



PROJETO DE GRADUAÇÃO

**PROPOSTA DE UMA ARQUITETURA ORIENTADA À
SAÚDE 4.0 PARA O PLANEJAMENTO E A GESTÃO DE UM
DEPARTAMENTO DE EMERGÊNCIA HOSPITALAR**

Por,
Lucas Caldas Danelon Lopes

Brasília, 08 de dezembro de 2020.

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia de Produção

PROJETO DE GRADUAÇÃO

**PROPOSTA DE UMA ARQUITETURA ORIENTADA À
SAÚDE 4.0 PARA O PLANEJAMENTO E A GESTÃO DE UM
DEPARTAMENTO DE EMERGÊNCIA HOSPITALAR**

Por,

Lucas Caldas Danelon Lopes

Relatório submetido como requisito parcial para obtenção
do grau de Engenheiro de Produção

Banca Examinadora

Prof. Dr. Clóvis Neumann, UnB/EPR (Orientador) _____
Prof. Dr. Reinaldo Crispiniano Garcia, UnB/EPR _____
Prof. Dr. Annibal Affonso Neto, UnB/EPR _____
Prof. Me. Michael Machado, Unicamp/EPR _____

FICHA CATALOGRÁFICA

CALDAS DANELON LOPES, LUCAS

PROPOSTA DE UMA ARQUITETURA ORIENTADA À SAÚDE 4.0 PARA O PLANEJAMENTO E A GESTÃO DE UM DEPARTAMENTO DE EMERGÊNCIA HOSPITALAR. [Distrito Federal] 2020.

(EPR/FT/UnB, Engenheiro, Engenheiro de Produção, 2020).

Trabalho de conclusão de curso – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia de Produção.

- | | |
|--------------------------------|--|
| 1. Saúde 4.0 | 2. Modelo de Arquitetura de Referência |
| 3. Quarta Revolução Industrial | 4. Sistema Ciber-Físico |
| 5. Gêmeo Digital | |

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

CALDAS DANELON LOPES, LUCAS. *PROPOSTA DE UMA ARQUITETURA ORIENTADA À SAÚDE 4.0 PARA O PLANEJAMENTO E A GESTÃO DE UM DEPARTAMENTO DE EMERGÊNCIA HOSPITALAR*. Trabalho de conclusão de curso, Departamento de Engenharia de Produção, Universidade de Brasília, Brasília, DF.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: LUCAS CALDAS DANELON LOPES

TÍTULO: PROPOSTA DE UMA ARQUITETURA ORIENTADA À SAÚDE 4.0 PARA O PLANEJAMENTO E A GESTÃO DE UM DEPARTAMENTO DE EMERGÊNCIA HOSPITALAR.

GRAU: Engenheiro em Engenharia de Produção ANO: 2020

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias deste projeto final de graduação e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desse projeto final de graduação pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Dedicatória

Your design is some degree wrong, probably a lot more than you think, and your goal is to make it less wrong over the time.

- Elon Musk

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus por me iluminar durante toda a minha jornada. Agradeço aos meus pais, Paulo e Deusiane, por me proporcionarem um ambiente de paz e alegria dentro de casa e por todo o suporte que sempre me ofereceram. Ao meu irmão vitor, que sempre acha um jeito de simplificar as coisas que eu insisto em complicar. À minha família como um todo, um muito obrigado.

Agradeço ao meu orientador Prof. Clóvis Neumann pela confiança e compromisso com o projeto desde o início, pela sua disponibilidade para realizarmos várias reuniões de alinhamento, pela participação em conjunto em uma conferência internacional, pela pontualidade e, principalmente, por acreditar em mim e que seria possível criarmos algo novo.

Agradeço ao Prof. Michael Machado pelos vários conselhos e apontamentos sobre a pesquisa e por disponibilizar o software FlexSim durante todo o período do projeto, só assim foi possível entender o que de fato funcionaria na prática.

Aos meus colegas de trabalho do laboratório Universal Internet of Things (Cássio F., Francisco L., Lucas M.) um muito obrigado por todos os esclarecimentos técnicos.

Aos meus amigos (Ana L., Arthalides P., Bruna R., Caio O., Gustavo L., Henrique G., Isabel V., João P., José C., Milena R., Pedro P., Rafael P., Rodrigo B., Vitor A., e tantos outros) um muito obrigado pela paciência para me ouvir e discutir sobre esse projeto, sem vocês não seria possível desenvolvê-lo da mesma forma. Vale ressaltar a quantidade de pomodoros feitos. Contabilizados, foram mais de trezentos e cinquenta.

Agradeço à Universidade de Brasília e ao curso de Engenharia de Produção como um todo por proporcionar um ambiente próspero para desenvolver a ciência. É impossível mensurar todos os ensinamentos que esse ambiente me proporcionou. Espero que eu retribua positivamente à sociedade, de alguma forma, com tudo o que me foi ensinado.

Lucas Caldas Danelon Lopes.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	18
1.1 Problema da Pesquisa.....	20
1.2 Justificativa.....	20
1.3 Objetivos	21
1.3.1 Objetivo geral.....	21
1.3.2 Objetivos específicos.....	21
1.4 Limitações da pesquisa	21
1.5 Estrutura do trabalho.....	22
2 METODOLOGIA.....	23
2.1 Classificação da pesquisa	23
2.1.1 Natureza	23
2.1.2 Abordagem do problema.....	24
2.1.3 Objetivo.....	26
2.1.4 Procedimento técnico	27
3 REFERENCIAL TEÓRICO	36
3.1 Revoluções industriais passadas e a saúde pública.....	36
3.2 Quarta revolução industrial.....	37
3.2.1 Principais iniciativas estratégicas.....	40
3.2.2 Integração ciber-física	50
3.2.3 Internet das coisas	69
3.2.4 Big data analytics	73
3.2.5 Computação em nuvem, em nevoeiro e de borda	74
3.3 Saúde 4.0	77
4 ARQUITETURA H4.0A – <i>Health 4.0 Oriented Architecture</i>	78
4.1 Terminologia	78
4.1.1 Ativo.....	78
4.1.2 Entidade.....	78
4.1.3 Gêmeo digital	79
4.1.4 Sistema ciber-físico	80

4.2	Convergência e comunicação entre os mundos físico e virtual.....	81
4.3	Modelos de referência para a construção da arquitetura H4.0A	84
4.4	Camadas da arquitetura H4.0A.....	85
4.4.1	Fluxo de pacientes	87
4.4.2	Camada física	88
4.4.3	Camada virtual	96
4.4.4	Camada de conversão.....	100
4.4.5	Camada de análise.....	104
4.4.6	Camada de serviços	107
4.4.7	Visão geral da arquitetura H4.0A.....	108
4.5	Aplicação em um departamento de emergência hospitalar	110
4.5.1	Aplicação do fluxograma	110
4.5.2	Aplicação da camada física	111
4.5.3	Aplicação da camada virtual	113
4.5.4	Aplicação da camada de dados.....	114
4.5.5	Aplicação da camada de análise.....	114
4.5.6	Aplicação da camada de serviços.....	114
4.5.7	Visão geral da arquitetura aplicada	114
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	116
	REFERÊNCIAS.....	119
	APÊNDICE A – Classificação de autores, países e instituições.....	131
	APÊNDICE B – Principais estudos no contexto da saúde 4.0	133
	APÊNDICE C – Aplicação da camada física: leitor RFID ligado à nuvem	135
	APÊNDICE D – Aplicação da camada virtual no <i>FlexSim Healthcare</i>	136
	ANEXO A – Sumário do <i>e-Dashboard</i> do Hospital Johns Hopkins.....	139
	ANEXO B – Composição A do <i>e-Dashboard</i> do Hospital Johns Hopkins.....	140
	ANEXO C – Composição B do <i>e-Dashboard</i> do Hospital Johns Hopkins.....	141

RESUMO

Os sistemas de saúde mundiais foram sobrecarregados durante a pandemia que se iniciou em 2019. Para evitar futuros colapsos nesses sistemas e tendo em vista o alto nível de complexidade dos ambientes hospitalares, propõe-se uma pesquisa sobre como utilizar tecnologias e conceitos emergentes da quarta revolução industrial, a fim de criar uma arquitetura de sistema que seja adaptável às mudanças e capaz de analisar a complexidade informacional de um departamento de emergência hospitalar. Para tanto, é necessário definir: se as principais tecnologias, conceitos e modelos de arquitetura de referência da quarta revolução industrial são aplicáveis à saúde; como ocorre o fluxo de dados em um ambiente hospitalar; e como é possível estruturar uma arquitetura de sistema que auxilie os provedores de saúde nas tomadas de decisões e na alocação eficiente dos recursos hospitalares. Com esses propósitos, uma pesquisa de natureza aplicada, de abordagem combinada, com objetivo exploratório e que usa o procedimento técnico de pesquisa bibliográfica foi desenvolvida. Diante disso, os resultados mostram que os conceitos da quarta revolução industrial podem ser aplicados no contexto da saúde para criar uma arquitetura orientada à saúde 4.0, além de analisar o fluxo dos dados de um departamento de emergência hospitalar desde sua aquisição até a sua visualização e exemplificar a aplicação da arquitetura nesse departamento utilizando tecnologias disponíveis no mercado.

Palavras-chave: Gêmeo Digital. Modelos de Arquitetura de Referência. Quarta Revolução Industrial. Saúde 4.0. Sistemas Ciber-Físicos.

ABSTRACT

Healthcare systems have been overwhelmed due to a pandemic outbreak in 2019. To avoid future collapses in these systems and considering their high complexity, a research is needed to discover how to utilize emergent technologies and concepts of the fourth industrial revolution to create a system architecture that is adaptable and able to analyze the information flow in a hospital emergency department. Therefore, it is necessary to define if the main technologies, concepts and reference models of the fourth industrial revolution are appropriate to the healthcare environment; how the data flow occurs in an emergency department and if it is possible to develop a system architecture that empower clinical staff with information to improve their decision-making and make the best use of hospital resources. Considering that, a research was made and structured as applied nature, using a combined approach, with exploratory objective and applying the bibliometric research as its technical procedure. The results show that the concepts of the fourth industrial revolution can be applied in healthcare to create a theoretical architecture for health 4.0, analyze its data flow and apply it in an hospital emergency department using available technologies in the market.

Keywords: Cyber-Physical Systems. Digital Twin. Fourth Industrial Revolution. Health 4.0. Reference Architectural Model.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fontes do procedimento técnico de pesquisa bibliográfica.....	28
Figura 2 – Resumo do procedimento técnico utilizado na pesquisa.....	35
Figura 3 – Os estágios das revoluções industriais e sua relação com as ondas da saúde.	38
Figura 4 – Modelos de arquiteturas de referência de acordo com seus países de origem.	40
Figura 5 – Modelo de arquitetura de referência para a Indústria 4.0.....	42
Figura 6 – Etapas de evolução para a transformação digital.	43
Figura 7 – Modelo de arquitetura de referência para a internet industrial.	44
Figura 8 – Iniciativa estratégica Made in China 2025.....	45
Figura 9 – Estrutura da Arquitetura de Sistema de Manufatura Inteligente.....	46
Figura 10 – Níveis de interoperabilidade de sistemas de TI na saúde.....	47
Figura 11 – Alinhamento entre as arquiteturas IIRA e RAMI 4.0.	48
Figura 12 – Alinhamento entre as arquiteturas RAMI 4.0 e IMSA.	49
Figura 13 – IIoT como uma força transformadora que conduz a convergência da IT e OT. ...	49
Figura 14 – Ramificações de CPS.	51
Figura 15 – Mapa conceitual de CPS.	52
Figura 16 – Arquitetura 5C CPS.	53
Figura 17 – Arquitetura CPeSC ³	55
Figura 18 – Arquitetura Health-CPS.	56
Figura 19 – Arquitetura de um MCPS.....	57
Figura 20 – Conceito de Digital Twin de 3 dimensões.	59
Figura 21 – História do DT.....	59
Figura 22 – Setores de aplicação de DT.	60
Figura 23 – Nuvem de palavras das definições de DT.	61
Figura 24 – Modelo conceitual do DT de 5 dimensões.	62
Figura 25 – Estrutura de ferramentas para gêmeos digitais.....	63
Figura 26 – Modelo de DT aplicado à saúde de idosos.....	64
Figura 27 – Nível de unidade de um CPS-DT.....	65
Figura 28 – Nível de sistema de um CPS-DT.	66
Figura 29 – Nível de sistema de sistemas de um CPS-DT.	67
Figura 30 – Arquitetura DTDL-CPS.	68
Figura 31 – Modelo de referência ISO / OSI.....	70
Figura 32 – Visão geral dos setores de aplicação da IoT.	71

Figura 33 – Elementos que compõe a IoT.....	72
Figura 34 – Arquitetura IoT-CPS-DT.	72
Figura 35 – Relação entre níveis de sistema e computação de borda, nevoeiro e em nuvem. .	74
Figura 36 – Computação em Nuvem.....	75
Figura 37 – Computação em Nevoeiro.....	76
Figura 38 – Principais tipos, formatos, protocolos de comunicação e aplicação dos dados. ...	77
Figura 39 – Comparação entre ativos e entidades na arquitetura.	79
Figura 40 – DT no contexto da saúde 4.0.....	80
Figura 41 – CPS no contexto da saúde 4.0.	81
Figura 42 – Jornada da transformação digital.	82
Figura 43 – Transformação digital na área da saúde.	82
Figura 44 – Convergência entre IT e OT.....	83
Figura 45 – Interoperabilidade entre os modelos de arquitetura de referência.	84
Figura 46 – Relação entre as aplicações da arquitetura IIRA (IIC) e RAMI 4.0 (I4.0).	84
Figura 47 – Representação das arquiteturas de acordo com o seu nível de sistema.....	86
Figura 48 – Relações entre a arquitetura IIRA e o modelo proposto.	87
Figura 49 – Modelo generalista do fluxo de pacientes em um departamento de emergência. .	88
Figura 50 – Diferença entre os conjuntos de entidades da camada física.	89
Figura 51 – Equipamentos hospitalares segundo o FNS.	90
Figura 52 – Equipamentos auxiliares segundo o FNS.....	90
Figura 53 – Principais protocolos de comunicação, formatos e tipos de dados na saúde.	92
Figura 54 – Relação entre D_{EFEH} e a função Ft.	93
Figura 55 – Relação entre a frequência de alteração de D_{EFEH} ao longo do tempo.....	94
Figura 56 – Camada física da arquitetura.	95
Figura 57 – Níveis de gêmeos digitais na área da saúde.	97
Figura 58 – Exemplo real de uma unidade de DT.....	98
Figura 59 – Exemplo de virtualização de uma empresa utilizando o software FlexSim.	98
Figura 60 – Camada virtual da arquitetura.	100
Figura 61 – Camada de conversão de dados.	102
Figura 62 – Camada de conversão.....	104
Figura 63 – Tipos de serviços em nuvem.	105
Figura 64 – Camada de análise.....	106
Figura 65 – Camada de serviços.....	108
Figura 66 – Visão holística da arquitetura H4.0A.....	109

Figura 67 – Exemplo de aplicação do fluxograma.	110
Figura 68 – Pulseiras baseadas em RFID.	111
Figura 69 – Exemplos de dispositivos para monitoramento de sinais vitais.	112
Figura 70 – Exemplo de utilização da função tempo.	112
Figura 71 – Modelagem da camada virtual usando o <i>software</i> FlexSim Healthcare.	113
Figura 72 – Fluxograma virtual dos pacientes.....	113
Figura 73 – Database Connector do <i>software</i> Flexsim Healthcare.	114
Figura 74 – Arquitetura H4.0A aplicada.	115
Figura 75 – Leitor de RFID vinculado à um SaaS.	135
Figura 76 – Fluxograma virtual do paciente.....	136
Figura 77 – Continuação do fluxograma virtual do paciente.	137
Figura 78 – Modelagem da camada virtual	138
Figura 79 – Sumário do <i>e-Dashboard</i> do Hospital Johns Hopkins.	139
Figura 80 – Composição A do <i>e-Dashboard</i> do Hospital Johns Hopkins.....	140
Figura 81 – Composição B do <i>e-Dashboard</i> do Hospital Johns Hopkins.....	141

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resultados da fórmula de score para um artigo.....	31
---	----

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Principais iniciativas estratégicas da quarta revolução industrial	39
Quadro 2 – Camadas das arquiteturas segundo o seu nível de sistema	85
Quadro 3 – Possíveis protocolos de comunicação a serem utilizados na arquitetura.....	101
Quadro 4 – Classificação dos principais autores, países e instituições da Quarta Revolução Industrial.....	131
Quadro 5 – Classificação dos principais autores, países e instituições da Indústria 4.0.	131
Quadro 6 – Classificação dos principais autores, países e instituições de Sistemas Ciber-Físicos.	132
Quadro 7 – Classificação dos principais autores, países e instituições de Gêmeo Digital.....	132
Quadro 8 – Classificação dos principais autores, países e instituições de Internet das Coisas.	132
Quadro 9 – Principais estudos e aplicações para a elaboração de uma arquitetura no contexto da saúde 4.0	133

LISTA DE SIGLAS

4IR	– <i>Fourth Industrial Revolution</i>
API	– <i>Application Programming Interface</i>
ATS	– <i>Australasian Triage Scale</i>
AWS	– <i>Amazon Web Services</i>
BLE	– <i>Bluetooth Low Energy</i>
C-CDA	– <i>Consolidated Clinical Document Architecture</i>
CID-10	– <i>Classificação Internacional de Doenças e Problemas Relacionados à Saúde</i>
CIRP	– <i>The International Academy for Production Engineering</i>
CN	– <i>Connection</i>
CPeSC ³	– <i>Cyber Physical Enhanced Secured WSN-integrated Cloud Computing</i>
CPPS	– <i>Cyber-Physical Production Systems</i>
CPS	– <i>Cyber-Physical Systems</i>
CRM	– <i>Customer Relationship Management</i>
D _c	– <i>Dados Cadastrais</i>
DD	– <i>Digital Twin Data</i>
DFS	– <i>Distributed File System</i>
DL	– <i>Deep Learning</i>
DPC	– <i>Distributed Parallel Computing</i>
DT	– <i>Digital Twin</i>
EC2	– <i>Elastic Compute Cloud</i>
ECG	– <i>Electrocardiogram</i>
EFEH	– <i>Entidade Física de um Elemento Humano</i>
EFEM	– <i>Entidade Física de um Elemento Material</i>
EFEMa	– <i>Entidade Física de um Elemento Material auxiliar</i>
EFEMh	– <i>Entidade Física de um Elemento Material hospitalar</i>
EHR	– <i>Electronic Health Record</i>
ERP	– <i>Enterprise Resource Planning</i>
ESI	– <i>Emergency Severity Index</i>
FHIR	– <i>Fast Healthcare Interoperability Resources</i>
Ft	– <i>Função do Fluxo de Tempo do Paciente</i>
H4.0A	– <i>Health 4.0 Oriented Architecture</i>

HEART	– <i>Health Relationship Trust</i>
HIMSS	– <i>Healthcare Information and Management Systems Society</i>
HL7	– <i>Health Level 7</i>
HRM	– <i>Human Resource Management</i>
I4.0	– <i>Industry 4.0</i>
IaaS	– <i>Infrastructure as a Service</i>
ICME	– <i>Intelligent Computation in Manufacturing Engineering</i>
ICR	– <i>Índice de Classificação de Risco</i>
IEEE	– <i>The Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IHE	– <i>Integrating the Healthcare Enterprise</i>
IIC	– <i>Industrial Internet Consortium</i>
IICF	– <i>Industrial Internet Connectivity Framework</i>
IIoT	– <i>Industrial Internet of Things</i>
IIRA	– <i>Industrial Internet Reference Architecture</i>
IMSA	– <i>Intelligent Manufacturing System Architecture</i>
IoT	– <i>Internet of Things</i>
IP	– <i>Internet Protocol</i>
ISO	– <i>International Organization for Standardization</i>
IT	– <i>Information Technology</i>
IVI	– <i>Industrial Value Chain Initiative</i>
IVRA	– <i>Smart Manufacturing Reference Architecture</i>
KPI	– <i>Key Performance Indicator</i>
LOS	– <i>Length of Stay</i>
MAR	– <i>Modelo de Arquitetura de Referência</i>
MCPS	– <i>Medical Cyber-Physical Systems</i>
M _{DT}	– <i>Digital Twin Model</i>
MIC 2025	– <i>Made in China 2025</i>
MIIT	– <i>Ministry of Industry and Information Technology of China</i>
MPLS	– <i>Multiprotocol Label Switching</i>
MPP	– <i>Método de Produtividade de Pesquisa</i>
MTBF	– <i>Mean Time Between Failures</i>
MTS	– <i>Manchester Triage System</i>
MTTF	– <i>Mean Time to Failure</i>

NASA	– <i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NFC	– <i>Near Field Communication</i>
NHS	– <i>National Health Service</i>
NIST	– <i>National Institute of Standards and Technology</i>
OPC UA	– <i>Open Platform Communications Unified Architecture</i>
OSI	– <i>Open Systems Interconnection model</i>
OT	– <i>Operational Technology</i>
PaaS	– <i>Platform as a Service</i>
PE	– <i>Physical Entity</i>
PMDP	– <i>Prescription Drug Monitoring Program</i>
QoS	– <i>Quality of Service</i>
RAH	– <i>Reference Architecture for IoT-based Healthcare Applications</i>
RAMI 4.0	– <i>Reference Architectural Model for Industrie 4.0</i>
RFID	– <i>Radio Frequency Identification</i>
RRI	– <i>Robot Revolution Initiative</i>
RTLS	– <i>Real-Time Locating System</i>
SaaS	– <i>Software as a Service</i>
SAP	– <i>Systeme, Anwendungen und Produkte in der Datenverarbeitung</i>
Ss	– <i>Services</i>
SUS	– <i>Sistema Unificado de Saúde</i>
Sv	– <i>Sinais Vitais</i>
TCP	– <i>Transmission Control Protocol</i>
TEMAC	– <i>Teoria do Enfoque Metaanalítico Consolidado</i>
TSN	– <i>Time-Sensitive Networking</i>
UDP	– <i>User Datagram Protocol</i>
UIoT	– <i>Universal Internet of Things Laboratory</i>
VE	– <i>Virtual Entity</i>
WBAN	– <i>Wireless Body Area Network</i>
WLAN	– <i>Wireless Local Area Network</i>
WP	– <i>Work in Progress</i>
WPAN	– <i>Wireless Personal Area Network</i>
WSN	– <i>Wireless Sensor Networks</i>

1 INTRODUÇÃO

As revoluções industriais passadas mudaram o mundo. Esse fenômeno ocorre quando novas tecnologias e novas formas de perceber o mundo desencadeiam uma alteração profunda nas estruturas sociais e nos sistemas econômicos (SCHWAB, 2016).

Hodiernamente, a sociedade está no início de sua quarta revolução industrial. Alguns países já criaram suas iniciativas estratégicas para esta revolução. A Alemanha, por exemplo, busca manter sua liderança mundial na indústria manufatureira a partir da iniciativa denominada indústria 4.0 (KAGERMANN; WAHLSTER; HELBIG, 2013).

Já a China propôs um plano de três etapas para transformar o país em uma potência industrial manufatureira até 2049 denominado *Made in China 2025* (CHINA, 2015). Outros países também já indicaram ações para sua reestruturação industrial, os Estados Unidos a partir do *Industrial Internet Consortium* e do *National Institute of Standards and Technology*, o Japão com a *Robot Revolution Initiative*, entre outras.

Tais iniciativas estratégicas possuem abordagens mais específicas para a manufatura, mas também influenciam em outros setores da sociedade como a área da saúde, serviços financeiros, segurança pública, setor de energia, entre outros (CONSORTIUM, 2020).

Cada uma dessas iniciativas busca, da sua própria forma, analisar o processo de evolução industrial por intermédio da criação de modelos de referência para avanços na quarta revolução industrial com o objetivo de aumentar a competitividade global e se destacar como líder na atual revolução industrial.

Os modelos de arquitetura de referência mais disseminados até dado momento são o *Reference Architectural Model for Industrie 4.0* da Alemanha e o *Industrial Internet Reference Architecture* dos Estados Unidos como seus modelos para a implementação da internet industrial.

Além das iniciativas estratégicas e dos modelos de arquitetura de referência evidenciados acima, vale ressaltar as principais tecnologias emergentes desta revolução. No entanto, deve-se pensar nessas tecnologias de uma forma sistêmica, uma vez que elas podem permitir que sistemas com melhores desempenhos sejam implementados (SCHWAB; DAVIS, 2017, p. 45).

Os recentes avanços na indústria manufatureira abriram a possibilidade do desenvolvimento de sistemas ciber-físicos, dentro do qual informações de várias perspectivas

da indústria são monitoradas e sincronizadas entre o chão de fábrica físico e o espaço cibernético computacional (LEE; BAGHERI; KAO, 2015).

Segundo Schwab e Davis (2017), as principais tecnologias que irão moldar a quarta revolução são: computação quântica, *blockchain*, internet das coisas, inteligência artificial e robótica, materiais modernos, manufatura aditiva, biotecnologias, neurotecnologias, realidades virtual e aumentada, transmissão de energia, geoengenharia e tecnologias espaciais.

A Gartner, empresa mundial líder em pesquisa e consultoria, definiu em seus relatórios de 2017, 2018 e 2019 que uma das tendências de tecnologias estratégicas para os próximos anos é a tecnologia denominada gêmeo digital (GARTNER, 2016, 2017, 2018).

O tamanho do mercado global de gêmeos digitais deve chegar a 26,07 bilhões de dólares até 2025, com uma taxa composta de crescimento anual de 38,2% (VIEW, 2018). Essa tecnologia vem ganhando popularidade porque surge como uma forma prática de integrar os mundos físico e cibernético (LEE *et al.*, 2020; TAO; ZHANG; NEE, 2019, p. 3).

Diante do cenário pandêmico iniciado em 2019 (CIMERMAN *et al.*, 2020; GUAN *et al.*, 2020; HUANG *et al.*, 2020), surgiu uma demanda de melhorar os sistemas de saúde mundial, pois estes colapsaram (LEMOS *et al.*, 2020).

A IBM (2008) declarou, em sua cartilha para uma planeta mais inteligente, que os sistemas de saúde hodiernos são antiquados, pois não existe ligação entre os diagnósticos médicos às descobertas de medicamentos, aos provedores de saúde, às seguradoras, aos pacientes e à comunidade, enquanto que o volume e a velocidade em que os dados são proliferados sobrecarrega os sistemas e os profissionais da saúde.

Algumas iniciativas para revolucionar o sistema de saúde atual estão sendo propostas, como o hospital do futuro da *General Electric* (GE HEALTHCARE, 2009) e o projeto do sistema de saúde nacional britânico (NHS) em parceria com a consultoria Hitachi para criar um centro digital de controle hospitalar (HITACHI, 2019).

Diante da crise de saúde pública imposta pela pandemia iniciada em 2019, é mais do que necessária uma aceleração na quinta onda da saúde, na qual os sistemas de saúde são considerados como sistemas complexos e imprevisíveis (HANLON *et al.*, 2011).

Assim, diante da imprevisibilidade e da complexidade dos sistemas de saúde, deve-se criar um modelo que esteja de acordo com as tecnologias e conceitos emergentes da quarta revolução industrial com o intuito de prover informações acuradas sobre o sistema aos provedores de saúde, melhorar a experiência do paciente e impulsionar a eficiência do hospital assegurando que seus ativos físicos estão sendo usados da melhor maneira possível, para responder ao seguinte questionamento:

A vida moderna está saturada de dados e tecnologias que estão emergindo a cada dia, mas como é possível usar essas inovações para fazer uma diferença real no mundo quando ele mais precisa?

1.1 Problema da Pesquisa

A quarta revolução industrial está em seus primeiros estágios e é necessário contribuir com diálogos estratégicos e criar teorias relativas à junção das tecnologias emergentes para ajudar a modelar ativamente os principais sistemas da sociedade. Assim, esta pesquisa visa responder:

Quais os impactos dos modelos de arquitetura de referência, conceitos e tecnologias da quarta revolução industrial ao serem aplicados na área da saúde?

1.2 Justificativa

Dado o alto nível de complexidade dos sistemas da área da saúde, os quais são imprevisíveis e sensíveis às pequenas mudanças, é necessário utilizar tecnologias e criar sistemas que sejam adaptáveis e capazes de analisar a complexidade dessa área.

Várias tecnologias emergentes da quarta revolução industrial já estão sendo aplicadas na indústria manufatureira. Iniciativas estratégicas, como a indústria 4.0, já criaram modelos de arquitetura de referência específicos para a manufatura. Porém, existem modelos que também são compatíveis com a área de serviços da saúde.

A sobrecarga dos sistemas de saúde ocorrida durante a pandemia (INOUE; OHIRA; TAKESHITA, 2020; LEMOS *et al.*, 2020), principalmente nos departamentos de emergência e nas unidades de tratamento intensivo dos hospitais, demonstrou que existem pontos de melhoria nos sistemas de saúde hodiernos.

Portanto, é possível melhorar os modelos tradicionais de planejamento e gestão da área da saúde, transformando-os em sistemas de saúde mais inteligentes, ao migrar os conceitos e as tecnologias da quarta revolução industrial – já consolidadas na indústria manufatureira – para o setor da saúde, utilizar modelos de arquitetura de referência como guia e aplicar a arquitetura proposta em um departamento de emergência fictício para avaliar o seu funcionamento.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

Desenvolver uma proposta de arquitetura de saúde 4.0 – utilizando os conceitos, tecnologias e modelos de arquitetura de referência da quarta revolução industrial – para melhorar o planejamento e a gestão de um departamento de emergência hospitalar, fornecendo informações que auxiliem os provedores de saúde nas tomadas de decisões e na alocação eficiente dos recursos hospitalares.

1.3.2 Objetivos específicos

- a) Analisar os principais conceitos e tecnologias da quarta revolução industrial aplicáveis à saúde;
- b) Identificar as principais referências (autores, países e instituições) que descrevem os principais conceitos e tecnologias da quarta revolução industrial;
- c) Automatizar a identificação das principais referências (autores, países e instituições);
- d) Identificar os modelos de arquitetura de referência da quarta revolução industrial que podem ser aplicados à saúde;
- e) Simular um fluxo de pacientes teórico e generalista de um departamento de emergência hospitalar;
- f) Analisar o fluxo de dados no ambiente hospitalar desde sua aquisição até a sua visualização pelo usuário final;
- g) Estruturar as camadas da arquitetura de saúde 4.0 com base nas camadas dos modelos de arquitetura de referência e dos conceitos e tecnologias da quarta revolução industrial;
- h) Estabelecer as principais normas e protocolos para a arquitetura proposta;
- i) Demonstrar o funcionamento teórico da arquitetura em um departamento de emergência hospitalar com a utilização de tecnologias disponíveis no mercado.

1.4 Limitações da pesquisa

Diante das limitações físicas impostas aos ambientes hospitalares durante a pandemia que ocorreu no período de realização da pesquisa (CIMERMAN *et al.*, 2020), não foi possível

avaliar o modelo em um ambiente real. Em contrapartida, buscaram-se *stakeholders* durante o projeto para suprir os conhecimentos técnicos da área da saúde, da tecnologia operacional e da tecnologia da informação para a elaboração da arquitetura proposta.

Outro fator que delimitou a pesquisa foi a área de atuação do pesquisador. Visto o alto nível de complexidade da área da saúde e as diferentes áreas de conhecimento necessárias para a elaboração de uma arquitetura de sistema, não foi possível analisar profundamente a aplicação das teorias propostas nas camadas da arquitetura. Além disso, não houve tempo hábil para elencar e comparar as tecnologias disponíveis no mercado e definir qual conjunto de tecnologias seria mais viável para o contexto de um departamento de emergência hospitalar.

1.5 Estrutura do trabalho

Este trabalho está organizado em cinco capítulos. O primeiro consistiu na contextualização, problemática, justificativa, objetivo geral e objetivos específicos do projeto.

O segundo capítulo apresenta a fundamentação teórica e o estado da arte dos principais temas que serviram de alicerce para a compreensão e desenvolvimento do trabalho. Os principais temas foram: revoluções industriais e ondas da saúde, principais iniciativas estratégicas da quarta revolução industrial, conexão entre o mundo virtual e o mundo físico, internet das coisas, computação em nuvem, em nevoeiro e em borda e *big data analytics*, com foco nas principais aplicações na área da saúde.

O terceiro capítulo refere-se a metodologia utilizada para a elaboração da pesquisa, a qual foi classificada em quatro etapas, a saber: sua natureza, abordagem do problema, objetivos e procedimento técnico.

O quarto capítulo demonstra o desenvolvimento dos resultados do trabalho teórico-conceitual. Neste capítulo, as terminologias da quarta revolução industrial utilizadas na manufatura foram adequadas ao ambiente da saúde; um fluxo teórico de pacientes em um departamento de emergência hospitalar foi estruturado; uma arquitetura de saúde 4.0 foi proposta a partir da conexão entre modelos de arquitetura de referência, sistemas ciber-físicos, gêmeos digitais, computação em nevoeiro e normas e protocolos da tecnologia da informação; e o funcionamento da arquitetura foi exemplificado no contexto de um departamento de emergência hospitalar utilizando tecnologias disponíveis no mercado.

Por fim, o último capítulo consolida os resultados expostos na pesquisa, analisa criticamente a diferença entre as expectativas e o desenvolvimento real do projeto e propõe futuras linhas de pesquisa para o aperfeiçoamento da arquitetura.

2 METODOLOGIA

Este capítulo visa esclarecer a pesquisa quanto à sua natureza, abordagem do problema, objetivos e procedimentos técnicos utilizados para a sua elaboração com o intuito de delimitar o escopo de execução do trabalho, atribuindo autenticidade, confiabilidade e valor acadêmico ao seu desenvolvimento.

2.1 Classificação da pesquisa

De acordo com Gil (2008, p. 17) pode-se definir pesquisa como o procedimento racional e sistemático que tem como objetivo proporcionar respostas aos problemas que são propostos.

As formas clássicas de classificação das pesquisas, segundo (SILVA; MENEZES, 2004), definem a pesquisa quanto a sua:

- a) Natureza;
- b) Abordagem do problema;
- c) Objetivos;
- d) Procedimentos técnicos.

2.1.1 Natureza

Silva e Menezes (2004), definem que a natureza da pesquisa pode ser:

- a) básica: objetiva gerar conhecimentos novos úteis para o avanço da ciência sem aplicação prática prevista;
- b) aplicada: objetiva gerar conhecimento para aplicação prática e dirigidos à solução de problemas específicos.

De acordo com a Universidade do Texas (2020), a pesquisa básica é guiada pela curiosidade, tem como objetivo a expansão do conhecimento e o aumento da compreensão de princípios fundamentais. Já a pesquisa aplicada é projetada para responder perguntas específicas para a resolução de problemas práticos.

O presente estudo é de natureza aplicada, visto que objetiva criar um modelo de arquitetura para ser aplicado à área da saúde e solucionar problemas de otimização de recursos dentro de um departamento de emergência hospitalar.

2.1.2 Abordagem do problema

Miguel et al. (2018) considera que existem três tipos de abordagens para uma pesquisa na área de engenharia de produção:

- a) Abordagem quantitativa;
- b) Abordagem qualitativa;
- c) Abordagem combinada.

Silva e Menezes (2005, p. 20), define pesquisa quantitativa como a que considera que tudo pode ser quantificável, o que significa traduzir em números opiniões e informações para classificá-las e analisá-las.

De acordo com (MIGUEL *et al.*, 2018), o ato de mensurar variáveis de pesquisa é a característica mais marcante da abordagem quantitativa. Assim, nenhum subjetivismo influenciará a apreensão dos fatos no uso da indução para a geração de conhecimento.

Na abordagem quantitativa, segundo (BRYMAN, 2003), hipóteses contém conceitos que precisam ser medidos com o intuito de que tais hipóteses sejam sistematicamente testadas.

De acordo com o mesmo autor, outro aspecto é a demonstração da causalidade, pois hipóteses normalmente contém afirmações implícitas e explícitas sobre causa e efeito, sendo necessário à pesquisa demonstrar a validade de tais causalidades, tanto implícitas quanto explícitas.

A terceira preocupação da abordagem quantitativa, ainda segundo o mesmo autor, é a generalização, isto é, afirmações generalizadas das descobertas do cenário específico da pesquisa para um quadro geral.

Por fim, a capacidade de replicação das investigações realizadas na pesquisa. É necessário que um pesquisador que aplique os mesmos procedimentos usados em estudos anteriores consiga replicar os resultados para checar a validação da investigação inicial (BRYMAN, 2003). Assim, os principais aspectos da pesquisa quantitativa podem ser descritos como:

- a) medição;
- b) causalidade;
- c) generalização;
- d) replicação.

Já a abordagem qualitativa, segundo Silva e Menezes (2005, p. 20), considera que há uma relação dinâmica entre o mundo real e o sujeito, isto é, um vínculo indissociável entre o mundo objetivo e a subjetividade do sujeito que não pode ser traduzido em números.

De acordo com (MIGUEL *et al.*, 2013), a abordagem qualitativa, na pesquisa em engenharia de produção, significa que o pesquisador deve visitar a organização pesquisada fazendo observações e, sempre que possível, coletando evidências. Para (BRYMAN, 2003), as características de uma abordagem qualitativa são:

- a) adotar a postura de um colaborador da organização estudada;
- b) delimitação do contexto do ambiente de pesquisa;
- c) ênfase no processo;
- d) abordagem desestruturada em relação à orientação teórica e hipóteses;
- e) múltiplas fontes de dados: notas de campo a partir de observações, entrevistas e conversas transcritas e documentos;
- f) concepção e compreensão da realidade organizacional e de sua cultura;
- g) proximidade com o fenômeno estudado.

De acordo com (MIGUEL *et al.*, 2013), a combinação das abordagens quantitativa e qualitativa possibilita um entendimento melhor dos problemas de pesquisa que cada uma das abordagens permitiria isoladamente. Assim, a combinação permite que a vantagem de uma amenize a desvantagem da outra.

Ainda segundo o mesmo autor, a possibilidade de usar todos os métodos e técnicas de coleta de dados disponíveis das duas abordagens pode prover evidências mais abrangentes do que seria proporcionado pelas abordagens separadamente.

De acordo com (GÜNTHER, 2006), é necessário considerar os recursos materiais, temporais e pessoais disponíveis durante a pesquisa para lidar com uma determinada pergunta científica.

Assim, do ponto de vista da forma de abordagem do problema, o presente estudo é definido como uma abordagem combinada, pois serão necessários todos os recursos, métodos,

técnicas e dados disponíveis para elaborar a arquitetura proposta diante do cenário pandêmico ocorrido durante a realização da pesquisa, fato que impossibilitou a proximidade com o fenômeno estudado e que também compromete a coleta de dados.

2.1.3 Objetivo

Segundo Gil (2008, p. 41), é possível classificar as pesquisas em três grandes grupos:

- a) Exploratórias;
- b) Descritivas;
- c) Explicativas.

A pesquisa exploratória tem como objetivo proporcionar maior familiaridade com o problema, com vistas a torná-lo mais explícito ou a construir hipóteses. O objetivo principal dessa pesquisa é o aprimoramento de ideias ou a descoberta de intuições (GIL, 2008).

Segundo (MIGUEL *et al.*, 2013), a abordagem combinada do tipo exploratório é um estudo de duas fases, sendo a abordagem qualitativa aplicada primeiro, com o intento de explorar o tema de pesquisa de forma a prover subsídios para a fase quantitativa.

Além disso, segundo os mesmos autores, as principais razões para a utilização dessa abordagem é que medidas e instrumentos de pesquisa não estão disponíveis e não existe um modelo ou teoria consolidada para o desenvolvimento da pesquisa.

A pesquisa descritiva, segundo Gil (2008, p. 42), tem como objetivo primordial a descrição das características de determinada população ou fenômeno e a coleta de dados que utiliza técnicas padronizadas tais como o questionário e a observação sistemática.

A pesquisa explicativa, segundo o mesmo autor, tem como preocupação central identificar os fatores que determinam ou que contribuem para a ocorrência dos fenômenos. Esse tipo de pesquisa explica a razão; o porquê das coisas.

Dessa forma, visto que ainda não existem arquiteturas de saúde 4.0 consolidadas na literatura e que os ambientes hospitalares estavam inacessíveis durante a realização do projeto, optou-se pela pesquisa com objetivo exploratório, visando aprimorar a teoria de uma possível arquitetura baseada em modelos de arquitetura de referência da quarta revolução industrial aplicados ao contexto da saúde.

2.1.4 Procedimento técnico

De acordo com Gil (2008, p. 43), para analisar os fatos do ponto de vista empírico, para confrontar a visão teórica com os dados da realidade, torna-se necessário traçar um modelo conceitual e operativo da pesquisa. Os procedimentos técnicos podem ser definidos como:

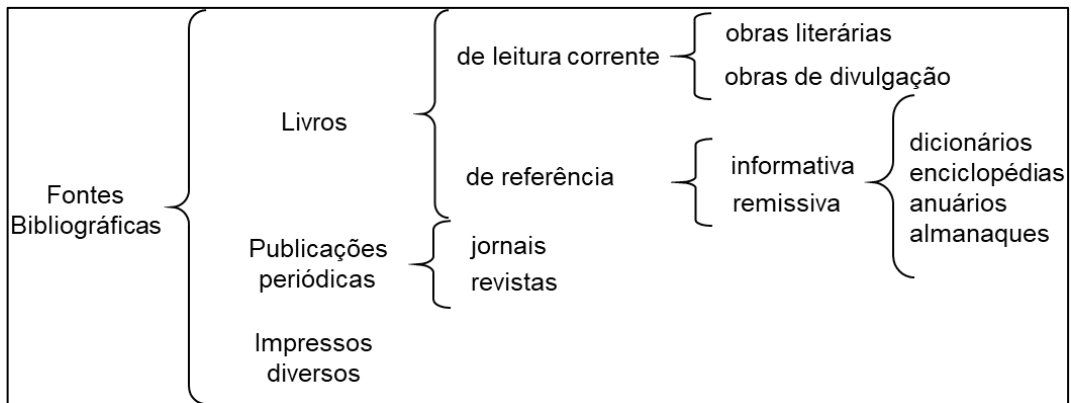
- a) pesquisa bibliográfica;
- b) pesquisa documental;
- c) pesquisa experimental;
- d) pesquisa *ex-post facto*;
- e) estudo de coorte;
- f) levantamento;
- g) estudo de campo;
- h) estudo de caso;
- i) pesquisa-ação;
- j) pesquisa participante.

