada de orquestração de aplicativos, a camada de orquestração do *Software Defined Network* (em português Rede Definida por *Software* – SDN)/ *Network Function Virtualization* (em português Função de Virtualização por Rede – NFV) e a camada de campo.

Em contraste com as soluções locais, a principal fraqueza das soluções em nuvem é que elas são menos escaláveis, centralizadas, responsivas e dependem de conectividade permanente. O caso de uso de sensores incorporados heterogêneos inteligentes visa demonstrar as vantagens de executar a inteligência incorporada local do processamento de dados muito próximo ao nível do sensor, e que a detecção de eventos de dados distribuídos e o

agrupamento de sensores é um aspecto essencial para a escalabilidade maciça do sistema. O SEMIoTICS foi utilizado em estudo desse caso apresentado, sendo este um caso de uso horizontal, onde demonstrou que como a sua tecnologia em desenvolvimento poderia disparar alertas com antecedência, para enviar alarmes à população e impedir a ocorrência de tragédias como as mencionadas acima [79].

6.8 IBM Industry 4.0

A RAM produzida pela *International Business Machines* (sem tradução - IBM), *IBM Industrie 4.0*, aborda o desafio atual e as necessidades futuras pela definição clara das três camadas - *Edge, Plant e Enterprise* (em português Ponta, Planta e Empresa) - e a flexibilidade de implantar e mover funcionalidades semelhantes nas três camadas. Além disso, a arquitetura pressupõe que a funcionalidade de hoje provavelmente precise ser implantada no local, mas que isso evoluirá para nuvens dedicadas ou até públicas ao longo do tempo. A arquitetura de referência *IBM Industrie 4.0* é baseada na arquitetura de referência da IBM IoT, da IIC, no modelo *Purdue* (sem tradução) do ISA-95 e nas melhores práticas observadas em projetos do mundo real [26].

Alguns dos desafios significativos exclusivos da implementação da *IBM Industrie 4.0* incluem: os ganhos de produtividade - maior rendimento e eficiência, eliminar atividades que não agregam valor; a prevenção de falhas - maximizar o OEE, evitar retrabalhos, interrupções e baixa qualidade do produto; e a flexibilidade - oculta complexidade, baixo esforço de configuração ou reconfiguração, conecta, produz e evita lacunas na tecnologia. A *IBM Industrie 4.0* fornece: integração vertical e horizontal; integração do ciclo de vida e gêmeo digital; conectividade universal entre processos, sistemas, máquinas e pessoas; assistência inteligente ao trabalhador; coleta de dados históricos e análises (preditivas); configuração flexível e orientada para os negócios em todos os níveis, de modo a incluir o chão de fábrica, a integração e a borda.

O plano de implementação utilizado pelo *IBM Industrie 4.0* é: em um ambiente de produção, os eventos são comunicados das máquinas de produção, ferramentas inteligentes e dispositivos por meio de protocolos mensagens ou de barramento de campo. Os dados enviados ao equipamento (como ajustes e comandos do ponto de ajuste) usam os mesmos protocolos. No *Edge*, a análise é usada para filtrar e analisar ou pontuar as condições de produção como parte do ciclo de *feedback* do CPS. Isso resulta no encaminhamento de alguns dados para a *Plant* ou o *Enterprise*, e em ajustes ou comandos de *setpoint* retornados ao equipamento ou ferramentas de produção.

Os dados trocados entre o *Edge* e o *Plant* (ou *Enterprise*) são comunicados por meio de protocolos de TI da fábrica. Protocolos de barramento de campo não são usados neste

nível; esses são ocultos pelo *Edge*. O *Edge* e o *Plant* devem poder operar como uma unidade autônoma da *Enterprise*, portanto, alguns recursos da plataforma devem estar no *Plant* e no *Enterprise*. No nível da fábrica, a coleta, a normalização e a limpeza de dados para oferecer suporte as análises, como parte do ciclo de análise do chão de fábrica, podem resultar no desencadeamento de ações. Exemplos de ações incluem a execução de um fluxo de trabalho ou *feedback* para a célula de produção. No nível *Enterprise*, ocorre o mesmo, mas o escopo se expande para incluir fábricas, sistemas e locais.

O modelo de informações (com base em padrões como ISA-95) é usado em combinação com dados limpos e coletados para suportar análises, e regras de produção destinadas a determinar as ações necessárias para esse evento (ou como resultado de um fluxo de eventos). Se necessário, o fluxo de trabalho no nível da *Plant* (ou *Enterprise*) é acionado. Esse fluxo de trabalho é composto para usar o sistema de TI *Plant* (ou *Enterprise*) de serviços de registro ou serviços recém-construídos, em combinação com serviços de plataforma. Como resultado das informações obtidas com a análise ou uma ação acionada, os ajustes ou os comandos do ponto de ajuste são transmitidos de volta à célula de produção (via *Edge*) para reconfigurar dinamicamente o processo de fabricação. Na empresa, isso pode resultar em alterações no cronograma entre plantas devido ao escopo mais amplo do espaço do problema [80].

6.9 NIST SMS

A arquitetura da *National Institute of Standards and Technology* (sem tradução – NIST), o *Smart Manufacturing Systems* (sem tradução - SMS), adota uma abordagem orientada a serviços para definir a arquitetura funcional de uma empresa de manufatura. A arquitetura do NIST utiliza um barramento de serviço de fabricação para conectar vários tipos de serviços no sistema, de forma a incluir o domínio da TO, da TI, virtual e o gerenciamento. Além disso, o barramento de serviço conecta a empresa a colaboradores externos por meio de serviços de *business intelligence* (em português inteligência do negócio).

Os serviços de domínio TO incluem funções fornecidas pelos componentes da indústria 4.0 (por exemplo, máquinas, linhas de produção). Os serviços de domínio de TI são serviços fornecidos pela TI corporativa e incluem serviços de gerenciamento de operações de manufatura, planejamento de recursos corporativos e gerenciamento da cadeia de suprimentos. Os serviços de domínio virtual são fornecidos pela fábrica digital ou pelo gêmeo digital da empresa, e incluem serviços de consulta e simulação. O gerenciamento ou serviços comuns incluem todos os outros serviços exigidos pela empresa, inclui, também, o gerenciamento do ciclo de vida, dados, segurança, conhecimento, dispositivos, qualidade do serviço e configuração de rede [81].

A competitividade sustentável de um fabricante depende de seus recursos em relação a custo, entrega, flexibilidade e qualidade. O SMS tenta maximizar esses recursos com o uso de tecnologias avançadas que promovem fluxo rápido e amplo de informações digitais dentro e entre sistemas de manufatura. O SMS gera ganhos sem precedentes em agilidade, qualidade e eficiência da produção entre os fabricantes. Especificamente, o SMS usa tecnologias de informação e comunicação junto com aplicações de *software* inteligentes para: otimizar o uso de mão de obra, material e energia para produzir produtos personalizados de alta qualidade para entrega pontual; e responder rapidamente a mudanças nas demandas do mercado e nas cadeias de suprimentos. A manufatura inteligente, diferente de outros paradigmas de manufatura baseados em tecnologia, define uma visão da manufatura de próxima geração com recursos aprimorados. O SMS é desenvolvido com base em tecnologias emergentes de informação e comunicação e é ativado com a combinação dos recursos de paradigmas de fabricação anteriores.

Os padrões são fundamentais para ativar a arquitetura SMS. Padrões diferentes contribuem de diferentes maneiras para habilitar os recursos de sistemas de fabricação inteligentes. Para gerar um cenário do SMS, identifica-se os padrões como dentro do escopo, com base no fato de um padrão contribuir para um recurso e se analisa onde, quando e com qual finalidade o padrão é usado. Existem três dimensões de preocupação que se manifestam no SMS, sendo elas: ciclo de vida do produto, do sistema de produção e dos negócios. O ciclo de vida do produto está relacionado aos fluxos e controles de informações, a começar no estágio inicial do *design* do produto e a continuar até o fim de sua vida útil.

O ciclo de vida do sistema de produção se concentra no *design*, implantação, operação e desativação de toda uma instalação de produção, de modo a incluir os seus sistemas. O ciclo de negócios aborda as funções das interações com fornecedores e clientes. Cada uma dessas dimensões auxilia na integração vertical de máquinas, plantas e sistemas corporativos no que se chama de pirâmide de fabricação. A integração de aplicações de *software* de fabricação em cada dimensão ajuda a permitir controles avançados no chão de fábrica, e a melhor tomada de decisões na planta e na empresa. A combinação dessas perspectivas e os sistemas que as sustentam compõem o ecossistema para a fabricação do SMS [82].