Segundo (BERTO; NAKANO, 2013), as técnicas mais utilizadas nos anais do Encontro Nacional de Engenharia de Produção (ENEGEP) são:

- a) teórico-conceitual;
- b) modelagem (ou modelamento);
- c) simulação;
- d) experimento;
- e) levantamento (*survey*);
- f) estudo de caso;
- g) estudo de campo.

Gil (2008, p. 44) define que o procedimento técnico da pesquisa bibliográfica é desenvolvido com base em material já elaborado, constituído de livros e artigos científicos, sendo as principais fontes bibliográficas ilustradas na figura 1.

Figura 1 – Fontes do procedimento técnico de pesquisa bibliográfica.



Fonte: Gil (2008).

Diante das fontes bibliográficas elucidadas por Gil (2008), vale destacar principalmente as publicações periódicas de jornais e revistas científicas, como as publicadas nas plataformas *Web of Science* e *Scopus*, além dos livros de leitura corrente e de referência.

Em conformidade com o procedimento técnico pesquisa bibliográfica, a técnica teórico-conceitual, segundo (BERTO; NAKANO, 2013), utiliza-se de textos, discussões, análises e/ou proposições conceituais de natureza monográfica a partir da literatura publicada e revisões bibliográficas, sem a presença de dados de campo.

Com base nos procedimentos descritos, o procedimento técnico utilizado no presente estudo baseia-se no procedimento metodológico de pesquisa bibliográfica e na técnica teórico-conceitual, visto a incidência da última no âmbito da engenharia de produção.

De acordo com Gil (2008, p.60), a pesquisa bibliográfica pode, portanto, ser entendida como um processo que envolve as seguintes etapas:

- a) Escolha do tema;
- b) Levantamento bibliográfico preliminar;
- c) Formulação do problema;
- d) Elaboração do plano provisório do assunto;
- e) Busca das fontes;
- f) Leitura do material;
- g) Fichamento;
- h) Organização lógica do assunto;
- i) Redação do texto.

2.1.4.1 Escolha do tema

Os principais questionamentos para a escolha do tema levantados por Gil (2008, p. 60) e adaptado ao contexto da engenharia de produção são:

- a) Quais as subáreas da engenharia de produção de maior interesse para o pesquisador?
- b) Quais os temas que mais instigam o pesquisador?
- c) De tudo o que o pesquisador tem estudado, o que lhe dá mais vontade de se aprofundar e pesquisar?

Visto isso, as principais subáreas da engenharia de produção escolhidas foram: pesquisa operacional, planejamento e controle da produção e simulação de sistemas.

O principal tema foi a aplicação de modelos e estruturas da quarta revolução industrial no contexto da saúde que, de acordo com Schwab (2018, p. 14), tem foco em conceitos e tecnologias como: transformação digital, sistemas ciber-físicos, computação quântica, *blockchain*, internet das coisas, inteligência artificial e robótica, manufatura aditiva, realidade virtual e aumentada, entre outras.

O principal foco de estudo aprofundado foi, primeiramente, em sistemas ciber-físicos (CPS). Após, houve um aprofundamento da pesquisa em sistemas de produção ciber-físicos (CPPS), gêmeos digitais (DT), internet das coisas (IoT), computação em nuvem e *big data analytics* na área da saúde.

2.1.4.2 Levantamento bibliográfico preliminar

Segundo Gil (2008, p. 61), é muito importante esclarecer os principais conceitos que envolvem o tema de pesquisa, procurar um contato com trabalhos de natureza teórica capazes de proporcionar explicações a respeito, bem como pesquisas recentes que abordaram o assunto.

Segundo Mariano e Rocha (2017), a revisão bibliográfica pode ser dividida em quatro tipos, a saber: revisão qualitativa, revisão integrativa, revisão sistemática e meta-análises.

Durante o decorrer do trabalho, dois principais métodos de revisão de literatura foram utilizados. Primeiramente, foi utilizada a Teoria do Enfoque Meta-Analítico Consolidado (TEMAC) e, por fim, o Método de Produtividade de Pesquisa.

O TEMAC utiliza abordagens da revisão qualitativa, integrativa e sistemática e consiste em três etapas: preparação da pesquisa (múltiplas bases de dados), apresentação e interrelação dos dados, detalhamento, modelo integrador e validação por evidências (MARIANO; ROCHA SANTOS, 2017).

Com esse método, Lopes *et al.* (2019) realizou um estudo com o intuito de consolidar a literatura de impacto de CPS presente nas plataformas científicas WoS e Scopus entre os anos de 2008 e 2019, demonstrando a quantidade de publicações por ano, o número de citações por ano, os principais países, palavras-chaves relacionadas ao tema e os principais artigos de CPS por número de citações.

Seguidamente, o método de produtividade de pesquisa (MPP) foi utilizado, que segue a abordagem de revisão sistemática. A revisão sistemática possui alto rigor metodológico e tem como base índices bibliométricos e análises estatísticas (Adaptado de Mariano e Rocha, 2020).

Alguns autores usaram este tipo de revisão para analisar a produtividade de pesquisa de jornais, instituições, universidades e autores em vários ramos de pesquisa (HU *et al.*, 2015; KE *et al.*, 2009; LI; SHEN; XUE, 2014; LIU *et al.*, 2019).

Notou-se que tais autores utilizavam uma fórmula proposta por Howard, Cole e Maxwell (1987) para mensurar a produtividade de pesquisa. No entanto, não existia na literatura a aplicação desta fórmula para classificar quantitativamente os autores de determinada linha de pesquisa.

Assim, com o intuito de aplicar o método de produtividade de pesquisa no ramo da engenharia de produção, Lopes e Neumann (2020) ranquearam os principais autores, universidades e instituições relacionados à linha de pesquisa de CPPS.

Para possuir uma base teórica consolidada sobre os vários temas abordados neste projeto de pesquisa, foi criado um *software* para automatizar a análise bibliométrica proposta pelo MPP.

Neste *software*, é possível realizar uma análise bibliométrica quantitativa baseada na fórmula de produtividade de pesquisa para ranquear os principais autores, países e universidades de um tópico específico a partir da extração de dados da plataforma científica Scopus.

Segundo Howard, Cole e Maxwell (1987), a fórmula de score é usada para dividir proporcionalmente a pontuação entre autores e suas instituições de pesquisa em um artigo publicado com múltiplos autores, conforme a equação abaixo.

$$\text{Score} = \frac{(1.5^{n-i})}{\sum_{i=1}^n 1.5^{n-i}} \quad (2.1)$$

Sendo *score* a pontuação dada a cada autor, país e instituição por artigo, *n* a quantidade total de autores no artigo e *i* representa a posição hierárquica de um autor específico no artigo.

O programa, desenvolvido na linguagem de programação *python*, calcula automaticamente o resultado da equação 2.1 para todos os autores, países e instituições de todos os artigos selecionados na base de dados. Os possíveis resultados da equação 2.1 são demonstrados na tabela abaixo.

Tabela 1 – Resultados da fórmula de score para um artigo

Total de autores	Posição de um autor específico				
	1 ^a	2 ^a	3 ^a	...	i
1	1.00			...	n _{1i}
2	0.60	0.40		...	n _{2i}
3	0.47	0.32	0.21	...	n _{3i}
...
n	n _{n1}	n _{n2}	n _{n3}	n _{n4}	n _{ni}

Fonte: O autor (2020).

Assim, visto que os principais grandes tópicos para a elaboração da arquitetura proposta são: Quarta Revolução Industrial (4IR), Indústria 4.0 (I4.0), Sistemas Ciber-físicos (CPS), Internet das Coisas (IoT) e Gêmeo Digital (DT), os principais autores, instituições e países destas linhas de pesquisa foram classificados, vide o apêndice A.

2.1.4.3 Formulação do problema

Somente o levantamento bibliográfico é insuficiente para a formulação do problema de pesquisa (GIL, 2008). Requer-se a reflexão crítica acerca dos assuntos estudados, questionando-se sobre as seguintes questões:

- a) Existem controvérsias entre os diferentes autores?
- b) Quais são as abordagens teóricas relevantes para o estudo do fenômeno?
- c) Existe uma abordagem teórica capaz de fundamentar o trabalho?

Após a reflexão crítica acerca dos principais assuntos estudados, notaram-se controvérsias principalmente em relação a diferenciação entre quarta revolução industrial e a iniciativa estratégica *industrie 4.0* da Alemanha e também entre as estruturas, conexões e principais diferenças entre CPS, IoT e DT (FAN, 2018; GOMAA, 2016).

As abordagens teóricas relevantes foram principalmente os modelos de arquitetura de referência da quarta revolução industrial, a RAMI 4.0 e a IIRA, em conjunto com as principais normas de tecnologia da informação para a área da saúde.

Segundo Booth (2016, p. 33), se um autor não faz uma pergunta específica digna de ser questionada, então ele não pode oferecer uma resposta específica digna de ser suportada. Assim, seguindo a metodologia de Booth (2016), buscou-se responder os seguintes questionamentos:

- a) história do tópico:
 - como este tópico cabe em um contexto de desenvolvimento mais amplo?;
 - por que este tópico surgiu?;
 - qual é a sua história interna?;
 - como e por que este tópico mudou com o tempo?;
- b) estrutura e composição:
 - como este tópico cabe em um contexto mais amplo ou quais as funções deste tópico dentro de um sistema mais amplo?;
- c) categorização:
 - como este tópico pode ser agrupado por tipos?;
 - como este tópico pode ser comparado e contrastado com outros semelhantes?;
- d) especulações:
 - como seria se o seu tópico nunca houvesse existido, ou desaparecesse ou fosse colocado em um novo contexto?

2.1.4.4 Elaboração do plano provisório de assunto

Construir um plano significa, pois, definir a estrutura lógica do trabalho, de forma que as partes estejam sistematicamente vinculadas entre si e ordenadas em função da unidade de conjunto (SALVADOR, 1982).

Considerando que o objetivo da pesquisa é a elaboração de uma arquitetura para o planejamento e a gestão de um departamento de emergência hospitalar utilizando as tecnologias da quarta revolução industrial, o plano provisório do trabalho foi estruturado da seguinte forma:

- a) modelos de arquitetura de referência da quarta revolução industrial:
 - modelo de arquitetura de referência da indústria 4.0;
 - modelo de arquitetura de referência da internet industrial;
 - modelo de arquitetura do sistema de manufatura inteligente da china;
- b) sistemas ciber-físicos:
 - modelo de referência de arquitetura de sistemas ciber-físicos;
 - sistemas ciber-físicos médicos;
- c) gêmeos digitais:
 - estruturas e modelos existentes de gêmeos digitais;
 - gêmeos digitais aplicados a saúde;
- d) internet das coisas para conexão entre sensores e sistemas;
- e) normas hospitalares:
 - Normas e padrões internacionais de tecnologia da informação aplicados à saúde.

2.1.4.5 Busca das fontes

As principais fontes de referência foram as plataformas científicas Scopus e *Web of Science*. A Scopus é uma plataforma que combina com exclusividade um banco de dados abrangente de resumos e citações com dados enriquecidos e conteúdo acadêmico vinculado (ELSEVIER, 2020a). Já o *Web of Science* é considerado o banco de dados de citações global, independente de editores, mais confiável do mundo (CLARIVATE, 2020).

Com o intuito de possuir uma visão mais técnica e a nível operacional do modelo proposto, uma parceria de pesquisa com a empresa Flexsim foi firmada para a validação e realização de possíveis testes futuros do modelo em ambiente hospitalar (FLEXSIM, 2020a).

Além disso, foi considerado oportuno a realização dos cursos *Mastering Digital Twin* (COURSERA, 2020), *Digital Twin: a comprehensive overview* (UDEMY, 2020) e *Industry 4.0: How to revolutionize your business* (EDX, 2019).

Visando aprofundar o conhecimento sobre alguns tópicos, publicaram-se artigos em conferências que tratavam sobre assuntos relevantes ao trabalho, como a *Intelligent Computation in Manufacturing Engineering* (ICME) da Academia Internacional de Engenharia de Produção (CIRP, 2020) e o Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção (APREPRO, 2019)

Por fim, com o intuito mais específico de adquirir conhecimento técnico sobre internet das coisas e tecnologia da informação, o pesquisador teve o cargo de pesquisador voluntário no laboratório *Universal Internet of Things* do departamento de engenharia elétrica da Universidade de Brasília.

2.1.4.6 *Leitura do material*

Segundo Gil (2008, p. 77), buscou-se realizar as leituras do tipo exploratória, seletiva, analítica e interpretativa com os seguintes objetivos:

- a) Identificar as informações e os dados constantes no material;
- b) Estabelecer relações entre as informações e os dados obtidos com o problema proposto;
- c) Analisar a consistência das informações e dados apresentados pelos autores.

2.1.4.7 *Fichamento*

Para que a tomada de notas seja eficiente, ela deve ser sempre realizada levando em consideração o problema da pesquisa, sendo que apenas aquilo que potencialmente representa algum tipo de solução ao problema deve ser registrado (GIL, 2008, p. 80).

Dessa forma, os apontamentos realizados durante a fase de pesquisa para a elaboração do modelo tiveram o foco principalmente em sua na macroestrutura, sendo que alguns pontos técnicos referentes à microestrutura operacional do modelo foram omitidos.

2.1.4.8 *Organização lógica do assunto e redação do trabalho*

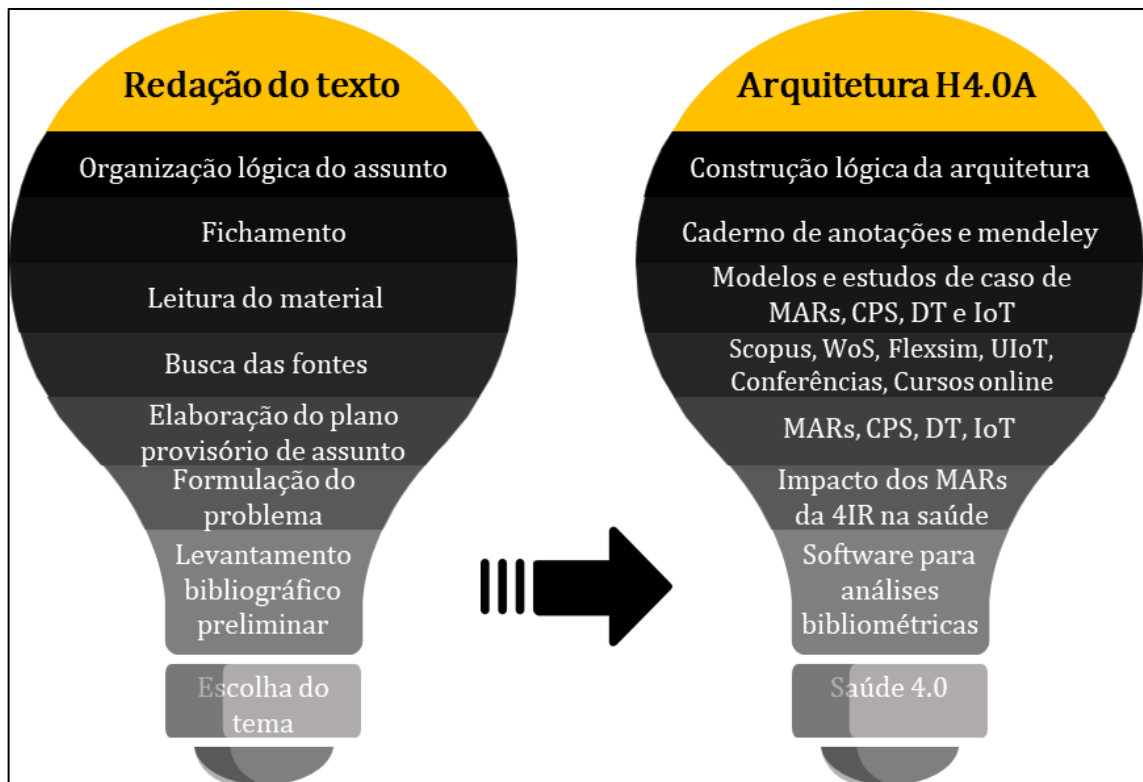
Segundo Gil (2008, p. 85), cabe nestas etapas estruturar logicamente o trabalho para que ele possa ser entendido como uma unidade dotada de sentido e, seguindo o estilo do autor, traga autenticidade ao projeto.

Assim, a construção lógica e redação do trabalho consistiram na organização das ideias com vista a atender os objetivos e hipóteses formuladas no início da pesquisa, sendo que a documentação das fontes bibliográficas foram armazenadas no *software* Mendeley, um gerenciador de referências gratuito e uma rede social acadêmica que ajuda a organizar uma

pesquisa, colaborar com outras pessoas online e descobrir as pesquisas mais recentes sobre determinado assunto (ELSEVIER, 2020).

Conforme o exposto acima sobre todo o procedimento técnico realizado durante o presente trabalho, a figura 2 ilustra o procedimento aplicado ao tema em questão.

Figura 2 – Resumo do procedimento técnico utilizado na pesquisa



Fonte: O autor (2020).

Em suma, a escolha do tema foi em torno do grande tópico saúde 4.0 diante da crise de saúde observada durante a realização da pesquisa; um software para análises bibliométricas baseado no MPP foi criado para realizar o levantamento bibliográfico preliminar; na formulação do problema foi observado qual seria o impacto dos conceitos, tecnologias e modelos de arquitetura de referências (MARs) da 4IR na saúde; a elaboração do plano provisório de assunto consistiu principalmente na pesquisa sobre MARs, CPS, DT e IoT; para a busca das fontes as plataformas científicas Scopus e WoS, o software FlexSim, o laboratório UIoT, as conferências CONBREPRO e CIRP ICME foram consultados; os modelos e estudos de caso de MARs, CPS, DT e IoT foram lidos; realizou-se o fichamento em um caderno de anotações e em conjunto com o *software* Mendeley; criou-se a arquitetura orientada a saúde 4.0 denominada H4.0A.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo visa abranger os assuntos mais importantes tratados no trabalho. Tais assuntos servirão de base para o desenvolvimento da fundamentação teórica abordada no projeto vigente.

3.1 Revoluções industriais passadas e a saúde pública

O conjunto das profundas transformações econômicas, tecnológicas e sociais ocorridas na Europa a partir da segunda metade do século XVIII recebe o nome de revolução industrial (PAZZINATO; SENISE, 1997).

A primeira revolução industrial (1760 – 1840) começou na Inglaterra e consistiu na transição de um sistema agrário e artesanal para um sistema de cunho industrial, dominado pelas fábricas, com novos produtos químicos, novos processos de fabricação, e desenvolvimento de máquinas movidas à vapor e energia hídrica (MOHAJAN, 2019).

É interessante notar que a primeira revolução industrial teve início na Inglaterra e somente depois foi se espalhando pela Europa continental, isso ocorreu por alguns fatores geográficos que favoreceram o país naquela época.

Segundo Schwab (2019, p.37), as novas tecnologias dessa revolução industrial trouxeram mudanças relacionadas à cooperação e à competição que, por sua vez, criaram sistemas inteiramente novos de produção, troca e distribuição de valor, subvertendo setores que vão da agricultura à manufatura, das comunicações ao transporte.

Em relação à saúde pública, sua primeira onda (1830 – 1900) consistiu em melhorar a saúde da população devido à ruptura social causada pela primeira revolução industrial, na qual houve superlotação dos centros urbanos, falta de água potável e saneamento básico, nutrição deficiente e um ambiente propício à infecções (HANLON *et al.*, 2011).

A segunda revolução industrial (1850 – 1970), iniciada em meados do século XIX, corresponde às inovações técnicas e econômicas que promoveram a passagem do capitalismo concorrencial (ou capitalismo industrial) para o capitalismo monopolista (ou capitalismo financeiro) (PAZZINATO; SENISE, 1997).

No capitalismo industrial, a indústria predominava sobre o comércio e as finanças. No capitalismo financeiro, houve o predomínio das finanças (bancos e instituições financeiras) sobre a produção (indústrias). Assim, visto o monopólio de vários setores industriais,

formaram-se empresas com alta concentração de capital e de âmbito internacional, as chamadas multinacionais.

Essa revolução pode ser atribuída primeiramente aos Estados Unidos, por conta da grande quantidade de novas tecnologias desenvolvidas, como a energia, motores de combustão interna, indústria química, petróleo, tecnologias de comunicação elétrica (telégrafo, telefone e rádio) e saneamento básico (MOHAJAN, 2020)

Segundo o mesmo autor, ocorreram vários avanços na medicina e nos utensílios médicos que ajudaram a reduzir as taxas de infecções e mortes por muitas doenças, o que melhorou muito a saúde pública.

Assim, no período entre 1890 e 1980, houve a segunda e terceira ondas de saúde, que foram caracterizadas pela ascensão do racionalismo científico, pela origem do serviço de emergência hospitalar moderno e pelo surgimento do estado de bem-estar (HANLON *et al.*, 2011).

Por volta de 1950, as principais tecnologias da terceira revolução industrial – a tecnologia da informação e a computação digital – passaram por avanços revolucionários (SCHWAB; DAVIS, 2018).

Com o implemento dessas tecnologias, alcançou-se mais ainda a automação dos processos de manufatura, já que as máquinas assumiram uma proporção do trabalho manual e intelectual (KAGERMANN; WAHLSTER; HELBIG, 2013).

Além disso, segundo Schwab e Davis (2018), com os avanços dessa revolução industrial, houve um aumento significativo na capacidade de armazenar, processar e transmitir informações em formato digital e isso transformou quase todas as indústrias.

Na indústria da saúde, a quarta onda (1960 – 2000) consistiu em intervenções médicas eficazes que ajudaram a prolongar a vida e fatores de risco e estilo de vida passaram a ser uma preocupação central (HANLON *et al.*, 2011).

O termo indústria aqui pode ser considerado como todas as atividades que decorrem do esforço humano (SCHWAB; DAVIS, 2018). Não deve ser associado exclusivamente à manufatura, mas ampliado para os vários setores industriais como a agricultura, saúde, transporte, entre outros.

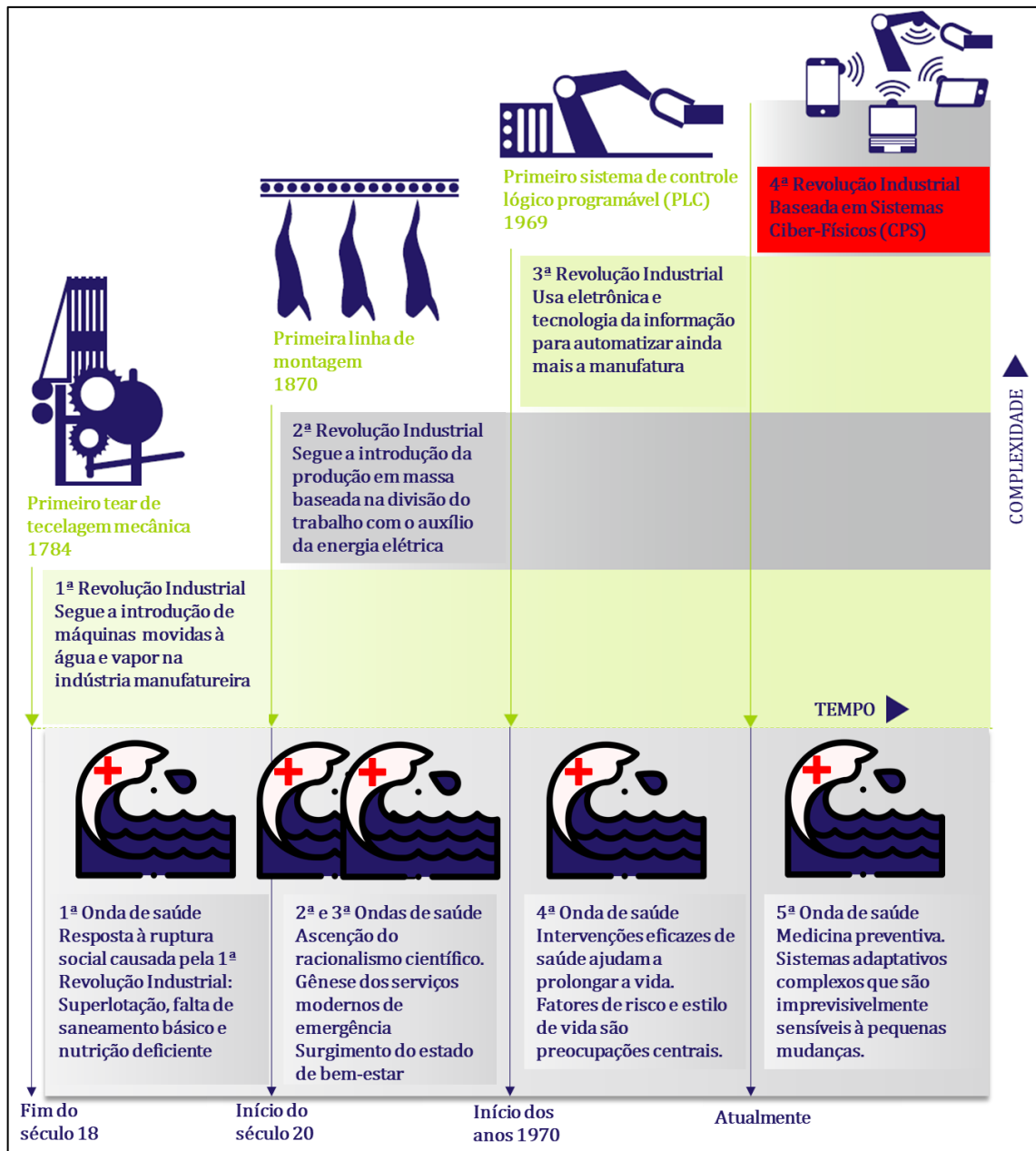
3.2 Quarta revolução industrial

A quarta revolução industrial (4IR) está em seu estágio inicial e as tecnologias emergentes dessa revolução estão sendo construídas sobre o conhecimentos e os sistemas das

revoluções industriais anteriores, mas principalmente sobre os recursos digitais da terceira revolução industrial (SCHWAB; DAVIS, 2018, p. 36).

Em relação à área da saúde, será possível, durante a sua quinta, onda aproveitar o acúmulo de dados médicos e usar novas tecnologias baseadas no consumidor, permitindo uma nova era de atendimento personalizado para cada indivíduo usando dados em tempo real e análises a partir da computação em nuvem que serão alimentadas por aprendizado de máquina (WEINSTEIN, 2016). Assim, é possível analisar pela figura 3 quais foram os principais estágios das revoluções industriais e das ondas da saúde ao decorrer do tempo.

Figura 3 – Os estágios das revoluções industriais e sua relação com as ondas da saúde.



Fonte: O autor (2020). Adaptado de Kagermann (2013) e Hanlon et al (2011).

Segundo Kagermann, Wahlster e Helbig (2013) o principal tipo de sistema que irá moldar a quarta revolução industrial são os sistemas ciber-físicos (CPS), pois as empresas estabelecerão redes globais que incorporarão suas máquinas, sistemas de armazenamento e instalações de produção no formato desses sistemas.

Schwab e Davis (2018) comentam que as principais tecnologias que irão moldar essa revolução são a computação quântica, *blockchain*, internet das coisas, inteligência artificial e robótica, materiais modernos, manufatura aditiva, biotecnologias, neurotecnologias, realidade virtual, aumentada e mista, transmissão de energia, geoengenharia e tecnologias espaciais.

Tal como ocorreu nas revoluções industriais passadas, alguns países tornaram-se referência diante de seus avanços tecnológicos, a exemplo da Inglaterra e dos Estados Unidos durante a primeira e a segunda revolução industrial, respectivamente. Diante do cenário atual, a Alemanha vem se destacando no cenário mundial com sua iniciativa estratégica denominada Indústria 4.0 (I4.0), termo que se tornou um sinônimo da 4IR para vários países.

Outros países também criaram iniciativas estratégicas, a partir de órgãos nacionais, para a 4IR. Os Estados Unidos criaram o *Industrial Internet Consortium (IIC)* e o *National Institute of Standards and Technology (NIST)*, a China elaborou o *Made in China 2025 (MIC 2025)*, o Japão propôs a *Robot Revolution Initiative (RRI)*, a França gerou a *Industrie du Futur*, a Itália idealizou a *Piano Impresa 4.0*, entre outras (STEVAN JR.; LEME; SANTOS, 2018).

Essas iniciativas estratégicas são responsáveis por: direcionar seus respectivos países diante do cenário atual da 4IR; padronizar procedimentos e processos; e criar modelos de arquitetura de referência para a implementação da 4IR em vários setores da indústria. As iniciativas estratégicas – e seus modelos de arquitetura de referência (MARs) – que mais se destacam no momento são:

Quadro 1 – Principais iniciativas estratégicas da quarta revolução industrial

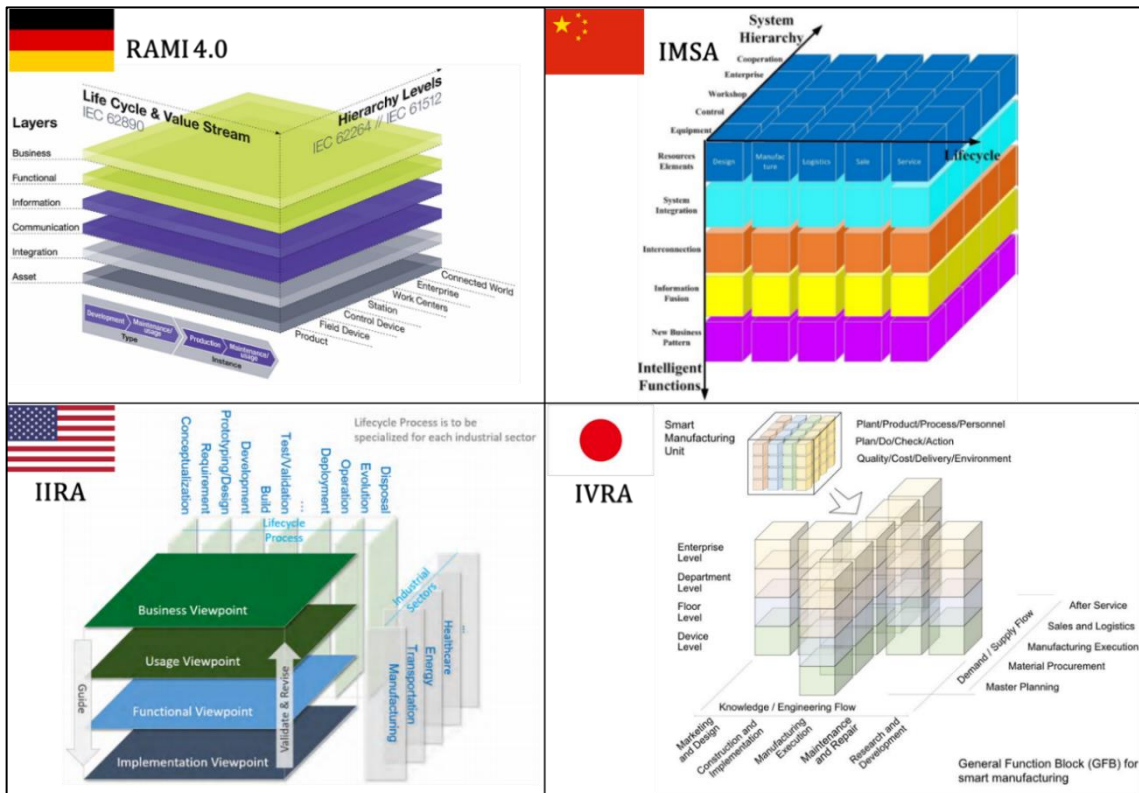
País	Desenvolvedores	Iniciativa Estratégica	Modelo de Arquitetura de Referência
Alemanha	<i>Deutsches Institut Für Normung, Plattform Industrie 4.0 e National Academy of Science and Engineering</i>	<i>Industrie 4.0</i>	<i>Reference Architectural Model for Industrie 4.0</i>
Estados Unidos	<i>Industrial Internet Consortium e National Institute of Standards and Technology</i>	<i>Industrial Internet</i>	<i>Industrial Internet Reference Architecture</i>
China	República Popular da China	<i>Made in China 2025</i>	<i>Intelligent Manufacturing System Architecture</i>
Japão	<i>Ministry of Economy, Trade and Industry</i>	<i>Robot Revolution Initiative</i>	<i>Smart Manufacturing Reference Architecture</i>

Fonte: O autor (2020).

O quadro anterior demonstra várias iniciativas estratégicas com diversos nomes diferentes para cada iniciativa, mas vale ressaltar que todas possuem o intuito de erguer ou manter seus respectivos países como uma referência industrial mundial e também buscam o aperfeiçoamento dos processos industriais (STEVAN JR.; LEME; SANTOS, 2018).

A figura 4 ilustra os principais modelos de arquitetura de referência da quarta revolução industrial disponíveis atualmente.

Figura 4 – Modelos de arquiteturas de referência de acordo com seus países de origem.



Fonte: O autor (2020).

É possível notar que todos os modelos possuem três dimensões e são divididos em camadas, porém, visualmente, a RAMI 4.0 assemelha-se mais à IIRA e a IMSA à IVRA.

3.2.1 Principais iniciativas estratégicas

Visto que as iniciativas estratégicas citadas anteriormente buscam normalizar procedimentos e processos da 4IR (STEVAN JR.; LEME; SANTOS, 2018), vale ressaltar quais são essas principais iniciativas, seus planos de ação e detalhar os MARs de cada uma.

3.2.1.1 Indústria 4.0

O conceito de Indústria 4.0 (I4.0) – traduzido do alemão *Industrie 4.0* – surgiu na feira comercial de Hannover na Alemanha em 2011 (VOGEL-HEUSER; HESS, 2016). No contexto da manufatura, a evolução tecnológica que é descrita como o quarto estágio da industrialização, é denominada I4.0.

O fenômeno referido como I4.0 tem nomes diferentes ao redor do mundo. Outros termos usados incluem Internet Industrial e 4IR (KAGERMANN; WAHLSTER; HELBIG, 2013). Os fatores-chave da I4.0 são:

- a) padronização e arquitetura de referência;
- b) gerenciamento de sistemas complexos;
- c) infraestrutura de banda larga abrangente para a indústria;
- d) segurança e proteção;
- e) organização e desenho do trabalho;
- f) treinamento e desenvolvimento profissional contínuo;
- g) estrutura regulamentar;
- h) eficiência de recursos.

Segundo os mesmos autores, caso esses fatores-chaves sejam realizados com sucesso, a I4.0 permitirá que a Alemanha aumente sua competitividade global e preserve sua indústria manufatureira nacional.

A I4.0 é focada em criar produtos, procedimentos e processos inteligentes; integrar redes de empresas e suas cadeias de valor; aprimorar as redes de comunicação existentes para fornecer tempos de latência garantidos, confiabilidade, qualidade de serviço e largura de banda disponível (KAGERMANN; WAHLSTER; HELBIG, 2013). Assim, a Indústria 4.0 pode ser definida como a aplicação da IoT na indústria manufatureira alemã.

Para que todos esses fatores-chave sejam alcançados e para que ocorra a integração das organizações, todos os objetos do chão de fábrica devem estar equipados com recursos integrados de processamento e comunicação (GORECKY *et al.*, 2014). Para isso, é necessária a implementação de um sistema ciber-físico – que é um componente essencial da indústria 4.0 (UHLEMANN; LEHMANN; STEINHILPER, 2017) – e de uma arquitetura que proporcione a interoperabilidade entre os vários níveis da organização.

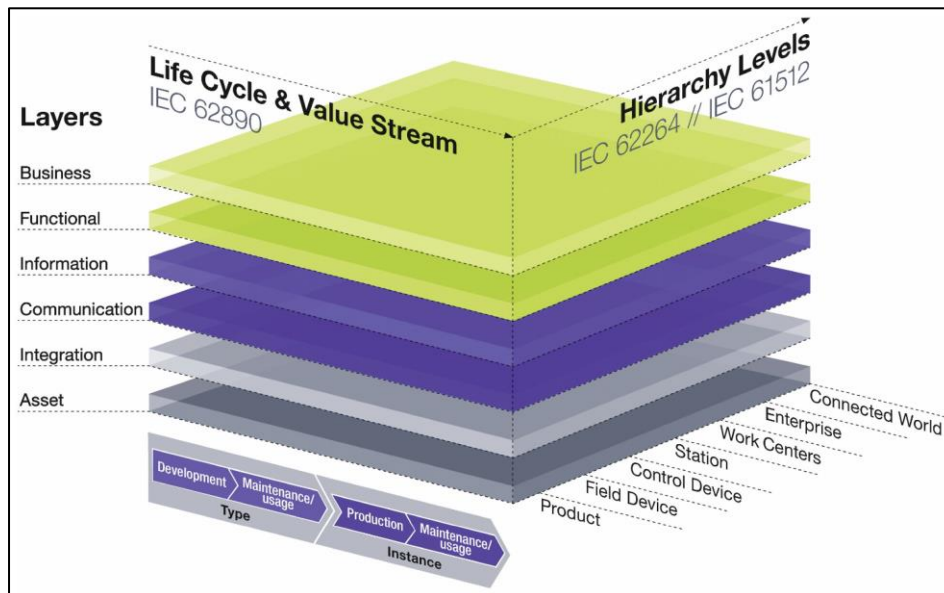
3.2.1.1.1 Modelo de Arquitetura de Referência para a Indústria 4.0

Segundo o Instituto Alemão de Padronização (2016), a RAMI 4.0 é um modelo de arquitetura de referência que fornece uma descrição estruturada de ideias fundamentais da I4.0 e é denominada como norma DIN SPEC 91345:2016-04.

A RAMI 4.0 é uma estrutura tridimensional que mostra os aspectos mais importantes da I4.0 e garante que todos os participantes envolvidos compartilhem de uma mesma perspectiva e desenvolvam o mesmo entendimento (PLATTFORM INDUSTRIE 4.0, 2019).

As três dimensões dessa arquitetura são: arquitetura, ciclo de vida e fluxo de valor e níveis hierárquicos, conforme ilustrado na figura 5.

Figura 5 – Modelo de arquitetura de referência para a Indústria 4.0



Fonte: Instituto Alemão de Padronização (2016).

Segundo a norma DIN SPEC 91345:2016-04 (2016), o eixo de arquitetura é dividido em seis camadas: Negócios, Funcional, Informação, Comunicação, Integração e Ativo, para representar as informações relevantes para a função do ativo.

O eixo de ciclo de vida e fluxo de valor é utilizado para representar a vida útil de um ativo e o processo de valor agregado. Tal eixo tem como base a norma IEC 62890, que estabelece princípios básicos para o gerenciamento do ciclo de vida de sistemas e componentes usados para medição, controle e automação de processos industriais (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, 2020).

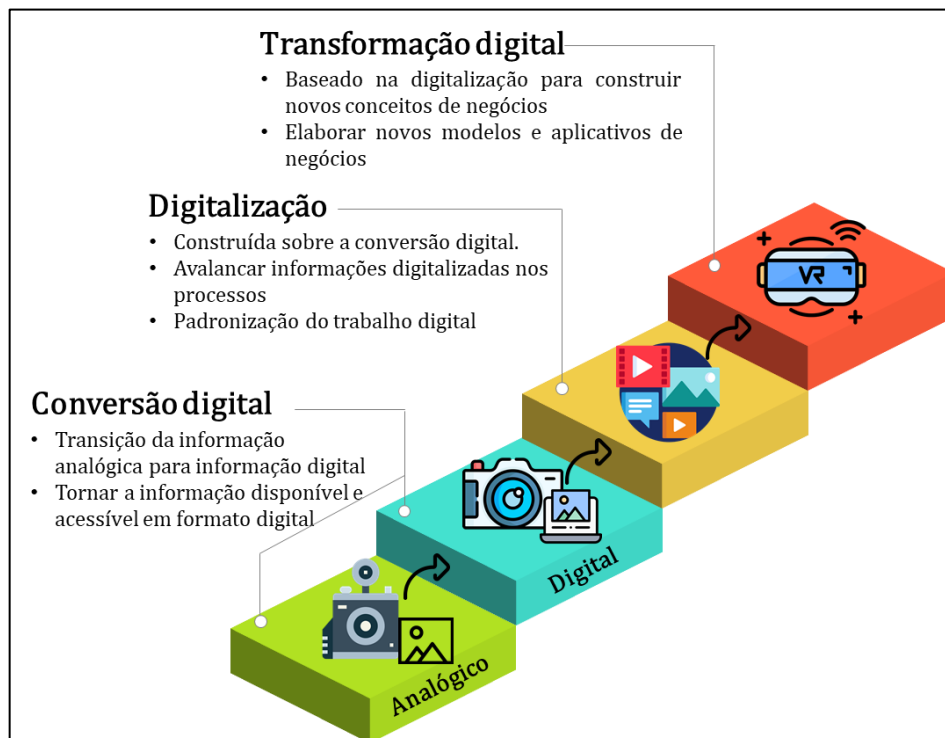
O eixo de níveis hierárquicos é usado para atribuir modelos funcionais para níveis específicos, baseado nas normas IEC 62264 e IEC 62512, com o intuito de integrar a tecnologia da informação do negócio e os sistemas de controle (DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, 2016).