6.10 IMSA

Geralmente, existem três etapas na construção de uma estrutura padrão de fabricação inteligente. Para isso, para atender essa estrutura foi proposto um *Intelligent Manufacturing System Architecture* (em português Arquitetura de Sistema de Manufatura Inteligente - IMSA) tridimensional, que consiste em um ciclo de vida, uma hierarquia de sistemas e de funções inteligentes, de forma a extrair os recursos abstratos gerais de todos os tipos

de sistemas de aplicações de manufatura inteligentes estudados. Essa arquitetura tem como propósito definir a conotação e extensão da padronização da manufatura inteligente, reconhecer os padrões de fabricação inteligentes disponíveis e indisponíveis, e entender as relações sobrepostas dos padrões existentes.

A IMSA é proposta por através da identificação das atividades de fabricação e as funções baseadas em TI, para tornar mais inteligente o processo de produção e o produto. Em vista disso seus elementos essenciais se dividem em três dimensões: ciclo de vida, hierarquia do sistema e funções inteligentes. O ciclo de vida se refere à integração da cadeia que consiste em uma série de atividades de criação de valor conectadas mutuamente, como *design*, produção, logística, vendas e serviço. Todas as atividades no ciclo de vida são associadas e influenciadas mutuamente. O ciclo de vida pode diferir em vários setores. A hierarquia do sistema é composta por nível do equipamento, de controle, de oficina, empresarial e de cooperação, da parte inferior para a superior. Em particular, a hierarquia do sistema de fabricação inteligente representa a inteligência e o protocolo da Internet dos equipamentos, bem como o nivelamento da rede.

As funções inteligentes incluem cinco camadas que são: elementos de recursos, integração de sistemas, interconexão, fusão de informações e novo padrão de negócios. Como os dados são o elemento principal da fabricação inteligente, usa-se para demonstrar a função de cada camada. A camada de elementos de recursos gera os dados; a camada de integração do sistema coleta os dados; a camada de interconexão transmite os dados; a camada de fusão de informações armazena os dados e depois os analisa; enquanto que, por fim, a nova camada de padrões de negócios tenta aplicar os dados de diferentes ângulos. Embora a privacidade e a segurança de TI não sejam explicitamente ilustradas em cada dimensão, elas são consideradas em todas as atividades de fabricação e camadas de funções de TI. A camada de integração do sistema é, também, considerada como o limite do mundo cibernético e do mundo físico, ou seja, as entidades do mundo físico são incluídas na camada de elementos de recursos; e com base nos dados gerados pelas lógicas de controle e de computação, esses são incluídos na camada de interconexão, camada de fusão de informações e nova camada de padrão de negócios [83].

A implementação do IMSA possui o seguinte plano: aplicação da dimensão do ciclo de vida e da dimensão da hierarquia da estrutura do sistema de manufatura inteligente à dimensão da função inteligente em cinco níveis, de cima para baixo, com base em uma análise profunda da demanda padrão e na análise abrangente das relações logísticas de todas as dimensões do sistema de manufatura inteligente, a fim de formar cinco padrões técnicos principais, que são: equipamentos, fábrica e serviço inteligente; *software* industrial, *Big Data* e internet industrial, para assim, formar uma arquitetura de sistema padrão de manufatura inteligente, juntamente com os padrões gerais e os principais padrões industriais. Por fim, a arquitetura do sistema padrão de fabricação inteligente deve ser

decomposta para estabelecer a estrutura, orientar a construção e a aprovação dos padrões relevantes [84].

6.11 Modelo RAM Proposto

O modelo RAM proposto será designado como SEPICOM em vista das iniciais das funcionalidades utilizadas, o mesmo necessita obter um nível alto de abstração, para que ao ser modelado possa atender ao essencial no campo em que atuará. Dessa forma, o modelo proposto engloba o nível 4 de todas as funcionalidades do MMA4RAM, por ser o ponto absoluto de cada característica, assim, segue, novamente, como devem ser a funções para formar o SEPICOM.

- Orientação Semântica: obter interoperabilidade semântica, integração de dados, acesso e abstração de dados, raciocínio e interpretação semântica, e pesquisa e descoberta de recursos e serviços.
- Escalabilidade: obter o fluxo de controle explícito, a separação entre controle e computação, a descentralização e a transparência da localização por interações exógenas.
- Modularidade: obter a terceirização, a padronização, as funcionalidades, a generalidade e o grau de interdependência.
- Interoperabilidade: obter interoperabilidade técnica, interoperabilidade para comunicação, interoperabilidade semântica, interoperabilidade sintática, interoperabilidade de serviços e interoperabilidade dinâmica.
- Padronização: obter a padronização do *middleware*, das interfaces para o usuário, da comunicação, da semântica; dos objetos e das aplicações inteligentes.
- Comunicação: obter o controle do consumo de largura de banda, do tempo de resposta, da perda de pacotes de mensagens, do consumo de energia e da confiabilidade.
- Segurança e Privacidade: obter a segurança contra adulteração, registro de dados, memória protegida e executa em ambiente confiável; criptografia, segurança para camada física e validação de mensagens alta; e parâmetros de segurança ajustáveis.

Quanto a estrutura em blocos, em relação aos modelos avaliados e os casos de uso atuais, conclui-se que por questões de organização interna e dissolução de funções, recomenda-se uma estrutura de três camadas, sendo elas: Chão de Fábrica, Integração (API) e Negócios. O ciclo de vida deste sistema será da seguinte forma: no Chão de Fábrica serão produzidos os dados através da linha de produção e das máquinas. Deste ponto os dados serão

transmitidos para a Integração (API) dos sistemas este funcionará como um barramento de dados, onde os dados produzidos pelo ativos operacionais e os sensores e os atuadores serão armazenados e convertidos, para serem avaliados na análise avançada. Ainda na Integração (API), as decisões serão realizadas por especialistas ou pela inteligência do sistema, para, por fim, os dados de todos os processos serem moldados e enviados ao setor de Negócios, de modo a obter a contabilização do sistema como todo e a análise de resultados da eficiência do modelo. Este ciclo de vida é demonstrado na Figura 13.

Figura 13 – SEPICOM.

Tal como a interoperabilidade, as outras funcionalidades surgirão neste ciclo de vida para auxiliar entre as camadas, como a escalabilidade para controlar entrada da massa de dados no sistema, a segurança e privacidade para que segredos industriais e usuários sem autorização não utilizem os sistema, a padronização com o propósito de gerar ou utilizar normas auxiliar no sistemas, dentre as outras funcionalidades. Quanto as tecnologias a serem utilizadas pelas funcionalidades na RAM proposta, do mesmo modo elas devem passar pelo MMA para identificar em qual nível se qualificam para o uso na arquitetura.

6.12 Estudo de Caso

Nesta seção, apresenta-se um estudo de caso, sendo a aplicação do MMA4RAM em arquiteturas caracterizadas anteriormente e no modelo proposto, o SEPICOM. As referências de cada arquitetura utilizadas para classificá-las no MMA4RAM estão descritas na Tabela

4. Essa é uma etapa crucial deste trabalho, pois expressa uma das contribuições que será fundamental para os usuários do modelo no momento de seleção de RAMs para implementação em seu ambiente e, também, para os pesquisadores que seguiram no campo para outros desenvolvimentos.

Tabela 4 – Referências das arquiteturas utilizadas na Tabela 5.

RAMs	**Referências**
IIRA	[1], [85] e [86]
RAMI 4.0	[5], [87] e [88]
InSight	[75] e [76]
GEs Predix	[6] e [89]
Siemens MindSphere	[77] e [7]
OpenPnP	[42] e [90]
SEMIoTICS	[78] e [79]
IBM Industry 4.0	[80] e [91]
NIST SMS	[81], [82] e [92]
IMSA	[84] e [83]

Todavia, para realizar a aplicação do MMA4RAM, buscou-se nas referências quais os pontos descritos que as mesmas atendiam do MMA4RAM construído, para, assim, realizar a pontuação em cada nível. A seguir, apresenta-se enumerados os resultados quanto as pesquisas nas referências das RAMs sobre cada característica, com o propósito de gerar o preenchimento do MMA4RAM presente na Tabela 5.

1. IIRA:

    - Segurança e Privacidade: possui todos os requisitos.
    - Escalabilidade: não possui o fluxo de controle explícito, a separação entre controle e computação, a descentralização e a transparência da localização por interações exógenas.
    - Padronização: não possui a padronização dos objetos e das aplicações inteligentes.
    - Interoperabilidade: possui todos os requisitos.
    - Comunicação: não possui o controle da confiabilidade.

- Orientação Semântica: possui todos os requisitos.
- Modularidade: não possui o grau de interdependência.

2. RAMI 4.0:

   - Segurança e Privacidade: possui todos os requisitos.
   - Escalabilidade: não possui o fluxo de controle explícito, a separação entre controle e computação, a descentralização e a transparência da localização por interações exógenas.
   - Padronização: possui todos os requisitos.
   - Interoperabilidade: não possui interoperabilidade de serviços e interoperabilidade dinâmica.
   - Comunicação: não possui o controle da confiabilidade.
   - Orientação Semântica: não possui pesquisa e descoberta de recursos e serviços.
   - Modularidade: não possui o grau de interdependência.