3.2.1.2 Internet Industrial

Desde o seu surgimento, a Internet das Coisas (IoT) amadureceu. Com um crescimento das aplicações da IoT, que continuam a transformar os negócios, a indústria e a sociedade, o *Industrial Internet Consortium* (IIC) busca acelerar a Internet Industrial das Coisas (IIoT) e, assim, transformar indústrias em indústrias digitais (INDUSTRIAL INTERNET CONSORTIUM, 2020).

Segundo o mesmo autor, o IIC foca na transformação digital a partir da perspectiva de preencher a lacuna entre estratégia e processos de inovação, e novas tecnologias que permitem uma interação mais complexa entre a tecnologia da informação (TI) e a tecnologia operacional (OT). A figura 6 ilustra as etapas para a transformação digital.

Figura 6 – Etapas de evolução para a transformação digital.



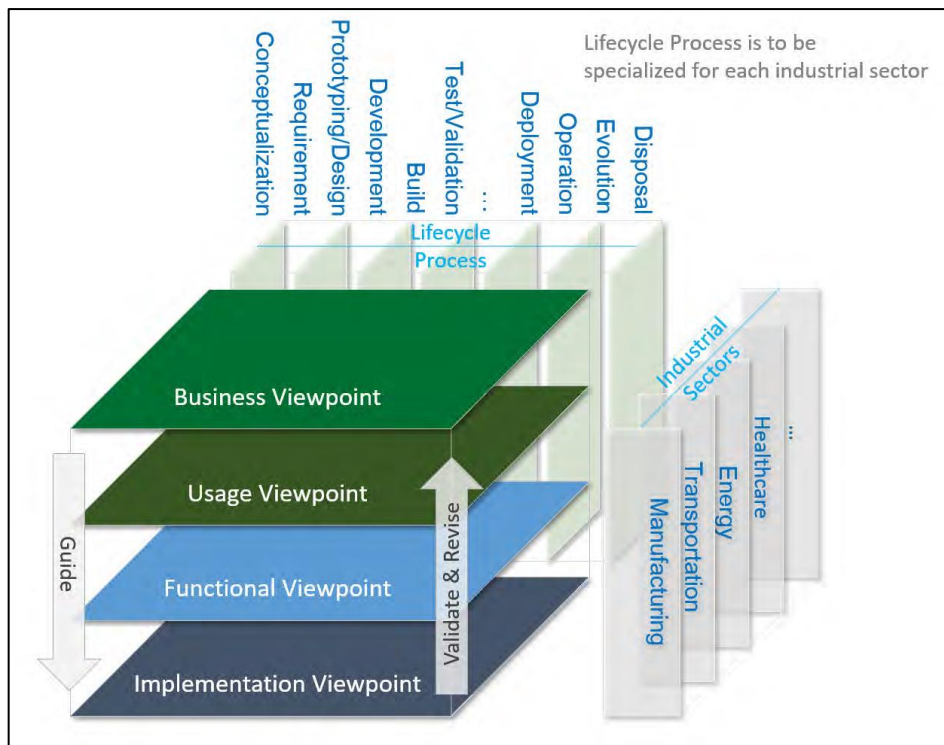
Fonte: O autor (2020).

3.2.1.2.1 Modelo de Arquitetura de Referência para a Internet Industrial

A *Industrial Internet Reference Architecture* (IIRA) é uma arquitetura aberta baseada em normas e padrões para sistemas IIoT. A IIRA maximiza seu valor por ter uma ampla aplicação na indústria para impulsionar a interoperabilidade entre sistemas, mapear tecnologias aplicáveis e orientar o desenvolvimento de tecnologias e padrões (IIC, 2019).

Diferentemente da RAMI 4.0, que possui 6 camadas, a IIRA é dividida em quatro pontos de vista (ou domínios): negócios, uso, funcional e implementação. Além disso, é válido ressaltar que a IIRA é aplicável na área da saúde, como mostra a figura 7 no eixo *industrial sectors*.

Figura 7 – Modelo de arquitetura de referência para a internet industrial.



Fonte: Industrial Internet Consortium (2019).

3.2.1.3 Made in China 2025

Segundo o Conselho de Estado da China (2015), *Made in China 2025* (MIC 2025) é um plano de ação que promove a manufatura chinesa. O intuito do plano, dividido em três etapas, é transformar a China em uma potência industrial até 2049, para a comemoração do centésimo aniversário da fundação da República Popular da China. Assim, nove tarefas e dez setores-chave foram identificados como prioridades, conforme ilustrado na figura 8.

Figura 8 – Iniciativa estratégica Made in China 2025.



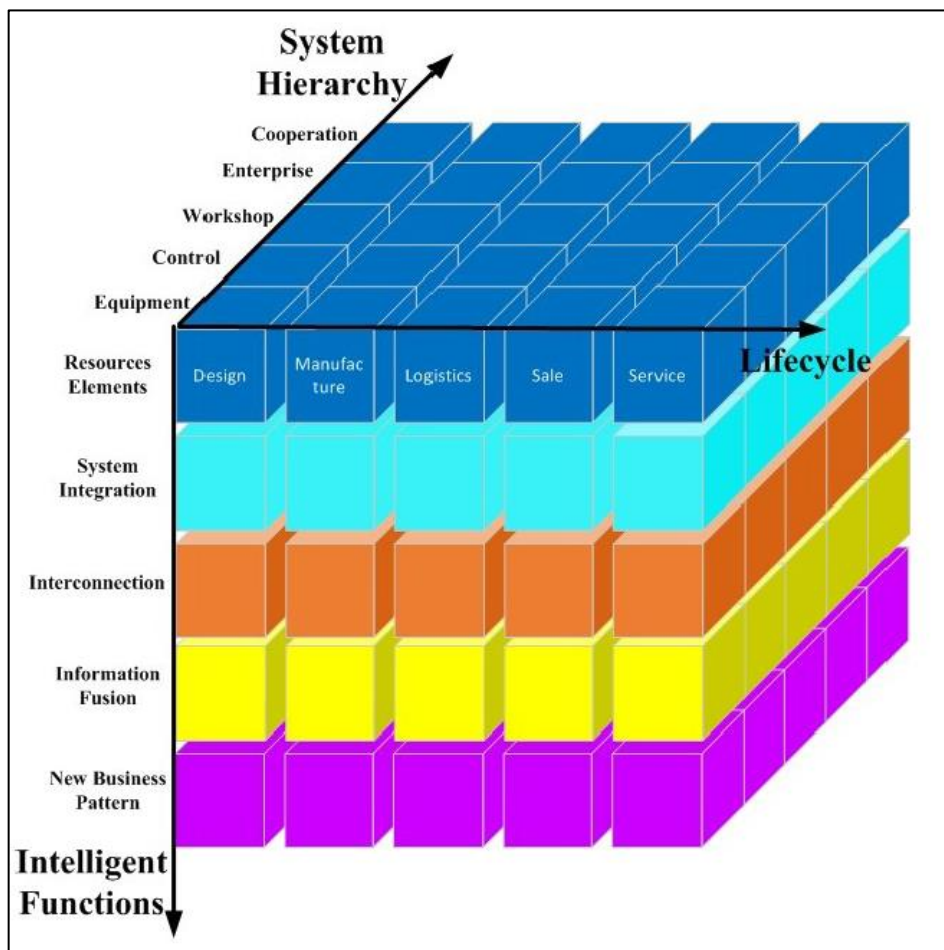
Fonte: Traduzido do Conselho de Estado Chinês (2015).

Apesar do MIC 2025 ter um foco mais voltado para o setor manufatureiro, é interessante ressaltar que o décimo setor-chave da estratégia chinesa é voltado à saúde, pois envolve biomedicina e equipamentos médicos de última geração.

3.2.1.3.1 Arquitetura de Sistema de Manufatura Inteligente

Segundo o Ministério da indústria e da tecnologia da informação da República Popular da China (MIIT, 2018), foi construída uma estrutura tridimensional composta pelo ciclo de vida, hierarquia do sistema e funções inteligentes denominada *Intelligent Manufacturing System Architecture (IMSA)*, conforme ilustrado na figura 9.

Figura 9 – Estrutura da Arquitetura de Sistema de Manufatura Inteligente.



Fonte: MIIT (2018).

O eixo de ciclo de vida refere-se à uma série de atividades de criação de valor conectadas ao estágio de pesquisa e desenvolvimento do protótipo do produto até a reciclagem e remanufatura do produto, incluindo design, fabricação, logística, vendas e serviços (STANDARDIZATION COUNCIL INDUSTRIE 4.0, 2018).

Segundo os mesmos autores, o eixo de hierarquia do sistema significa a divisão da hierarquia da estrutura organizacional relacionada às atividades de manufatura da empresa, o

que inclui: equipamentos, o controle desses equipamentos, estações de trabalho, nível empresarial e cooperação entre os níveis hierárquicos.

O eixo das funções inteligentes é baseado na nova TI e em tecnologias de comunicação, propondo autodetecção, autoaprendizado, tomada de decisão automática, autoconhecimento, auto execução e auto adaptação (STANDARDIZATION COUNCIL INDUSTRIE 4.0, 2018).

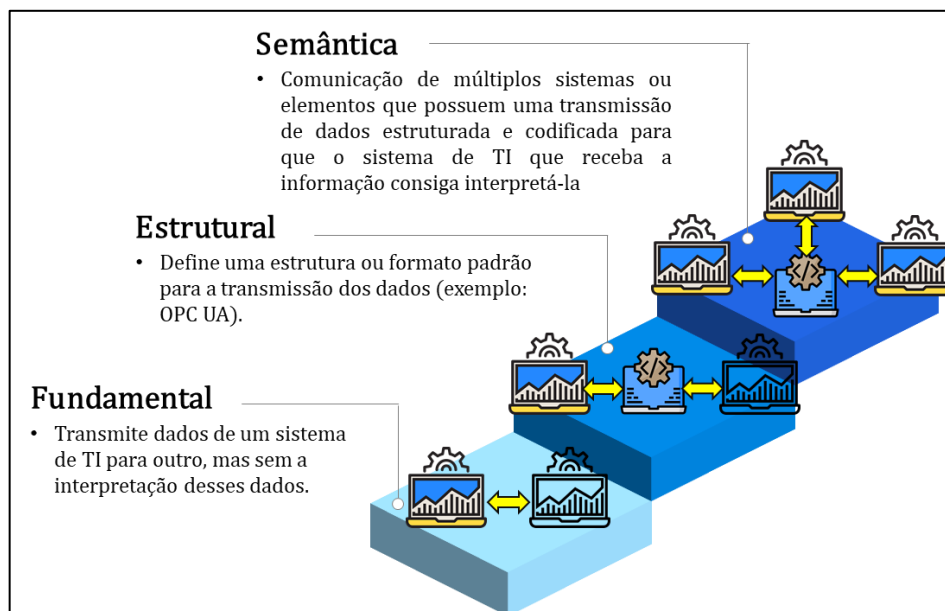
3.2.1.4 Princípio da interoperabilidade entre arquiteturas

Com o intuito de alinhar os modelos de arquitetura de referência IIRA, RAMI 4.0 e IMSA, foram criados documentos para possibilitar a interoperabilidade entre tais arquiteturas (LIN *et al.*, 2017; STANDARDIZATION COUNCIL INDUSTRIE 4.0, 2018).

A Sociedade de Sistemas de Informação e Gestão da Saúde (HIMSS, 2013) define interoperabilidade, na saúde, como a habilidade de diferentes sistemas de tecnologia da informação (TI) e aplicações de *software* se comunicarem, compartilharem dados e usar as informações que foram compartilhadas.

Ainda segundo a HIMSS, existem três níveis de interoperabilidade de TI na saúde: fundamental, estrutural e semântica. Conforme ilustrado na figura 10.

Figura 10 – Níveis de interoperabilidade de sistemas de TI na saúde.



Fonte: O autor (2020).

O nível fundamental é o nível mais baixo e permite a troca de dados entre sistemas de TI da saúde, sem a necessidade de que o sistema que recebe os dados interprete-os.

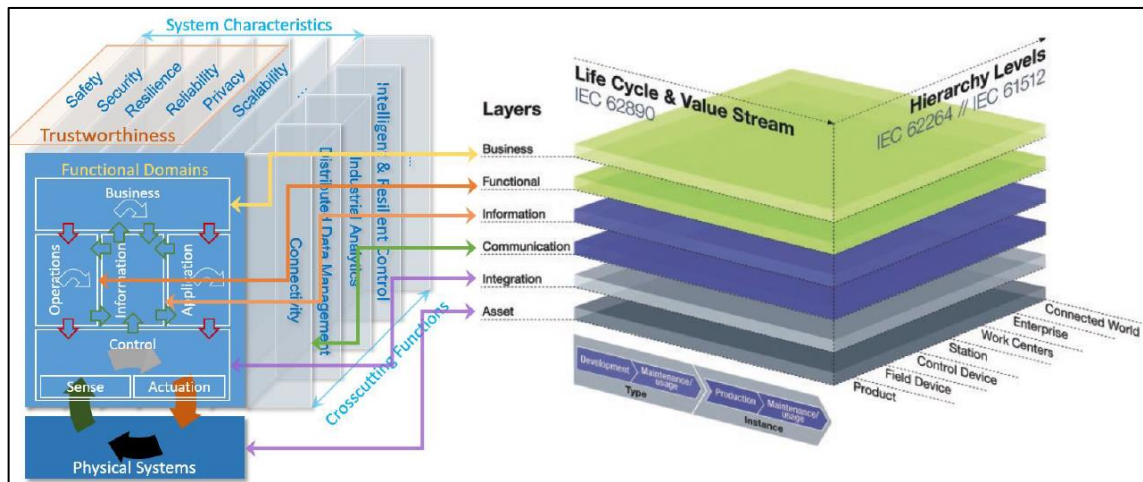
O nível estrutural é o nível intermediário que define um padrão para a transmissão dos dados. Assim, existe uma transmissão uniforme dos dados de modo que a finalidade clínica ou operacional e o significado de tais dados sejam preservados e inalterados.

As arquiteturas IIRA, RAMI 4.0 e IMSA sugerem a utilização do protocolo OPC UA (*Open Communication Standard Unified Architecture*), sendo que a RAMI 4.0 se baseia no modelo ISO/OSI (ZIMMERMANN, 1980) e também especifica sobre os protocolos de transporte TCP/UDP, o protocolo de rede IP, e uma possibilidade de uso do protocolo de enlace IEEE 802.1 TSN e o protocolo da camada física denominado 5G (LIN *et al.*, 2017, p. 14).

Por fim, o nível semântico – nível mais alto – possibilita a troca de informações e o seu uso por múltiplos sistemas ou elementos ao providenciar estrutura e codificação para os dados, de forma que o sistema que os recebe consiga interpretá-los.

Visando a interoperabilidade semântica entre os modelos de arquitetura de referência, a RAMI 4.0 foi alinhada com a IIRA, conforme ilustra a figura 11.

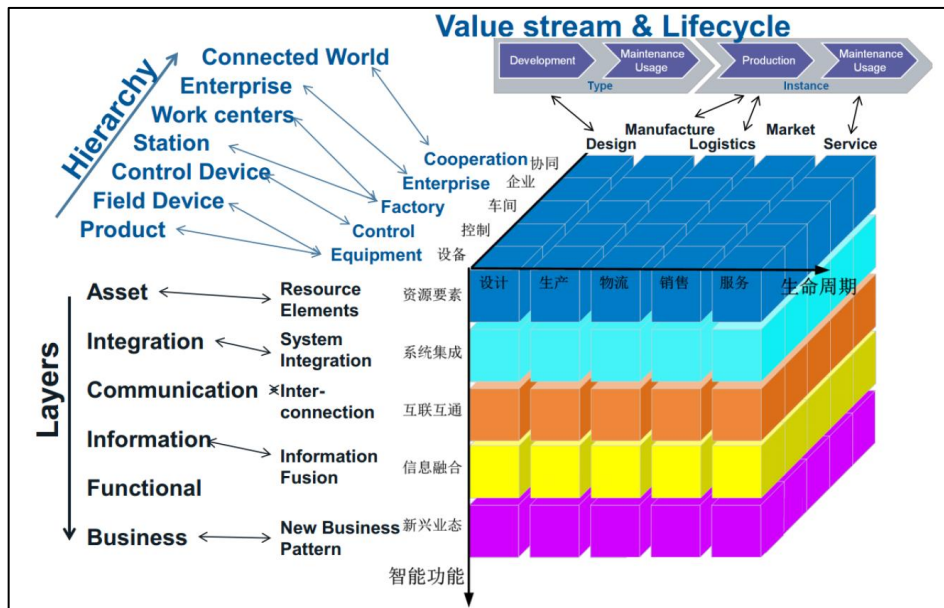
Figura 11 – Alinhamento entre as arquiteturas IIRA e RAMI 4.0.



Fonte: LIN et al (2017, p. 8).

Tendo em vista o domínio funcional da IIRA e as camadas da RAMI 4.0, ambas possuem camadas de negócios; a camada de operações da IIRA corresponde à camada funcional da RAMI 4.0; ambas possuem uma camadas de informação; a camada de comunicação da RAMI 4.0 associa-se à função de conectividade da IIRA; a camada de controle da IIRA refere-se a camada de integração da RAMI 4.0; e a camada de sistemas físicos da IIRA assemelha-se à camada de ativos da RAMI 4.0. O mesmo raciocínio é ilustrado na figura 12 que mostra o alinhamento entre a RAMI 4.0 e a IMSA.

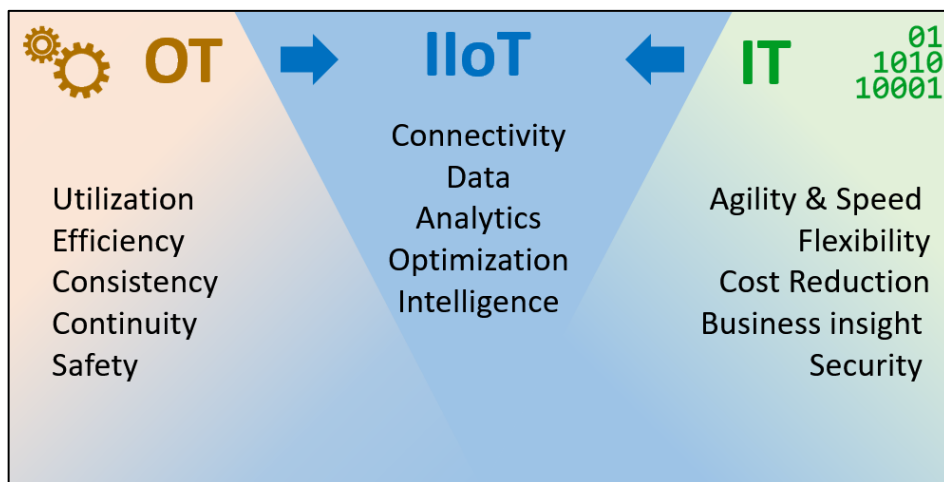
Figura 12 – Alinhamento entre as arquiteturas RAMI 4.0 e IMSA.



Fonte: Conselho de Padronização da Indústria 4.0 (2018).

Além do princípio da interoperabilidade, é válido ressaltar que as arquiteturas foram criadas com o mesmo objetivo: convergir o mundo físico e o virtual, mais especificamente a tecnologia da informação (IT) e a tecnologia operacional (OT). A figura 13 ilustra esse processo de convergência.

Figura 13 – IIoT como uma força transformadora que conduz a convergência da IT e OT.



Fonte: LIN et al (2017).

A OT busca a utilização, eficiência, consistência, continuidade e segurança enquanto a IT possui agilidade e velocidade, flexibilidade, redução de custos, visão de negócios e segurança.

O propósito da Internet Industrial das Coisas (IIoT) é promover conectividade, dados, análises, otimização e inteligência entre o mundo físico e o mundo virtual, mais especificamente, entre a IT e a OT. Para esse propósito, surgem alguns conceitos dentro da IIoT que propõem uma abordagem prática para a convergência entre esses dois mundos.

3.2.2 Integração ciber-física

Sistemas ciber-físicos (CPS) e gêmeos digitais (DT) surgem na manufatura inteligente como uma forma de realizar a conexão entre o mundo físico e o mundo virtual, ter iterações em tempo real, integração da organização e uma colaboração profunda do sistema.

O conceito de CPS emergiu em 2006, proposto por Helen Gill na Fundação Nacional de Ciências dos Estados Unidos, como uma referência à integração da computação aos processos físicos. Assim, computadores embarcados e redes monitoram e controlam os processos físicos por meio de ciclos de *feedback* sendo que a resposta desses ciclos afeta ambas as partes (LEE; SESHIA, 2017).

O conceito de DT surgiu em 2002, proposto por Michael Grieves em seu curso sobre Gerenciamento do Ciclo de Vida do Produto na Universidade de Michigan (GRIEVES, 2016). O DT foi adotado inicialmente na indústria aeroespacial e a Administração Nacional da Aeronáutica e do Espaço (NASA) define DT como uma integração multifísica e multiescalar de um veículo ou sistema que usa os melhores modelos físicos, atualização de sensores, histórico da frota, etc., para espelhar a vida de seu correspondente gêmeo voador (SHAFTO *et al.*, 2010).

Existem algumas diferenças conceituais entre CPS e DT e, nesta seção, busca-se aprofundar os dois conceitos e definir suas similaridades e divergências para realizar a conexão entre o mundo físico e o virtual.

3.2.2.1 Sistemas ciber-físicos

Como mencionado anteriormente, em uma perspectiva mais ampla, sistemas ciber-físicos (CPS) são integrações computacionais com processos físicos. Computadores embarcados e redes monitoram e controlam os processos físicos. Ocorrem ciclos de *feedback* nos quais os processos físicos afetam as atividades computacionais e vice-versa. (LEE; SESHIA, 2017).

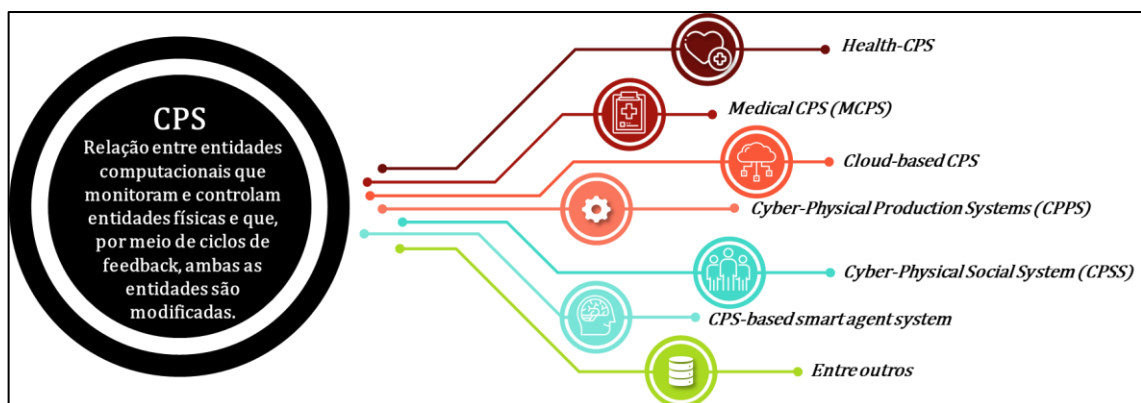
Segundo Lee, Bagheri e Kao (2015), os CPS são tecnologias transformadoras para gerenciar sistemas interconectados por seus ativos físicos e suas capacidades computacionais. Kagermann, Wahlster e Helbig (2013), indicam que a quarta revolução industrial será baseada nesse tipo de sistema.

Os CPS também podem ser definidos como um conjunto de sistemas físicos e sistemas de engenharia cujas operações são monitoradas, coordenadas, controladas e integradas por um núcleo de computação e comunicação (RAJKUMAR *et al.*, 2010). Aqui também é notória a relação intrínseca entre entidades físicas e entidades computacionais.

Essa relação entre tais entidades pode ser aplicada à diversos setores como aeroespacial, controle de ambientes e edifícios, controle de processos, automatização de fábricas e à área da saúde (RAJKUMAR *et al.*, 2010).

Assim, vários sistemas foram derivados do conceito de CPS para serem aplicados à diversos setores, como os sistemas de produção ciber-físicos (MONOSTORI, 2014), sistemas ciber-físicos sociais (LIU *et al.*, 2011), sistema de agente inteligente baseado em CPS (LEITÃO; RIBEIRO; STRASSER, 2016), sistemas ciber-físicos aplicados à saúde (ZHANG *et al.*, 2017), sistemas ciber-físicos médicos (JIMENEZ; JAHANKHANI; KENDZIERSKYJ, 2020), CPS assistido por computação em nuvem, (ALAM; EL SADDIK, 2015), entre outros. A figura 14 ilustra tais ramificações de CPS.

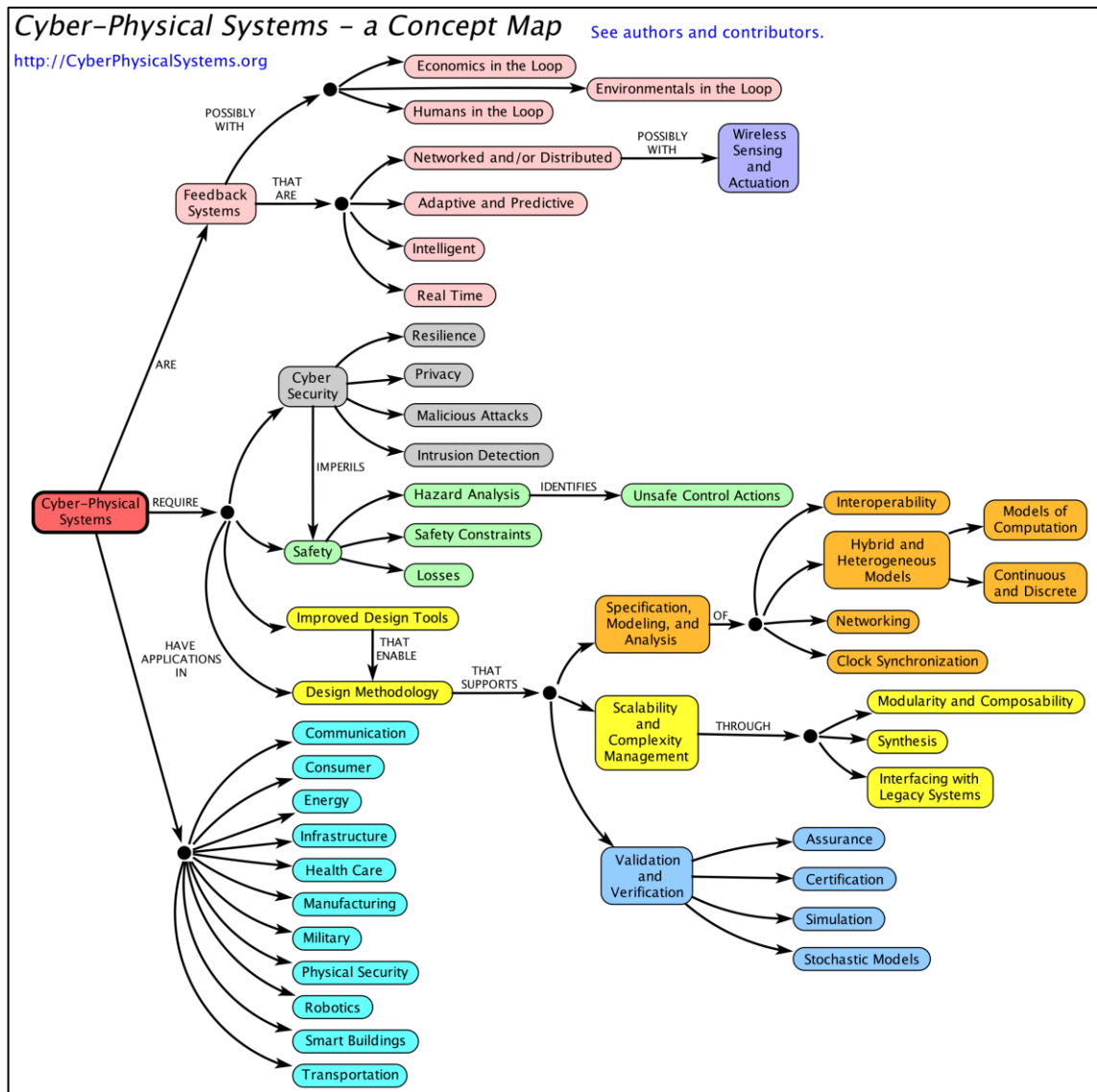
Figura 14 – Ramificações de CPS.



Fonte: O autor (2020).

Para compreender melhor o conceito e a estrutura de CPS, um mapa conceitual, desenvolvido pelo autor Edward A. Lee em um projeto da Universidade de Berkeley, é demonstrado na figura 15.

Figura 15 – Mapa conceitual de CPS.



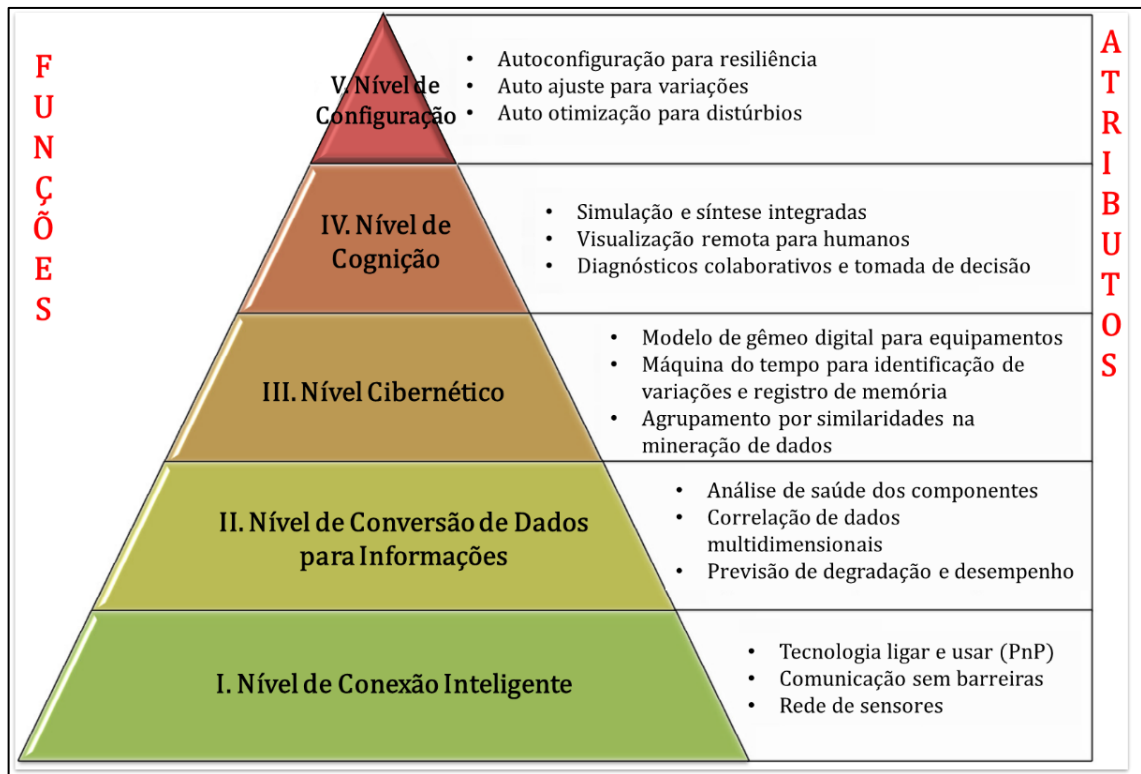
Fonte: Edward A Lee. UC Berkeley (2020).

É possível analisar pelo mapa conceitual que CPS podem ser aplicados ao ramo da saúde, que existem vários tipos de ciclos de feedback, sendo que a criação de redes para tais ciclos são possíveis por meio de sensores e atuadores e que é possível utilizar tal sistema com seres humanos no ciclo.

Além disso, é válido ressaltar que algumas arquiteturas foram propostas visando a implementação desse tipo de sistema em vários setores da indústria, sendo mais recorrente a implementação na indústria manufatureira.

Visto que CPS ainda estão em estágio inicial de desenvolvimento, é essencial definir uma estrutura e metodologia padrão para a implementação nos diversos setores da indústria. Assim, uma estrutura unificada foi feita para aplicações gerais, denominada arquitetura 5C (LEE; BAGHERI; KAO, 2015), ilustrada na figura 16.

Figura 16 – Arquitetura 5C CPS.



Fonte: Traduzido de Lee, Bagheri e Kao (2015).

A arquitetura 5C é composta por cinco níveis, a saber: nível de conexão inteligente, nível de conversão de dados para informações, nível cibernético, nível de cognição e nível de configuração.

O primeiro nível corresponde à coleta de dados precisos e confiáveis de máquinas e de seus componentes. Essa coleta pode ser feita por meio de sensores ou obtida a partir de controladores ou sistemas empresariais como o *Enterprise Resource Planning (ERP)*, *Manufacturing Execution System (MES)*, *Supply Chain Management (SCM)* e *Coordinate Measuring Machine (CMM)*, entre outros (LEE; BAGHERI; KAO, 2015).

Esse primeiro nível pode ser considerado como o nível dos dispositivos inteligentes (*smart devices*) de IoT. Nesse nível é possível conectar sensores aos diversos equipamentos do espaço físico, conectar diferentes tipos de sistemas a partir da internet e conectar fontes computacionais aos servidores em nuvem (*cloud computing*). Segundo Lee, Bagheri e Kao (2015), sugere-se utilizar comunicações de código aberto (OPC) ou MTConnect nesse nível.

No segundo nível ocorre o tratamento e a limpeza dos dados. Assim, os dados são transformados em informações. É interessante ressaltar que, utilizando os padrões OPC ou MTConnect, provavelmente o tratamento de dados será menos trabalhoso para o sistema como um todo.

O nível cibernético, ou terceiro nível, funciona como a central de informações do sistema (LEE; BAGHERI; KAO, 2015). Nesse nível, as máquinas – que antes atuavam individualmente – são conectadas, formando uma rede de dispositivos. Essa rede de dispositivos, que foi formada por meio de vários sensores diferentes, permite a auto comparação entre essas máquinas e a criação de registros de memória. Nesse nível, pode-se utilizar a tecnologia denominada gêmeo digital (DT).

O quarto nível, ou nível de cognição, gera um conhecimento profundo do sistema monitorado (LEE; BAGHERI; KAO, 2015). Esse nível é o local no qual existe a percepção humana de problemas que antes estavam ocultos. Assim, devem ser criadas interfaces para a visualização dos dados.

Aqui pode-se utilizar da inteligência computacional, inteligência ponto-a-ponto, inteligência de mineração de dados e aprendizado de máquina para obter classificações ou alertas antecipados de potenciais problemas.

Por fim, o nível de configuração é o feedback do espaço cibernético para o espaço físico e atua como controle de supervisão para tornar as máquinas autoconfiguráveis e auto adaptativas (LEE; BAGHERI; KAO, 2015).

Esse nível é o local que ocorrem as configurações do sistema para reagir onde, como e quando determinadas ações devem ser tomadas e, assim, torná-lo resiliente ao ponto de que não haja mais preocupação humana à respeito de seu funcionamento.

Por fim, conclui-se que o mundo físico é baseado na física e em um tempo contínuo, onde não há como retroceder. O sistema virtual consiste na comunicação e no controle computacional que servem de base para gerar modelos semelhantes à realidade baseado em vários comportamentos das entidades físicas. Após criado o modelo, consegue-se usar lógicas de controle para entender a relação entre o modelo físico e o modelo virtual. Assim, é possível usar esse modelo virtual treinado para controlar, estimular, sintetizar e até mesmo prever futuras situações do modelo físico.

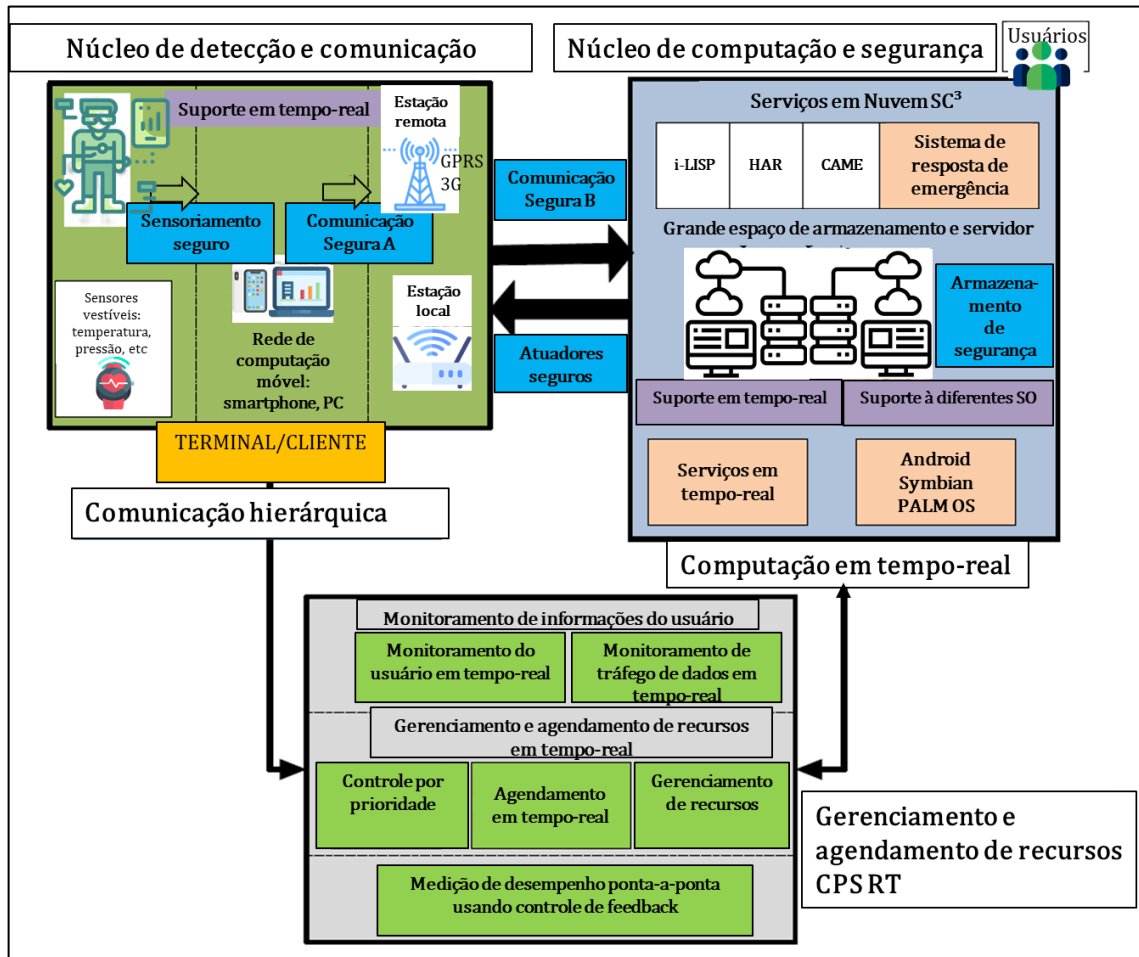
3.2.2.2.1 Sistemas ciber-físicos aplicados à saúde

No âmbito da saúde, os CPS ainda não foram amplamente consolidados, mas algumas sugestões de arquiteturas já foram propostas, como a arquitetura CPeSC³, arquitetura Health-CPS e a arquitetura para CPS Médicos (MCPS).

A arquitetura CPeSC³ (*Cyber Physical Enhanced Secured WSN-integrated Cloud Computing for health Care*) consiste de três partes: núcleo de detecção e comunicação, núcleo

de computação e segurança, e núcleo de gerenciamento de recursos e programação em tempo real (WANG *et al.*, 2011). A figura 17 representa o funcionamento da arquitetura CPeSC³.

Figura 17 – Arquitetura CPeSC³.



Fonte: O autor (2020). Adaptado de WANG *et al.* (2011).

O núcleo de detecção e comunicação propõe a utilização de redes de sensores sem fio (*wireless*) em larga escala para realizar a comunicação com o ambiente físico e, assim, realizar o seu monitoramento em tempo real.

Em suma, o fluxo de dados consistiria em: coletar dados brutos dos sensores vestíveis dos pacientes, enviar tais dados à uma porta de entrada (*gateway*) – estação local ou remota – e armazená-los em uma base de dados para processamento futuro.

O núcleo de computação e segurança utiliza do conceito de computação em nuvem e promove aplicações para monitorar a saúde do paciente, fazer análises do ambiente físico, além de promover a segurança durante a transmissão, detecção e armazenamento dos dados.