3. InSight:

   - Segurança e Privacidade: não possui o nível alto de segurança para criptografia, a camada física e a validação de mensagens.
   - Escalabilidade: não possui o fluxo de controle explícito, a separação entre controle e computação, a descentralização e a transparência da localização por interações exógenas.
   - Padronização: não possui a padronização da semântica, dos objetos e das aplicações inteligentes.
   - Interoperabilidade: não possui interoperabilidade sintática, interoperabilidade de serviços e interoperabilidade dinâmica.
   - Comunicação: não possui o controle da confiabilidade.
   - Orientação Semântica: não possui raciocínio e interpretação semântica, e pesquisa e descoberta de recursos e serviços.
   - Modularidade: não possui a generalidade e o grau de interdependência.

4. GEs Predix:

   - Segurança e Privacidade: não possui o nível alto de segurança para criptografia, a camada física e a validação de mensagens.
   - Escalabilidade: não possui o fluxo de controle explícito, a separação entre controle e computação, a descentralização e a transparência da localização por interações exógenas.

- Padronização: não possui a padronização dos objetos e das aplicações inteligentes.
- Interoperabilidade: não possui interoperabilidade de serviços e interoperabilidade dinâmica.
- Comunicação: não possui o controle do consumo de energia e da confiabilidade.
- Orientação Semântica: não possui pesquisa e descoberta de recursos e serviços.
- Modularidade: não possui o grau de interdependência.

5. Siemens MindSphere:

   - Segurança e Privacidade: possui todos os requisitos.
   - Escalabilidade: possui todos os requisitos.
   - Padronização: não possui a padronização dos objetos e das aplicações inteligentes.
   - Interoperabilidade: não possui interoperabilidade de serviços e interoperabilidade dinâmica.
   - Comunicação: não possui o controle do consumo de energia e da confiabilidade.
   - Orientação Semântica: não possui raciocínio e interpretação semântica, e pesquisa e descoberta de recursos e serviços.
   - Modularidade: possui todos os requisitos.

6. OpenPnP:

   - Segurança e Privacidade: possui todos os requisitos.
   - Escalabilidade: possui todos os requisitos.
   - Padronização: não possui a padronização da semântica, dos objetos e das aplicações inteligentes.
   - Interoperabilidade: possui todos os requisitos.
   - Comunicação: não possui o controle da confiabilidade.
   - Orientação Semântica: não possui raciocínio e interpretação semântica, e pesquisa e descoberta de recursos e serviços.
   - Modularidade: não possui a generalidade e o grau de interdependência.

7. SEMIoTICS:

   - Segurança e Privacidade: não possui o nível alto de segurança para criptografia, a camada física e a validação de mensagens.

- Escalabilidade: não possui o fluxo de controle explícito, a separação entre controle e computação, a descentralização e a transparência da localização por interações exógenas ou orientada a eventos.
- Padronização: não possui a padronização da comunicação, da semântica, dos objetos e das aplicações inteligentes.
- Interoperabilidade:não possui interoperabilidade sintática, interoperabilidade de serviços e interoperabilidade dinâmica.
- Comunicação: não possui o controle da perda de pacotes de mensagens, do consumo de energia e da confiabilidade.
- Orientação Semântica: não possui acesso e abstração dedados, raciocínio e interpretação semântica, e pesquisa e descoberta de recursos e serviços.
- Modularidade: não possui a generalidade e o grau de interdependência.

8. IBM Industry 4.0:

- Segurança e Privacidade: não possui o nível alto de segurança para criptografia, a camada física e a validação de mensagens.
- Escalabilidade: não possui o fluxo de controle explícito, a separação entre controle e computação, a descentralização e a transparência da localização por interações exógenas.
- Padronização: não possui a padronização da comunicação, da semântica, dos objetos e das aplicações inteligentes.
- Interoperabilidade: não possui interoperabilidade sintática, interoperabilidade de serviços e interoperabilidade dinâmica.
- Comunicação: não possui o controle do consumo de energia e da confiabilidade.
- Orientação Semântica: não possui raciocínio e interpretação semântica, e pesquisa e descoberta de recursos e serviços.
- Modularidade: possui todos os requisitos.

9. NIST SMS:

- Segurança e Privacidade: possui todos os requisitos.
- Escalabilidade: não possui o fluxo de controle explícito, a separação entre controle e computação, a descentralização e a transparência da localização por interações exógenas.
- Padronização: não possui a padronização dos objetos e das aplicações inteligentes.
- Interoperabilidade: possui todos os requisitos.

- Comunicação: não possui o controle do consumo de energia e da confiabilidade.
- Orientação Semântica: não possui raciocínio e interpretação semântica, e pesquisa e descoberta de recursos e serviços.
- Modularidade: não possui o grau de interdependência.

10. IMSA:

    - Segurança e Privacidade: possui todos os requisitos.
    - Escalabilidade: não possui o fluxo de controle explícito, a separação entre controle e computação, a descentralização e a transparência da localização por interações exógenas.
    - Padronização: não possui a padronização dos objetos e das aplicações inteligentes.
    - Interoperabilidade: não possui interoperabilidade de serviços e interoperabilidade dinâmica.
    - Comunicação: não possui o controle da confiabilidade.
    - Orientação Semântica: não possui pesquisa e descoberta de recursos e serviços.
    - Modularidade: não possui a generalidade e o grau de interdependência.

11. SEPICOM:

    - Segurança e Privacidade: possui todos os requisitos.
    - Escalabilidade: possui todos os requisitos.
    - Padronização: possui todos os requisitos.
    - Interoperabilidade: possui todos os requisitos.
    - Comunicação: possui todos os requisitos.
    - Orientação Semântica: possui todos os requisitos.
    - Modularidade: possui todos os requisitos.

Tabela 5 – Aplicação do MMA nas RAMs apresentadas.

RAMs	**MMA**						
	Segurança e Privacidade	**Escalabilidade**	**Padronização**	**Interopera-bilidade**	**Comunicação**	**Orientação Semântica**	**Modularidade**
IIRA	4	3	3	4	3	4	3
RAMI 4.0	4	3	4	3	3	3	3
InSight	3	3	2	2	3	2	2
GEs Predix	3	3	3	3	2	3	3
Siemens MindSphere	4	4	3	3	2	3	4
OpenPnP	4	4	2	4	3	2	2
SEMIoTICS	3	2	1	2	1	1	2
IBM Industry 4.0	3	3	1	2	2	2	4
NIST SMS	4	3	3	4	2	2	3
IMSA	4	3	3	3	3	3	2
SEPICOM	4	4	4	4	4	4	4

7 Análise dos Resultados

Esta seção avalia o desempenho de contribuição do modelo proposto, o SEPICOM, e do MMA proposto, o MMA4RAM, e a entender como que medir a capacidade do sistema é um ponto essencial para êxito em produtividade, organização e alinhamento interno.

7.1 Performance das RAMs no MMA4RAM

As arquiteturas expostas neste trabalho possuem um progresso contínuo e, logo, a tendência é aprimorar e simplificar os modelos para melhor atender as demandas dos usuários e dos *stakeholders*. Nesta seção são ressaltadas e comparadas as RAMs apresentadas anteriormente neste capítulo, quanto a algumas das características desafiadoras para a construção de um modelo para um sistema da IIoT e, também, quanto as funcionalidades utilizadas no desenvolvimento do MMA4RAM, como Segurança e Privacidade, Escalabilidade, Padronização, Interoperabilidade, Comunicação, Orientação Semântica e Modularidade. Além disso, outras características tais como os tipos de camada, processos e aplicação serão avaliadas e discutidas. A referências nessa seção se baseiam na Tabela 4.

Inicialmente, atenta-se ao número de camadas das RAMs analisadas, as que foram desenvolvidas por consórcios industriais (IIRA, RAMI 4.0, IMSA) utilizam de quatro a seis camadas em seu modelo e as outras, desenvolvidas por empresas independentes ou pesquisadores, utilizam apenas 3 camadas. Percebe-se, ainda, que a primeira, chão de fábrica, e a última camada, negócios, são comuns a todas as arquiteturas e a intermediária, de operações, é dissolvida nas RAMs com mais camadas.