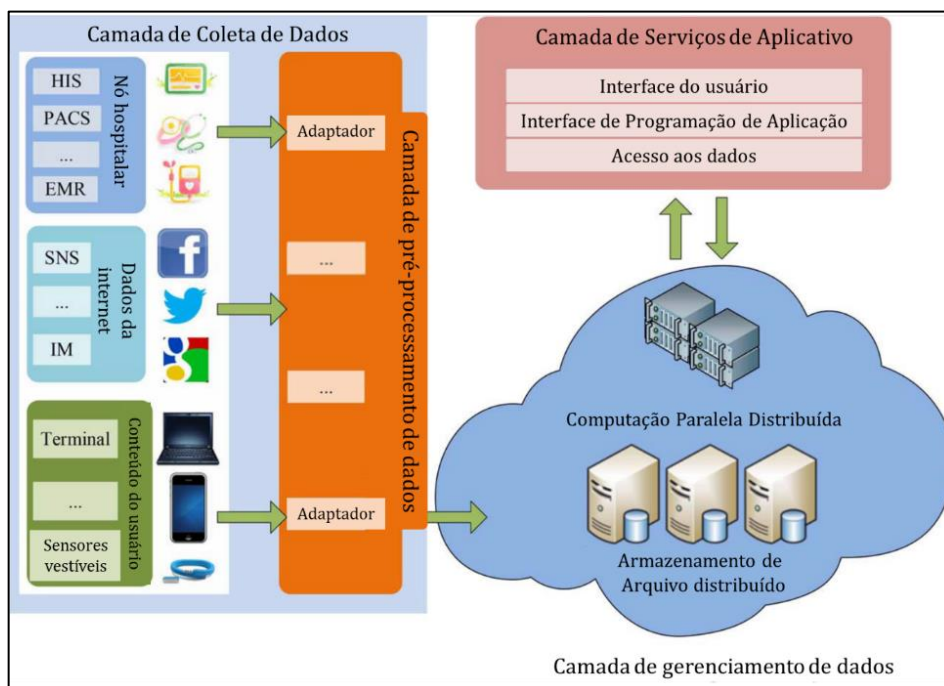
O núcleo de gerenciamento de recursos e programação em tempo real é dividido em três camadas. Na camada inferior, é feita uma medição de desempenho de ponta a ponta do sistema baseado nos dados coletados em tempo real como, por exemplo, gerenciamento de recursos virtuais, criação de máquinas virtuais, programação de tarefas para as máquinas virtuais, redução do tempo de transmissão de dados, entre outras coisas.

Na camada intermediária, existe um controle por prioridade para situações emergenciais do sistema – como acidentes de transporte, falta de energia – gerenciamento em tempo real da unidade central de processamento (CPU) e gerenciamento dinâmico de recursos. E, na camada superior, ocorre o monitoramento do usuário e do tráfego de dados em tempo real.

Por fim, Wang et al (2011) sugere a aplicação da arquitetura CPeSC³ no cenário de cuidados médicos da saúde, utilizando o modelo para o monitorar idosos que possuem riscos de queda em suas residências e, assim, alertar a equipe médica caso um acidente ocorra para que as ações necessárias sejam tomadas.

Outra arquitetura proposta é a Health-CPS, que consiste em três camadas: camada de coleta de dados, camada de gerenciamento dos dados e camada de serviços de aplicativo (ZHANG *et al.*, 2017), conforme ilustra a figura 18.

Figura 18 – Arquitetura Health-CPS.



Fonte: Traduzido de ZHANG et al. (2017).

Segundo os mesmos autores, a camada de coleta de dados consiste em nós (registros) de dados em adaptadores (*middlewares*). Essa camada fornece acesso à interface unificada do sistema para dados heterogêneos de múltiplas origens como: dados do hospital, internet ou o conteúdo gerado pelo usuário.

A camada de gerenciamento de dados consiste em dois módulos: o módulo de armazenamento de arquivos distribuídos (DFS) e o módulo de computação paralela distribuída (DPC).

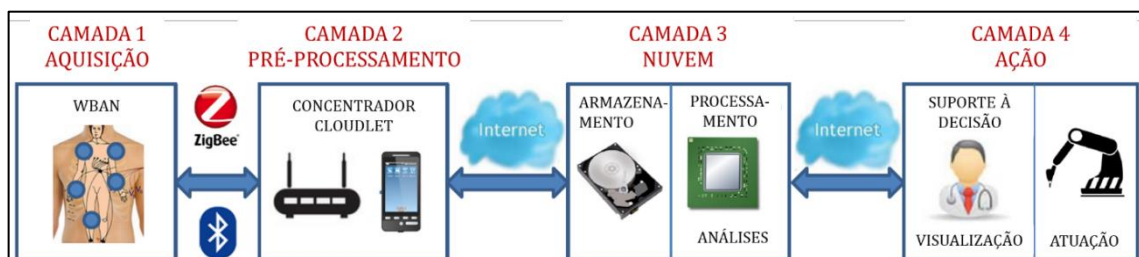
O DFS é responsável por otimizar o desempenho do sistema de saúde ao armazenar e prover a entrada e saída dos dados heterogêneos de saúde. O DPC realiza o processamento e a análise desses dados.

Por fim, a camada de serviços de aplicativo fornece aos usuários a visualização básica do resultado dos dados analisados, além de uma interface de programação de aplicação (API) para desenvolvedores que buscam fornecer serviços de saúde personalizados para os pacientes.

Existem também os CPS médicos (MCPS - *Medical Cyber-Physical Systems*). Os MCPS podem ser definidos como sistemas de dispositivos médicos que são críticos para a segurança, interconectados e inteligentes (LEE *et al.*, 2011). Jimenez, Jahankhani e Kendzierskyj (2020) definem MCPS como sistemas inteligentes relacionados à dispositivos médicos utilizados dentro de hospitais, clínicas ou dispositivos vestíveis.

Uma arquitetura típica de MCPS, conforme a figura 19, consiste em 4 camadas diferentes: camada de aquisição de dados, camada de pré-processamento de dados, camada de processamento na nuvem e camada de ação (KOCABAS; SOYATA; AKTAS, 2016).

Figura 19 – Arquitetura de um MCPS.



Fonte: Traduzido de Kocabas, Soyata e Aktas (2016).

A camada de aquisição de dados normalmente consiste em uma rede corporal de sensores sem fio (WBAN – *Wireless Body Sensor Network*) que utiliza protocolos de comunicação sem fio – como ZigBee, Bluetooth, WSN, RFID, entre outros – para aplicações como, por exemplo, monitoramento da temperatura corporal e pressão arterial, e

armazenamento de dados para acesso dos médicos (JIMENEZ; JAHANKHANI; KENDZIERSKYJ, 2020; KOCABAS; SOYATA; AKTAS, 2016).

A WBAN facilita a coleta de informações médicas do paciente e encaminha tais informações para uma porta de entrada do sistema, nesse caso, uma *cloudlet* – uma micro nuvem que está na borda da internet – onde ocorre o pré-processamento dos dados antes de enviá-los para a nuvem.

Segundo Kocabas, Soyata, Aktas (2016), isso ocorre porque os sensores da WBAN possuem baixa capacidade computacional e precisam transmitir os dados para um dispositivo intermediário que agregará todos os dados da rede de sensores em um concentrador – ou uma *cloudlet* – antes de enviá-los para a nuvem.

A terceira camada, denominada nuvem, é responsável por armazenar, proteger e analisar os dados que foram agregados e transmitidos pelo dispositivo intermediário – concentrador ou *cloudlet*. Assim, a nuvem permite que a equipe médica e os pacientes acessem os registros eletrônicos de saúde (EHR) do paciente (JIMENEZ; JAHANKHANI; KENDZIERSKYJ, 2020).

Segundo os mesmos autores, a quarta camada pode providenciar ações passivas ou ativas. Na ação passiva ocorre a visualização de informações para melhorar a tomada de decisão enquanto na ação ativa um atuador é utilizado para realizar modificações físicas no MCPS.

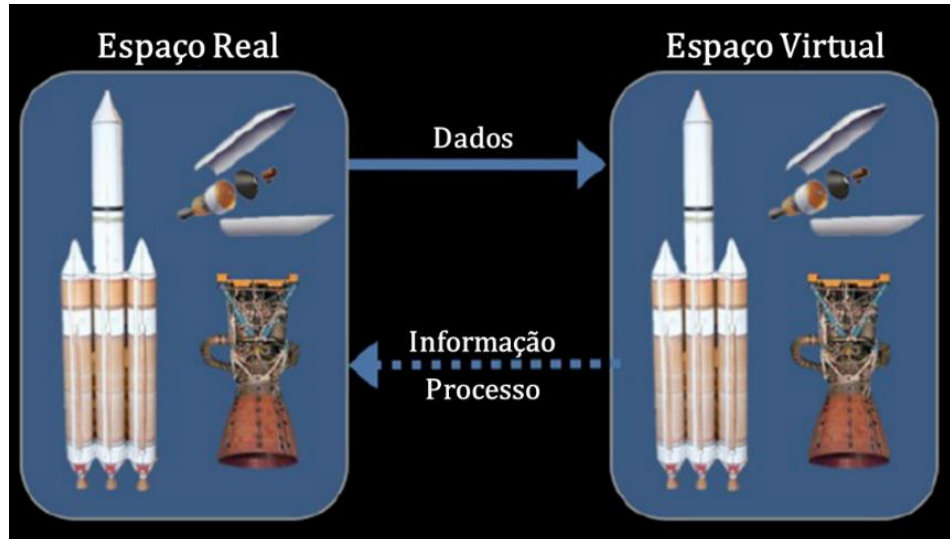
Percebe-se que as arquiteturas CPeSC³, Health-CPS e MCPS possuem alguns pontos em comum. Todas utilizam sensores vestíveis para a coleta de dados dos pacientes; os dados são enviados para um dispositivo intermediário que possui uma capacidade computacional suficiente para agregar os dados dos sensores e enviá-los para o sistema; utiliza-se normalmente a nuvem e, conseqüentemente, a internet para armazenar, analisar e processar os dados e convertê-los em informações; as informações são disponibilizadas para monitorar o paciente e melhorar a tomada de decisão da equipe médica.

Para realizar esse monitoramento do paciente – e de ativos físicos – uma solução da engenharia aplicada à saúde, denominada gêmeo digital, permite a virtualização do sistema para que seja possível, pela leitura dos dados sensoriais do paciente, realizar o monitoramento e, assim, criar um paciente virtual (JIMENEZ; JAHANKHANI; KENDZIERSKYJ, 2020).

3.2.2.2 Gêmeos digitais

O conceito de gêmeo digital – ou *Digital Twin* em inglês (DT) – foi proposto por Michael Grieves em 2002 e consiste em três dimensões (3D): espaço real, espaço virtual e a conexão entre esses dois espaços (GRIEVES, 2016). A figura 20 ilustra o conceito de DT.

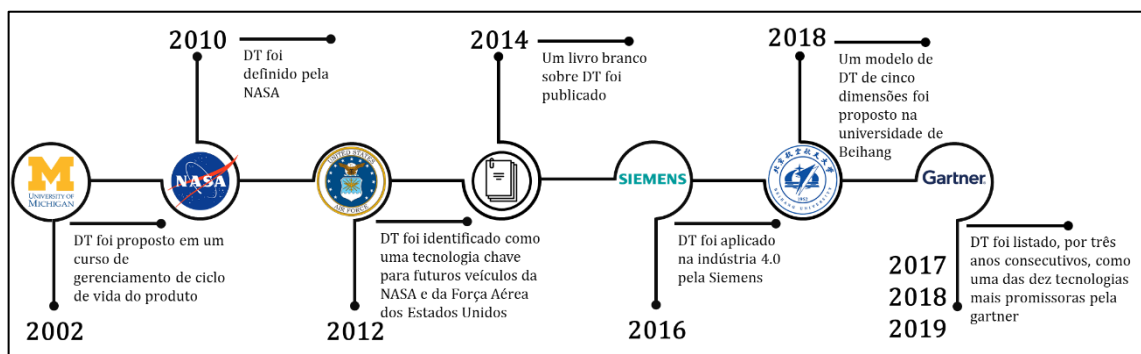
Figura 20 – Conceito de Digital Twin de 3 dimensões.



Fonte: Tradução de GRIEVES (2016).

Segundo o mesmo autor, o espaço real envia um fluxo de dados para o espaço virtual, enquanto o espaço virtual retorna um fluxo de informações para o espaço real. A partir deste conceito inicial, surgiram diversas definições de DT e a figura 21 ilustra a história desta tecnologia ao longo do tempo.

Figura 21 – História do DT.



Fonte: O autor (2020).

Em 2002 o conceito de DT foi proposto no curso de gerenciamento do ciclo de vida do produto na Universidade de Michigan por Michael Grieves. Em 2010 a NASA definiu DT como

“uma integração multifísica e multiescalar de um veículo ou sistema que usa os melhores modelos físicos, atualização de sensores, histórico da frota etc., para espelhar a vida de seu correspondente gêmeo voador.”

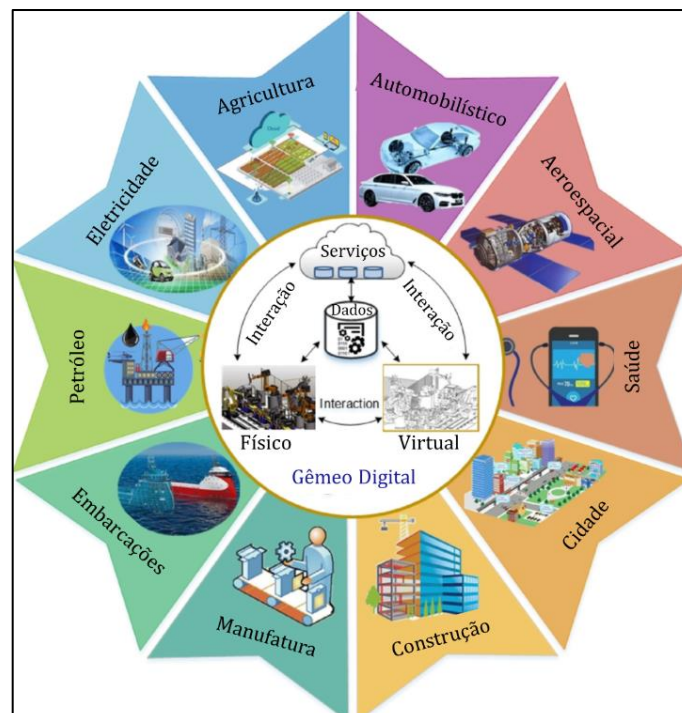
Em 2012, a Força Aérea dos Estados Unidos interpretou que o DT seria uma tecnologia essencial para futuros veículos. Por conseguinte, nota-se que o DT teve suas bases de aplicação primeiramente no setor aeroespacial. Em 2014, um *whitepaper* foi publicado por Michael Grieves em conjunto com a empresa Dassault Systèmes (DASSAULT SYSTÈMES, 2014; GRIEVES, 2014).

Em 2016 a Siemens aplicou o DT no contexto da indústria 4.0 e em 2018 um modelo de DT de cinco dimensões foi proposto. Nota-se nesse período que o conceito de DT começou a ser aprimorado e aplicado nos moldes da 4IR.

Visto a notoriedade do DT recentemente, a Gartner – empresa mundial líder em pesquisa e consultoria – definiu que o DT é uma das tendências de tecnologias estratégicas dos próximos anos em seus relatórios de 2017 a 2019 (GARTNER, 2016, 2017, 2018).

Atualmente o DT é aplicado em diversos setores como o aeroespacial (GOCKEL *et al.*, 2012), automotivo (CAMPEAN *et al.*, 2019), saúde (BRUYNSEELS; DE SIO; VAN DEN HOVEN, 2018; HEMPEL, 2017; KARAKRA *et al.*, 2019), entre outros, como demonstra a figura 22.

Figura 22 – Setores de aplicação de DT.



Fonte: Traduzido de Qi et al (2019).

O conceito de DT vem evoluindo e várias instituições e empresas estão contribuindo para a sua definição. A imagem a seguir – feito com a técnica nuvem de palavras – é um compilado de 41 definições de DT que englobam conceitos teóricos de universidades e conceitos industriais de empresas.

Figura 23 – Nuvem de palavras das definições de DT.



Fonte: O autor (2020).

Segundo a nuvem de palavras, nota-se o destaque dos termos: representação digital/virtual; produtos; ativos; objetos/ativos físicos; gêmeo digital e ciclo de vida de produto.

É interessante ressaltar a definição que diz que o DT é uma cópia digital de uma fábrica real, máquina, trabalhador etc., que é criada e pode ser independentemente expandida, atualizando-se automaticamente, bem como estar globalmente disponível em tempo real (BRENNER; HUMMEL, 2017).

Outra definição que se destaca é a que o DT é visto como a camada física do CPS, que evolui de forma independente e mantém integração próxima à camada física (ALAM; EL SADDIK, 2015).

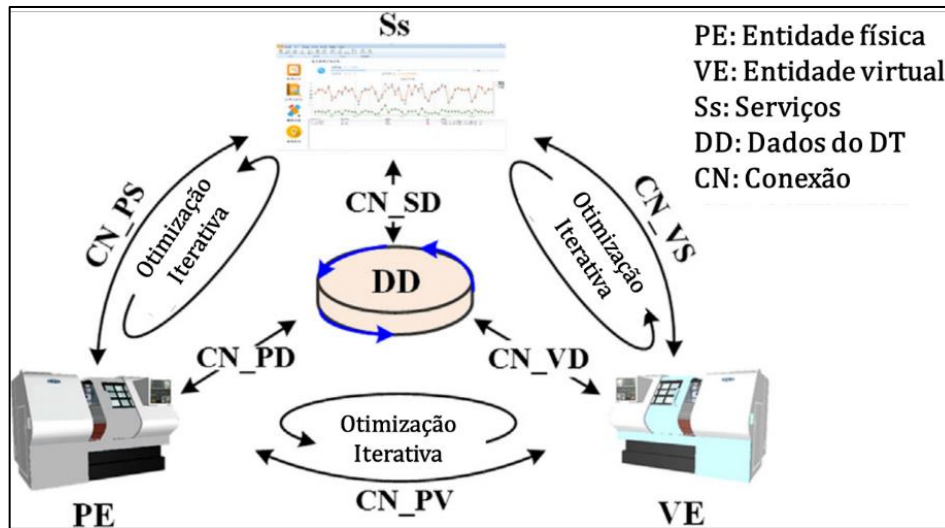
Houve não só uma evolução na definição de DT, como também em sua arquitetura. Como mencionado anteriormente, uma arquitetura de 5 dimensões (5D) foi proposta em 2018 com o intuito de aprimorar a arquitetura anterior de 3D.

A arquitetura de 5D é uma extensão da arquitetura de 3D proposta por Grieves (2014), que adiciona as camadas de dados e serviços do DT, conforme a expressão a seguir (TAO *et al.*, 2018):

$$M_{DT} = (PE, VE, Ss, DD, CN) \quad (3.1)$$

PE refere-se à entidade física, que existe no espaço físico; VE representa a entidade virtual, que consiste em uma série de modelos; Ss representa os serviços para PE e VE; DD são os dados do DT; e CN é a conexão que une as diferentes partes do DT, conforme ilustra a figura 24.

Figura 24 – Modelo conceitual do DT de 5 dimensões.



Fonte: Traduzido de Tao *et al* (2018).

Segundo os mesmos autores, a PE é composta por vários subsistemas e sensores. Os sensores coletam dados em tempo real dos subsistemas e de suas condições de funcionamento. A VE é a imagem espelhada da PE e é representada pela expressão abaixo:

$$VE = (Gv, Pv, Bv, Rv) \quad (3.2)$$

Na qual VE representa a entidade virtual; Gv representa o modelo geométrico que descreve parâmetros da entidade física; Pv são as propriedades físicas da entidade; Bv representa os mecanismos de resposta e os comportamentos da entidade e Rv é um conjunto de regras extraídas dos dados históricos da entidade física.

A camada Ss otimiza as operações da PE e garante a alta fidelidade da VE à PE por meio da calibração dos parâmetros da VE durante sua execução. Cada serviço disponibilizado pela Ss é descrito pela seguinte expressão:

$$Ss = (Função, Entrada, Saída, Qualidade, Estado) \quad (3.3)$$

Os dados do DT de 5D podem ser representados por:

$$DD = (Dpe, Dve, Dss, Dk, Df) \quad (3.4)$$

Onde Dpe, Dve, Dss, Dk e Df representam, respectivamente, os dados de PE, VE, Ss, domínio do conhecimento e fusão de todos os dados anteriores.

As conexões entre as camadas do DT de 5D são bidirecionais e os dados enviados diante das conexões são descritos por:

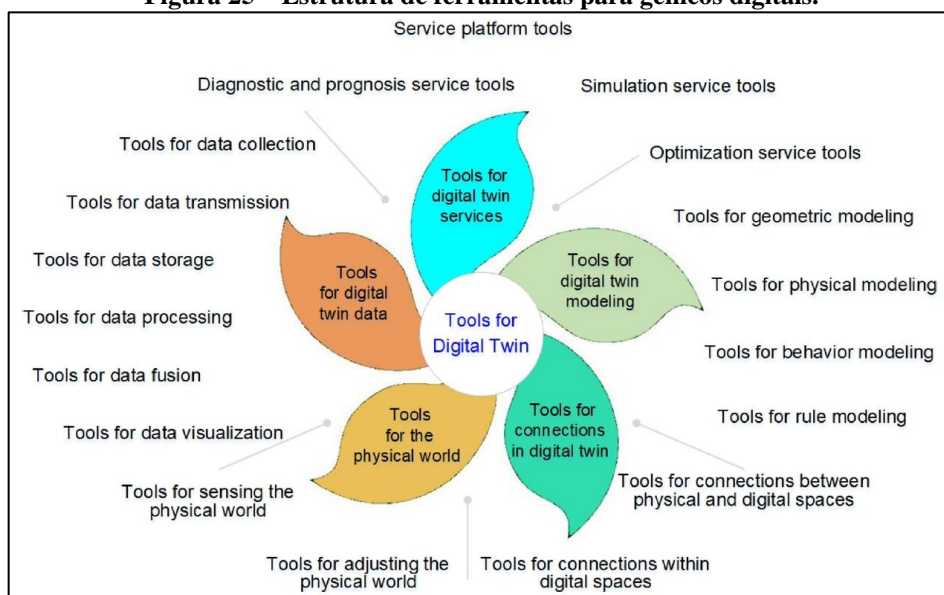
$$CN_{X_1-X_2} = (Fonte\ dos\ dados, unidade, valor, escopo, intervalo\ de\ amostra) \quad (3.5)$$

Onde $CN_{X_1X_2}$ é a variável que representa a conexão entre determinadas camadas e suas possíveis combinações, que são:

$$CN_{X_1-X_2} = CN_{Ss_DD}, CN_{PE_DD}, CN_{VE_DD}, CN_{PE_Ss}, CN_{VE_Ss}, CN_{PE_VE} \quad (3.6)$$

Qi et al (2019) elencou tecnologias e ferramentas a serem utilizadas para cada um desses elementos (PE, VE, Ss, DD, CN), sendo interessante citar o *software FlexSim Healthcare*, que foi adaptado especificamente para a área da saúde (FLEXSIM, 2020a; QI et al., 2019). A figura 25 ilustra os principais tipos de ferramentas utilizadas na estruturação de um DT.

Figura 25 – Estrutura de ferramentas para gêmeos digitais.

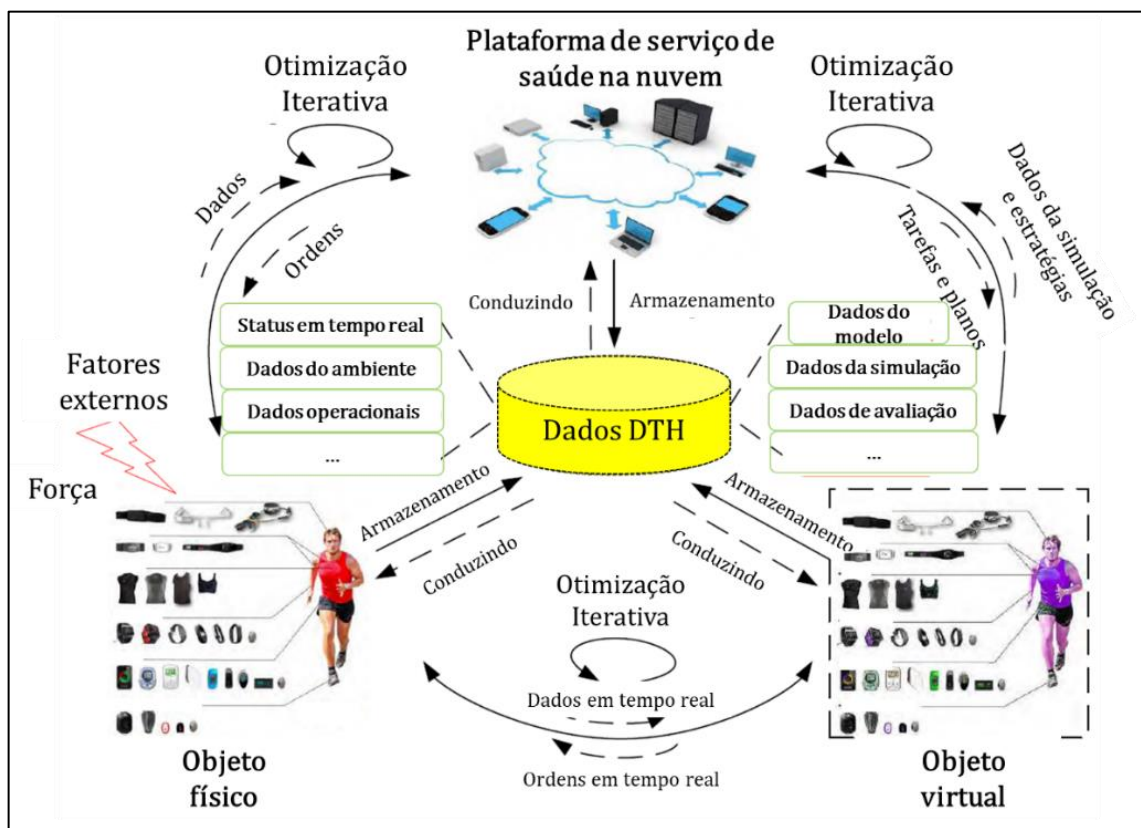


Fonte: Qi et al. (2019).

3.2.2.2.1 Gêmeos digitais aplicados à saúde

No contexto da saúde, o modelo conceitual de Tao *et al.* (2018) foi aplicado para serviços de saúde de idosos (LIU *et al.*, 2019). A estrutura proposta segue a mesma fórmula do modelo de DT de 5D, porém a camada de serviços utiliza o conceito de computação em nuvem e a camada de dados do modelo é voltada para dados de saúde de pacientes idosos, conforme ilustrado na figura 26.

Figura 26 – Modelo de DT aplicado à saúde de idosos.



Fonte: Traduzido de Liu et al. (2019).

Outra aplicação do DT na saúde foi o *Hosp'Twin*, que utilizou o *software FlexSim Healthcare* para criar um sistema preditivo baseado em simulação digital para análise dos fluxos dos pacientes dentro de um hospital (KARAKRA *et al.*, 2018, 2019). Além disso, Mazumder *et al.* (2019) criou um DT de um sistema cardiovascular, que é modelado com um coração com duas câmaras, equações hemodinâmicas e um mecanismo de controle de pressão para gerar variações de pressão e fluxo sanguíneo.

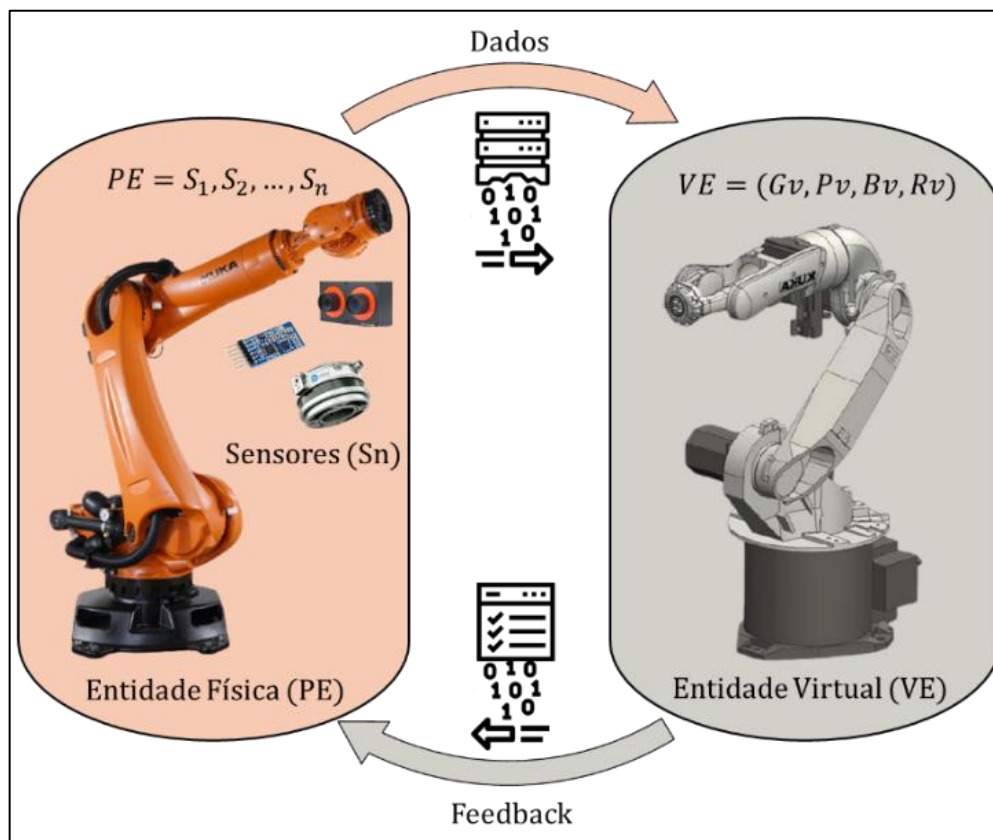
3.2.2.2 Integração entre CPS e DT

A tecnologia DT é essencial para construir um CPS e a combinação desses dois conceitos melhora a precisão e eficiência do gerenciamento e da tomada de decisões da empresa (TAO *et al.*, 2019). Visto que ambos os conceitos buscam a integração ciber-física, faz-se mister compreender suas diferenças teóricas e suas aplicações conjuntas.

Em uma perspectiva hierárquica, CPS e DT podem ser divididos em três níveis diferentes segundo sua magnitude: nível de unidade, nível de sistema e nível de sistema de sistemas (TAO *et al.*, 2019).

Segundo os mesmos autores, o nível de unidade refere-se a mínima unidade participante das atividades de manufatura como, por exemplo, um braço robótico, conforme ilustra a figura 27. O nível de unidade da integração entre CPS e DT compartilham dos mesmos objetos físicos.

Figura 27 – Nível de unidade de um CPS-DT.



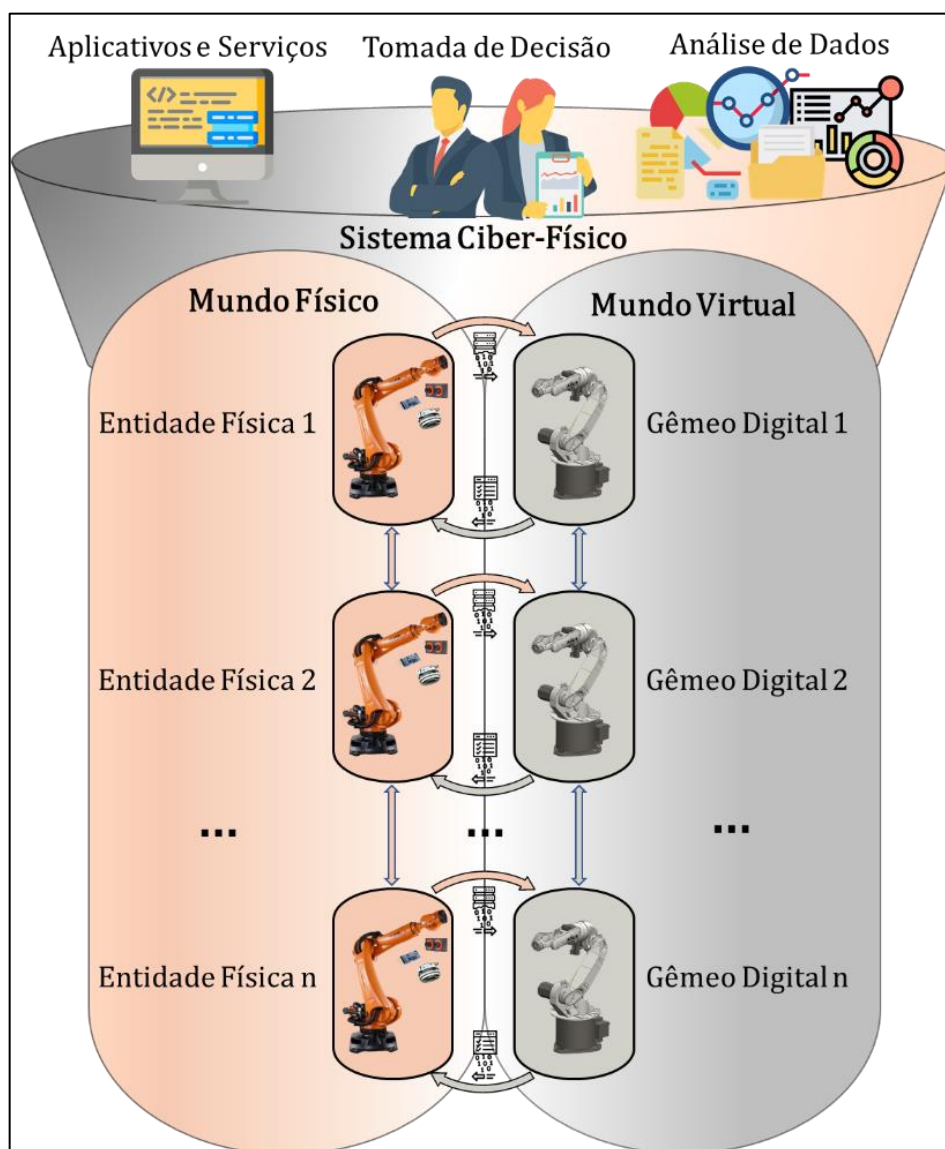
Fonte: O autor (2020).

O DT no nível de unidade deve ser formado com base em modelos geométricos, propriedades físicas, mecanismos de resposta, comportamentos e conjunto de regras extraídas

dos dados históricos para espelhar sua respectiva entidade física. Para estruturar um modelo fidedigno, são utilizados sensores acoplados à entidade física (S_1 a S_n) que enviam dados à entidade virtual para que ela possa retornar feedbacks com base no modelo criado.

No nível de sistema, por meio da Internet Industrial das Coisas (IIoT), ocorre a interconectividade e interoperabilidade de múltiplas unidades de DT's, permitindo um amplo fluxo de dados e coordenação de recursos (TAO *et al.*, 2019). Dessa forma, surge um CPS-DT, figura 28, no qual existe a possibilidade de comparação entre as diversas entidades do sistema.

Figura 28 – Nível de sistema de um CPS-DT.



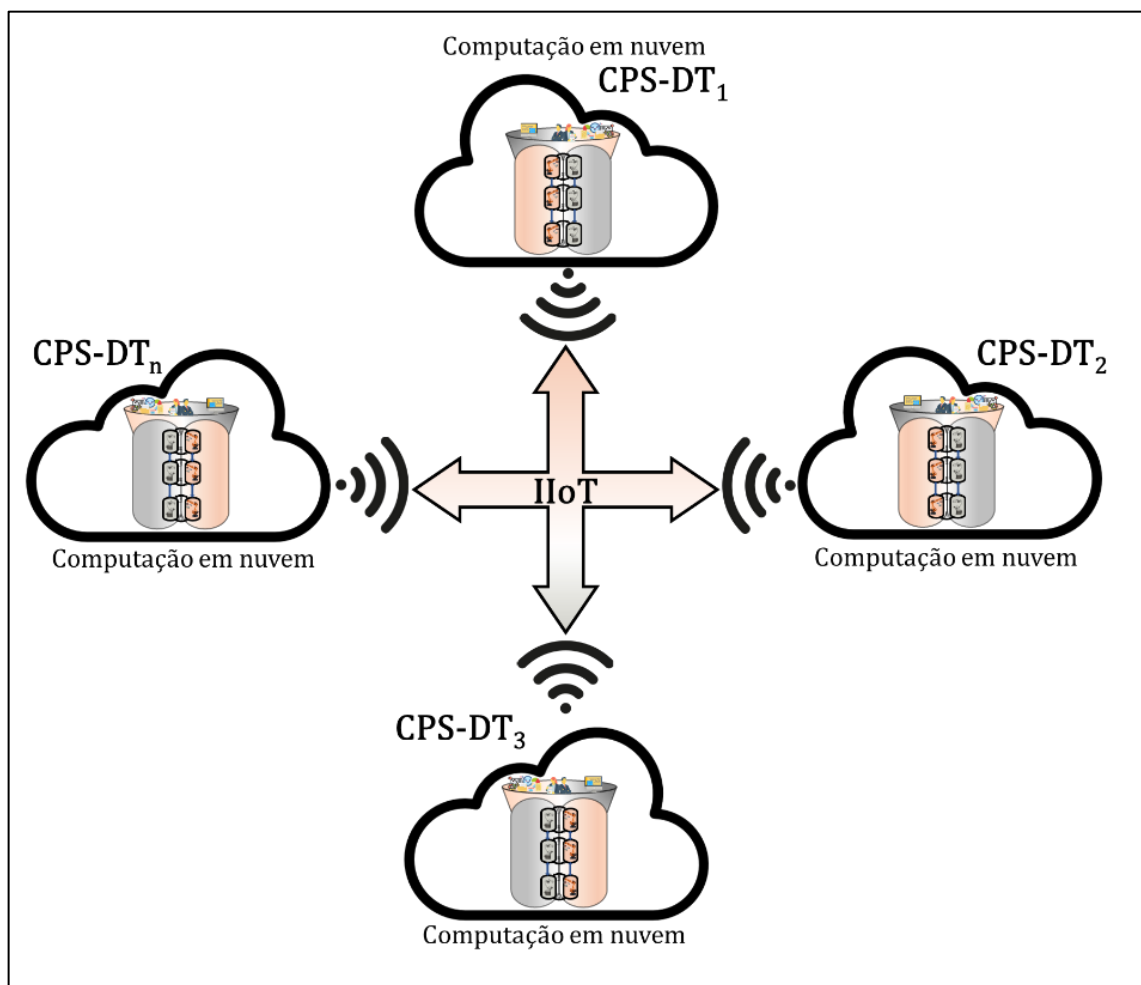
Fonte: O autor (2020).

Um CPS-DT começa a fazer mais sentido no nível de sistema, pois no nível de unidade não existem parâmetros externos para cada DT se basear. Segundo Lee, Bagheri e Kao (2015),

no nível de sistema há a possibilidade de comparação entre DT's, criação de interfaces homem-máquina (aplicativos e serviços) para a visualização de dados, identificação de variações e registros de memória e melhoria na tomada de decisão.

No nível de sistema de sistemas, existe uma interoperabilidade entre múltiplos sistemas que poderiam ser interconectados também pela IIoT. Comparado com o nível de sistemas, o nível de sistema de sistemas foca mais na integração de toda a empresa – ao invés da integração de um único setor – e até mesmo na colaboração entre empresas (TAO *et al.*, 2019).

Figura 29 – Nível de sistema de sistemas de um CPS-DT.

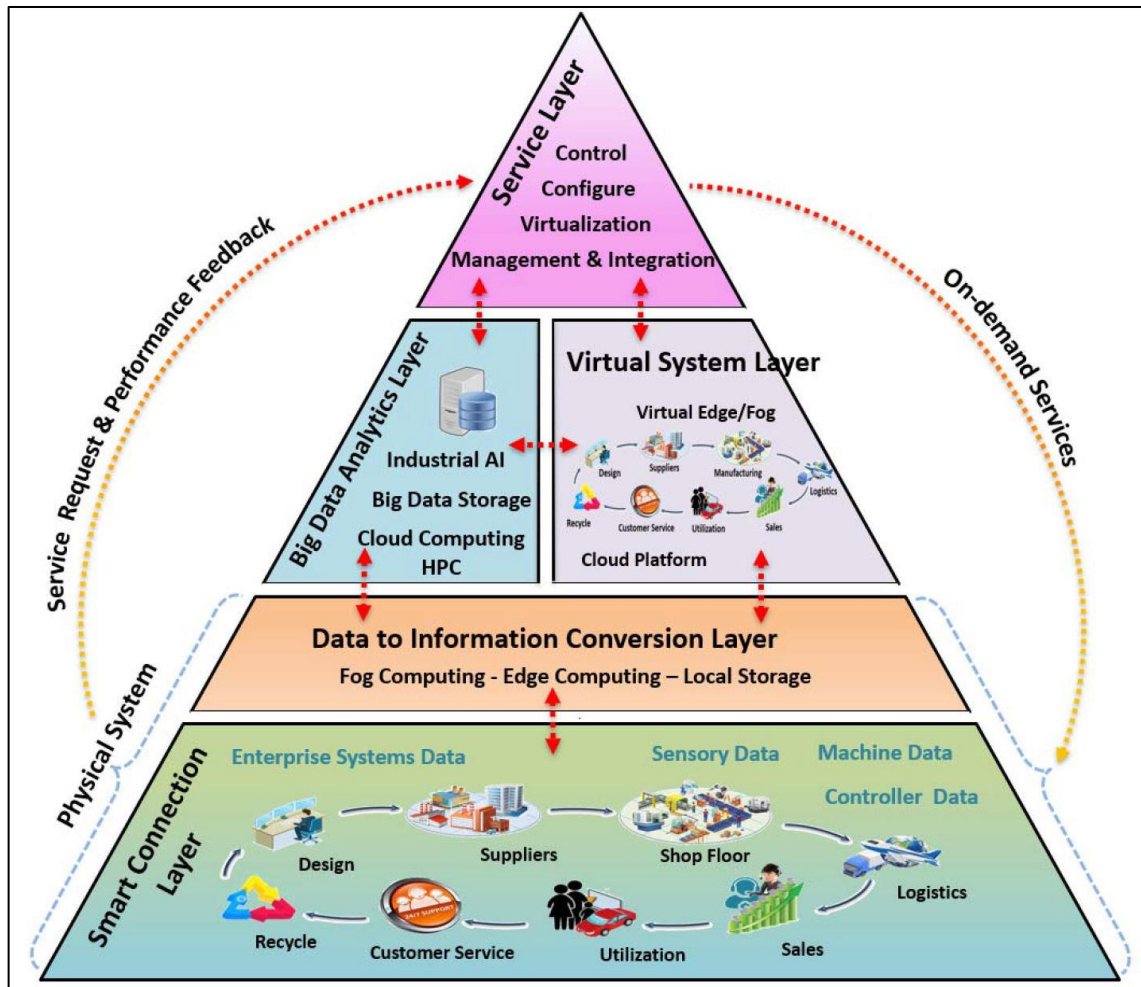


Fonte: O autor (2020).