O protocolo *Open Platform Communications Unified Architecture* (em português Plataforma de Comunicação Aberta Arquitetura Unificada – OPC UA) e o padrão ISA/IEC 62443 são comuns as arquiteturas. O OPC UA, lançado em 2008, é um protocolo de interoperabilidade para a troca de dados segura e confiável no espaço de automação industrial e em outras indústrias. É uma plataforma independente que garante o fluxo de informação contínuo entre os dispositivos de diversos fornecedores. Essa abordagem em várias camadas atinge os objetivos originais de especificação de um projeto de [93]:

- Equivalência funcional: todas as especificações são mapeadas para unificar a arquitetura;
- Independência da plataforma: de um microcontrolador incorporado à infraestrutura baseada na nuvem;

- Seguro: criptografia, autenticação e auditoria;
- Extensível: capacidade de adicionar novos recursos sem afetar os aplicativos existentes;
- Modelagem abrangente de informações: para definir informações complexa.

Portanto, esse protocolo engloba a escalabilidade, a modularidade, a interoperabilidade e, em partes, a segurança no desenvolvimento de uma arquitetura. OPC UA segue exatamente no caminho da quarta revolução industrial, ou Indústria 4.0. Conceitos como comunicação independente de plataforma e fornecedor, segurança de dados, padronização e inteligência descentralizada são comuns entre os dois.

Quanto a ISA/IEC 62443 é o padrão mundial para segurança dos Sistemas de Controle Industriais no domínio das TO. O padrão oferece às organizações procedimentos para melhorar a segurança digital de seus processos. A implementação do padrão leva a indústria a um nível mais alto de segurança do mundo TO, do processo ou dos ambientes de produção. As metas de segurança de TI, geralmente, não dão a mesma ênfase pois eles podem estar mais preocupados em proteger as informações do que os ativos físicos [94]. Esses diferentes objetivos devem ser definidos como objetivos de segurança, independentemente do grau de integração da planta alcançado. Uma etapa fundamental na avaliação de riscos, conforme exigido pela ISA/IEC 62443, deve ser a identificação de quais serviços e funções são realmente essenciais para operações, ou seja, esse é um padrão desejável que todas as RAMs possuam.

Ao observar a Tabela 5 se percebe que os desafios geram oportunidades nas áreas de pesquisa sobre RAMs para a IIoT, tendo em vista que as arquiteturas estudadas no trabalho demonstram, embora que estejam em desenvolvimento, que existem lacunas nas pesquisas relacionadas às necessidades de um sistema da IIoT. Estes fatos colocam que essas arquiteturas expostas no trabalho ainda necessitam de melhorias quanto as limitações apresentadas e, assim, consequentemente, adquirir habilidades para preencher essas lacunas.

Em análise, observa-se que as RAMs desenvolvidas pelos consórcios industriais possuem ainda limitações, principalmente, em escalabilidade, modularidade e comunicação da arquitetura, enquanto, que as independentes se limitam em orientação semântica e padronização. Uma forma de visualizar em qual das funcionalidades se encontra a maior complexidade ou tribulação por desenvolvimento das RAMs, é o somatório estatístico dos níveis de classificação de cada funcionalidade, sendo 10 e 40 o range de valores, em vista disso segue a Tabela 6, desconsidera-se a SEPICOM deste somatório estatístico .

Tabela 6 – Somatório dos níveis de classificação das funcionalidades no MMA.

Funcionalidades	**Somatório**
Segurança e Privacidade	36
Escalabilidade	35
Padronização	29
Interoperabilidade	34
Comunicação	24
Orientação Semântica	29
Modularidade	32

A partir da Tabela 6, percebe-se que a comunicação é a funcionalidade com menor rendimento por parte das arquiteturas, esse fato leva ao questionamento porque isso ocorre? Este é um serviço chave para o funcionamento das plataformas da IIoT, em vista de que por ela que ocorrem as transmissões dos dados por todo o ciclo da RAM. A complexidade nessa funcionalidade gira em torno, principalmente, da escolha por protocolos e redes que farão as transições dos dados para obter o melhor tempo de resposta e o cumprimento da segurança necessária. Outro fator é o controle dos dispositivos na rede para que não haja perda de mensagens que podem ser cruciais na obtenção de resultados e tomadas de decisões, dentre outros fatores.

Outro somatório estatístico importante é a relação de desempenho entre as RAMs pelas funcionalidades, descrito na Tabela 7, em que o range varia de 7 a 28. A SEMIoTICS é a com menor taxa de desempenho entre as RAMs, esse acontecimento se justifica pelo fato de em orientação semântica, padronização e comunicação receberem nível 1 em sua classificação, e, apesar de ter casos de uso, é uma arquitetura com baixo desenvolvimento e documentação. Em sua página [78], demonstra ainda a busca por padronização na arquitetura, assim como a presença em eventos para divulgação da arquitetura. Contudo, após a sua finalização, há uma expectativa de grande cobertura das funcionalidades e para isso, atualmente, realizam: desenvolvimento de mecanismos principais para inteligência incorporada em várias camadas; adaptação, aprendizado e evolução de aplicações de IoT; segurança e privacidade, responsabilidade e controle do usuário de ponta a ponta.

Tabela 7 – Somatório da performance das RAMs no MMA.

RAMs	**Somatório**
IIRA	24
RAMI 4.0	23
InSight	17
GEs Predix	20
Siemens MindSphere	23
OpenPnP	19
SEMIoTICS	12
IBM Industry 4.0	17
NIST SMS	21
IMSA	21

7.2 Avaliação do SEPICOM e do MMA4RAM

O modelo de RAM proposto, o SEPICOM, traz uma versão justificada das plataformas e com o necessário para o funcionamento em um ambiente industrial, e apresenta uma abertura de crescimento com a inserção de novas tecnologias em suas camadas, dado que por, também, ser uma tecnologia sempre estará em um espiral evolutivo. Além disso, ainda pode ser utilizada para as implementações de IIoT em empresas com perspectivas de melhorar a cobertura dos requisitos apresentados como necessários em uma arquitetura para a IIoT.

Igualmente, o MMA4RAM passará ainda por mudanças com a evolução das funcionalidades e das necessidades industriais. No entanto, no momento, tem a capacidade de mostrar quais os pontos em que mudanças ou atualizações são requeridas, para gerar melhorias e a elevar o desempenho de performance, são indispensáveis, durante a aplicação ou criação de RAMs. O MMA4RAM pode ser utilizada como referência para as RAMs a serem criadas ou uma forma de customizar ou generalizar as existentes, como uma forma de avaliar a sua maturidade e apontar os pontos que necessitam de melhoria. E, também, pode ser utilizado como elemento de comparação entre várias arquiteturas, de modo a ser uma fonte de informação para um tomada de decisão, de qual arquitetura adotar para a implementação na indústria.

A Figura 14 representa uma escala das arquiteturas apresentadas com suas pontuações

no MMA4FOR, através dela é possível notar que o IIRA é a mais qualificada e o SEMIoTICS é a de menor desempenho, mas o que ambas possuem em comum são as mesmas funcionalidades com baixo desenvolvimento, padronização e comunicação, e com alto desenvolvimento, segurança e privacidade. Estas funcionalidades são desafiadoras na construção de uma arquitetura pois interligam as outras e geram uma dependência interna entre as funcionalidades. Em vista disso, a Figura 15 completa essa argumentação ao demonstrar que as mesmas funcionalidades são as que possuem menor e maior desempenho em requisito de desenvolvimento pelas arquiteturas apresentadas.

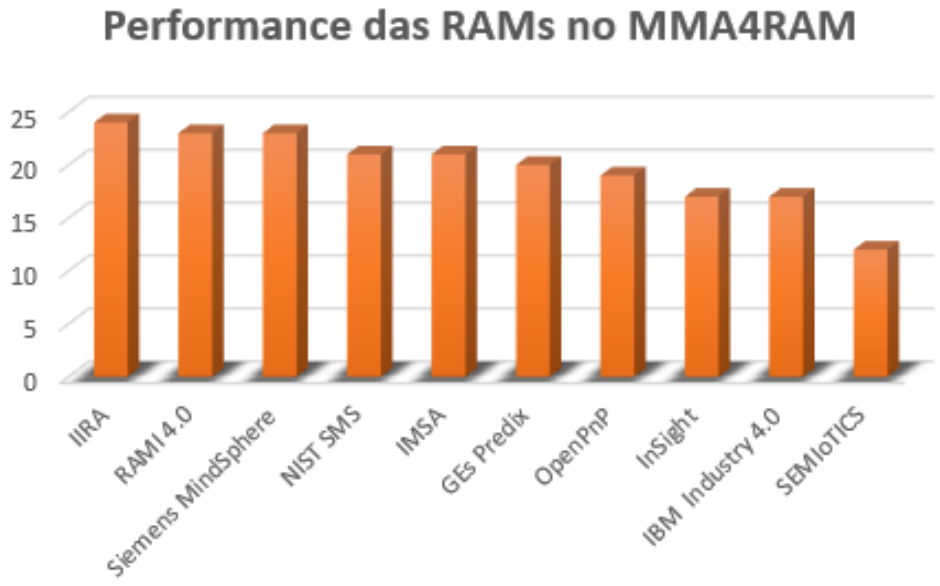


Figura 14 – Escala das RAMs quanto a aplicação do MMA4RAM.