Tao, Zhang e Nee (2019, p. 174), propõe a aplicação do conceito de computação em nuvem no nível de sistema de sistemas. Conforme ilustra a figura 29, os diferentes setores de uma empresa – ou até mesmo diferentes empresas – seriam interconectadas utilizando o conceito de computação em nuvem por meio da IIoT.

Por fim, é interessante ressaltar que foram elaboradas arquiteturas que uniram esses conceitos. Uma arquitetura baseada em aprendizado de máquina (ML), DT, e na arquitetura 5C-CPS – mencionada anteriormente – foi proposta, figura 30, com o intuito de facilitar a transformação digital para a manufatura inteligente e a indústria 4.0 (LEE *et al.*, 2020).

Figura 30 – Arquitetura DTDL-CPS.



Fonte: Lee *et al.* (2020).

A arquitetura DTDL-CPS possui cinco camadas: conexão inteligente, conversão de dados para informação, análise de *big data*, sistema virtual e serviços.

Segundo Lee *et al.* (2020), na camada de conexão inteligente, dados são extraídos de sensores, atuadores e controladores. Tais dados podem ser advindos do chão de fábrica ou dos sistemas empresariais de manufatura (ERP, MES, CRM, entre outros).

Os autores ressaltam que alguns fatores devem ser levados em consideração e que a tecnologia 5G (LEE; AZAMFAR; MILLER, 2020) poderia cumprir todos os requisitos propostos, a saber:

- a) sincronização dos dados entre fontes;
- b) baixa latência, baixo consumo de energia e alta confiabilidade para a transferência dos dados para a nuvem;
- c) segurança e privacidade dos dados;
- d) interconectividade entre objetos inteligentes.

Na camada de conversão de dados em informação, recursos como a computação em nevoeiro (*Fog computing*) e computação de borda (*Edge computing*) poderiam ser utilizados para:

- a) reduzir a latência de comunicação entre entidades inteligentes e a nuvem;
- b) realizar um pré-processamento e extração das informações requisitadas antes de enviar os dados para a nuvem;
- c) gerenciar as interações entre os objetos inteligentes da camada anterior;
- d) executar ordens de controle para aumentar a resiliência da fabricação e evitar distúrbios.

A camada de análise de *big data* é o centro da arquitetura em relação ao armazenamento e análise de dados. Os autores também sugerem a utilização de métodos de aprendizagem profunda de máquinas (*Deep learning* - DL). Interessante ressaltar que esse método também foi proposto na área da saúde para monitorar a saúde de pacientes por meio de sensores vestíveis (KING *et al.*, 2017).

A camada de sistema virtual – ou DT – tem o intuito de espelhar as entidades físicas – ou objetos inteligentes – do modelo, e consiste em selecionar e construir o modelo, e monitorar e atualizar o desempenho do modelo construído (LEE *et al.*, 2020).

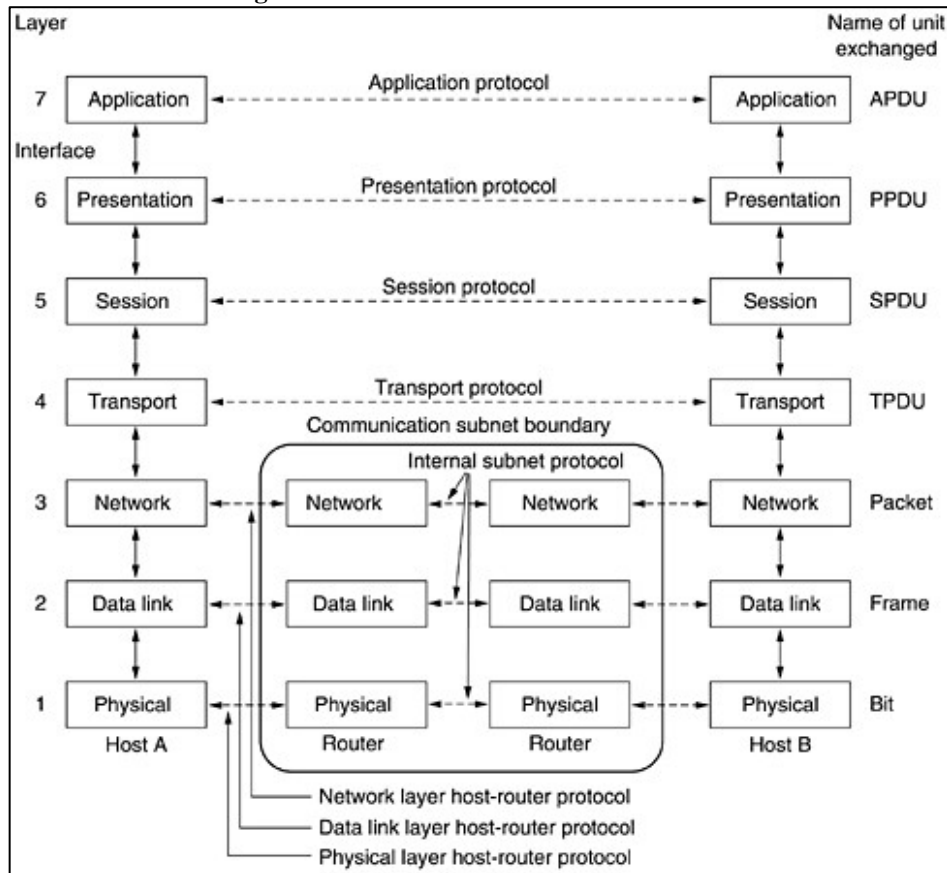
Por fim, a camada de serviços permite o controle, visualização, otimização e monitoramento de saúde dos equipamentos da camada física do sistema. Serviços esses que facilitam o processo de tomada de decisão dos usuários (LEE *et al.*, 2020).

3.2.3 Internet das coisas

Para entender sobre a Internet das Coisas (IoT), é necessário entender primeiramente sobre os modelos de interconexão de sistemas abertos. Mais especificamente, sobre o modelo ISO / OSI (KUROSE; ROSS, 2017; TANENBAUM, 2003; ZIMMERMANN, 1980), figura

31, que é um modelo conceitual que informa o que cada camada de rede deve fazer e é intrínseco para a compreensão das arquiteturas IoT, visto que essas focam no fluxo de dados do sistema.

Figura 31 – Modelo de referência ISO / OSI.



Fonte: Tanenbaum (2003).

Segundo Tanenbaum (2003), a camada física – *physical* – trata da transmissão de bits brutos; a camada de enlace – *data link* – transforma um canal bruto de transmissão em uma linha livre de erros, além de enviar pacotes de dados ao invés de bits; a camada de rede – *network* – controla a operação da sub-rede e cria rotas para o envio dos pacotes de dados; a camada de transporte – *transport* – assegura que todos os pacotes de dados chegarão corretamente à outra extremidade; a camada de sessão – *session* – permite que os usuários de diferentes máquinas estabeleçam sessões entre eles; a camada de apresentação – *presentation* – está relacionada à sintaxe e à semântica das informações transmitidas e a camada de aplicação – *application* – contém uma série de protocolos necessários para os usuários.

A IoT é intrínseca às arquiteturas propostas anteriormente. A IoT é considerada como um novo paradigma. A ideia básica desse conceito é a presença generalizada em torno de nós – registros – de uma variedade de objetos que, por meio de esquemas de endereçamento

exclusivo, são capazes de interagir uns com os outros e cooperar com seus vizinhos para alcançar objetivos em comum (ATZORI; IERA; MORABITO, 2010).

É considerada um paradigma porque une os conceitos e visões de várias comunidades científicas. Segundo Atzori, Iera e Morabito (2010), a IoT busca a convergência entre a visão orientada à internet, coisas e interoperabilidade semântica entre sistemas.

Segundo Gubbi et al (2013, p. 1646), a visão orientada à internet, coisas e interoperabilidade entre sistemas correspondem, respectivamente, à middlewares, sensores e conhecimento.

O termo IoT foi cunhado primeiramente por Kevin Ashton em 1999 no contexto que gerenciamento da cadeia de suprimentos. No entanto, na década passada, a definição tornou-se mais inclusiva, cobrindo uma ampla gama de aplicações como saúde, serviços e outras indústrias (GUBBI *et al.*, 2013). Al-Fuqaha *et al.* (2015), ilustra os possíveis ramos de aplicação da IoT na figura 32.

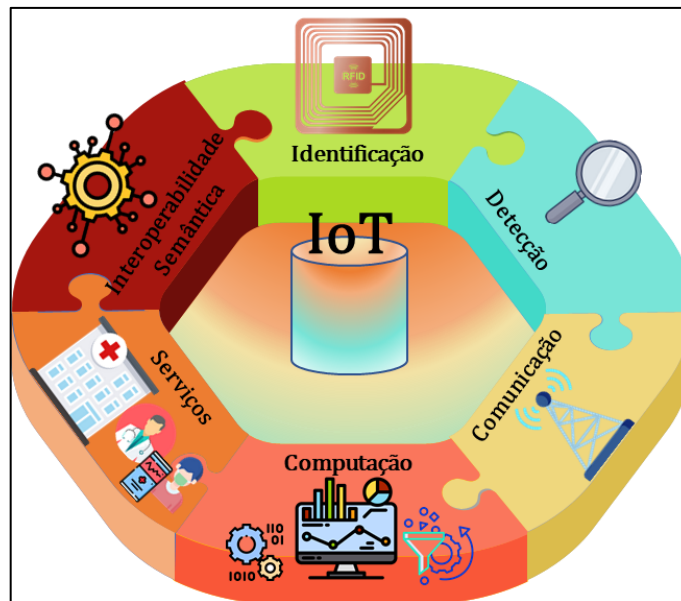
Figura 32 – Visão geral dos setores de aplicação da IoT.



Fonte: Al-Fuqaha et al (2015).

Diante dos possíveis setores de aplicação, faz-se mister entender também quais os principais pilares da IoT. Al-Fuqaha et al (2015) definiu como elementos essenciais para o funcionamento da IoT a identificação, detecção, comunicação, computação, serviços e a interoperabilidade semântica, conforme ilustrado na figura 33 para o setor da saúde.

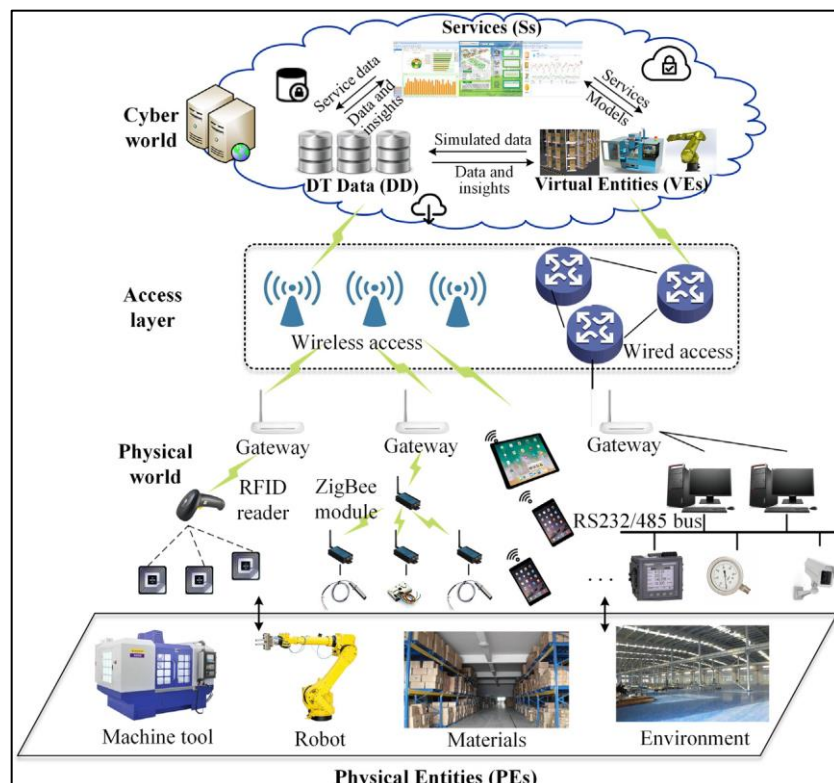
Figura 33 – Elementos que compõe a IoT.



Fonte: O autor (2020).

Tao, Zhang e Nee (2019, p. 253), unindo os conceitos de DT, CPS e IoT, elaboraram uma arquitetura na qual a IoT conecta as entidades físicas (PE's) no mundo físico e as entidades virtuais (VE's), os dados e serviços no mundo cibernético, conforme ilustra a figura 34.

Figura 34 – Arquitetura IoT-CPS-DT.



Fonte: Tao, Zhang e Nee (2019).

Nessa arquitetura, as PE's são conectadas por meio de sensores e atuadores, que podem coletar dados em tempo-real. Visto que os dados podem ser transmitidos por diferentes protocolos de comunicação (Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee, entre outros), utilizam-se portas de entrada (*gateways*) para analisar os protocolos de comunicação, transformar, encapsular e padronizar os dados (pré-processamento), e oferecer suporte à transmissão desses dados de uma forma padronizada.

Para o processamento e a análise desses dados, utiliza-se a computação em nuvem, por meio da camada de acesso, visto a ampla capacidade computacional dos servidores em relação aos *gateways*.

Na nuvem, os elementos cibernéticos do sistema se conectam. Assim, os dados do sistema são usados para dar suporte às VE's e aos serviços, enquanto que os dados de simulação das VE's e dos serviços são injetados nos servidores de dados no sistema (TAO; ZHANG; NEE, 2019). Isto é, o sistema possui um ciclo no qual ele se autoalimenta.

Em suma, os sensores acoplados nas PE's transmitem dados – por meio de diferentes protocolos de comunicação – que são pré-processados por uma porta de entrada do sistema e transmitidos para a nuvem. Os servidores na nuvem, por terem maior capacidade computacional, armazenam e analisam esses dados, que viram *inputs* para serviços e para as VE's, que gerarão dados como *output* para corrigir as PE's por meio de atuadores e serviços para melhorar a tomada de decisão. Tudo isso ocorrendo em um fluxo contínuo e em tempo-real.

3.2.4 Big data analytics

Visto a grande quantidade de dados que são gerados nesses sistemas, a área de cuidados da saúde tornou-se um dos principais usuários emergentes para a análise de big data (DIMITROV, 2016).

Segundo Gandomi e Haider (2015), o termo *big data* consistia inicialmente em três variáveis: volume, variedade e velocidade. Mais duas variáveis foram propostas ao conjunto: veracidade e valor (RAMADAN, 2017). Assim, os 5V's do *big data* são: Volume, Variedade, Velocidade, Veracidade e Valor.

Volume refere-se à grande quantidade de dados; variedade diz respeito aos tipos dos dados (estruturados, semiestruturados ou não estruturados); velocidade refere-se à alta velocidade na qual esses dados precisam ser processados e transmitidos; veracidade consiste na

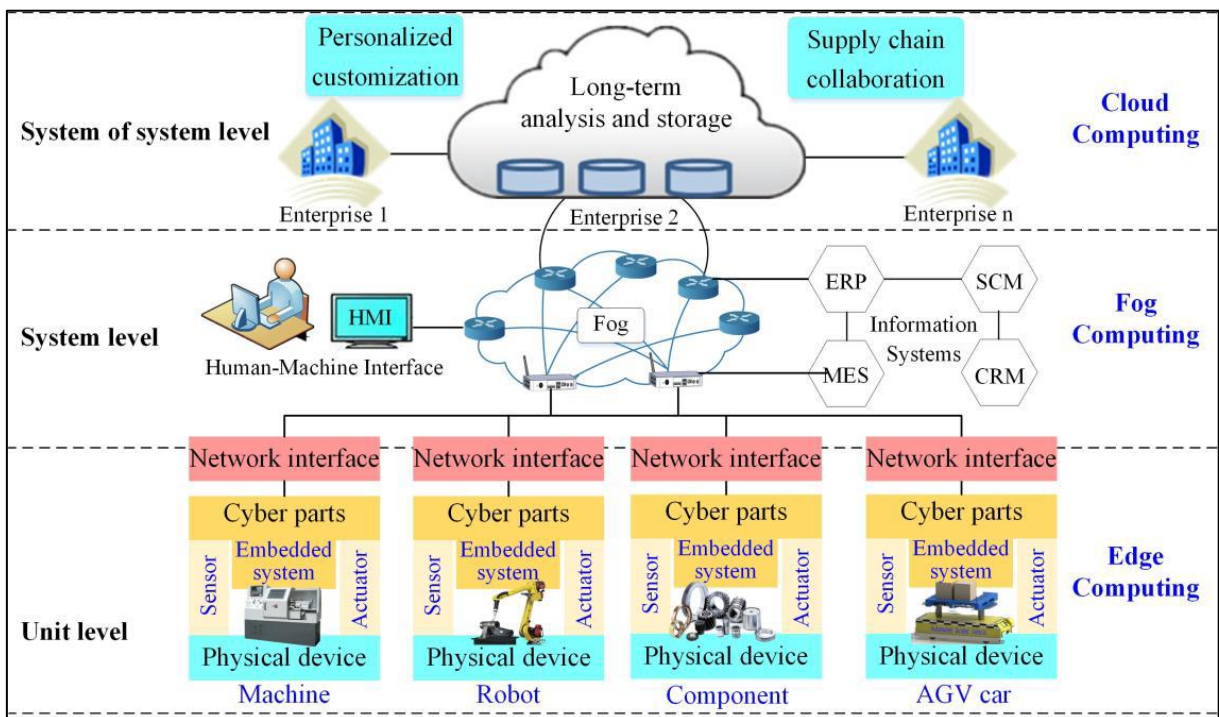
verificação de inconsistência e incerteza dos dados e valor significa como esses dados são convertidos em informação valiosas para a organização.

3.2.5 Computação em nuvem, em nevoeiro e de borda

Visto essa grande quantidade de dados de vários tipos que necessitam ser enviados em uma alta velocidade para que o sistema funcione em tempo real, a utilização da computação em nuvem, em nevoeiro e em borda são recomendadas.

Qi et al (2018) menciona que para o nível de sistema de sistemas, nível de sistema, e nível de unidade – de um modelo que integra os conceitos de CPS e DT – utilizar-se-ia os conceitos de computação em nuvem, computação em nevoeiro e computação em borda, respectivamente, conforme ilustra a figura 35.

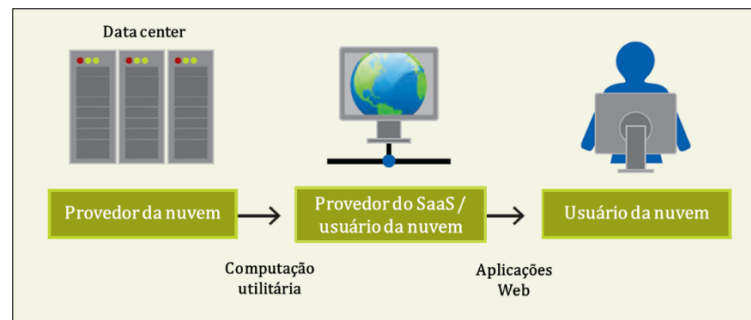
Figura 35 – Relação entre níveis de sistema e computação de borda, nevoeiro e em nuvem.



Fonte: Qi et al (2018).

A computação em nuvem, demonstrada na figura 36, refere-se tanto aos aplicativos entregues pela internet em formato de serviços – *Software as a Service* (SaaS) – quanto ao hardware e aos sistemas de *software* nos *data centers* que fornecem esses serviços (ARMBRUST *et al.*, 2012).

Figura 36 – Computação em Nuvem.



Fonte: Traduzido de Armbrust *et al.* (2010).

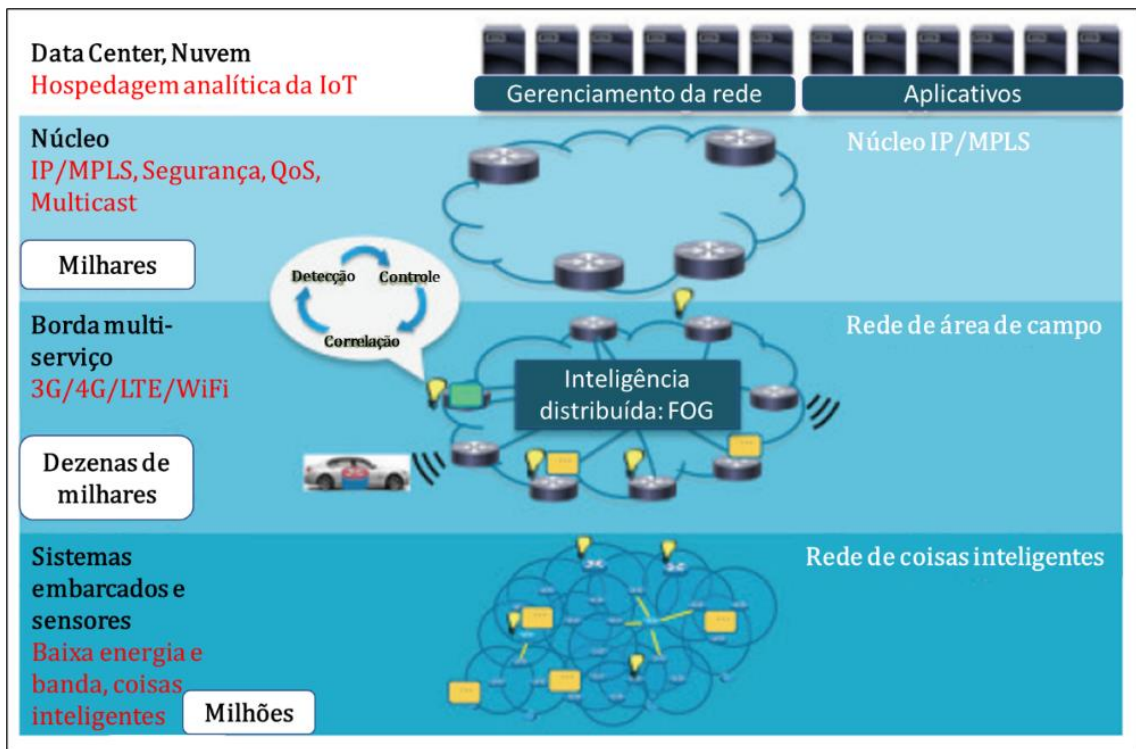
Na computação em nuvem, o provedor – detentor do *data center* – utiliza da computação utilitária para mensurar os serviços oferecidos em formato de aplicações web (SaaS) para cobrar o usuário da nuvem pela sua utilização. Alguns autores referem-se ao método de monetização da computação em nuvem como “*pay as you go*”, na tradução literal, pague conforme você for usando.

A computação em nevoeiro é uma extensão do paradigma da computação em nuvem até a borda da rede, e busca minimizar a latência dos serviços e o tempo de resposta média das aplicações, assim, melhorando a experiência do usuário final (TANEJA; DAVY, 2016). Bonomi *et al.* (2010), define que as principais características da computação em nevoeiro são:

- a) Baixa latência e reconhecimento de localização;
- b) Ampla distribuição geográfica;
- c) Mobilidade;
- d) Grande número de nós;
- e) Papel predominante da rede sem fio;
- f) Forte presença de transmissão de dados pela internet (*streaming*) e aplicativos em tempo real;
- g) Heterogeneidade.

Conforme ilustrado na figura 37, os dispositivos inteligentes – sensores e sistemas embarcados – possuem baixa capacidade computacional, assim, por meio de protocolos de comunicação – 3G, 4G, LTE, WiFi, ZigBee, Bluetooth, LoRa, entre outros – enviam os dados para *gateways* que formam uma rede multi-serviço – WBAN, PAN, FAN entre outras – que irá transmitir por meio da internet – IP/MPLS – os dados para o *data center*, onde ocorre o armazenamento e a análise dos dados dos dispositivos inteligentes.

Figura 37 – Computação em Nevoeiro.



Fonte: Traduzido de Bonomi *et al.* (2010).

Já a computação de borda é um paradigma em que recursos substanciais de computação e armazenamento – também conhecido como *cloudlets* ou *micro data centers* – são colocados na borda da internet nas proximidades de dispositivos móveis ou sensores (SITTÓN-CANDANEDO *et al.*, 2019)

A computação de borda pode-se referir também às tecnologias que permitem que a atividade computacional seja realizada na borda da rede. Define-se borda como quaisquer recursos de computação e rede entre as fontes de dados e os centros de dados em nuvem (SHI *et al.*, 2016).

Segundo os mesmos autores, a computação de borda é intercambiável com a computação em nevoeiro, mas a computação de borda é mais focada nos dispositivos inteligentes, enquanto a computação em nevoeiro se concentra mais na infraestrutura do sistema como um todo.

Os três conceitos de computação apresentados acima podem ser implementados, por exemplo, em conjunto com a arquitetura IoT-CPS-DT proposta por Tao, Zhang e Nee (2019).

No contexto da saúde, um estudo de caso utilizando computação em nevoeiro foi realizado para a extração de dados de eletrocardiogramas (GIA *et al.*, 2015). Além disso, Filho (2017) compilou os principais tipos de dados, protocolos de comunicação, protocolos de

aplicação e formato dos dados de aplicações de saúde baseado em arquiteturas IoT, conforme ilustra a figura 38.

Figura 38 – Principais tipos, formatos, protocolos de comunicação e aplicação dos dados.



Fonte: O autor (2020). Adaptado de Filho (2018).

3.3 Saúde 4.0

Assim, diante de todos os conceitos explicados acima e de suas aplicações no ramo da saúde, a saúde 4.0 pode ser vista como um conceito estratégico do domínio da saúde derivado do conceito de indústria 4.0 (THUEMMLER; BAI, 2017, p. 30).

Existem diversas aplicações que correlacionam os conceitos e tecnologias da quarta revolução industrial com a saúde e foi feito um compilado dos principais estudos de saúde 4.0 para a elaboração e aplicação de uma arquitetura de sistemas em um departamento de emergência hospitalar, vide o apêndice B.

4 ARQUITETURA H4.0A – *Health 4.0 Oriented Architecture*

A arquitetura H4.0A propõe a análise e a adaptação das arquiteturas de IIoT, CPS, DT e das tecnologias e conceitos da 4IR ao contexto da saúde 4.0. A arquitetura H4.0A refere-se à *Health 4.0 Oriented Architecture* – ou Arquitetura orientada à saúde 4.0 – e foi aplicada à um departamento de emergência de um hospital com o intuito de exemplificar e explicar seu funcionamento.

4.1 Terminologia

Visto a gama de diferentes definições e perspectivas de diversos autores sobre os temas abordados, é essencial definir alguns conceitos como base para a elaboração da arquitetura.

4.1.1 Ativo

Segundo a norma DIN SPEC 91345:2016-04 (RAMI 4.0), ativo é um objeto físico que possui valor para uma organização. Os ativos no contexto da saúde 4.0 serão considerados como a menor parte divisível do sistema e se dividem em elementos humanos e elementos materiais.

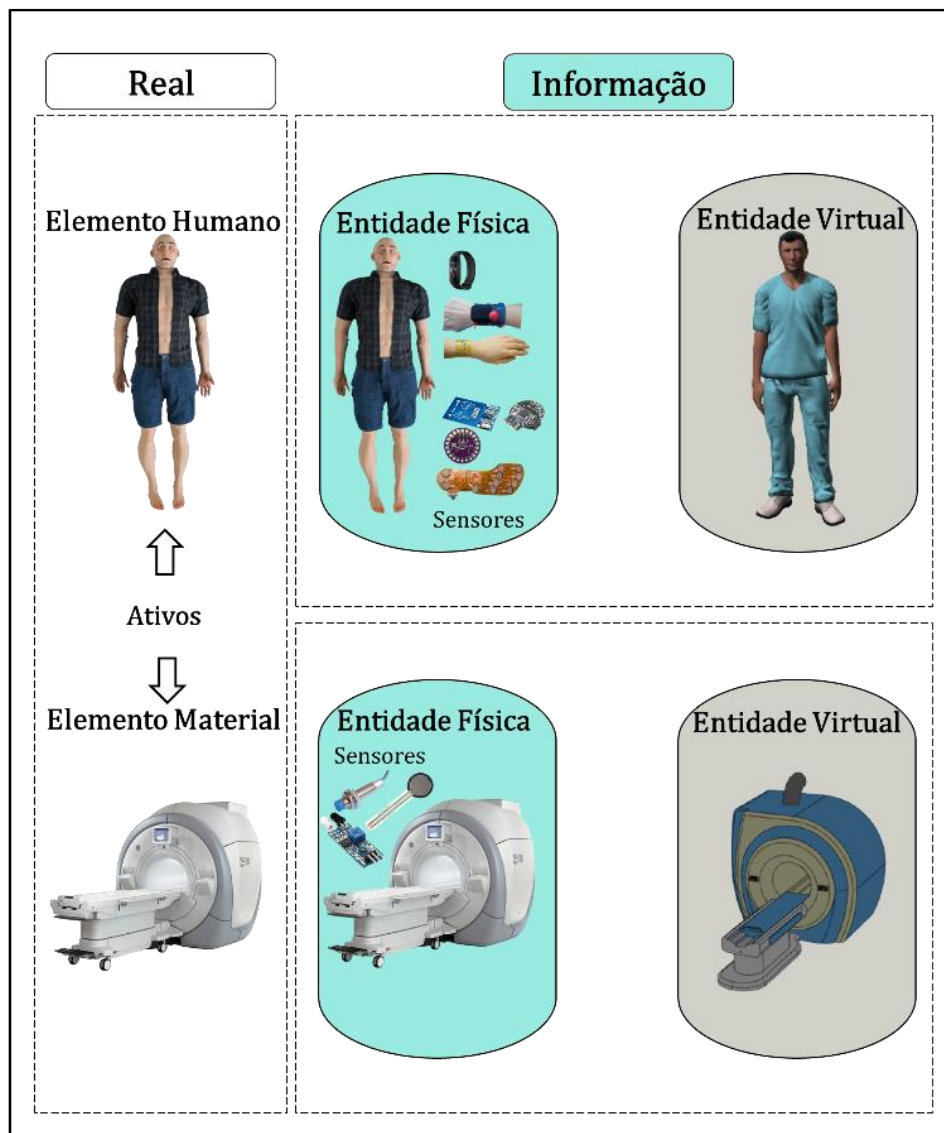
4.1.2 Entidade

A entidade é um objeto exclusivamente identificável que é administrado no mundo da informação devido à sua importância (DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, 2016). Existem dois tipos de entidades na arquitetura, as entidades físicas – que diz respeito aos ativos físicos – e a entidades virtuais – representações virtuais das entidades físicas.

A figura 39 ilustra os conceitos de ativos e entidades da arquitetura. No mundo real existem ativos que se dividem entre elementos humanos e elementos materiais. No mundo informacional existem entidades físicas de um elemento humano e entidades físicas de um elemento material – e suas respectivas entidades virtuais.

Para que os ativos do mundo real sejam considerados como entidades físicas no mundo informacional, sensores devem ser acoplados tanto nos elementos humanos quanto nos elementos materiais, para que assim seja possível coletar dados e identificá-los individualmente no ambiente informacional.

Figura 39 – Comparação entre ativos e entidades na arquitetura.

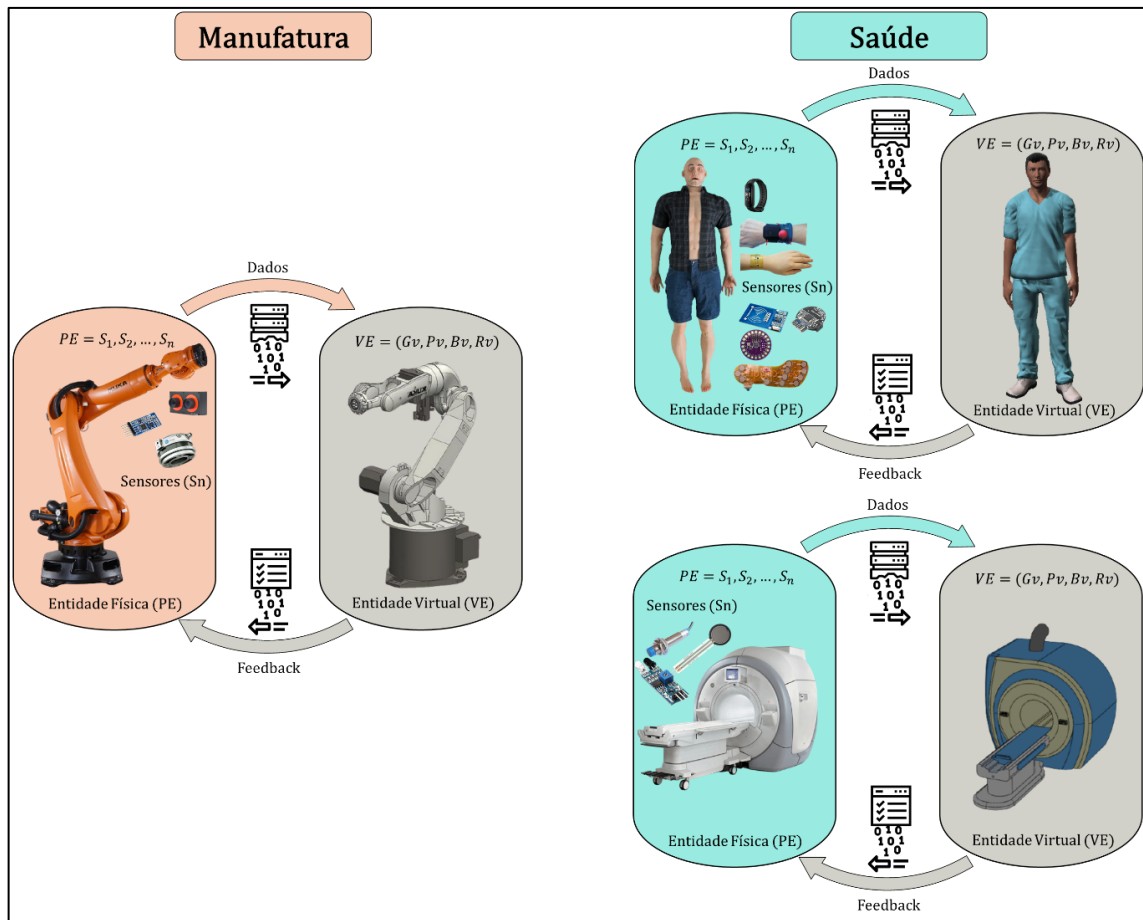


Fonte: O autor (2020).

4.1.3 Gêmeo digital

Visto a nuvem de palavras sobre a definição de DT, o conceito inicial proposto por Grieves (2014, 2016) e as correlações e comparações feitas por Tao, Qi e Nee (2019) e Lee *et al.* (2020), DT será considerado na arquitetura como o conjunto unitário da representação virtual (VE) de uma entidade física (PE), sendo que a PE enviará dados para a sua VE por meio de sensores e receberá *feedbacks* dela. Observa-se na figura 40 a migração do conceito de DT da indústria 4.0 para o contexto da saúde 4.0.

Figura 40 – DT no contexto da saúde 4.0.



Fonte: O autor (2020).

A figura 40 contempla três unidades de DT – uma entidade no âmbito da manufatura e duas na área da saúde – sendo que duas unidades são relacionadas à elementos materiais e uma unidade à um elemento humano.

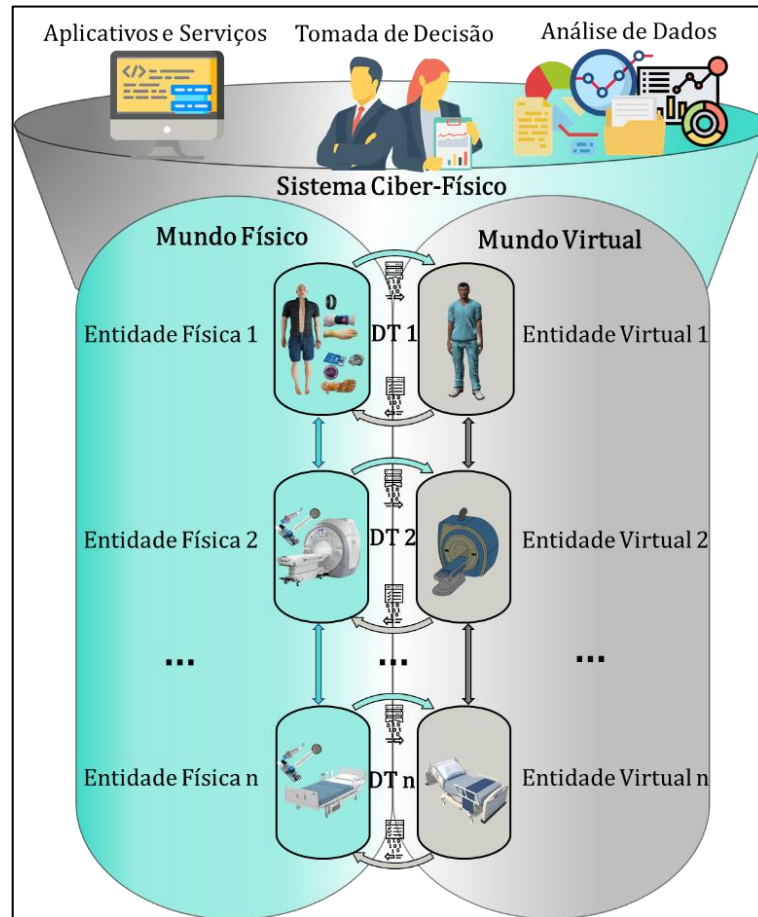
4.1.4 Sistema ciber-físico

Lee, Bagheri e Kao (2015) consideram que os CPS gerenciam sistemas interconectados por seus ativos físicos e suas capacidades computacionais. Tao *et al* (2019) define que a tecnologia DT pode ser considerada uma base necessária para a construção e realização do CPS, e uma forma prática para a integração ciber-física (TAO; ZHANG; NEE, 2019).

Assim, na arquitetura presente, considera-se a base de integração ciber-física do CPS um conjunto de DT's interconectados. Em uma análise sistemática, o DT está no nível de

unidade e o conjunto de vários DT's formam a base do CPS, que está no nível de sistemas. A figura 41 ilustra a correlação entre os conceitos.

Figura 41 – CPS no contexto da saúde 4.0.



Fonte: O autor (2020).

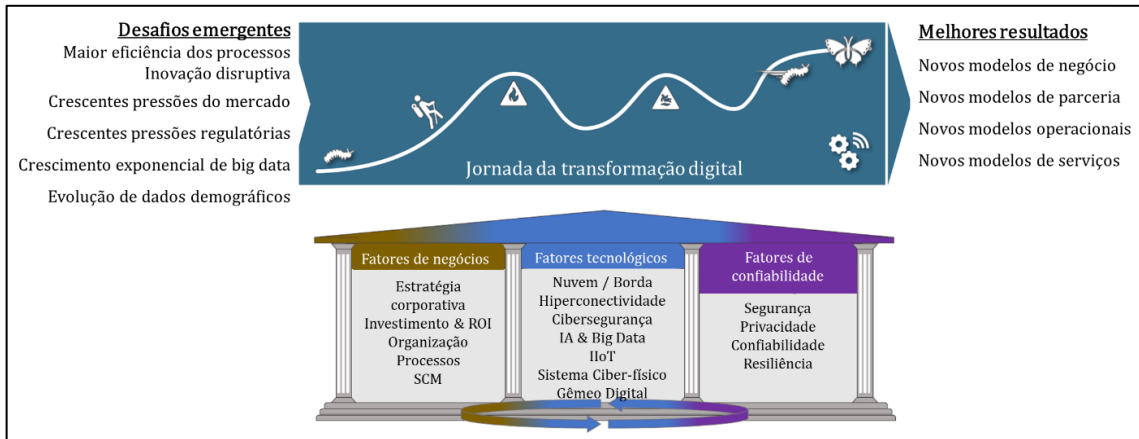
4.2 Convergência e comunicação entre os mundos físico e virtual

Diante da premissa de que as revoluções industriais (IR's) são construídas com base nas revoluções anteriores, é interessante notar que a tecnologia operacional, a tecnologia da informação e a internet – desenvolvidas principalmente durante a terceira revolução industrial (3IR) – são intrínsecas à quarta revolução industrial (4IR). A principal diferença entre os sistemas da 3IR e da 4IR é que, na última, propõe-se a convergência entre o mundo físico e o virtual.

Essa convergência entre os dois mundos é relacionada ao conceito de transformação digital. Diante da constatação de que o sistema de saúde atual é antiquado (PALMISANO, 2008), do crescimento exponencial de dados, do envelhecimento da população e de possíveis

futuras pandemias, é necessário que na quinta onda da saúde ocorra uma transformação digital, pois os sistemas da quinta onda são complexos e sensíveis à pequenas mudanças (HANLON *et al.*, 2011). A figura 42 ilustra a jornada para realizar a transformação digital.