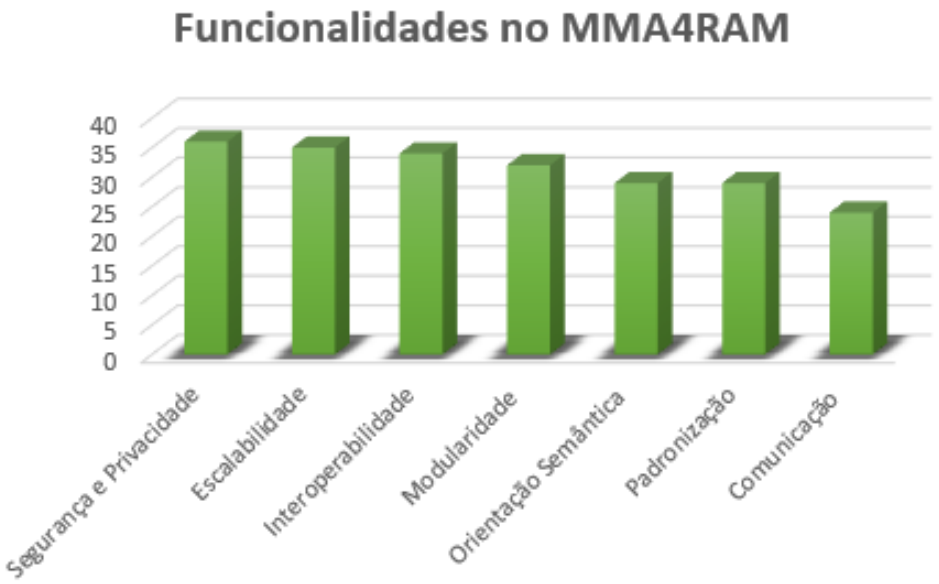


Figura 15 – Escala do desenvolvimento das funcionalidades pelas RAMs com a aplicação do MMA4RAM.

Compreender a aptidão do sistema em que se trabalha é relevante para promover o sucesso da arquitetura. Além de obter um sistema de alta capacidade, é necessário que o usuário entenda e aprenda todos os seus pontos chaves para auxiliar no sucesso da aplicação. Tal como, também, com o progresso do uso, aumentarão a produtividade, a organização interna e o alinhamento com os operadores, em vista de todos obtiverem o conhecimento da infraestrutura e o nível em que estão. O SEPICOM e o MMA4RAM auxiliam nessa visão, mas necessitam de usuários para propagar esses benefícios, além dos outros que as ferramentas proporcionam.

8 Conclusão

Este trabalho apresentou as etapas adotadas para validar os elementos e o sistema de um ambiente da IIoT. A partir de pesquisas bibliográficas com caráter exploratório e experimental, montou-se uma documentação sobre as funcionalidades necessárias em modelos de arquitetura de referência e, também, sobre as próprias existentes no mercado de tecnologias atual. Iniciou-se com a conceituação dos pontos necessários para o entendimento da circunstância em que este trabalho englobaria.

Em seguida, discutiu-se sobre os trabalhos correlatos para dimensionar o que havia de pesquisa sobre o assunto em pauta e, também, para afirmar quais os diferenciais do trabalho, como: relatos de que na IIoT existem grandes desafios na inclusão das tecnologias na indústrias, com a caracterização do MMA4RAM é possível diminuir esses desafios para aumentar a segurança da implantação; sobre as RAMs nesta pesquisa não foi apontado um problema a ser resolvido com uma RAM, por outro lado foi produzido uma RAM para resolver diversos problemas, a SEPICOM; e, por fim, os trabalhos sobre modelos de maturidade demonstrou que muitos pesquisadores buscam pela otimização do modelo desenvolvido pela SEI, isso transmite uma inversão ao MMA4RAM dado que as suas características foram selecionadas para desenvolvimento.

Na metodologia do trabalho, discutiu-se como seria a execução das etapas para consolidar os objetivos descritos no inicio do trabalho. Posteriormente, produziu-se o modelo de maturidade e aderência como uma tratativa para classificar o nível de amadurecimento das funcionalidades das RAMs, de modo a qualificar seus elementos, para identificar nas RAMs existentes o nível presente das funcionalidades, e, assim, caso necessário, gerar alguma atualização ou melhoria para o processo.

O desenvolvimento desse modelo foi crucial para gerar a segunda contribuição desse trabalho, o SEPICOM retrata como uma abstração significativa pode constituir um embasamento, auxiliar na construção de novos modelos de arquitetura de referência e torná-los adaptáveis a diferentes âmbitos industriais. A partir da produção dessas contribuições foi possível cumprir os seguintes objetivos do trabalho: fornecer um MMA para qualificar o grau de funcionalidade e verificar as propriedades; gerar uma introdução a aplicação de um MMA funcional para ferramentas de *software*; avaliar diferentes estruturas de RAMs, em questões de formato; identificar requisitos, divisão de processos, técnicas de desenvolvimento e caracterização de propriedades industriais; e elaborar uma RAM e abstrata.

Outro objetivo executado foi o estudo de caso da aplicabilidade do MMA4RAM, com a

implementação nas estruturas RAMs apresentadas. A análise dos resultados do estudo de caso expôs que das RAMs abordadas, o IIRA obteve a melhor pontuação quanto as funcionalidades testadas. Outra análise realizada foi sobre a performance das funcionalidades pelas as arquiteturas, essa demonstrou que a segurança e privacidade é a funcionalidade que as RAMs mais se desempenham em desenvolver. Com isso, provou-se o último objetivo do trabalho, a contribuição com dois sistemas complementares, e também independentes, que podem ser inseridos no ambiente industrial e utilizados como sistemas de suporte a decisão do usuário para as características das RAMs.

Além disso, explorou-se os benefícios do uso de ambas ferramentas para a IIoT, como aumento de produtividade, tempo de reposta para tomadas de decisão, organização do sistema interno, predição de manutenções, minimização em tempos de paradas, dentre outras. Abordou-se como a espiral evolutiva das tecnologias é muita rápida e ambos necessitarão acompanhar o progresso para garantir a sua aplicabilidade nos setores industriais. Um exemplo, é a segurança e privacidade que, atualmente, passa por uma crise e está a evoluir os seus parâmetros para *cyber* segurança devido aos intensos ataques as redes empresariais por usuários não autorizados. Portanto, será necessário seguir essas atualizações das funcionalidades para assegurar que o modelo seja aplicável a todos os casos.

8.1 Trabalhos Futuros

Os modelos de arquitetura de referência provaram ser uma parte fundamental dos sistemas IIoT, pois ajudam no gerenciamento completo de uma indústria, ou seja, começam com o controle dos recursos no chão de fábrica e terminam com o gerenciamento completo de a planta e os sistemas corporativos. E o MMA4RAM apresentou a robustez com que as funcionalidades de uma RAM devem ser tratadas, para haja um desempenho superior das próximas arquiteturas a serem desenvolvidas e, também, pode ser utilizada pelas atuais para a realização de uma evolução.

Em relação às arquiteturas apresentadas, cada uma delas é singular em seu formato, embora umas usem padrões semelhantes, com o uso do MMA4RAM foi possível notar que algumas ainda possuem limitações em certas demandas necessárias em sistemas da IIoT, apresentados na Tabela 5, as arquiteturas apresentam em seus documentos apenas sugestões do que realizar para enfrentar esses desafios.

Por fim, este trabalho se limitou a contribuir com a produção das ferramentas e a validar o seu uso em RAMs existentes. Como os trabalhos futuros, a partir das realizações deste trabalho, sugere-se uma rigorosa investigação sobre como as arquiteturas a surgir com o uso podem corrigir ou minimizar as lacunas deixadas pelas apresentadas; uma

pesquisa e desenvolvimento sobre as tecnologias que podem ser utilizadas para assegurar o performance da SEPICOM sugerida neste trabalho; e a inclusão de novas funcionalidades no MMA4RAM gerado, como conectividade, desempenho em tempo real, dentre outras, para aumentar o seu range de alcance, plenitude e complexidade sobre as necessidades dos setores industriais.

Além disso, como complemento do conteúdo das RAMs, sugere-se que sejam realizadas entrevistas com os usuários das RAMs apresentadas, como forma de identificar outros pontos positivos, pontos negativos e, até mesmo, confirmar os argumentos dispostos ao longo deste trabalho.

8.2 Artigos Produzidos

A partir do esforço deste trabalho, as principais contribuições foram alcançar a modelagem do MMA, a implementação do mesmo em RAMs produzidas por consórcios industriais e, por fim, a proposição de uma RAM, com características abstratas para aplicações em diversos setores. Quanto as publicações realizadas no período do desenvolvimento do trabalho, duas foram sobre estudos da IIoT e a aplicação de novas tecnologias em seu ambiente, sendo apresentadas em diferentes conferências em nível nacional e internacional, e uma com a introdução do trabalho que seria realizado e uma comparação inicial de algumas RAMs, a publicação foi aceita em um congresso internacional no entanto não houve a publicação por limitações de recursos. Os artigos publicados, respectivamente, são:

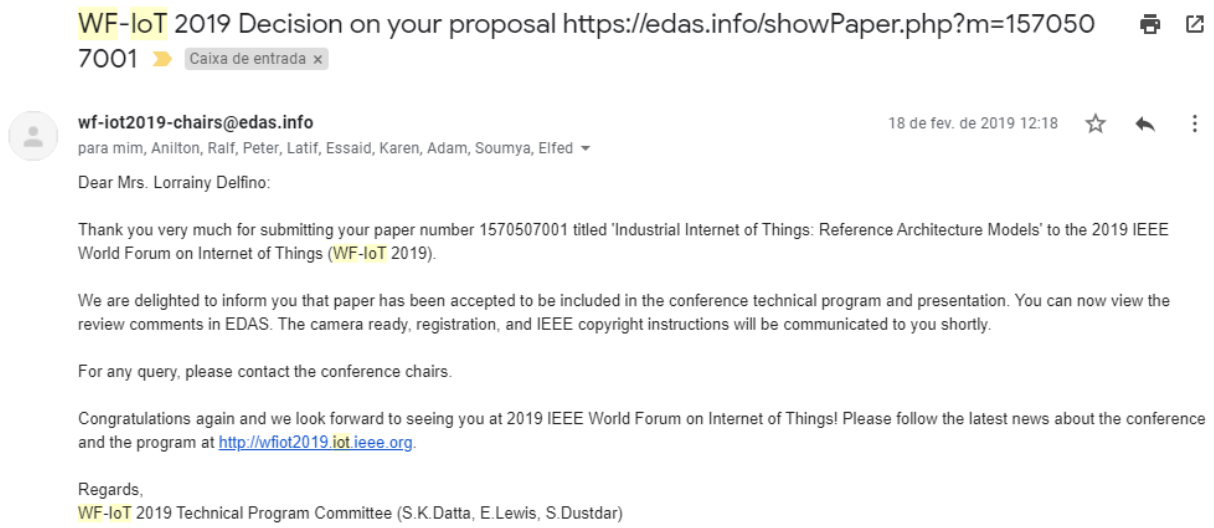
DELFINO, L. R. GARCIA, A. S. DE MOURA, R. L. Industrial Internet of Things: Digital Twins. In: *18th International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC) 2019*. Aveiro - Portugal, 2019.

DELFINO, L. R. GARCIA, A. S. ROCHA, H. Algoritmos baseados em Métodos de Clustering: simulação e análise de aplicações em redes de sensores sem fio para a Internet das Coisas na Indústria. In: *LI SIMPóSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, 2019*, Limeira. Anais eletrônicos... Campinas, Galoá, 2020.

Segue a carta de aceite do terceiro artigo e a sua tradução, em Figura 16:

“Cara Sra. Lorrainy Delfino: Muito obrigado por enviar seu número de artigo 1570507001 intitulado ’Internet das Coisas na Indústria: Modelos de Arquitetura de Referência’ para o Fórum Mundial IEEE de 2019 sobre Internet das Coisas (WF-IoT 2019).

Temos o prazer de informar que o artigo foi aceito para ser incluído no programa técnico e na apresentação da conferência. Agora você pode ver os comentários da revisão no EDAS. As instruções de câmera pronta, registro e direitos autorais IEEE serão comunicadas a



WF-IoT 2019 Decision on your proposal https://edas.info/showPaper.php?m=1570507001 Caixa de entrada ×

wf-iot2019-chairs@edas.info 18 de fev. de 2019 12:18

para mim, Anilton, Ralf, Peter, Latif, Essaid, Karen, Adam, Soumya, Elfed

Dear Mrs. Lorrainy Delfino:

Thank you very much for submitting your paper number 1570507001 titled 'Industrial Internet of Things: Reference Architecture Models' to the 2019 IEEE World Forum on Internet of Things (WF-IoT 2019).

We are delighted to inform you that paper has been accepted to be included in the conference technical program and presentation. You can now view the review comments in EDAS. The camera ready, registration, and IEEE copyright instructions will be communicated to you shortly.

For any query, please contact the conference chairs.

Congratulations again and we look forward to seeing you at 2019 IEEE World Forum on Internet of Things! Please follow the latest news about the conference and the program at http://wfiot2019.iot.ieee.org.

Regards,
WF-IoT 2019 Technical Program Committee (S.K.Datta, E.Lewis, S.Dustdar)

Figura 16 – Carta de aceite de artigo produzido sobre este trabalho.

você em breve.

Para qualquer dúvida, entre em contato com os presidentes da conferência.

Parabéns novamente e estamos ansiosos para vê-lo no Fórum Mundial IEEE de 2019 na Internet das Coisas! Siga as últimas notícias sobre a conferência e o programa em http://wfiot2019.iot.ieee.org. Saudações,

Comitê Técnico do Programa WF-IoT 2019 (S.K. Data, E.Lewis, S.Dustdar)”

Referências

1 LIN, S.; SIMMON, E.; MELLOR, S. The Industrial Internet of Things Volume G1: Reference Architecture. In: INDUSTRIAL INTERNET CONSORTIUM. [S.l.], 2019. Cited 4 times in pages 9, 30, 60 e 75.

2 DE MOURA, R. L.; DE L. F. CEOTTO, L.; GONZALEZ, A. Industrial iot and advanced analytics framework: An approach for the mining industry. In: *2017 International Conference on Computational Science and Computational Intelligence (CSCI)*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1308–1314. Cited 3 times in pages 9, 34 e 35.

3 CUI, Y.; KARA, S.; CHAN, K. C. Manufacturing big data ecosystem: A systematic literature review. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, v. 62, p. 101861, 2020. Cited 2 times in pages 9 e 36.

4 MILLER, P. An sei process improvement path to software quality. In: *6th International Conference on the Quality of Information and Communications Technology (QUATIC 2007)*. [S.l.: s.n.], 2007. p. 12–20. Cited 2 times in pages 9 e 37.

5 ADOLPHS, P. et al. Reference Architecture Model Industrie 4.0 (RAMI 4.0). In: VDI/VDE AND ZVEI. *Status Report July 2015*. [S.l.], 2015. Cited 4 times in pages 9, 61, 62 e 75.

6 COMPANY, G. E. Predix: The platform for the industrial internet. 2018. Cited 3 times in pages 9, 64 e 75.

7 SIEMENS. White paper | MindSphere: Enabling the world's industries to drive their digital transformations. 2018. Cited 3 times in pages 9, 66 e 75.

8 LI, Q. et al. Smart manufacturing standardization: Architectures, reference models and standards framework. *Computers in Industry*, v. 101, p. 91 – 106, 2018. Cited on page. 15.

9 SISINNI, E. et al. Industrial internet of things: Challenges, opportunities, and directions. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, v. 14, n. 11, p. 4724–4734, Nov 2018. Cited 5 times in pages 18, 23, 33, 48 e 49.

10 SCHULTE, D.; COLOMBO, A. W. RAMI 4.0 based digitalization of an industrial plate extruder system: Technical and infrastructural challenges. In: *IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Beijing, China, October 29 - November 1, 2017*. [S.l.]: IEEE, 2017. p. 3506–3511. Cited on page. 19.

11 DIN SPEC 91345:2016-04. Reference Architecture Model Industrie 4.0 (RAMI4.0). In: . [S.l.], April 2016. Cited 3 times in pages 19, 62 e 63.

12 SEZI, T.; DUNCAN, B. K. New intelligent electronic devices change the structure of power distribution systems. In: *Conference Record of the 1999 IEEE Industry Applications Conference. Thirty-Forth IAS Annual Meeting (Cat. No.99CH36370)*. [S.l.: s.n.], 1999. p. 944–952 vol.2. Cited on page. 21.

13 CLARKE, G.; REYNDERS, D.; WRIGHT, E. Practical Modern SCADA Protocols: DNP3, 60870.5 and Related Systems. In: NEWNES OXFORD. [S.l.], 2003. Cited on page. 21.

14 BURGER, J. The utility initiative for interoperability between intelligent electronic devices in the substation-goals and status. In: 1999 IEEE POWER ENGINEERING SOCIETY SUMMER MEETING. CONFERENCE PROCEEDINGS. [S.l.], 1999. v. 1, p. 28–30 vol.1. Cited on page. 21.

15 AL-FUQAHA, A. et al. Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications. In: IEEE Communications Surveys Tutorials. [S.l.], 2015. v. 17, n. 4, p. 2347–2376. Cited 5 times in pages 22, 42, 50, 52 e 53.