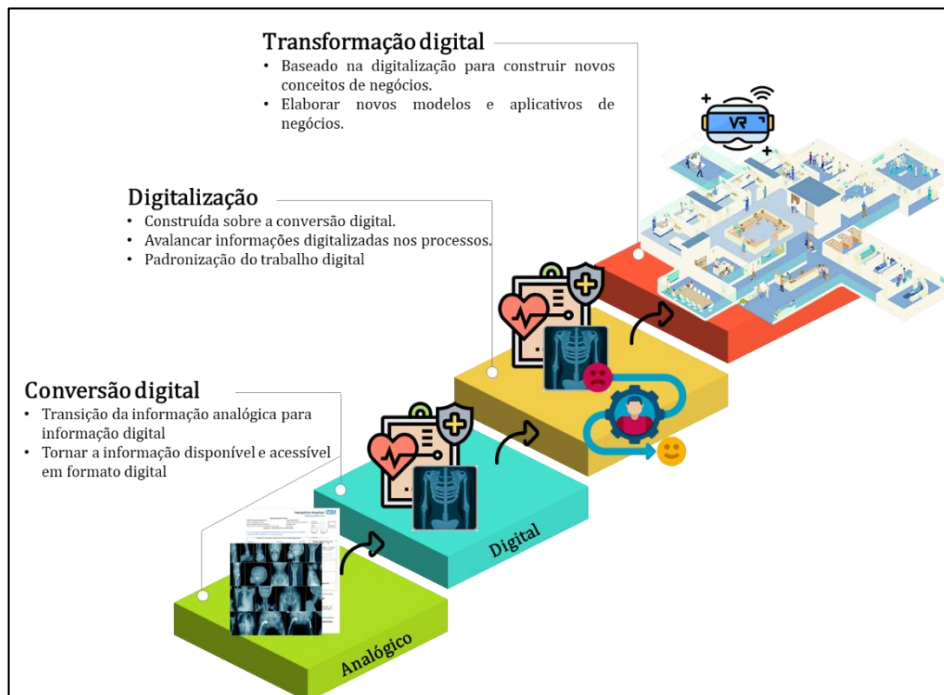
Figura 42 – Jornada da transformação digital.



Fonte: Traduzido de IIC (2020).

É necessária uma mudança estrutural nas organizações para que ocorra a transformação digital. A figura 43 ilustra as três etapas que seriam necessárias para essa transformação no contexto da saúde, a saber: conversão digital, digitalização e, por fim, transformação digital.

Figura 43 – Transformação digital na área da saúde.

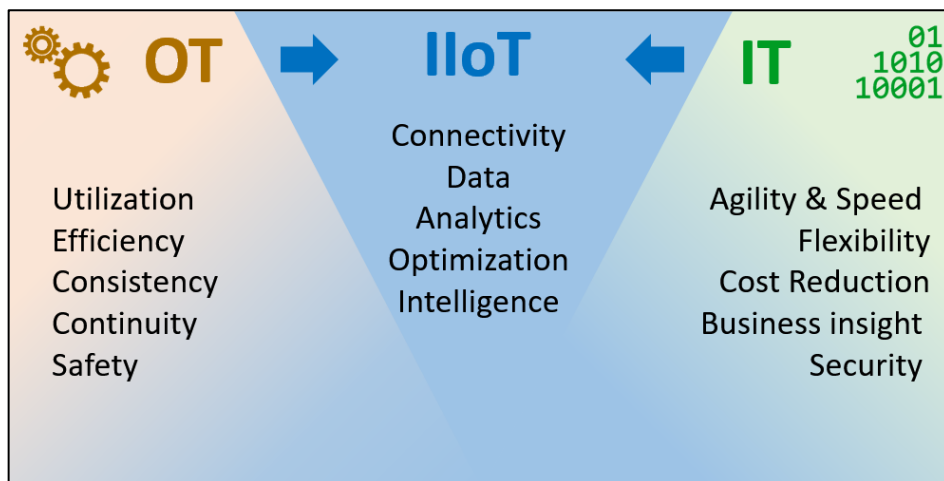


Fonte: O autor (2020).

Na primeira etapa, informações hospitalares analógicas – por exemplo, prontuários e exames de imagens dos pacientes – serão convertidos em formato digital. Ao serem digitalizados, tais informações são padronizadas e incorporadas nos processos hospitalares. Por fim, com a digitalização do hospital como um todo, é possível criar um novo modelo de negócio, concluindo sua transformação digital.

Os modelos de arquitetura da RAMI 4.0, IIRA, CPS e DT têm o mesmo propósito de convergência entre o mundo físico e o mundo virtual. Buscam – em um contexto mais específico – a convergência entre a tecnologia da informação (TI) e a tecnologia operacional (OT). Essa convergência é realizada pela IIoT, que gera conectividade, dados, análises, otimizações e torna o sistema inteligente, como ilustra a figura 44.

Figura 44 – Convergência entre IT e OT.



Fonte: Lin *et al.* (2017).

Porém, para que ocorra essa convergência, é necessária a interoperabilidade semântica entre os sistemas, isto é, uma arquitetura de comunicação padrão que permita a comunicação entre múltiplos sistemas.

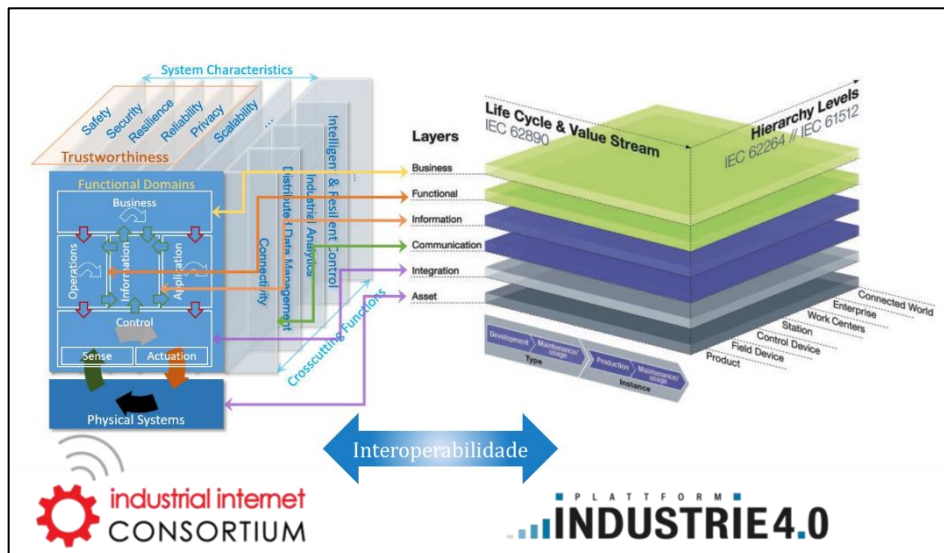
Para tanto, visto o alinhamento entre as arquiteturas IIRA e RAMI 4.0 (LIN *et al.*, 2017), propõe-se a utilização da arquitetura unificada de comunicação padrão aberta (*Open Communication Standard Unified Architecture – OPC UA*) como o padrão de conectividade principal do modelo, conforme a análise feita por Miranda *et al* (2017), para integrar sistemas de saúde heterogêneos.

4.3 Modelos de referência para a construção da arquitetura H4.0A

Para a estruturação das camadas da arquitetura, a IIRA e a RAMI 4.0 são as principais referências. A IIRA serve como arquitetura de referência primária, pois é uma arquitetura mais ampla e já foi adaptada ao contexto da saúde 4.0 (FILHO, 2018).

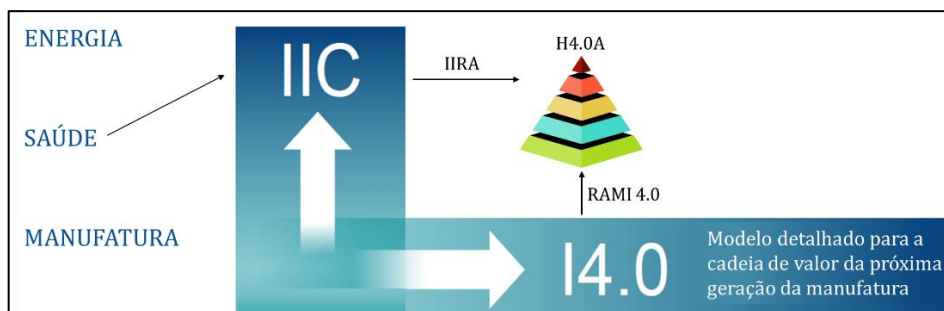
A RAMI 4.0, apesar de ter seu foco exclusivo para a manufatura, serve como arquitetura de referência secundária, pois está alinhada com a IIRA e, assim, é possível realizar a migração dos conceitos da manufatura para a saúde, conforme o princípio de interoperabilidade (LIN *et al.*, 2017). Logo, é possível usar os dois MARs para elaborar a arquitetura proposta, conforme ilustram as figuras 45 e 46.

Figura 45 – Interoperabilidade entre os modelos de arquitetura de referência.



Fonte: Traduzido de LIN *et al* (2017).

Figura 46 – Relação entre as aplicações da arquitetura IIRA (IIC) e RAMI 4.0 (I4.0).



Fonte: Adaptado de IIC (2017).

4.4 Camadas da arquitetura H4.0A

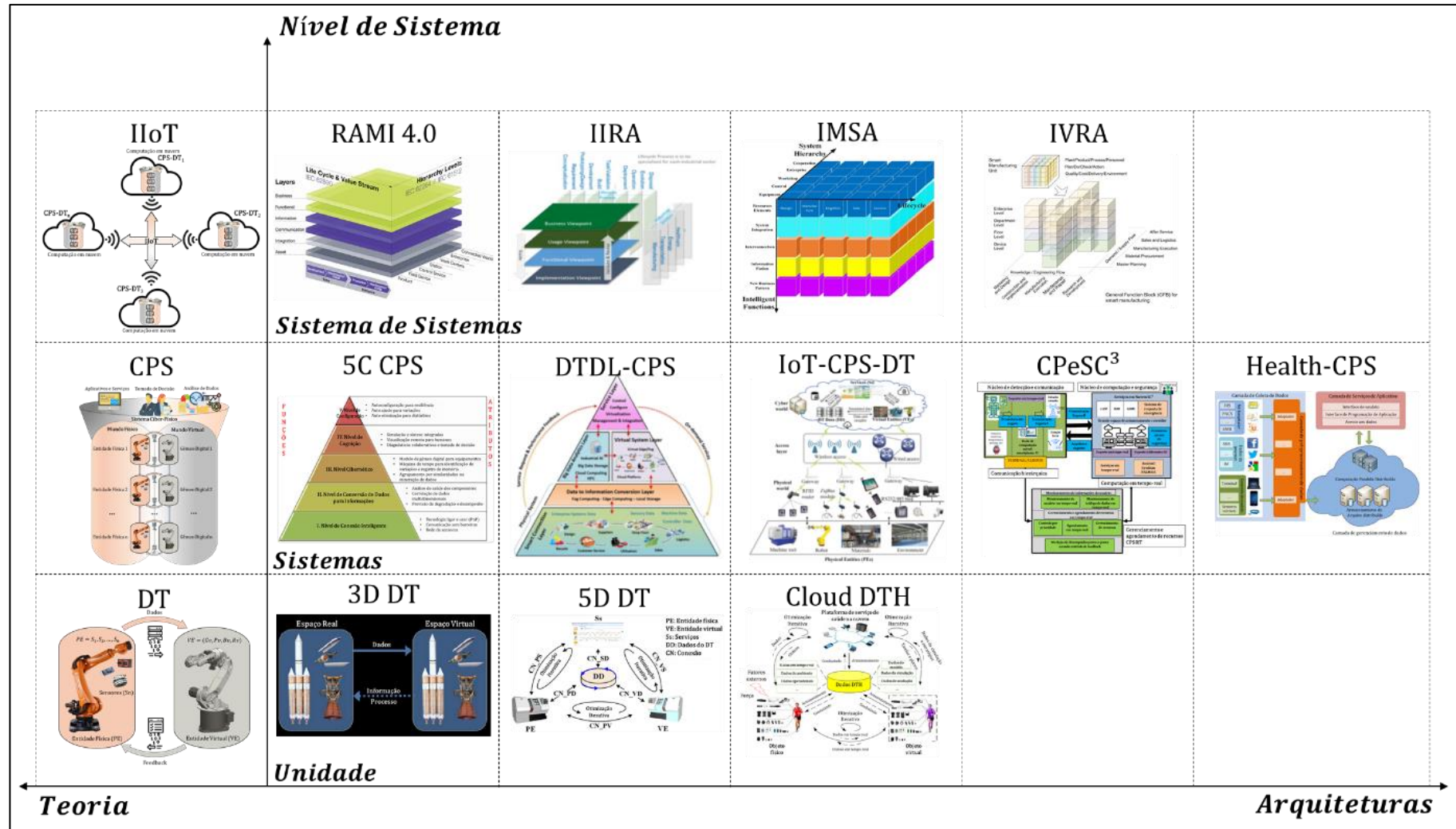
Para a definição da estrutura da arquitetura, é interessante, primeiramente, entender quais são as camadas funcionais das arquiteturas já consolidadas que envolvem os conceitos da quarta revolução industrial, conforme ilustram o quadro 2 e a figura 47.

Quadro 2 – Camadas das arquiteturas segundo o seu nível de sistema.

Nível	Arq.	Camada 1	Camada 2	Camada 3	Camada 4	Camada 5	Camada 6
SoS	IIRA	Sistemas físicos	Controle	Operações	Informação	Aplicação	Negócios
	RAMI 4.0	Ativos	Integração	Comunicação	Informação	Funcional	Negócios
Sistema	5C CPS	Conexão Inteligente	Conversão de dados	Cibernético	Cognição	Configuração	
	DTDL-CPS	Conexão Inteligente	Conversão de dados	Sistema Virtual	Big Data Analytics	Serviços	
	IoT-CPS-DT	Entidades físicas	Acesso	Dados DT	Entidades Virtuais	Serviços	
	CPeSC ³	Deteção e Comunicação	Computação	Segurança			
	Health-CPS	Coleta de dados	Gerenciamento de dados	Aplicação e Serviços			
	MCPS	Aquisição	Pré-processamento	Nuvem	Ação		
Unidade	DT 3D	Espaço Real	Espaço Virtual	Conexão			
	DT 5D	Entidade física	Entidade virtual	Dados do DT	Serviços	Conexões	
	Cloud DTH	Objeto físico	Objeto virtual	Dados do DTH	Serviços em nuvem	Conexões	

Fonte: O autor (2020).

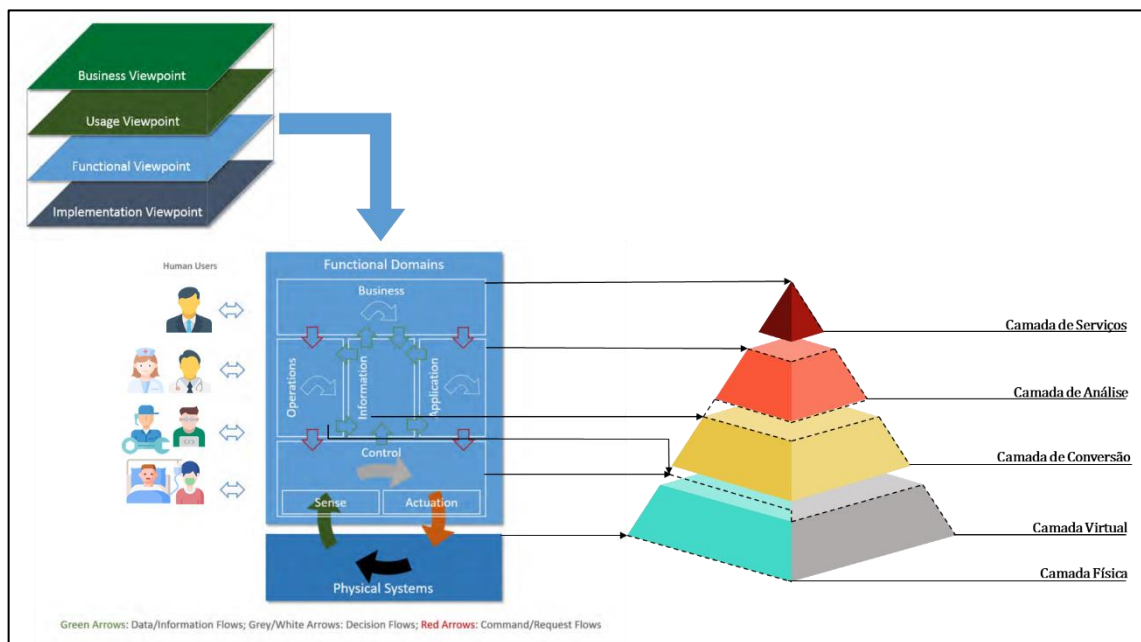
Figura 47 – Representação das arquiteturas de acordo com o seu nível de sistema.



Fonte: O autor (2020).

Diante disso, o modelo foi dividido em cinco camadas: física, virtual, conversão, análise e serviços. A camada física contém as entidades físicas; a camada virtual contém as entidades virtuais; a camada de conversão realiza o pré-processamento dos dados; a camada de análise busca a transformação desses dados em informações e cria *softwares*; e a camada de serviços utiliza os aplicativos estruturados na camada de análise para auxiliar nas tomadas de decisões. A figura 48 associa as camadas da arquitetura H4.0A às camadas do domínio funcional da IIRA.

Figura 48 – Relações entre a arquitetura IIRA e o modelo proposto.



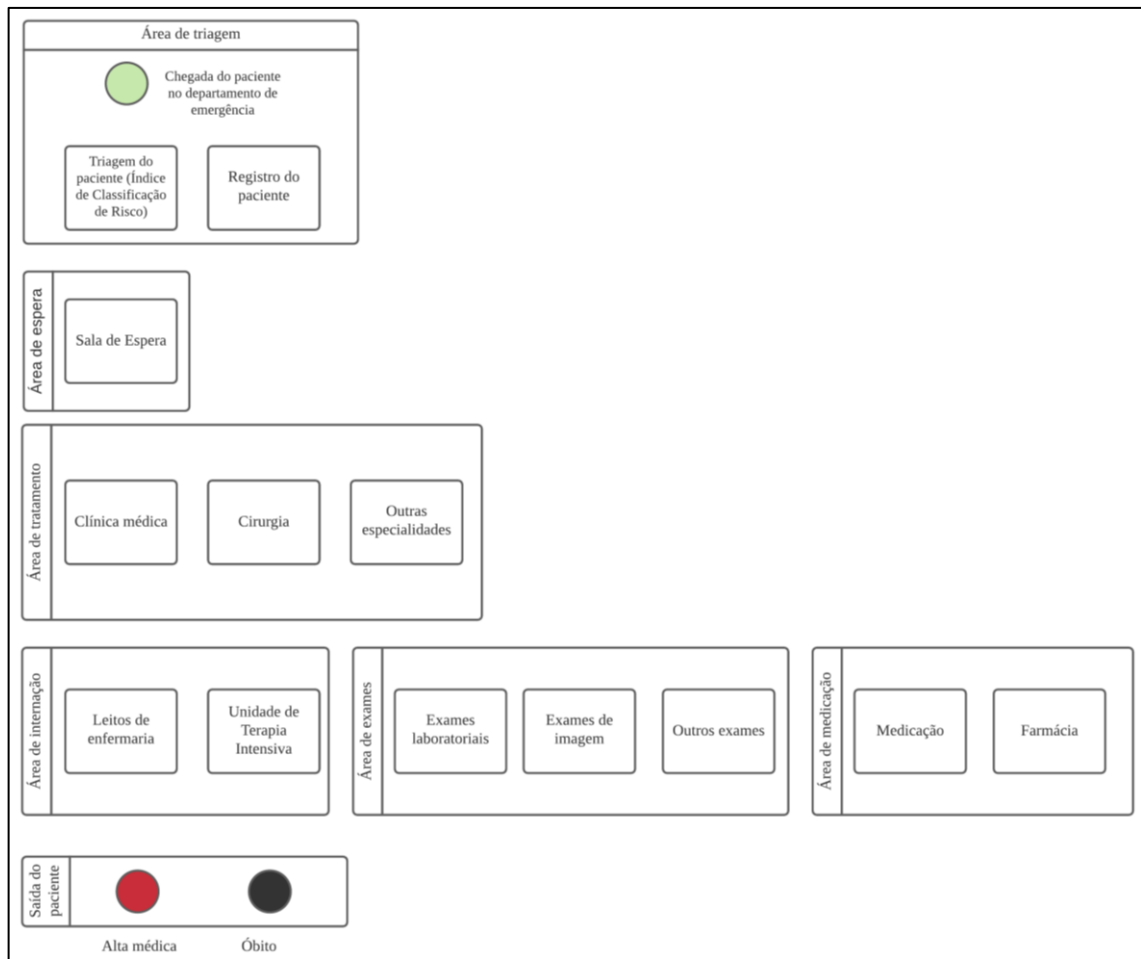
Fonte: O autor (2020).

Conforme ilustrado acima, algumas camadas do domínio funcional da IIRA são divididas – camada de informação da IIRA – e outras são unificadas nas camadas da arquitetura H4.0A – camadas de controle e operação da IIRA.

4.4.1 Fluxo de pacientes

O fluxograma a seguir foi baseado em pesquisas médicas sobre gerenciamento e simulações em um departamento de emergência hospitalar (DAY; AL-ROUBAIE; GOLDLUST, 2012; DICKSON *et al.*, 2009; GOLDLUST; DAY; HOOT, 2017; SAUNDERS; MAKENS; LEBLANC, 1989). A figura 49 representa um fluxograma generalista e cabe ao hospital adaptá-lo a sua realidade.

Figura 49 – Modelo generalista do fluxo de pacientes em um departamento de emergência.



Fonte: O autor (2020).

O fluxograma é constituído pelas áreas de: triagem, espera, tratamento, internação, exames e medicação. É válido ressaltar que a chegada do paciente, por se tratar de um pronto-socorro, pode ser por via de uma ambulância. Assim, alguns dos processos deste fluxograma generalista podem ocorrer anteriormente à chegada do paciente no departamento de emergência como, por exemplo, a triagem e o registro do paciente (TOLLEFSEN *et al.*, 2005).

4.4.2 Camada física

4.4.2.1 Definição

A primeira camada do modelo é composta por entidades físicas que consistem em vários subsistemas e sensores. Os subsistemas incluem sistemas dinâmicos, sistemas de controles etc. Os sensores coletam dados em tempo real dos subsistemas e de suas condições de funcionamento. Para construir e manter uma entidade física, além dos fatores como design e

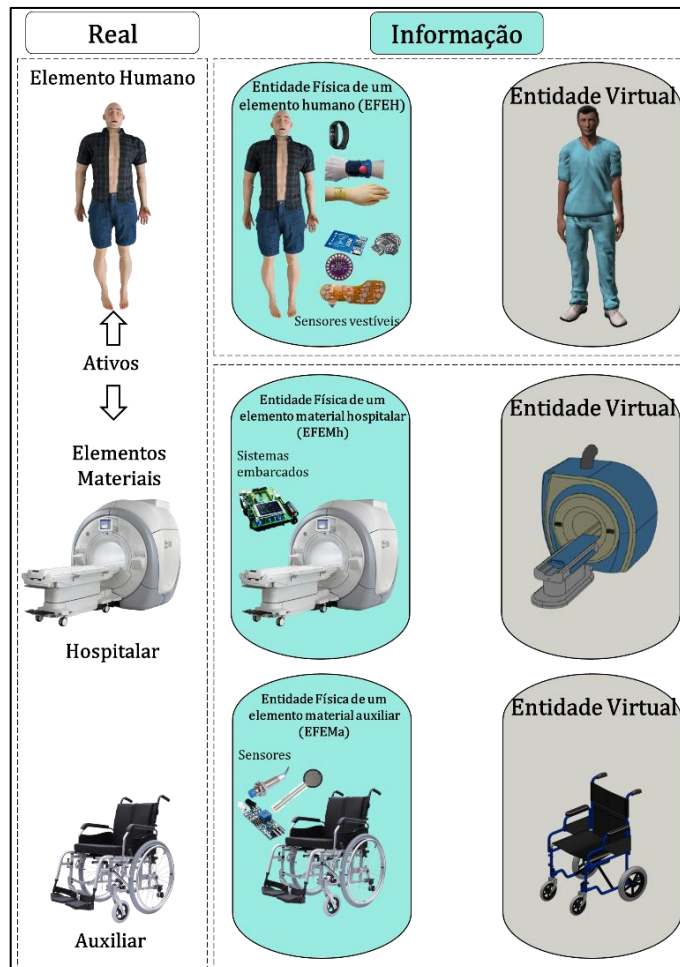
gestão de prognósticos de saúde, é necessária a coleta de dados em tempo real com base em tecnologias sensoriais avançadas (TAO; ZHANG; NEE, 2019).

4.4.2.2 Composição

Conforme ilustrado anteriormente, as entidades físicas são advindas de elementos humanos (EH) e elementos materiais (EM). A camada física possui três conjuntos: pessoa física com sensores vestíveis, máquinas com sistemas embarcados e objetos com sensores acoplados.

O conjunto pessoa física com sensores vestíveis é denominado entidade física de um elemento humano (EFEH), o conjunto máquina com sistema embarcado é denominado entidade física de um elemento material hospitalar (EFEMh) e o conjunto objeto com sensores acoplados é denominado entidade física de um elemento material auxiliar (EFEMa), conforme ilustra a figura 50.

Figura 50 – Diferença entre os conjuntos de entidades da camada física.



Fonte: O autor (2020).

Segundo os estudos realizados sobre sensores aplicados à saúde (ALFIAN *et al.*, 2018; AMENDOLA *et al.*, 2014; BADAWI *et al.*, 2019; FLEXSIM, 2016; JANJUA *et al.*, 2017; OKONIEWSKA *et al.*, 2012; SHI *et al.*, 2020; SYAFRUDIN *et al.*, 2018; TAO; ZHANG; NEE, 2019), os principais sensores para formar uma entidade física envolvem tecnologias como:

- a) *bluetooth* de baixo consumo de energia (BLE) para localização em tempo real (RTLS) em ambientes internos;
- b) etiqueta com identificação por rádio frequência (RFID) para cuidados pessoais da saúde em espaços inteligentes;
- c) palmilha de sapato para dispositivos de saúde pessoal baseado na norma de comunicação de dispositivos médicos ISO/IEEE 11073;
- d) BLE para monitoramento de sinais vitais;
- e) WiFi e RFID para localização em tempo real de provedores de saúde em um ambiente hospitalar de cuidados intensivos;
- f) sensor vestível e auto curável para monitoramento de movimento, sinais vitais e temperatura corporal;
- g) ZigBee;
- h) comunicação de Campo Próximo (NFC);
- i) rede de sensores sem fio (WSN);
- j) rede de área corporal sem fio (WBAN);
- k) sistemas embarcados.

Assim, os principais sensores a serem utilizados pelas EFEH seriam:

- a) cartão de Identificação por Radiofrequência (RFID);
- b) monitor de eletrocardiograma (ECG) vestível;
- c) monitor de pressão arterial vestível;
- d) sensor de pulso para frequência cardíaca;
- e) BLE para localização em tempo real.

Os principais sensores a serem utilizados pelas EFEMh e EFEMa seriam:

- a) sistemas embarcados das próprias máquinas;

Os dados das EFEH são descritos por:

$$D_{EFEH} = D_c \cup ICR \cup EHR \cup S_v \quad (4.2)$$

Sendo os conjuntos que caracterizam os dados das EFEH: D_c (Dados cadastrais), ICR (Índice de Classificação de Risco), EHR (Registro Eletrônico de Saúde), S_v (Sinais vitais).

Os dados cadastrais (D_c) são: nome, idade, gênero, CPF, RG, telefone, n° de identificação do plano de saúde privado ou público (carteira de identificação do SUS) etc.

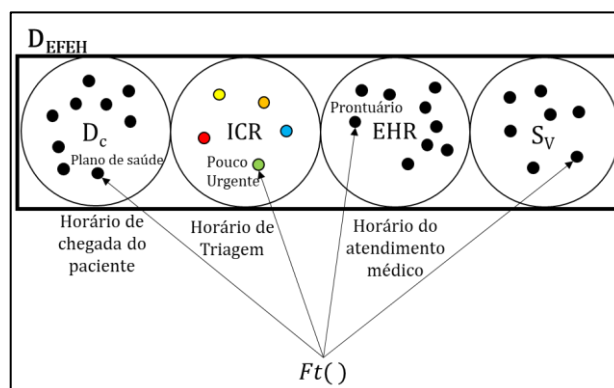
Segundo Junior, Torres e Rausch (2014), o Índice de Classificação de Risco (ICR) pode ser baseado no: Modelo Australiano (ATS), Modelo Canadense (CTAS), Modelo de Manchester (MTS), Modelo Americano (ESI), Modelo de Andorra (MAT).

Os registros eletrônicos de saúde (EHR) são constituídos por: histórico médico do paciente (prontuário do paciente), CID-10 (classificação internacional de doenças), testes e exames laboratoriais, alergias, imunizações, exames de imagem (ressonâncias magnéticas, tomografias, raio-x, ultrassonografia), uso de medicações, uso de dispositivos intra-hospitalares (sonda, acesso periférico, acesso central), etc.

Os principais sinais vitais (S_v) a serem medidos são: temperatura, frequência respiratória, frequência cardíaca, saturação e pressão arterial (FILHO, 2018, p. 64).

Tais conjuntos de dados (D_c , ICR, EHR e S_v) possuem uma função intrínseca chamada fluxo de tempo do paciente (F_t), que pode obter informações como: horário de entrada na emergência, tempo de cadastro do paciente, horário de triagem, horário de atendimento do enfermeiro, horário de atendimento do médico, tempo de atendimento total, ordem para internação, horário de requisição de cama para o paciente, horário de aquisição de cama para o paciente, cama pronta para o paciente, horário de saída da emergência, etc. A figura 54 ilustra a relação entre a função F_t e os conjuntos de dados citados anteriormente.

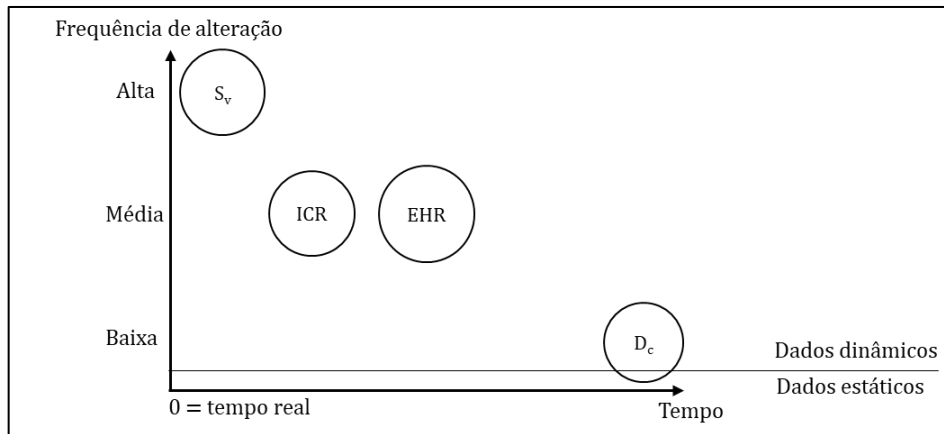
Figura 54 – Relação entre D_{EFEH} e a função F_t .



Fonte: O autor (2020).

Em relação à função fluxo de tempo do paciente (Ft), é válido ressaltar que os dados poderiam ser classificados em estáticos e dinâmicos. A figura 55 mostra que os dados estáticos são raramente alterados, enquanto os dados dinâmicos possuem diferentes frequências de alteração ao longo do tempo, e sua extração pode ou não ser necessária em tempo real.

Figura 55 – Relação entre a frequência de alteração de D_{EFEM} ao longo do tempo.



Fonte: O autor (2020).

4.4.2.3.2 Dados das EFEM

O principal intuito da coleta de informações do maquinário do departamento de emergência é a confiabilidade, disponibilidade e manutenibilidade desses equipamentos, visto que máquinas ficam inativas em muitos hospitais por falta de manutenção e, conseqüentemente, perdem sua função. Assim, sugere-se aplicar o conceito de manutenção preditiva desses equipamentos, por meio da simulação preditiva, para que não ocorra a perda de sua função (MACHADO, 2018). Em relação aos dados das EFEM, temos que:

$$D_{EFEM} = D_{EFEMh} \cup D_{EFEMa} \quad (4.3)$$

Sendo os conjuntos que caracterizam os dados das EFEM: D_{EFEMh} (Dados das entidades físicas dos elementos materiais hospitalares) e D_{EFEMa} (Dados das entidades físicas dos elementos materiais auxiliares).

Os D_{EFEMh} são: Tempo Médio entre Falhas (MTBF), Tempo Médio para Reparo (MTTR), disponibilidade, confiabilidade, etc.

Os D_{EFEMa} são: localização em tempo real do equipamento e disponibilidade para o uso desse equipamento.

4.4.3 Camada virtual

4.4.3.1 Definição

Segundo a IIRA, o domínio funcional mais baixo é o domínio de controle, que consiste na implementação de sistemas de controle industrial (ICSs). A principal funcionalidade desses sistemas é ler os dados dos sensores, aplicar regras e lógica, e controlar os sistemas físicos por meio de atuadores (IIC, 2019).

O domínio de operações busca a gestão do domínio de controle. Representa um conjunto de funções para o prognóstico, otimização, monitoramento e diagnóstico, provisionamento e gerenciamento dos sistemas no domínio de controle (IIC, 2019). Esses dois domínios funcionais da IIRA constituem a camada virtual do modelo.

4.4.3.2 Composição

Assim, visto como uma imagem espelhada da camada física, as unidades de DT – entidades virtuais – podem ser representadas pela fórmula (TAO *et al.*, 2018):

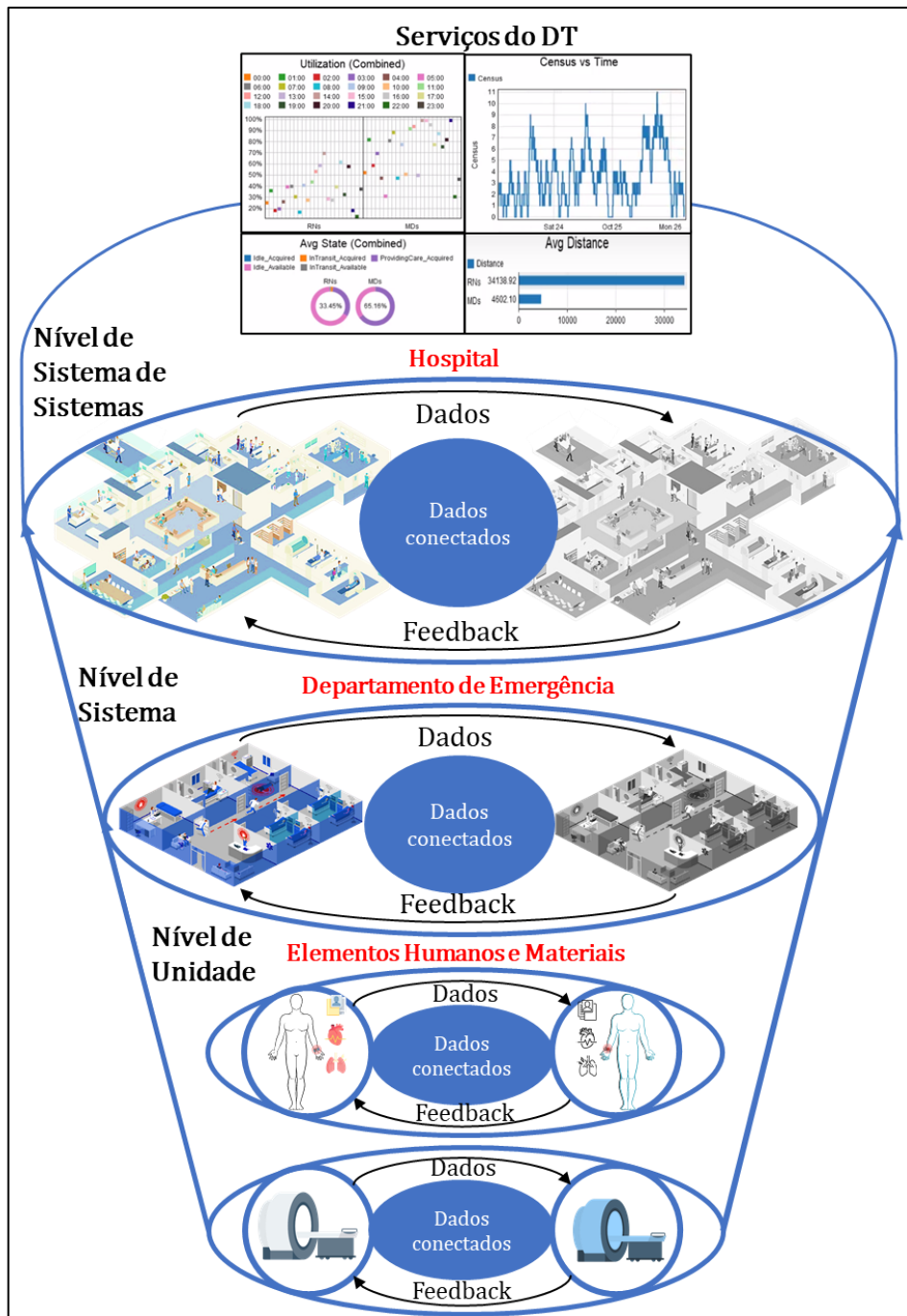
$$VE = (Gv, Pv, Bv, Rv) \quad (4.4)$$

Na qual VE representa a entidade virtual; Gv representa o modelo geométrico que descreve parâmetros da entidade física como forma, tamanho e relações de montagem; Pv são as propriedades físicas da entidade, como deformação, fratura e corrosão; Bv representa os mecanismos de resposta e os comportamentos da entidade, como estado de transição e análise de degradação; e Rv é um conjunto de regras extraídas dos dados históricos da entidade física.

Cada entidade física (EFEH e EFEM), após uma modelagem usando tecnologias de integração dos modelos (Gv, Pv, Bv e Rv) e *softwares*, será representada na camada virtual da arquitetura. Logo, o conjunto dessas entidades virtuais formará a parte cibernética do sistema ciber-físico, que gera dados de saída (considerados como os serviços do DT) para a arquitetura.

Tais serviços podem ser mapas de calor gerados pelo fluxo de pacientes; distância percorrida pelos provedores de saúde ao longo do tempo; nível de utilização de cada setor ao longo do tempo; tempo de ocupação dos provedores de saúde ao longo do dia, chegada de pacientes ao longo do tempo, entre outros. A figura 57 ilustra os níveis de gêmeos digitais de acordo com os diferentes níveis de sistema.

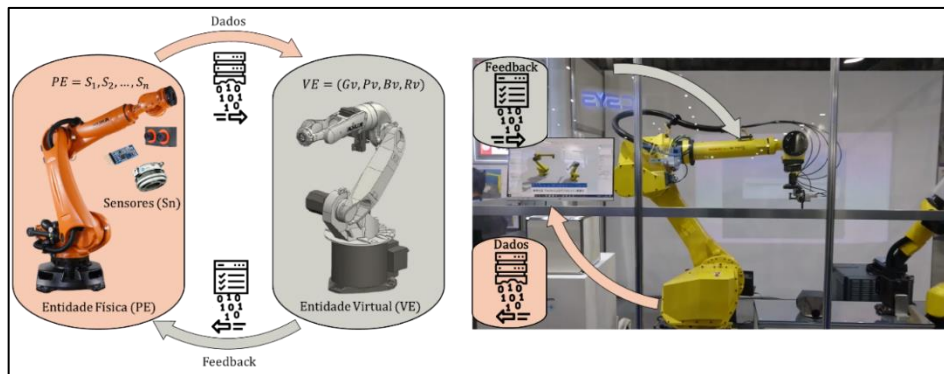
Figura 57 – Níveis de gêmeos digitais na área da saúde.



Fonte: O autor (2020).

Na figura 57, no nível de unidade, existem DT's de elementos humanos e materiais (EFEH e EFEM); no nível de sistema, a representação virtual de um departamento de emergência; e no nível de sistema de sistemas, a representação de um hospital como um todo, visto sua elevada complexidade. Um exemplo real de unidade de DT pode ser encontrado na figura 58, que foi criado a partir do módulo de emulação do *software* FlexSim.

Figura 58 – Exemplo real de uma unidade de DT.



Fonte: O autor (2020).

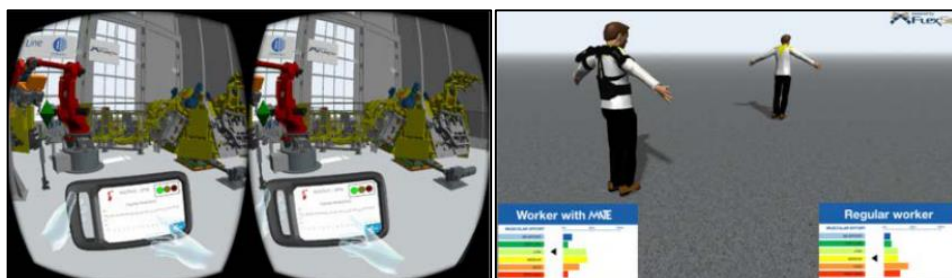
4.4.3.3 Dados

Para que a digitalização proposta pelo modelo ocorra, é necessário que, além dos tempos coletados pela função tempo na entidade física, a quantidade de pessoas da equipe do departamento de emergência (médicos, enfermeiros, recepcionistas, técnicos etc.), a quantidade de elementos materiais disponíveis (leitos, cadeira de rodas, máquinas de raio-x etc.) e o *layout* do local sejam registrados no *software* a ser utilizado. Isto é, é necessária realizar a modelagem do sistema e de seus fluxos antes de sua implementação. No *software* FlexSim Healthcare, tal atividade é realizada no módulo de fluxo do paciente (*patient flow*).