16 PAL, A.; PURUSHOTHAMAN, B. IoT Technical Challenges and Solutions. In: ARTECH HOUSE. [S.l.], 2017. Cited on page. 22.

17 FARAHZADIA, A. et al. Middleware technologies for cloud of things-a survey. In: DIGITAL COMMUNICATIONS AND NETWORKS. [S.l.], 2017. Cited on page. 22.

18 TRAN-DANG, H. et al. Towards the internet of things for physical internet: Perspectives and challenges. *IEEE Internet of Things Journal*, 2020. Cited on page. 22.

19 BLOOM, G. et al. Design patterns for the industrial internet of things. In: *2018 14th IEEE International Workshop on Factory Communication Systems (WFCS)*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 1–10. Cited 3 times in pages 22, 23 e 26.

20 CAVALCANTE, E. et al. An analysis of reference architectures for the internet of things. *2015 1st International Workshop on Exploring Component-based Techniques for Constructing Reference Architectures (CobRA)*, p. 1–4, 2015. Cited on page. 23.

21 ANTÃO, L. et al. Requirements for testing and validating the industrial internet of things. In: *2018 IEEE International Conference on Software Testing, Verification and Validation Workshops (ICSTW)*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 110–115. Cited 3 times in pages 23, 25 e 46.

22 SAMUEL, A.; SIPES, C. Making internet of things real. *IEEE Internet of Things Magazine*, v. 2, p. 10–12, 03 2019. Cited on page. 23.

23 LIAO, Y.; LOURES, E.; DESCHAMPS, F. Industrial internet of things: A systematic literature review and insights. *IEEE Internet of Things Journal*, v. 5, n. 6, p. 4515–4525, Dec 2018. Cited on page. 25.

24 YOUNAN, M. et al. Challenges and recommended technologies for the industrial internet of things: A comprehensive review. *Measurement*, p. 107198, 2019. Cited on page. 25.

25 REHMAN, M. H. ur et al. The role of big data analytics in industrial internet of things. *Future Generation Computer Systems*, v. 99, p. 247 – 259, 2019. Cited 2 times in pages 25 e 26.

26 MOGHADDAM, M. et al. Reference architectures for smart manufacturing: A critical review. *Journal of Manufacturing Systems*, v. 49, p. 215 – 225, 2018. Cited 2 times in pages 26 e 69.

27 BAINES, T.; LIGHTFOOT, H. *Made to serve: How manufacturers can compete through servitization and product-service systems*. Chichester: West Sussex: John Wiley Sons Inc, 2013. Cited on page. 27.

28 HU, P. A system architecture for software-defined industrial internet of things. In: *2015 IEEE International Conference on Ubiquitous Wireless Broadband (ICUWB)*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 1–5. Cited on page. 27.

29 UNVERDORBEN, S.; BÖHM, B.; LÜDER, A. Reference architectures for future production systems in the field of discrete manufacturing. In: *2018 IEEE 14th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 869–874. Cited on page. 27.

30 NAKAGAWA, E. Y.; OQUENDO, F.; BECKER, M. Ramodel: A reference model for reference architectures. In: *2012 Joint Working IEEE/IFIP Conference on Software Architecture and European Conference on Software Architecture*. [S.l.: s.n.], 2012. p. 297–301. Cited on page. 27.

31 WUNCK, C.; BAUMANN, S. Towards a process reference model for the information value chain in iot applications. In: *2017 IEEE European Technology and Engineering Management Summit (E-TEMS)*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1–6. Cited on page. 28.

32 BADER, S.; MALESHKOVA, M.; LOHMANN, S. Structuring reference architectures for the industrial internet of things. *Future Internet*, v. 11, p. 151, 07 2019. Cited on page. 28.

33 NAVANI, D.; JAIN, S.; NEHRA, M. S. The internet of things (iot): A study of architectural elements. In: *2017 13th International Conference on Signal-Image Technology Internet-Based Systems (SITIS)*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 473–478. Cited on page. 28.

34 MEYER, O. et al. Industrial internet of things: covering standardization gaps for the next generation of reconfigurable production systems. In: . [S.l.: s.n.], 2018. Cited 4 times in pages 29, 33, 47 e 49.

35 BRUIN, T. de et al. Understanding the main phases of developing a maturity assessment model. *Australasian Conference on Information Systems*, 01 2005. Cited 3 times in pages 30, 31 e 37.

36 JUNIOR, C. A. C.; PAULA, I. C.; FOGLIATTO, F. S. Método de análise de maturidade e priorização de melhorias na gestão do processo de desenvolvimento de produtos. *Production*, scielo, v. 20, p. 359 – 377, 09 2010. Cited on page. 30.

37 SIEGFANZ, C. Maturity and customer centricity of "knowledge management maturity models" (kmmm). In: . [S.l.: s.n.], 2013. p. 754–759. ISBN 978-1-4799-1426-5. Cited 3 times in pages 30, 31 e 38.

38 FRASER, P.; MOULTRIE, J.; GREGORY, M. The use of maturity models/grids as a tool in assessing product development capability. In: . [S.l.: s.n.], 2002. v. 1, p. 244 – 249 vol.1. ISBN 0-7803-7385-5. Cited on page. 31.

39 VAN LIER, B. Developing the industrial internet of things with a network centric approach: A holistic scientific perspective on smart industries. In: *2014 18th International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC)*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 324–329. Cited on page. 34.

40 RUPPERT, T.; ABONYI, J. Industrial internet of things based cycle time control of assembly lines. In: *2018 IEEE International Conference on Future IoT Technologies (Future IoT)*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 1–4. Cited on page. 34.

41 LANGARICA, S.; RÜFFELMACHER, C.; NÚÑEZ, F. An industrial internet platform for real-time fault detection in industrial motors. In: *2018 IEEE Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS)*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 351–356. Cited on page. 34.

42 KOZIOLEK, H. et al. OpenPnP: A plug-and-produce architecture for the industrial internet of things. In: *2019 IEEE/ACM 41st International Conference on Software Engineering: Software Engineering in Practice (ICSE-SEIP)*. [S.l.: s.n.], 2019. p. 131–140. Cited 3 times in pages 35, 67 e 75.

43 MORKEVICIUS, A.; BISIKIRSKIENE, L.; BLEAKLEY, G. Using a systems of systems modeling approach for developing industrial internet of things applications. In: *2017 12th System of Systems Engineering Conference (SoSE)*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1–6. Cited on page. 35.

44 MONTEIRO, P. et al. Adoption of architecture reference models for industrial information management systems. In: *2018 International Conference on Intelligent Systems (IS)*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 763–770. Cited on page. 35.

45 IJAZ, Q.; ASGHAR, H.; AHSAN, A. Exploratory study to investigate the correlation and contrast between iso 9001 and cmmi framework: Context of software quality management. In: *2016 Sixth International Conference on Innovative Computing Technology (INTECH)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 388–391. Cited on page. 37.

46 AL-SAI, Z. A.; ABDULLAH, R.; HUSIN, M. h. A review on big data maturity models. In: *2019 IEEE Jordan International Joint Conference on Electrical Engineering and Information Technology (JEEIT)*. [S.l.: s.n.], 2019. p. 156–161. Cited on page. 38.

47 GIL, A. C. Como elaborar projetos de pesquisa 4 ed. In: *São Paulo: ATLAS*. [S.l.: s.n.], 2002. p. 172. Cited on page. 39.

48 IWANNICKI, K. A Distributed Systems Perspective on Industrial IoT. In: *2018 IEEE 38th International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS)*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 1164–1170. Cited on page. 41.

49 LENNVALL, T.; GIDLUND, M.; ÅKERBERG, J. Challenges when bringing IoT into Industrial Automation. In: 2017 IEEE AFRICON. [S.l.], 2017. Cited on page. 42.

50 CARVALHO, N. et al. Manufacturing in the fourth industrial revolution: A positive prospect in Sustainable Manufacturing. In: PROCEDIA MANUFACTURING. *15th Global Conference on Sustainable Manufacturing*. [S.l.], 2018. p. 671 – 678. Cited on page. 42.

51 XU, H. et al. A survey on industrial internet of things: A cyber-physical systems perspective. *IEEE Access*, PP, p. 1–1, 12 2018. Cited 4 times in pages 43, 45, 48 e 49.

52 MOURATIDIS, H.; DIAMANTOPOULOU, V. A security analysis method for industrial internet of things. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, v. 14, n. 9, p. 4093–4100, 2018. Cited 3 times in pages 43, 44 e 45.

53 MAHMOUD, R. et al. Internet of things (iot) security: Current status, challenges and prospective measures. In: . [S.l.: s.n.], 2015. p. 336–341. Cited 3 times in pages 43, 44 e 45.