Além disso, para que o conceito de gêmeo digital seja aplicado na íntegra, é necessário que exista a virtualização do modelo, utilizando os conceitos de realidade virtual, realidade aumentada ou realidade mista (SCHWAB; DAVIS, 2018) e a conexão contínua entre as entidades físicas e virtuais.

Um estudo de caso sobre virtualização foi realizado em parceria entre a empresa Comau e a Flexsim com o intuito de fornecer dados em tempo real para o setor automotivo (MACHADO, 2018), conforme ilustra a figura 59.

Figura 59 – Exemplo de virtualização de uma empresa utilizando o software FlexSim.



Fonte: Machado M. (2020).

Por fim, a partir de simulações de eventos discretos, como a realizada por (CÁCERES FLÓREZ; ROSÁRIO; HURTADO, 2020), tem-se que os dados da camada virtual (D_{cv}) são iguais a:

$$D_{CV} = D_{Sim} \quad (4.5)$$

Sendo D_{cv} os dados da camada virtual e D_{SIM} os dados das simulações realizadas a partir dos dados de entrada da camada física em conjunto com F_t para coletar os fluxos de tempos dos pacientes e provedores de saúde.

Os D_{SIM} são: tempo esperado dentro do sistema (em horas); número esperado de saídas (pacientes/hora); tempo de espera: na recepção, na sala de exames, na mesa de cirurgia, entre outros (em minutos); taxa de utilização: da recepção, do laboratório, da sala de emergência, da sala de exames, da mesa de cirurgia, dos provedores de saúde (em porcentagem); comprimento médio da fila: na recepção, no laboratório, na mesa de exames, na sala de atendimento médico; taxa de ocupação de leitos, entre outros.

4.4.3.4 Normas

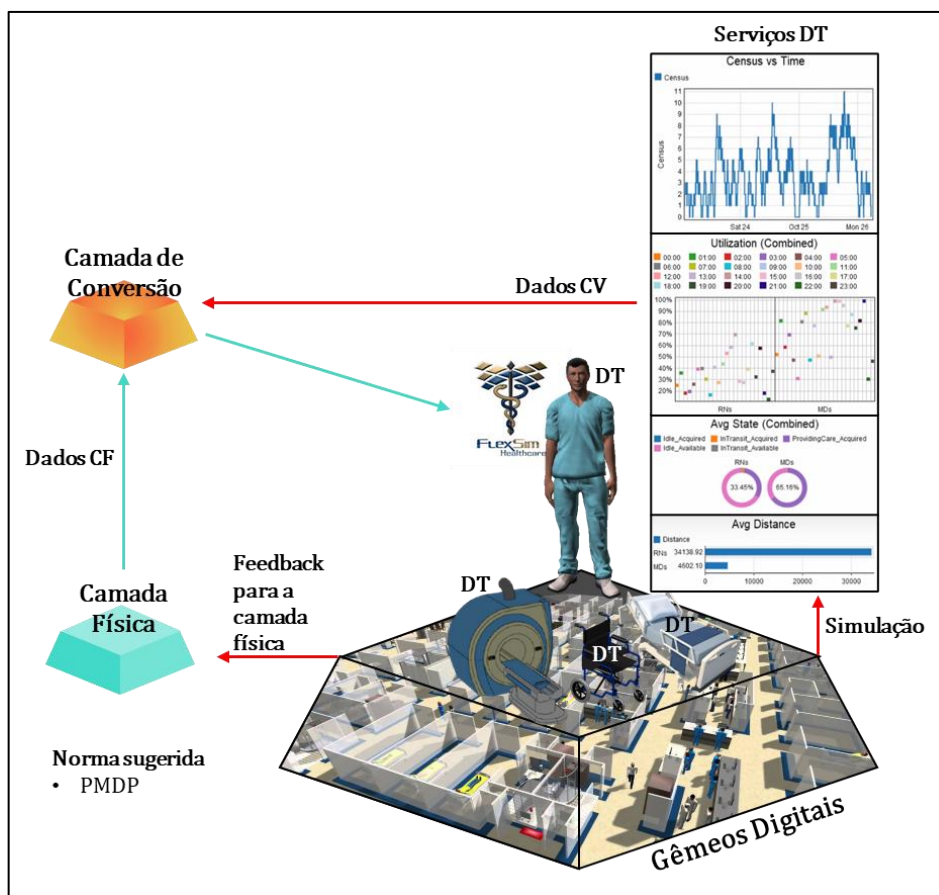
As sugestões de normas a serem utilizadas na camada virtual são (OFFICE OF THE NATIONAL COORDINATOR FOR HEALTH INFORMATION TECHNOLOGY (ONC), [s. d.]):

- a) *prescription drug monitoring program* (PDMP): banco de dados eletrônico que rastreia prescrições de substâncias controladas.

4.4.3.5 Visualização

É válido ressaltar que, para a camada virtual executar suas funções de forma adequada, os dados da camada física tem de ser pré-processados na camada de conversão previamente. Do contrário, não é possível realizar as simulações e modelagens no *software*, entregar os resultados das simulações para a camada de conversão (dados CV) e enviar feedbacks para a camada física. A figura 60 consolida todos os conceitos da camada virtual.

Figura 60 – Camada virtual da arquitetura.



Fonte: O autor (2020).

4.4.4 Camada de conversão

4.4.4.1 Definição

O domínio da informação é responsável por gerenciar e processar dados. Esse domínio representa uma coleção de funções para coletar dados de vários domínios, e transformar, modelar ou analisar esses dados para adquirir inteligência de alto nível sobre o sistema geral (IIC, 2019).

As funções da camada de conversão consistem na coleta e tratamento dos dados. Nessa camada ocorre um pré-processamento dos dados para que, na próxima camada da arquitetura, seja possível realizar análises e criar aplicações a partir dos dados. Assim, as principais funções dessa camada são:

- a) Avaliação dos dados dos sensores e dos estados de operação das camadas física e virtual;
- b) Processamento da qualidade dos dados: limpeza de dados, filtragem e eliminação de duplicatas;
- c) Distribuição dos dados para outras camadas.

4.4.3.2 Composição

Visto a estrutura de conectividade de internet industrial (IICF) da IIRA e a camada de comunicação da RAMI 4.0 (LIN *et al.*, 2017), utilizou-se o modelo ISO / OSI como base para estruturar a comunicação da camada de conversão da arquitetura (TANENBAUM, 2003; ZIMMERMANN, 1980).

Uma tabela foi criada com o intuito de elencar quais seriam os possíveis protocolos a serem utilizados na arquitetura baseado no modelo ISO / OSI. A tabela a seguir foi baseada nas tendências futuras de conectividade (LEE; AZAMFAR; MILLER, 2020), em protocolos e normas de tecnologia de informação na área da saúde (OFFICE OF THE NATIONAL COORDINATOR FOR HEALTH INFORMATION TECHNOLOGY (ONC), [s. d.]) e nos protocolos utilizados nas arquiteturas de referência (LIN *et al.*, 2017).

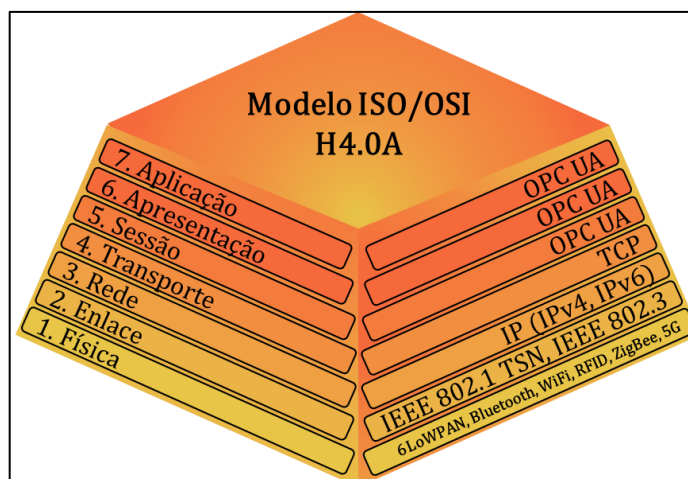
Quadro 3 – Possíveis protocolos de comunicação a serem utilizados na arquitetura.

Camadas	Protocolo
Aplicação	OPC UA, HL7, IHE, FHIR
Apresentação	OPC UA
Sessão	OPC UA
Transporte	TCP, UDP, Direct
Rede	IP (IPv4, Ipv6)
Enlace	IEEE 802.3 (Ethernet), IEEE 802.1 TSN
Física	6LoWPAN, Bluetooth, WiFi, RFID, GPRS, ZigBee, IEEE 802.15.4, NFC, 3G, 4G, 5G

Fonte: O autor (2020).

Diante dos protocolos listados acima, estruturou-se a camada de conversão de dados, conforme ilustra a figura 61.

Figura 61 – Camada de conversão de dados.



Fonte: O autor (2020).

Diante dos protocolos de comunicação dos sensores – elucidados na camada física do modelo – os principais protocolos utilizados na camada física da camada de comunicação são: 6LoWPAN, Bluetooth, WiFi, RFID, ZigBee, e futuramente 5G.

Um *gateway* é utilizado a partir da camada de enlace – que segue o protocolo de ethernet atualmente e futuramente o IEEE 802.1 TSN – para fazer o pré-processamento dos dados, utilizando o conceito de computação em nevoeiro, no qual o tratamento dos dados é feita na borda da rede para, somente depois, os dados serem enviados para a nuvem, com o intuito de reduzir a quantidade de banda necessária para o envio desses dados.

O *gateway* utilizará o protocolo de rede IP (IPv4 ou IPv6) e fará o envio desses dados pelo protocolo TCP, que prioriza a qualidade de envio de dados ao invés da velocidade, pois realiza checagem e recuperação de pacotes que possuíam erros durante o envio.

Por fim, segundo a análise realizada por (MIRANDA *et al.*, 2017), optou-se pela utilização do protocolo OPC UA como *middleware*, visto a possibilidade de integração entre sistemas heterogêneos de saúde, maquinário e também a compatibilidade com o *software* utilizado na camada virtual.

4.4.4.3 Dados

Os dados da camada de conversão são descritos por:

$$D_{CC} = (D_{CF}, D_{CV}) \quad (4.6)$$

Sendo Dcc os dados da camada de conversão, Dcf e Dcv os dados das entidades físicas e virtuais, conforme elucidado nas camadas física e virtual, respectivamente.

4.4.4.4 Normas

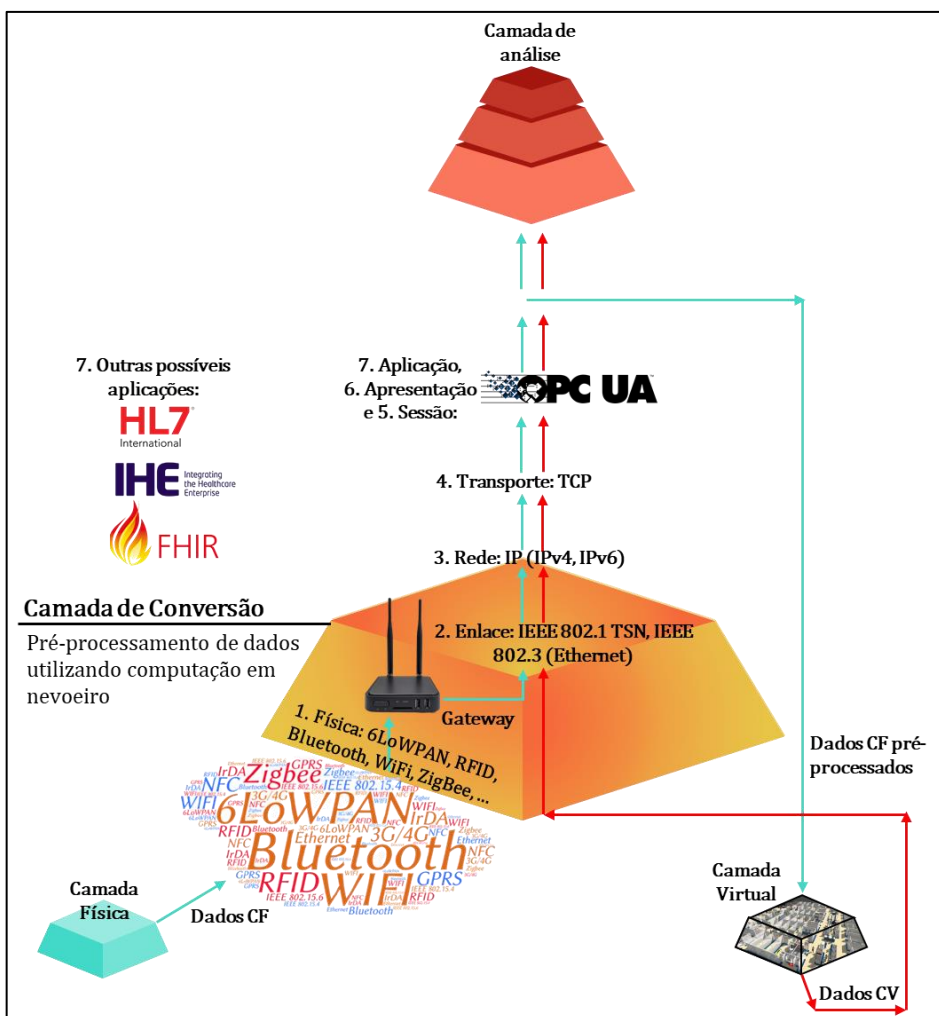
As normas e protocolos sugeridos para a camada de conversão seriam:

- a) IEEE 802.3 Ethernet: protocolo da camada de enlace;
- b) IEEE 802.1 *Time Sensitive Network* (TSN): protocolo da camada de enlace;
- c) *Internet Protocol* (IP): protocolo da camada de rede da internet, podendo ser IPv4 (32 bits) ou IPv6 (128 bits);
- d) *Transmission Control Protocol* (TCP): protocolo de transporte da internet;
- e) *User Datagram Protocol* (UDP): protocolo de transporte da internet;
- f) Direct: padrão para o envio seguro de informações de saúde pela internet;
- g) OPC UA: é uma plataforma independente de arquitetura orientada a serviços que integra todas as funcionalidades das especificações OPC em uma estrutura extensível;
- h) *Health Level 7 (HL7) v2 messaging*: padrão de intercâmbio de dados que inclui especificação para administração de pacientes, pedidos, resultados, agendamento, gerenciamento de reclamações e gerenciamento de documentos;
- i) *Integrating the Healthcare Enterprise (IHE)*: baseado no HL7, busca promover o intercâmbio de dados dos pacientes de vários locais – clínicas, hospitais, entre outros – por meio da criação de perfis que possibilitam a intercomunicação entre diferentes sistemas de saúde.
- j) *Fast Healthcare Interoperability Resource (FHIR)*: especificação para intercâmbio de dados clínicos e administrativos da saúde.

4.4.4.5 Visualização

Assim, os dados recebidos tanto da camada física (Dados CF) quanto os dados da camada virtual (Dados CV), são pré-processados em um gateway – utilizando os protocolos elucidados acima – e transmitidos para a camada de análise. A figura 62 consolida os conceitos da camada de conversão.

Figura 62 – Camada de conversão.



Fonte: O autor (2020).

4.4.5 Camada de análise

4.4.5.1 Definição

A camada de análise também pertence ao domínio da informação e busca prover informações para otimizar as operações e modelos do sistema ao longo do tempo (IIC, 2019).

Após o pré-processamento dos dados na camada conversão, a camada de análise tem como função modelar, analisar e processar os dados para implementação das funcionalidades de negócio, funções essas a serem utilizadas na camada de serviços. Assim, criam-se aplicações e interfaces para os usuários utilizarem o sistema.

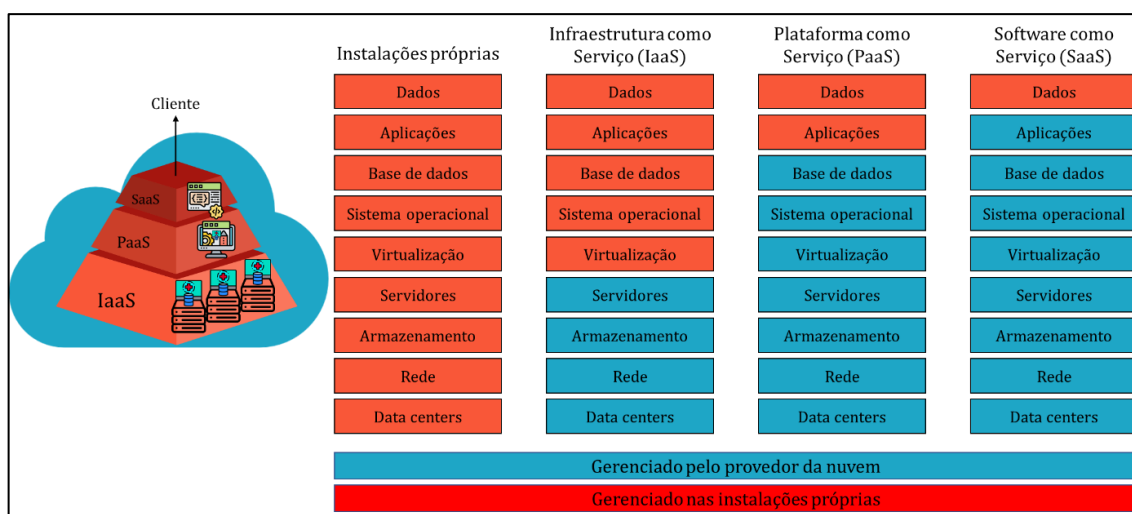
Os principais objetivos da camada de análise são, então, criar lógicas e regras das aplicações (*back-end*) que serão utilizadas visualmente (API's e UI) na camada de serviços (*front-end*), além de armazenar tais dados de uma forma segura.

4.4.5.2 Composição

Tendo em vista o volume, a variedade e a velocidade dos dados que passam pela camada de conversão e a capacidade computacional reduzida dos *gateways* e dos servidores hospitalares para realizar uma análise robusta desses dados, utiliza-se a computação em nuvem e ferramentas de big data para realizar tais análises, que serão mostradas na camada de serviços.

A computação em nuvem pode ser destrinchada em três níveis de serviços, a saber: Infraestrutura como Serviço (IaaS), Plataforma como Serviço (PaaS) e *Software* como Serviço (SaaS) (ARMBRUST *et al.*, 2012). Cabe ao hospital observar qual nível de gerenciamento é favorável ao seu ambiente específico, conforme ilustra a figura 63.

Figura 63 – Tipos de serviços em nuvem.



Fonte: O autor (2020).

Tendo o local de armazenamento desses dados estabelecido, inicia-se o processo de análise de *big data*, conforme elucidado por (WANG *et al.*, 2018). Assim, conforme ilustra a figura 63, pode-se optar por 4 casos, sendo o primeiro caso a escolha das instalações próprias do local e os outros três casos os tipos de serviços do provedor da nuvem: IaaS, PaaS, SaaS. A principal diferença entre os tipos de serviços é o nível de liberdade sobre a nuvem. Caso opte-se pela PaaS, faz-se necessária a criação de aplicações para a próxima camada da arquitetura.

4.4.5.3 Dados

Os dados dessa camada podem ser descritos como:

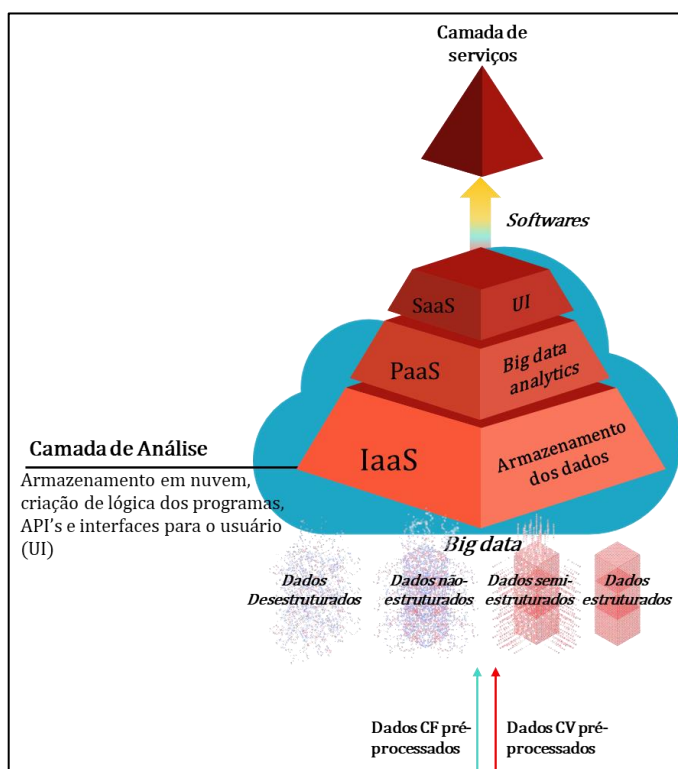
$$D_{CA} = (D_{CF}, D_{CV}, D_k, D_f) \quad (4.8)$$

Sendo D_{CA} os dados da camada de análise; D_{CF} os dados consolidados da camada física; D_{CV} os dados consolidados da camada virtual; D_k os dados do domínio do conhecimento, obtidos de outras bases de dados e por meio das API's de outros sistemas existentes; e D_f a fusão dos dados (KING *et al.*, 2017), que seriam os dados obtidos pelos algoritmos e modelos de predição como redes neurais, filtro de Kalman, k-NN, árvore de decisão, entre outros.

4.4.5.4 Visualização

Diante do exposto, tem-se que os dados advindos da camada de conversão já estão pré-processados e serão armazenados na nuvem, com a escolha de algum tipo de serviço, a depender das preferências do hospital. A figura 64 consolida os conceitos da camada de análise.

Figura 64 – Camada de análise.



Fonte: O autor (2020).

4.4.6 Camada de serviços

4.4.6.1 Definição

A camada de serviços pertence ao domínio de negócios e busca a implementação da lógica de negócios estruturada na camada de serviços. Assim, essa camada representa as funções de negócios que dão suporte aos processos e procedimentos da organização como, por exemplo, um Sistema de Gestão integrado (ERP), um sistema de Gestão de Relacionamento com o Cliente (CRM), um sistema Gestão de Recursos Humanos (HRM), entre outros (IIC, 2019).

4.4.6.2 Composição

Aqui propõe-se a visualização dos dados que foram estruturados, em uma aplicação na camada anterior, em formato de *dashboard* que auxilie o planejamento e a gestão do departamento de emergência hospitalar.

A aplicação pode tanto ser estruturada pelo time de desenvolvimento do hospital quanto adquirida no mercado. No primeiro caso, utilizar-se-ia uma plataforma como um serviço (PaaS) e o *software* em si seria feito pelo hospital. No segundo caso, o *software* já seria disponibilizado pelo provedor da nuvem; um software como um serviço (SaaS).

Um *dashboard* eletrônico foi feito para monitorar o fluxo de pacientes do hospital Johns Hopkins para a comunicação de indicadores-chave de desempenho utilizando o modelo de Donabedian, que fornece uma estrutura para examinar os serviços de saúde e avaliar a qualidade dos cuidados da saúde, vide os anexos A, B e C (MARTINEZ *et al.*, 2018).

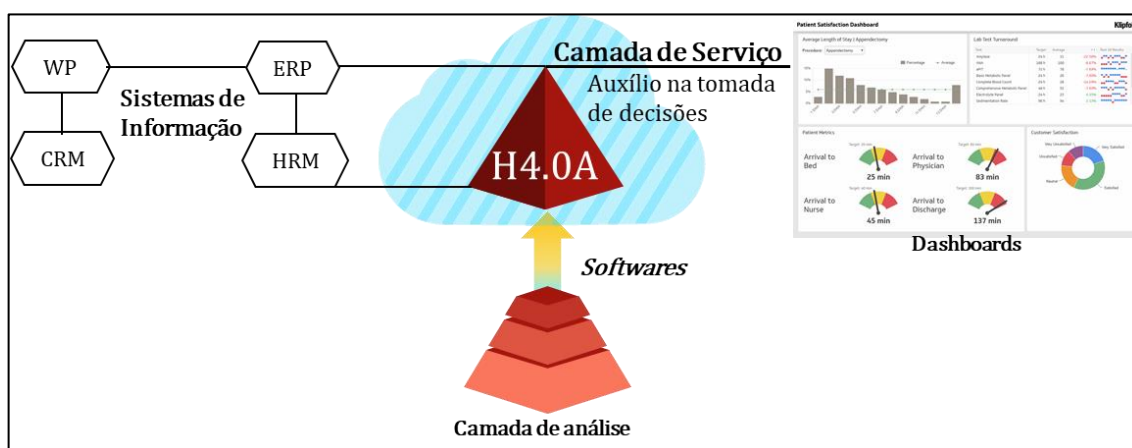
Assim, seria possível disponibilizar informações para a gerência do departamento de emergência como:

- a) disponibilidade de leitos;
- b) número de internações;
- c) tempo de permanência do paciente (LOS);
- d) tempo de espera do paciente;
- e) tempo de atendimento do paciente;
- f) fluxo e localização dos pacientes no layout do departamento de emergência;
- g) manutenção preventiva de máquinas.

4.4.6.2 Visualização

Diante disso, tem-se que a camada de serviços usaria os *softwares* desenvolvidos – ou disponibilizados – na camada de análise e os utilizaria em conjunto com os sistemas de informação do hospital para melhorar o auxílio na tomada de decisões do departamento de emergência hospitalar. A figura 65 consolida os conceitos da camada de serviços.

Figura 65 – Camada de serviços.

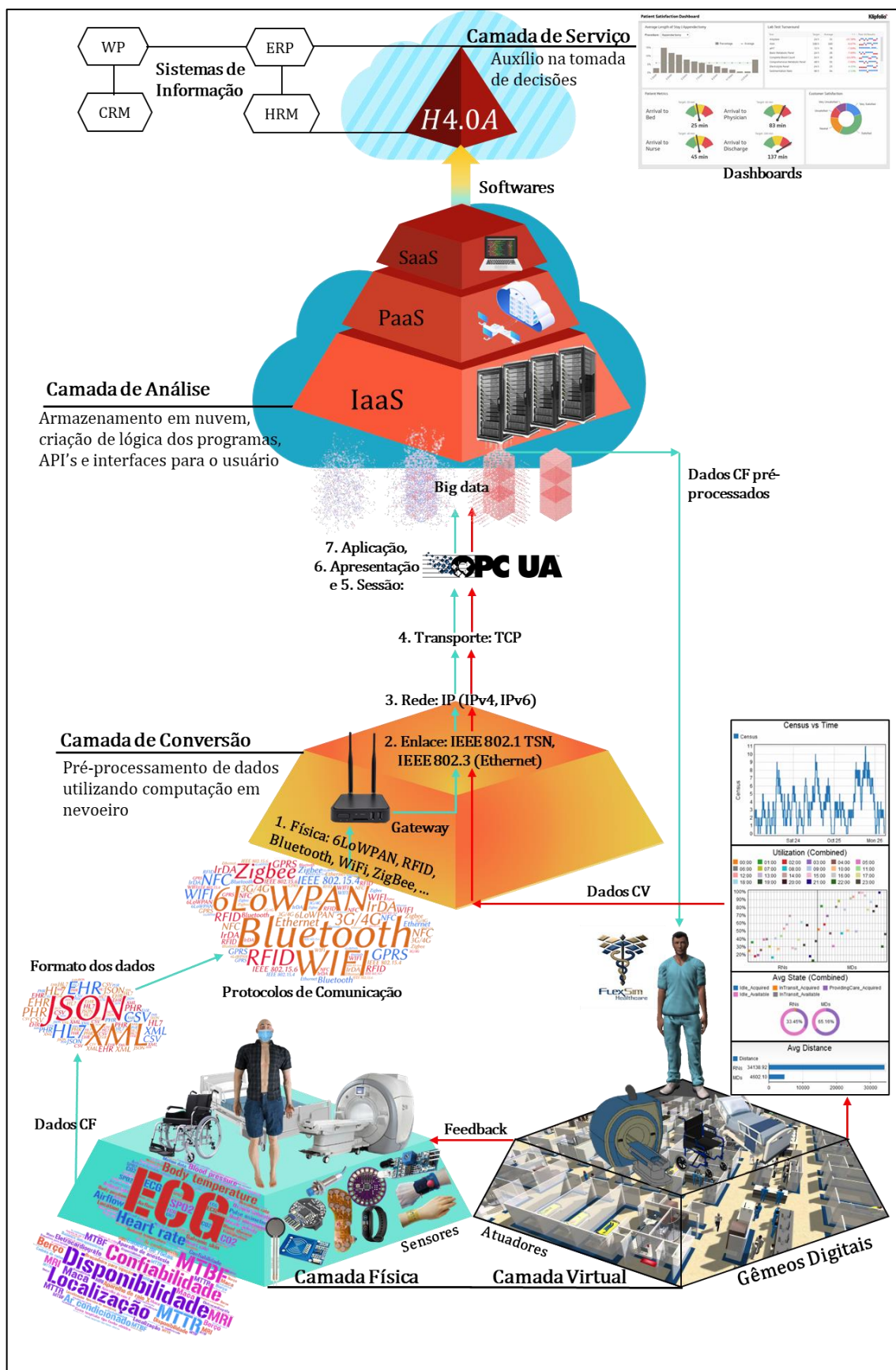


Fonte: O autor (2020).

4.4.7 Visão geral da arquitetura H4.0A

Por fim, a imagem a seguir ilustra a junção de todas as camadas elucidadas anteriormente para explicar o funcionamento teórico da arquitetura H4.0A. A camada física utilizar-se-á de sensores para transformar os ativos físicos do mundo real em entidades físicas no mundo informacional. Os dados da camada física (D_{CF}) serão pré-processados em um *gateway* – seguindo os protocolos de comunicação da camada de conversão – para que os D_{CF} sejam utilizados tanto na camada virtual como na camada de análise. A camada virtual recebe os D_{CF} e, a partir da modelagem das entidades físicas, cria suas representações virtuais que retornarão *feedbacks* para as suas respectivas entidades físicas e realiza simulações (D_{cv}), dados esses que serão transmitidos pela camada de conversão para a camada de análise. Visto o volume, a variedade e a velocidade desses dados e a capacidade computacional reduzida dos *gateways* da camada de conversão, faz-se necessário na camada de análise optar por algum tipo de serviço em nuvem para realizar análises mais robustas. A partir dessas análises, criam-se aplicações que serão utilizadas na camada de serviço para auxiliar nas tomadas de decisões.

Figura 66 – Visão holística da arquitetura H4.0A.



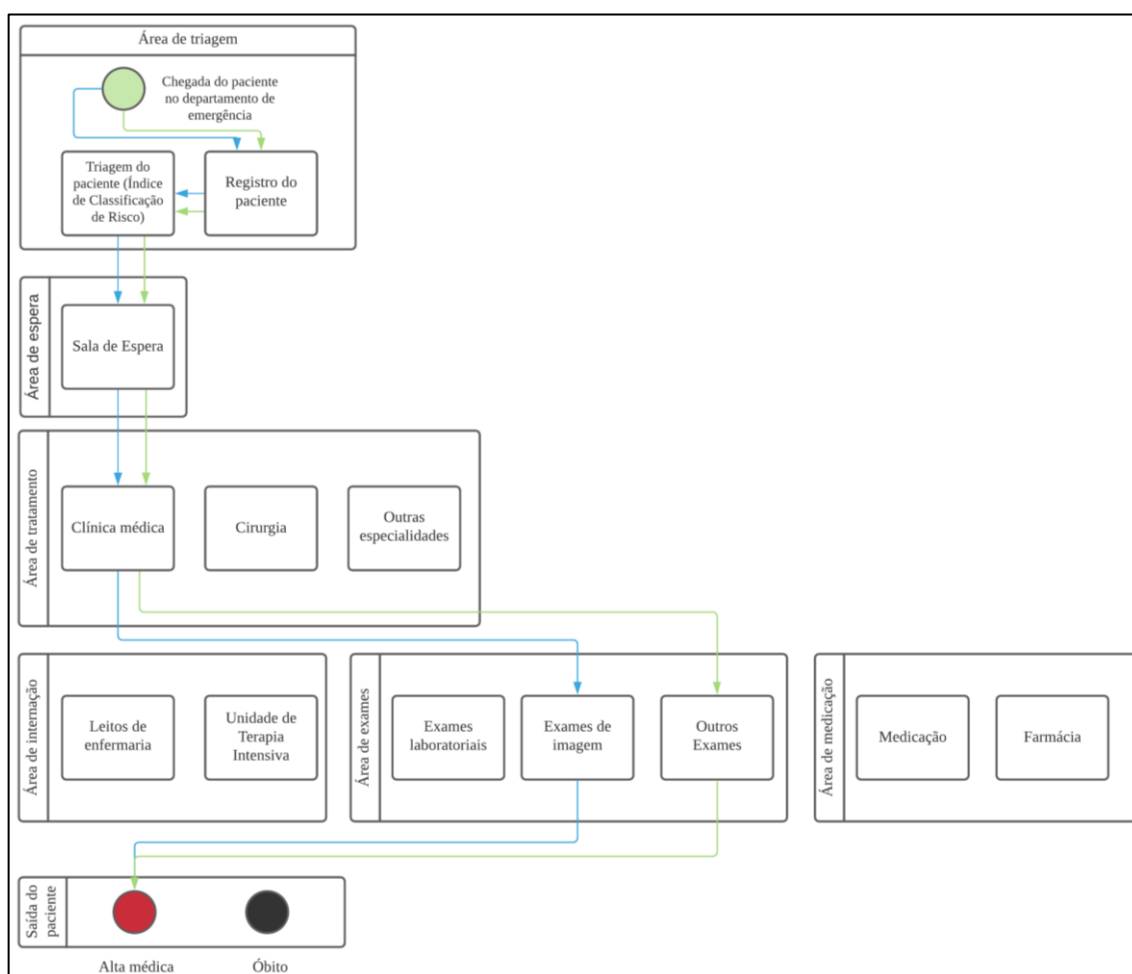
Fonte: O autor (2020).

4.5 Aplicação em um departamento de emergência hospitalar

4.5.1 Aplicação do fluxograma

Considere o cenário hipotético de dois fluxos de paciente. No primeiro fluxo, o paciente chega ao hospital, é registrado, um provedor de saúde realiza sua triagem baseado no protocolo de Manchester, esse paciente aguarda na sala de espera, é examinado pelo médico, realiza um exame de imagem e tem alta médica. No segundo fluxo, o paciente realiza os mesmos procedimentos do primeiro, porém, um exame de eletrocardiograma é solicitado ao invés de um exame de imagem. A figura 67 demonstra os dois exemplos de fluxo de pacientes baseado no fluxograma generalista proposto anteriormente.

Figura 67 – Exemplo de aplicação do fluxograma.



Fonte: O autor (2020).

4.5.2 Aplicação da camada física

Os pacientes, ao chegarem no hospital, eram apenas ativos físicos. Para transformá-los em EFEH, é necessário identificá-los no mundo informacional. Assim, conforme demonstrado por (GHOLAMHOSSEINI; SADOUGHI; SAFAEI, 2019; OKONIEWSKA *et al.*, 2012), pode-se implementar um sistema de localização em tempo real baseado em cartões RFID, conforme ilustra a figura 68.

Figura 68 – Pulseiras baseadas em RFID.



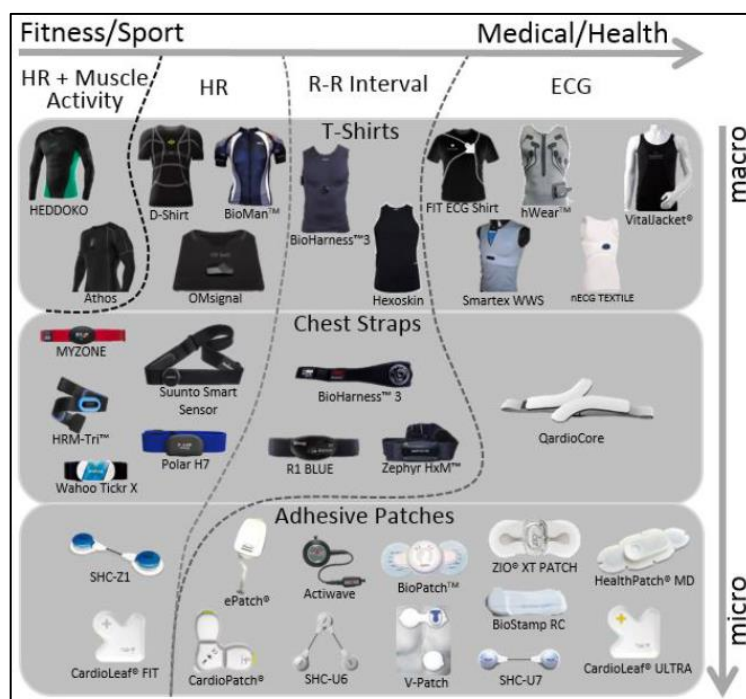
Fonte: Gholamhosseini *et al.* (2019).

Sugere-se, como melhoria para a pulseira acima, a utilização das cores do protocolo de Manchester para identificar visualmente o risco do paciente no mundo físico. Além disso, foi criado um leitor RFID para realizar os registros do paciente na nuvem, vide o apêndice C.

Com essa pulseira, podemos ter acesso à três dos quatro conjuntos da EFEH: Dc, ICR e EHR. Outros tipos de sensores com outras tecnologias também poderiam ser utilizados para o acesso a esses dados (ALFIAN *et al.*, 2018; AMENDOLA *et al.*, 2014; BADAWI *et al.*, 2019; FLEXSIM, 2016; JANJUA *et al.*, 2017; OKONIEWSKA *et al.*, 2012; SHI *et al.*, 2020; SYAFRUDIN *et al.*, 2018; TAO; ZHANG; NEE, 2019).

Para obtenção do conjunto de dados Sv, pode-se utilizar os sensores elucidados por (DIAS; CUNHA, 2018; GRANADOS *et al.*, 2014; PANTELOPOULOS; BOURBAKIS, 2010), conforme ilustra a figura 69 com alguns exemplos.

Figura 69 – Exemplos de dispositivos para monitoramento de sinais vitais.

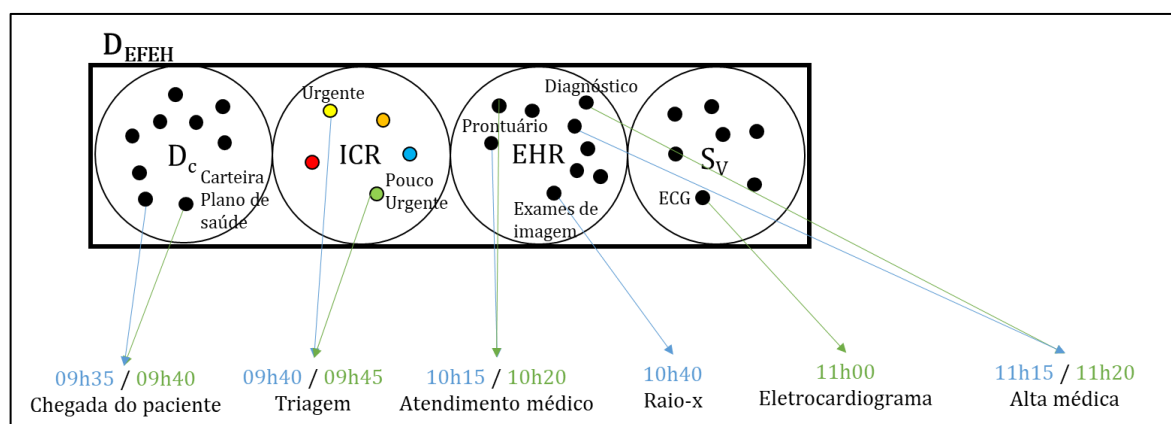


Fonte: Dias e Cunha (2018)

Em relação às EFEM, utilizam-se os sistemas embarcados das próprias máquinas (EFEMh) e também seria possível acoplar sensores nas EFEMa, conforme elucidado por (SHIREHJINI; YASSINE; SHIRMOHAMMADI, 2012).

Além disso, é interessante notar que a cada registro com a pulseira RFID do paciente, é possível utilizar a Ft para registrar o fluxo de tempos do paciente, conforme ilustra a figura 70.

Figura 70 – Exemplo de utilização da função tempo.



Fonte: O autor (2020).

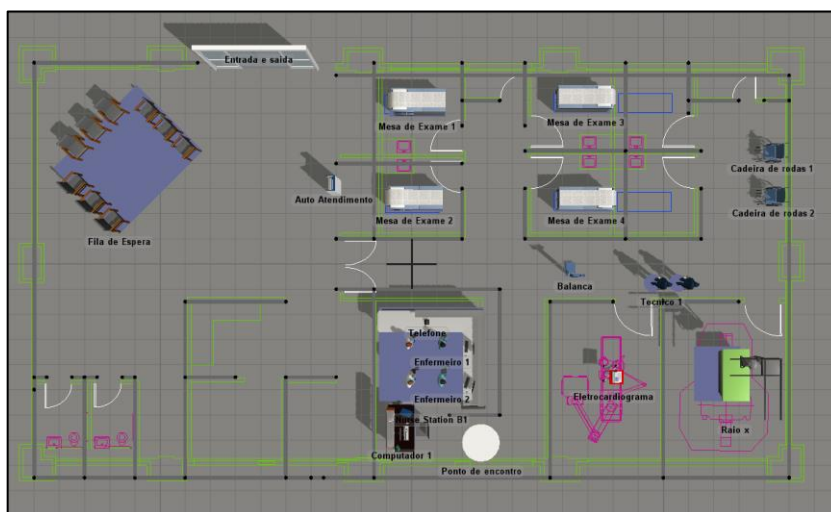
4.5.3 Aplicação da camada virtual

Uma vez que os dados estejam sendo obtidos em tempo real na camada física, realizam-se modelagens em algum *software* que possua aplicações para usar a tecnologia de DT, como é o exemplo do *Flexsim Healthcare* (FLEXSIM, 2020b).