54 MCGINTHY, J. M.; MICHAELS, A. J. Secure industrial internet of things critical infrastructure node design. *IEEE Internet of Things Journal*, v. 6, n. 5, p. 8021–8037, 2019. Cited 3 times in pages 43, 44 e 45.

55 PANCHAL, A. C.; KHADSE, V. M.; MAHALLE, P. N. Security issues in iiot: A comprehensive survey of attacks on iiot and its countermeasures. In: *2018 IEEE Global Conference on Wireless Computing and Networking (GCWCN)*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 124–130. Cited 2 times in pages 43 e 45.

56 CERTMIKE. *Confidentiality, Integrity And Availability – The CIA Triad*. Disponível em: <https://www.certmike.com/confidentiality-integrity-and-availability-the-cia-triad/>. Acesso em: 23 mai. 2020. Cited on page. 44.

57 ARELLANES, D.; LAU, K. Analysis and classification of service interactions for the scalability of the internet of things. In: *2018 IEEE International Congress on Internet of Things (ICIOT)*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 80–87. Cited 2 times in pages 46 e 47.

58 BREIVOLD, H. P.; SANDSTRÖM, K. Internet of things for industrial automation – challenges and technical solutions. In: *2015 IEEE International Conference on Data Science and Data Intensive Systems*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 532–539. Cited 2 times in pages 46 e 47.

59 ALISTAIR, B. et al. Service interaction patterns. In: *Int Conference on Business Process Management*. [S.l.: s.n.], 2005. p. 302–318. Cited on page. 47.

60 FISHER, M. T.; ABBOTT, M. L. The art of scalability: Scalable web architecture, processes, and organizations for the modern enterprise, second edition. In: *Addison-Wesley Professional*. [S.l.: s.n.], 2015. Cited on page. 47.

61 BANDYOPADHYAY, D.; SEN, J. Internet of things: Applications and challenges in technology and standardization. *Wireless Personal Communications*, v. 58, p. 49 – 69, 05 2011. Cited 2 times in pages 48 e 49.

62 TAYUR, V.; SUCHITHRA, R. Review of interoperability approaches in application layer of internet of things. In: . [S.l.: s.n.], 2017. p. 322–326. Cited 2 times in pages 50 e 51.

63 ABDELOUAHID, R. A.; OGAIDI, M.; MARZAK, A. Towards to a new iot interoperability architecture. In: *2018 IEEE International Conference on Technology Management, Operations and Decisions (ICTMOD)*. [S.l.: s.n.], 2018. p. 148–154. Cited 2 times in pages 50 e 51.

64 KONDURU, V.; BHARAMAGOUDRA, M. Challenges and solutions of interoperability on iot: How far have we come in resolving the iot interoperability issues. In: . [S.l.: s.n.], 2017. p. 572–576. Cited 2 times in pages 50 e 51.

65 YOKOTANI, T. Requirements on the iot communication platform and its standardization. In: *2017 Japan-Africa Conference on Electronics, Communications and Computers (JAC-ECC)*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1–4. Cited 2 times in pages 52 e 53.

66 ÇORAK, B. et al. Comparative analysis of iot communication protocols. In: . [S.l.: s.n.], 2018. p. 1–6. Cited 2 times in pages 52 e 53.

67 GHOSH, S.; SEETHARAMAN, S. Mechanism for adaptive and context-aware inter-iot communication. In: . [S.l.: s.n.], 2015. p. 1–6. Cited 2 times in pages 52 e 53.

68 BARNAGHI, P. et al. Semantics for the internet of things: Early progress and back to the future. *International Journal on Semantic Web Information Systems*, v. 8, 01 2012. Cited on page. 54.

69 DE, S. et al. An internet of things platform for real-world and digital objects. *Scalable Computing: Practice and Experience*, v. 13, 2012. Cited on page. 54.

70 BARNAGHI, P. et al. Sense and sens' ability: Semantic data modelling for sensor networks. *Conference Proceedings of ICT Mobile Summit 2009*, 01 2009. Cited on page. 54.

71 CORCHO, O.; CASTRO, R. G. Five challenges for the semantic sensor web. *Semantic Web*, v. 1, 04 2010. Cited on page. 55.

72 GHOBAKHLOO, M. Industry 4.0, digitization, and opportunities for sustainability. *Journal of Cleaner Production*, v. 252, 2020. Cited 2 times in pages 56 e 57.

73 GUPTA, P. Modularity enablers: a tool for industry 4.0. *Life Cycle Reliability and Safety Engineering*, 11 2018. Cited 2 times in pages 56 e 57.

74 KUBOTA, F.; MIKKOLA, J.; MIGUEL, P. Theoretical analysis of the relationships between modularity in design and modularity in production. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 89, p. 1–16, 03 2017. Cited 2 times in pages 56 e 57.

75 SOLUTIONS, S. W. T. . InSight* – digital asset monitoring. 2016. Cited 2 times in pages 63 e 75.

76 SOLUTIONS, S. W. T. . SUEZ's InSight* technology provides operational efficiency cost savings for middle east oil gas operator. 2015. Cited 2 times in pages 64 e 75.

77 SIEMENS. MindSphere. 2018. Cited 2 times in pages 65 e 75.

78 EUROPEAN UNION. *SEMIoTICS Project*. Disponível em: <https://www.semiotics-project.eu>. Acesso em: 12 fev. 2020. Cited 3 times in pages 68, 75 e 83.

79 PETROULAKIS, N. et al. Semiotics architectural framework: End-to-end security, connectivity and interoperability for industrial iot. In: . [S.l.: s.n.], 2019. Cited 2 times in pages 69 e 75.

80 IBM. *IBM Industrie 4.0*. Disponível em: <https://www.ibm.com/cloud/architecture/architectures/iot_industrie_40>. Acesso em: 10 fev. 2020. Cited 2 times in pages 70 e 75.

81 LU, Y.; RIDDICK, F.; IVEZIC, N. The paradigm shift in smart manufacturing system architecture. In: . [S.l.: s.n.], 2016. p. 767–776. Cited 2 times in pages 70 e 75.

82 Y. LU and KC. MORRIS and S. FRECHETTE. Current Standards Landscape for Smart Manufacturing Systems. 2016. Cited 2 times in pages 71 e 75.

83 MINISTRY OF INDUSTRY AND INFORMATION TECHNOLOGY OF CHINA AND STANDARDIZATION ADMINISTRATION OF CHINA. National Intellegent Manufacturing Standards Architecture Construction Guidance. 2015. Cited 2 times in pages 72 e 75.

84 WEI, S. et al. The essential elements of intelligent manufacturing system architecture. In: *2017 13th IEEE Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1006–1011. Cited 2 times in pages 73 e 75.

85 LIN, S.; SIMMON, E.; MELLOR, S. Industrial Internet of Things Volume G4: Security Framework. In: INDUSTRIAL INTERNET CONSORTIUM. [S.l.], 2016. Cited on page. 75.

86 JOSHI, R.; DIDIER, P.; MELLOR, S. The Industrial Internet of Things Volume G5: Connectivity Framework. In: INDUSTRIAL INTERNET CONSORTIUM. [S.l.], 2018. Cited on page. 75.

87 JOCHEM, M.; KLASEN, W.; LINKE, L. Security in RAMI 4.0. In: PLATTFORM INDUSTRIE 4.0. *Guideline*. [S.l.], 2016. Cited on page. 75.

88 PLATTFORM INDUSTRIE 4.0. Which criteria do Industrie 4.0 products need to fulfil? . In: PLATTFORM INDUSTRIE 4.0. *Guideline*. [S.l.], 2019. Cited on page. 75.

89 GE DIGITAL. *Product Documentation Predix Platform*. Disponível em: <https://www.ge.com/digital/product-documentation>. Acesso em: 10 mar. 2020. Cited on page. 75.

90 OPENPNP. *Developers Guide*. Disponível em: <https://www.https://github.com/openpnp/openpnp/wiki/Developers-Guide>. Acesso em: 05 mar. 2020. Cited on page. 75.

91 IBM. *Industrie 4.0 reference architecture*. Disponível em: <https://www.ibm.com/cloud/architecture/architectures/iotArchitecture/reference-architecture>. Acesso em: 10 fev. 2020. Cited on page. 75.

92 MORRIS, K.; FRECHETTE, S.; LU, Y. Standards landscape and directions for smart manufacturing systems. In: *2015 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)*. [S.l.: s.n.], 2015. Cited on page. 75.

93 OPC FOUNDATION. *Open Platform Communications Unified Architecture*. Disponível em: <https://opcfoundation.org/about/opc-technologies/opc-ua/>. Acesso em: 05 mar. 2020. Cited on page. 81.

94 INTERNATIONAL SOCIETY OF AUTOMATION. *New ISA/IEC 62443 standard specifies security capabilities for control system components*. Disponível em: <https://www.isa.org/intech/201810standards/>. Acesso em: 05 mar. 2020. Cited on page. 82.