Primeiramente, cria-se um modelo do departamento de emergência do hospital com o layout, a equipe de provedores de saúde e o fluxo de pacientes com o intuito de representar fidedignamente a realidade do ambiente hospitalar. Após, utiliza-se o módulo de emulação do *software* FlexSim Healthcare para criar os DT's.

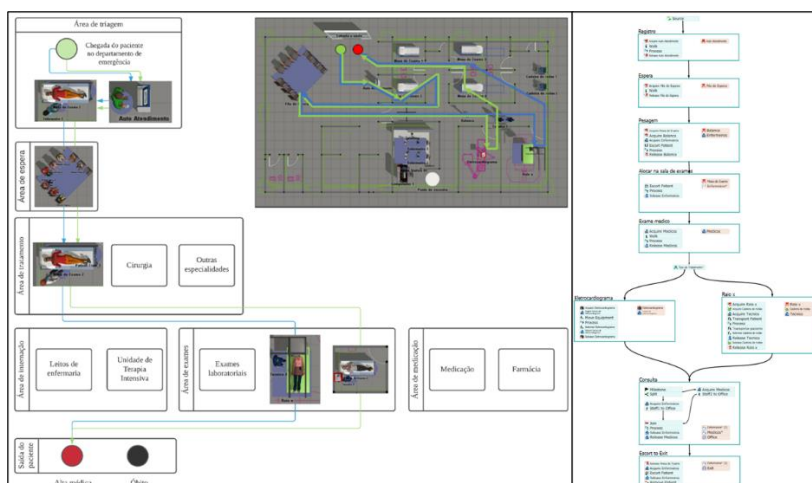
A imagem espelhada da camada física no ambiente cibernético e o fluxograma virtual do paciente são ilustrados nas figuras 71 e 72 – para mais detalhes, vide o apêndice D.

Figura 71 – Modelagem da camada virtual usando o *software* FlexSim Healthcare.



Fonte: O autor (2020).

Figura 72 – Fluxograma virtual dos pacientes.

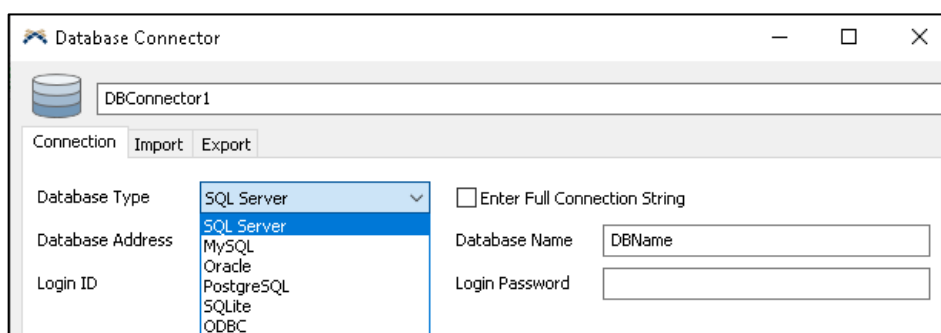


Fonte: O autor (2020).

4.5.4 Aplicação da camada de dados

Para o recebimento e conexão com a base de dados, o Flexsim Healthcare possui um módulo denominado *Database Connector*, no qual é possível importar e exportar dados nos formatos SQL Server, MySQL, Oracle, PostgreSQL, SQLite, ODBC, conforme ilustrado na figura 73.

Figura 73 – Database Connector do software Flexsim Healthcare.



Fonte: Software FlexSim Healthcare (2020).

4.5.5 Aplicação da camada de análise

Após serem gerados os DT's e os dados das simulações, tanto os dados da camada física quanto os dados da camada virtual são armazenados na nuvem, para que se possam realizar análises por meio deles. Um exemplo de nuvem que possui compatibilidade com o *software* é a AWS (PaaS) e a EC2 da Amazon (IaaS) (FLEXSIM, 2018).

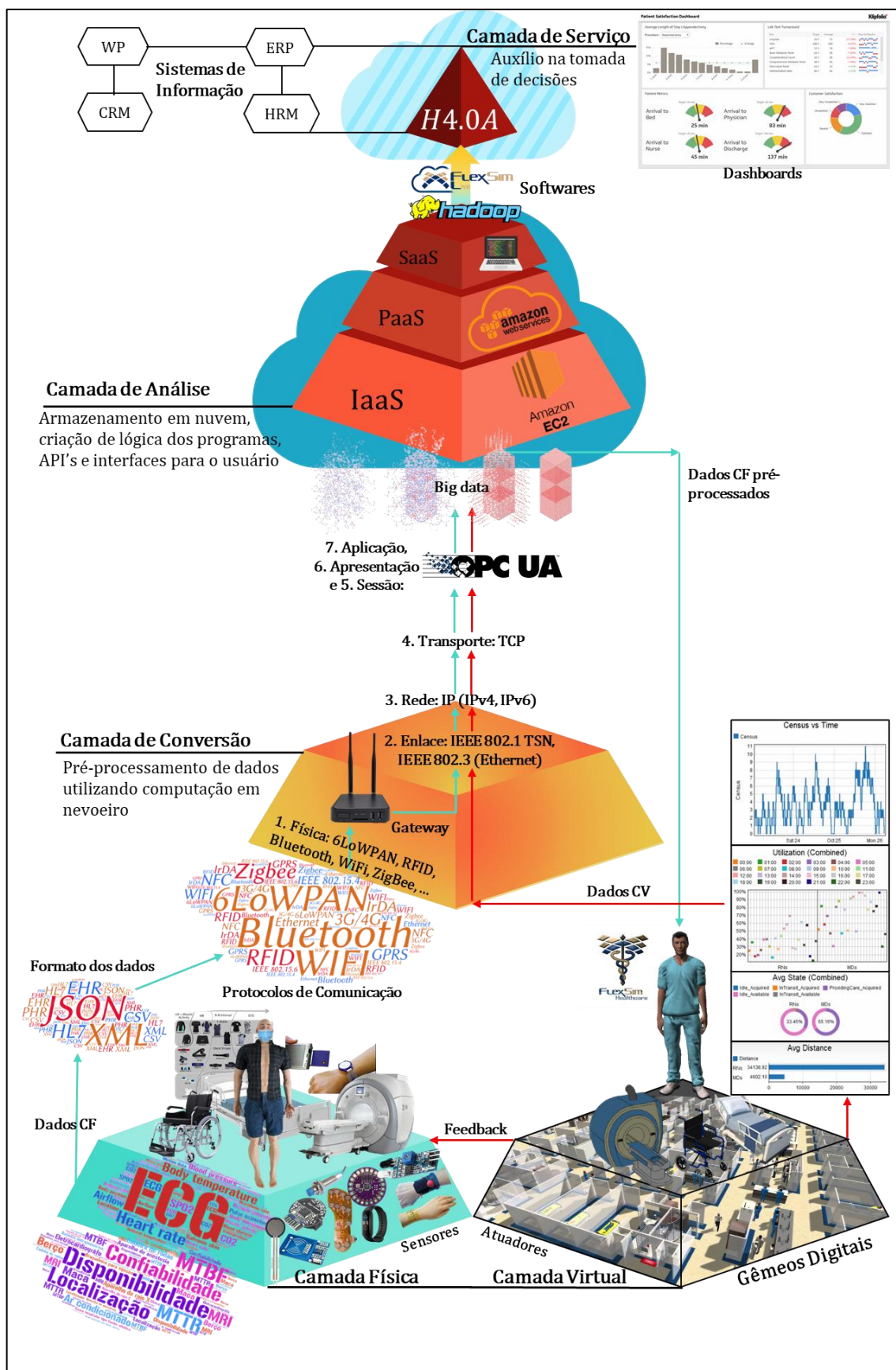
4.5.6 Aplicação da camada de serviços

Por fim, para a camada de serviços, seriam criadas aplicações para melhorar a tomada de decisão do hospital ou poderiam ser usados *softwares* na nuvem, como o *Hadoop as a Service* para a análise de *big data* e o FlexSim Live (2020), que poderia ser integrado com sistemas como SAP (ERP) e ferramentas de inteligência de negócios como o *Power BI*.

4.5.7 Visão geral da arquitetura aplicada

Assim, tendo em vista as tecnologias e aplicações citadas acima, a figura 74 ilustra o funcionamento da arquitetura.

Figura 74 – Arquitetura H4.0A aplicada.



Fonte: O autor (2020).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Quando se iniciou o projeto de pesquisa, foi constatado que os sistemas de saúde hodiernos não utilizavam os seus recursos da melhor maneira possível e que não existia uma arquitetura de saúde 4.0 consolidada que utilizasse os principais conceitos, tecnologias e estruturas da quarta revolução industrial para tornar esses sistemas mais inteligentes.

Diante disso, a pesquisa propôs o desenvolvimento de uma arquitetura de saúde 4.0 para melhorar o sistema informacional de um departamento de emergência hospitalar, fornecendo informações que auxiliem os provedores de saúde nas tomadas de decisões e na alocação eficiente dos recursos hospitalares.

Constata-se que o objetivo geral foi atendido porque o projeto de pesquisa conseguiu desenvolver a proposta de uma arquitetura de saúde 4.0, denominada H4.0A, tendo como base os modelos de arquitetura de referência IIRA e RAMI 4.0, além da aplicação dos conceitos de CPS, DT, IoT, computação em nevoeiro e *big data analytics*.

Em relação à primeira seção dos objetivos específicos – que buscava um embasamento teórico consolidado acerca do tema – os principais conceitos, tecnologias e modelos de arquitetura de referência da quarta revolução industrial que eram aplicáveis a saúde foram analisados, as principais referências (autores, países e instituições) sobre cada tema foram identificadas e um *software* foi desenvolvido na linguagem de programação *python* para automatizar a identificação das principais referências de qualquer tema contido na plataforma científica Scopus.

A segunda seção dos objetivos específicos – a qual buscava desenvolver um modelo de saúde 4.0 no contexto de um departamento de emergência hospitalar – também foi atendida, pois um fluxograma dos pacientes de um departamento hospitalar foi desenvolvido, o fluxo de dados dentro desse ambiente foi analisado – desde sua aquisição até a sua visualização final – e as camadas da arquitetura foram estruturadas.

Vale ressaltar que a segunda seção, diante da inacessibilidade do ambiente hospitalar, foi feita por meio de pesquisas científicas e validações de *stakeholders* da área da saúde, da tecnologia da informação e da tecnologia operacional.

A terceira seção de objetivos específicos – na qual eram propostas a aplicação e demonstração do funcionamento teórico da arquitetura – foi atendida, pois um exemplo do funcionamento da arquitetura foi elucidado a partir de tecnologias disponíveis no mercado. Uma simulação de um departamento de emergência hospitalar foi feita no *software FlexSim*

Healthcare com a proposta de coletar os dados dos pacientes por meio de um identificador por radiofrequência.

A pesquisa partiu da premissa de que era possível adaptar os conceitos e estruturas da quarta revolução industrial – consolidados principalmente na indústria manufatureira – ao contexto da saúde. A principal motivação foi a de que já existiam estudos de aplicações individuais desses conceitos à saúde, mas não existia um estudo de aplicação conjunta.

Verificou-se que a premissa foi confirmada pois, pelo princípio da interoperabilidade semântica entre sistemas, as arquiteturas de referência IIRA e RAMI 4.0 puderam ser utilizadas como base para o desenvolvimento de uma arquitetura no ramo da saúde.

O problema da pesquisa foi respondido, visto que, teoricamente: a aplicação dos modelos de arquitetura de referência IIRA e RAMI 4.0; a operação em conjunto de CPS com a tecnologia de DT; a utilização de sensores para a coleta de dados e o armazenamento e análise desses dados em nuvem impactaria positivamente a distribuição de informações que auxiliariam a tomada de decisão dos provedores de saúde e a alocação dos recursos hospitalares de uma forma mais eficiente. Com isso, o sistema informacional de saúde de um departamento de emergência hospitalar se torna mais inteligente.

A metodologia da pesquisa foi de natureza aplicada, utilizando uma abordagem combinada e com objetivo exploratório. O procedimento técnico foi uma combinação de pesquisa bibliográfica com a técnica teórico-conceitual. Durante o procedimento técnico, primeiramente, a teoria do enfoque meta-analítico consolidado foi utilizada e, após, o método de produtividade de pesquisa foi aplicado para uma revisão sistemática da literatura. Com o intuito de otimizar o desempenho desse último método, um *software* foi criado para automatizar o processo de identificação das principais referências.

Além disso, com o intuito de aprofundamento teórico dos assuntos abordados, cursos sobre DT e I4.0 foram feitos de forma online, além da participação em conferências nacionais e internacionais e a participação como pesquisador voluntário do laboratório de IoT do departamento de engenharia elétrica da Universidade de Brasília. Por fim, para a validação dos conceitos e da estrutura da arquitetura, buscaram-se *stakeholders* que possuíam conhecimento prático na área da saúde, tecnologia operacional e tecnologia da informação.

Diante do exposto, existem algumas recomendações para pesquisas futuras. Primeiramente, no âmbito da metodologia de pesquisa, seria interessante o aperfeiçoamento da fórmula utilizada no método de produtividade de pesquisa, pois a fórmula atual não possui uma ponderação para considerar o número de citações por artigo, o que influencia o ranking dos principais autores, países e instituições.

Em relação ao fluxo de pacientes e à arquitetura proposta, devem-se buscar validações e adaptações de forma presencial em um departamento de emergência hospitalar, para que ocorra uma maior proximidade com o fenômeno estudado e uma avaliação técnica da viabilidade da estrutura da arquitetura pelos provedores da saúde.

Por fim, é necessário um estudo mais aprofundado e comparativo sobre os dispositivos e tecnologias a serem utilizados na implementação da arquitetura, a fim de fornecer a viabilidade operacional do modelo e uma avaliação de seus custos para que ocorra a transformação digital de um departamento de emergência hospitalar.

REFERÊNCIAS

- ALAM, K. M.; EL SADDIK, A. C2PS: A digital twin architecture reference model for the cloud-based cyber-physical systems. **IEEE Access**, [S. l.], v. 14, n. 8, p. 13, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2657006>
- ALFIAN, G. *et al.* A personalized healthcare monitoring system for diabetic patients by utilizing BLE-based sensors and real-time data processing. **Sensors (Switzerland)**, [S. l.], v. 18, n. 7, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/s18072183>
- AMENDOLA, S. *et al.* RFID technology for IoT-based personal healthcare in smart spaces. **IEEE Internet of Things Journal**, [S. l.], v. 1, n. 2, p. 144–152, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/JIOT.2014.2313981>
- APREPRO. **IX Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção**. [s. l.], 2019. Disponível em: <https://aprepro.org.br/combrepro/2019/>. Acesso em: 19 set. 2020.
- ARMBRUST, M. *et al.* A view of cloud computing. **Communications of the ACM**, [S. l.], v. 1, n. 1, p. 2–8, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.2991/ijndc.2013.1.1.2>
- ATZORI, L.; IERA, A.; MORABITO, G. The Internet of Things: A survey. **Computer Networks**, [S. l.], v. 54, n. 15, p. 2787–2805, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2010.05.010>
- BADAWI, H. *et al.* **Standardizing a Shoe Insole Based on ISO / IEEE 11073 Personal Health Device (X73-PHD) Standards**. [S. l.]: Springer International Publishing, 2019. *E-book*. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-11890-7>
- BAGARIA, N. *et al.* Health 4.0: Digital Twins for Health and Well-Being. **Connected Health in Smart Cities**, [S. l.], n. January, p. 1–254, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-27844-1>
- BERTO, R. M. V. de S.; NAKANO, D. Revisitando a produção científica nos anais do Encontro Nacional de Engenharia de Produção. **Production**, [S. l.], v. 24, n. 1, p. 225–232, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s0103-65132013005000007>
- BOOTH, W. C. *et al.* **The craft of research**. 4. ed. Chicago: [s. n.], 2016. v. 53*E-book*. Disponível em: <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- BRENNER, B.; HUMMEL, V. Digital Twin as Enabler for an Innovative Digital Shopfloor Management System in the ESB Logistics Learning Factory at Reutlingen - University. **Procedia Manufacturing**, [S. l.], v. 9, p. 198–205, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.04.039>
- BRUYNSEELS, K.; DE SIO, F. S.; VAN DEN HOVEN, J. Digital Twins in health care: Ethical implications of an emerging engineering paradigm. **Frontiers in Genetics**, [S. l.], v. 9, n. FEB, p. 1–11, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fgene.2018.00031>
- BRYMAN, A. **Research methods and organization studies**. [S. l.: s. n.]. *E-book*. Disponível

em: <https://doi.org/10.4324/9780203359648>

CÁCERES FLÓREZ, C. A.; ROSÁRIO, J. M.; HURTADO, D. A. Application of automation and manufacture techniques oriented to a service-based business using the Internet of Things (IoT) and industry 4.0 concepts. Case study: Smart hospital. **Gestao e Producao**, [S. l.], v. 27, n. 3, p. 1–19, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0104-530x5416-20>

CAMPEAN, F. *et al.* Automotive IVHM: Towards intelligent personalised systems healthcare. **Proceedings of the International Conference on Engineering Design, ICED**, [S. l.], v. 2019-Augus, n. August, p. 857–866, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1017/dsi.2019.90>

CATARINUCCI, L. *et al.* An IoT-Aware Architecture for Smart Healthcare Systems. **IEEE Internet of Things Journal**, [S. l.], v. 2, n. 6, p. 515–526, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/JIOT.2015.2417684>

CHINA, P. R. of. **Made in China 2025 plan issued**. [s. l.], 2015. Disponível em: http://english.www.gov.cn/policies/latest_releases/2015/05/19/content_281475110703534.htm. Acesso em: 14 set. 2020.

CIMERMAN, S. *et al.* Deep impact of COVID-19 in the healthcare of Latin America: the case of Brazil. **Brazilian Journal of Infectious Diseases**, [S. l.], v. 24, n. 2, p. 93–95, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.bjid.2020.04.005>

CIRP. **14th CIRP Conference on Intelligent Computation in Engineering Manufacturing: Innovative and Cognitive Production Technology and Systems**. [s. l.], 2020. Disponível em: http://www.icme.unina.it/ICME_20/ICME_20.htm. Acesso em: 19 set. 2020.

CLARIVATE. **About Web of Science**. [s. l.], 2020. Disponível em: <https://clarivate.com/webofsciencegroup/solutions/web-of-science/>. Acesso em: 19 set. 2020.

CONSELHO DE ESTADO DA CHINA. **Made in China 2025**. [s. l.], 2015. Disponível em: http://english.www.gov.cn/policies/latest_releases/2015/05/19/content_281475110703534.htm. Acesso em: 1 nov. 2020.

CONSORTIUM, I. I. **Testbeds**. [s. l.], 2020. Disponível em: <https://www.iiconsortium.org/test-beds.htm>. Acesso em: 14 set. 2020.

COURSERA. **Mastering Digital Twins**. [s. l.], 2020. Disponível em: <https://www.coursera.org/learn/mastering-digital-twins>. Acesso em: 20 set. 2020.

DASSAULT SYSTÈMES. **Digital Twin**. [s. l.], 2014. Disponível em: <https://discover.3ds.com/digital-twin>. Acesso em: 9 nov. 2020.

DAY, T. E.; AL-ROUBAIE, A. R.; GOLDLUST, E. J. **Decreased length of stay after addition of healthcare provider in emergency department triage: A comparison between computer-simulated and real-world interventions**. [S. l.: s. n.] Disponível em: <https://doi.org/10.1136/emered-2012-201113>

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG, D. Reference Architecture Model Industrie 4.0 (RAMI 4.0) English translation of DIN SPEC 91345:2016-04. Germany, n. April, p. 1–40, 2016.

DIAS, D.; CUNHA, J. P. S. Wearable health devices—vital sign monitoring, systems and technologies. **Sensors (Switzerland)**, [S. l.], v. 18, n. 8, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/s18082414>

DICKSON, E. W. *et al.* Application of Lean Manufacturing Techniques in the Emergency Department. **Journal of Emergency Medicine**, [S. l.], v. 37, n. 2, p. 177–182, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jemermed.2007.11.108>

DIMITROV, D. V. Medical internet of things and big data in healthcare. **Healthcare Informatics Research**, [S. l.], v. 22, n. 3, p. 156–163, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.4258/hir.2016.22.3.156>

EDX. **Industry 4.0: How to Revolutionize your Business**. [S. l.], 2019. Disponível em: <https://www.edx.org/course/industry-40-how-to-revolutionize-your-business>. Acesso em: 20 set. 2020.

EL SADDIK, A.; SHAMIM HOSSAIN, M.; KANTARCI, B. **Connected health in smart cities**. [S. l.: s. n.]. *E-book*. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-27844-1>

ELSEVIER. **About Scopus**. [S. l.], 2020a. Disponível em: <https://www.elsevier.com/solutions/scopus>. Acesso em: 19 set. 2020.

ELSEVIER. **Reference Manager and Academic Social Network - Mendeley Database**. [S. l.], 2020b. Disponível em: <https://www.elsevier.com/solutions/mendeley>. Acesso em: 20 set. 2020.

FAN, W. **What are the connections and essential differences between Cyber-Physical Systems and Digital Twin?**. [S. l.], 2018. Disponível em: https://www.researchgate.net/post/What_are_the_connections_and_essential_differences_between_CPS_Cyber-Physical_Systemand_DT_Digital_Twin. Acesso em: 18 set. 2020.

FILHO, I. B. **Architectural design of IoT-based healthcare applications**. 2018. [S. l.], 2018.

FLEXSIM. **Using Simulation to Justify RFID Technology**. [S. l.], 2016. Disponível em: <https://www.flexsim.com/news/using-simulation-justify-rfid-technology/>. Acesso em: 23 out. 2020.

FLEXSIM. **Using Amazon Web Services for Distributed Experiments or Optimizations - FlexSim Community**. [S. l.], 2018. Disponível em: <https://answers.flexsim.com/content/kbentry/53302/using-amazon-web-services-for-distributed-experime.html>. Acesso em: 2 dez. 2020.

FLEXSIM. **FlexSim Healthcare: Healthcare Simulation and Modeling**. [S. l.], 2020a. Disponível em: <https://healthcare.flexsim.com/>. Acesso em: 20 set. 2020.

FLEXSIM. **Digital Twin - FlexSim**. [S. l.], 2020b. Disponível em: <https://www.flexsim.com/pt/gêmeo-digital/>. Acesso em: 24 nov. 2020.

FLEXSIM. **Flexsim Live**. [S. l.], 2020c. Disponível em: <http://flexsimlive.com/pricing/>.

Acesso em: 2 dez. 2020.

FUNDO NACIONAL DE SAÚDE. **FNS - Equipamentos e Materiais Permanentes**. [s. l.], [s. d.]. Disponível em: <https://consultafns.saude.gov.br/#/equipamento/completa>. Acesso em: 22 nov. 2020.

GANDOMI, A.; HAIDER, M. Beyond the hype: Big data concepts, methods, and analytics. **International Journal of Information Management**, [S. l.], v. 35, n. 2, p. 137–144, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2014.10.007>

GARTNER. **Top 10 Strategic Technology Trends for 2017**. [s. l.], 2016. Disponível em: <https://www.gartner.com/smarterwithgartner/gartners-top-10-technology-trends-2017/>. Acesso em: 14 set. 2020.

GARTNER. **Top 10 Strategic Technology Trends for 2018**. [s. l.], 2017. Disponível em: <https://www.gartner.com/smarterwithgartner/gartner-top-10-strategic-technology-trends-for-2018/>. Acesso em: 14 set. 2020.

GARTNER. **Top 10 Strategic Technology Trends for 2019**. [s. l.], 2018. Disponível em: <https://www.gartner.com/smarterwithgartner/gartner-top-10-strategic-technology-trends-for-2019/>. Acesso em: 14 set. 2020.

GE HEALTHCARE. **Hospital of the future**. [S. l.: s. n.]. Disponível em: <https://doi.org/10.1136/bmj.320.7236.715/a>.

GHOLAMHOSSEINI, L.; SADOUGHI, F.; SAFAEI, A. Hospital real-time location system (A practical approach in healthcare): A narrative review article. **Iranian Journal of Public Health**, [S. l.], v. 48, n. 4, p. 593–602, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.18502/ijph.v48i4.980>

GIA, T. N. *et al.* Fog computing in healthcare Internet of Things: A case study on ECG feature extraction. **Proceedings - 15th IEEE International Conference on Computer and Information Technology, CIT 2015, 14th IEEE International Conference on Ubiquitous Computing and Communications, IUCC 2015, 13th IEEE International Conference on Dependable, Autonomic and Se**, [S. l.], p. 356–363, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/CIT/IUCC/DASC/PICOM.2015.51>

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4^a ed. São Paulo: [s. n.], 2008. *E-book*.

GOCKEL, B. T. *et al.* Challenges with structural life forecasting using realistic mission profiles. **Collection of Technical Papers - AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference**, [S. l.], n. April, p. 1–11, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.2514/6.2012-1813>

GOLDLUST, E. J.; DAY, T. E.; HOOT, N. R. Streamlining patient flow in the emergency department with discrete event simulation. **Value and Quality Innovations in Acute and Emergency Care**, [S. l.], p. 201–208, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1017/9781316779965.026>

GOMAA, W. **What is the difference between Cyber-Physical Systems and Internet of**

Things systems? [s. l.], 2016. Disponível em: https://www.researchgate.net/post/What_is_the_difference_between_cyber-physical_systems_CPS_and_Internet_of_Things_IoT_systems. Acesso em: 18 set. 2020.

GORECKY, D. *et al.* Human-machine-interaction in the industry 4.0 era. **Proceedings - 2014 12th IEEE International Conference on Industrial Informatics, INDIN 2014**, [S. l.], p. 289–294, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/INDIN.2014.6945523>

GRANADOS, J. *et al.* Towards Energy-Efficient HealthCare: an Internet-of-Things Architecture Using Intelligent Gateways. [S. l.], p. 279–282, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.4108/icst.mobihealth.2014.257394>

GRIEVES, M. Digital Twin : Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication This paper introduces the concept of a A Whitepaper by Dr . Michael Grieves. **White Paper**, [S. l.], n. March, 2014. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/275211047_Digital_Twin_Manufacturing_Excellence_through_Virtual_Factory_Replication

GRIEVES, M. Origins of the Digital Twin Concept. **Research Gate**, [S. l.], 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.26367.61609>

GUAN, W. *et al.* Clinical characteristics of coronavirus disease 2019 in China. **New England Journal of Medicine**, [S. l.], v. 382, n. 18, p. 1708–1720, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1056/NEJMoa2002032>

GUBBI, J. *et al.* Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions. **Future Generation Computer Systems**, [S. l.], v. 29, n. 7, p. 1645–1660, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.future.2013.01.010>

GÜNTHER, H. Pesquisa qualitativa versus pesquisa quantitativa: esta é a questão? **Psicologia: Teoria e Pesquisa**, [S. l.], v. 22, n. 2, p. 201–209, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s0102-37722006000200010>

HANLON, P. *et al.* Making the case for a “fifth wave” in public Health. **Public Health**, [S. l.], v. 125, n. 1, p. 30–36, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.puhe.2010.09.004>

HEMPEL, V. **Healthcare solution testing for future | Digital Twins in healthcare**. [s. l.], 2017. Disponível em: <https://www.dr-hempel-network.com/digital-health-technology/digital-twins-in-healthcare/>. Acesso em: 9 nov. 2020.

HIMSS. **What is Interoperability?**. [s. l.], 2013. Disponível em: <https://www.himss.org/previous-himss-interoperability-definitions>. Acesso em: 6 nov. 2020.

HITACHI. **Northern Care Alliance NHS Group partners with Hitachi on UK’s first fully integrated hospital-wide digital transformation**. [s. l.], 2019. Disponível em: <https://www.hitachi.com/New/cnews/month/2019/10/191002c.pdf>. Acesso em: 10 out. 2020.

HOWARD, G. S.; COLE, D. A.; MAXWELL, S. E. Research Productivity in Psychology Based on Publication in the Journals of the American Psychological Association. **American Psychologist**, [S. l.], v. 42, n. 11, p. 975–986, 1987. Disponível em:

<https://doi.org/10.1037/0003-066X.42.11.975>

HU, Y. *et al.* From construction megaproject management to complex project management: Bibliographic analysis. **Journal of Management in Engineering**, [S. l.], v. 31, n. 4, p. 1–11, 2015. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ME.1943-5479.0000254](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000254)

HUANG, C. *et al.* Clinical features of patients infected with 2019 novel coronavirus in Wuhan, China. **The Lancet**, [S. l.], v. 395, n. 10223, p. 497–506, 2020. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(20\)30183-5](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(20)30183-5)

IIC, I. I. C. **The Industrial Internet of Things Volume G1: Reference Architecture**. [S. l.: s. n.]. Disponível em: <https://www.mendeley.com/catalogue/industrial-internet-things-volume-g1-reference-architecture-1/>.

INDUSTRIAL INTERNET CONSORTIUM, I. Digital Transformation in Industry. [S. l.], p. 35, 2020.

INOUE, K.; OHIRA, Y.; TAKESHITA, H. The risk of the collapse of public health centres under the current system to prevent the spread of COVID-19. **International Maritime Health**, [S. l.], v. 71, n. 2, p. 149–149, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.5603/IMH.2020.0026>

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 62890**. [S. l.], 2020. Disponível em: https://www.iec.ch/dyn/www/f?p=103:38:1030931674164:::FSP_ORG_ID,FSP_APEX_PAGE,FSP_PROJECT_ID:1250,20,20929. Acesso em: 16 out. 2020.

JANJUA, G. *et al.* Wireless chest wearable vital sign monitoring platform for hypertension. **Proceedings of the Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, EMBS**, [S. l.], n. 676201, p. 821–824, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/EMBC.2017.8036950>

JIMENEZ, J. I.; JAHANKHANI, H.; KENDZIERSKYJ, S. **Health Care in the Cyberspace: Medical Cyber-Physical System and Digital Twin Challenges**. [S. l.]: Springer International Publishing, 2020. *E-book*. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-030-18732-3_6

JUNIOR, W. C.; TORRES, B. L. de B.; RAUSCH, M. do C. P. Sistema Manchester de Classificação de Risco. **Grupo Brasileiro de Classificação de Risco**, [S. l.], p. 1–16, 2014.

KAGERMANN, H.; WAHLSTER, W.; HELBIG, J. Securing the future of German manufacturing industry: Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0. **Final Report of the Industrie 4.0 Working Group**, [S. l.], n. April, p. 1–84, 2013.

KANG, H.; HASWELL, E. Patient Flow Analysis Using Real-Time Locating System Data: A Case Study in an Outpatient Oncology Center. **JCO Oncology Practice**, [S. l.], 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1200/op.20.00119>

KARAKRA, A. *et al.* Pervasive Computing Integrated Discrete Event Simulation for a Hospital Digital Twin. **Proceedings of IEEE/ACS International Conference on Computer Systems and Applications, AICCSA**, [S. l.], p. 1–6, 2018. Disponível em:

<https://doi.org/10.1109/AICCSA.2018.8612796>

KARAKRA, A. *et al.* HospiT'Win: A predictive simulation-based digital twin for patients pathways in hospital. **2019 IEEE EMBS International Conference on Biomedical and Health Informatics, BHI 2019 - Proceedings**, [S. l.], p. 1–4, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/BHI.2019.8834534>

KE, Y. *et al.* Research trend of public-private partnership in construction journals. **Journal of Construction Engineering and Management**, [S. l.], v. 135, n. 10, p. 1076–1086, 2009. Disponível em: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(2009\)135:10\(1076\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(2009)135:10(1076))

KING, R. C. *et al.* Application of data fusion techniques and technologies for wearable health monitoring. **Medical Engineering and Physics**, [S. l.], v. 42, p. 1–12, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.medengphy.2016.12.011>

KOCABAS, O.; SOYATA, T.; AKTAS, M. K. Emerging Security Mechanisms for Medical Cyber Physical Systems. **IEEE/ACM Transactions on Computational Biology and Bioinformatics**, [S. l.], v. 13, n. 3, p. 401–416, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/TCBB.2016.2520933>

KUROSE, J. F.; ROSS, K. W. **Computer Networking: A Top-Down Approach**. New York: [s. n.], 2017. *E-book*.

LEE, E. A.; SESHIA, S. A. **Introduction to Embedded Systems. A Cyber-Physical Systems Approach. Second Edition**. 2. ed. [S. l.: s. n.], v. 195 *E-book*. Disponível em: <https://books.google.co.uk/books?hl=en&lr=&id=chPiDQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR7&dq=INTRODUCTION+TO+EMBEDDED+SYSTEMS+A+CYBER-PHYSICAL+SYSTEMS+APPROACH&ots=wWyCt2IKDK&sig=Gbp7bueYwN1ShTL9HQBqTC6l6VA#v=onepage&q=INTRODUCTION+TO+EMBEDDED+SYSTEMS+A+CYBER-PHYSICAL+SYS>

LEE, I. *et al.* Challenges and Research Directions in Medical Cyber – Physical Systems. **Proceedings of the IEEE**, [S. l.], 2011.

LEE, J. *et al.* Integration of digital twin and deep learning in cyber-physical systems: towards smart manufacturing. **IET Collaborative Intelligent Manufacturing**, [S. l.], v. 2, n. 1, p. 34–36, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1049/iet-cim.2020.0009>

LEE, J.; AZAMFAR, M.; MILLER, M. 5G and Smart Manufacturing. **Manufacturing Leadership**, [S. l.], n. September, 2020.

LEE, J.; BAGHERI, B.; KAO, H. A. A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. **Manufacturing Letters**, [S. l.], v. 3, p. 18–23, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2014.12.001>

LEITÃO, P.; RIBEIRO, L.; STRASSER, T. Smart Agents in Industrial Cyber-Physical Systems. **Proceedings of the IEEE**, [S. l.], v. 104, n. 5, p. 1–16, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/JPROC.2016.2521931>

LEMOS, D. R. Q. *et al.* Health system collapse 45 days after the detection of COVID-19 in

Ceará, Northeast Brazil: a preliminary analysis. **Revista da Sociedade Brasileira de Medicina Tropical**, [S. l.], v. 53, 2020.

LI, Z.; SHEN, G. Q.; XUE, X. Critical review of the research on the management of prefabricated construction. **Habitat International**, [S. l.], v. 43, p. 240–249, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2014.04.001>

LIN, S.-W. *et al.* Architecture Alignment and Interoperability. **Platform Industrie 4.0**, [S. l.], p. 19, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.12.005>

LIU, Y. *et al.* A Novel Cloud-Based Framework for the Elderly Healthcare Services Using Digital Twin. **IEEE Access**, [S. l.], v. 7, p. 49088–49101, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2909828>

LIU, Z. *et al.* Cyber-physical-social systems for command and control. **IEEE Intelligent Systems**, [S. l.], v. 26, n. 4, p. 92–96, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/MIS.2011.69>

LOPES, L. C. D.; NEUMANN, C. Research and trends in cyber-physical production systems from 2008 to 2019. **Procedia CIRP**, [S. l.], p. 6, 2020.

LOPES, L. C. D.; SANTOS, M. R.; MARIANO, A. M. Uma revisão bibliométrica sobre Sistemas Ciber-físicos (2008 - 2019): aplicação da teoria do enfoque meta analítico consolidado. [S. l.], p. 1–12, 2019.

MACHADO, M. Indústria 4.0: O Uso da Simulação e do Digital Twin na Manutenção Preditiva para Apoiar a Transformação Digital Bem-Sucedida. **Flexsim**, [S. l.], 2018.

MARIANO, A. M.; ROCHA SANTOS, M. Revisão da Literatura: Apresentação de uma Abordagem Integradora. **XXVI Congreso Internacional de la Academia Europea de Dirección y Economía de la Empresa (AEDEM)**, [S. l.], n. September, p. v.26, 2017. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/319547360>

MARTINEZ, D. A. *et al.* An Electronic Dashboard to Monitor Patient Flow at the Johns Hopkins Hospital: Communication of Key Performance Indicators Using the Donabedian Model. **Journal of Medical Systems**, [S. l.], v. 42, n. 8, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10916-018-0988-4>

MAZUMDER, O. *et al.* Synthetic PPG generation from haemodynamic model with baroreflex autoregulation: A Digital twin of cardiovascular system. **Proceedings of the Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, EMBS**, [S. l.], p. 5024–5029, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/EMBC.2019.8856691>

MIGUEL, P. A. C. *et al.* **Metodologia de Pesquisa em Engenharia de Produção e Gestão de Operações**. 2ª ed. Rio de Janeiro: Elsevier Ltd, 2013. v. 53E-book. Disponível em: <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

MIGUEL, P. A. C. *et al.* **Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações**. 2ª ed. Rio de Janeiro: Elsevier Ltd, 2018. E-book. Disponível em:

<https://books.google.com.br/books?id=JO1oDwAAQBAJ>

MIIT, M. da indústria e da tecnologia da informação da R. P. da C.; CONSELHO DE ESTADO DA CHINA. **Diretrizes para a construção do Sistema Nacional de Padrões.** [S. l.: s. n.]. Disponível em: http://english.www.gov.cn/policies/latest_releases/2015/05/19/content_281475110703534.htm. Acesso em: 1 nov. 2020.

MIRANDA, J. *et al.* Analysis of OPC unified architecture for healthcare applications. **IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, ETFA**, [S. l.], p. 1–4, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/ETFA.2017.8247771>

MOHAJAN, H. The First Industrial Revolution: Creation of a New Global Human Era. **Journal of Social Sciences and Humanities**, [S. l.], v. 5, n. 4, p. 377–387, 2019.

MOHAJAN, H. The Second Industrial Revolution has Brought Modern Social and Economic Developments. **Journal of Social Sciences and Humanities**, [S. l.], v. 6, n. 1, p. 1–14, 2020.

MONOSTORI, L. Cyber-physical production systems: Roots, expectations and R&D challenges. **Procedia CIRP**, [S. l.], v. 17, p. 9–13, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.03.115>

OFFICE OF THE NATIONAL COORDINATOR FOR HEALTH INFORMATION TECHNOLOGY (ONC). **Health IT Standards.** [s. l.], [s. d.]. Disponível em: <https://www.healthit.gov/topic/standards-technology/health-it-standards>. Acesso em: 12 out. 2020.

OKONIEWSKA, B. *et al.* Multidimensional evaluation of a radio frequency identification wi-fi location tracking system in an acute-care hospital setting. **Journal of the American Medical Informatics Association**, [S. l.], v. 19, n. 4, p. 674–679, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1136/amiajnl-2011-000560>

PALMISANO, S. J. **A smarter planet: the next leadership agenda.** [S. l.: s. n.]

PANTELOPOULOS, A.; BOURBAKIS, N. G. A survey on wearable sensor-based systems for health monitoring and prognosis. **IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics Part C: Applications and Reviews**, [S. l.], v. 40, n. 1, p. 1–12, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/TSMCC.2009.2032660>

PAZZINATO, A. L.; SENISE, M. H. V. **História Moderna e Contemporânea.** 1. ed. São Paulo: [s. n.], 1997. *E-book*.

PLATTFORM INDUSTRIE 4.0. **Plattform Industrie 4.0 - RAMI4.0 – a reference framework for digitalisation** **Plattform Industrie 4.0.** [S. l.: s. n.]

QI, Q. *et al.* Enabling technologies and tools for digital twin. **Journal of Manufacturing Systems**, [S. l.], 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2019.10.001>

RAJKUMAR, R. *et al.* Cyber-Physical Systems: The Next Computing Revolution. **47th Design Automation Conference**, [S. l.], 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1097/01.XME.0000415592.81690.e8>

RAMADAN, R. Big Data Tools-An Overview. **International Journal of Computer & Software Engineering**, [S. l.], v. 2, n. 2, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.15344/2456-4451/2017/125>

SALVADOR, Â. D. **Métodos e técnicas de pesquisa bibliográfica**. 11. ed. Porto Alegre: [s. n.], 1982. *E-book*.

SAUNDERS, C. E.; MAKENS, P. K.; LEBLANC, L. J. Modeling emergency department operations using advanced computer simulation systems. **Annals of Emergency Medicine**, [S. l.], v. 18, n. 2, p. 134–140, 1989. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0196-0644\(89\)80101-5](https://doi.org/10.1016/S0196-0644(89)80101-5)

SCHWAB, K. **A Quarta Revolução Industrial**. 1ª ed. São Paulo: [s. n.], 2016. *E-book*.

SCHWAB, K.; DAVIS, N. **Aplicando a quarta revolução industrial**. 1ª Edição ed. São Paulo: [s. n.], 2018. *E-book*.

SHAFTO, M. *et al.* Modeling, Simulation, information Technology & Processing Roadmap - Technology Area 11. **National Aeronautics and Space Administration**, [S. l.], p. 27, 2010. Disponível em: https://www.nasa.gov/pdf/501321main_TA11-MSITP-DRAFT-Nov2010-A1.pdf

SHI, C. *et al.* Heterogeneous integration of rigid , soft , and liquid materials for self-healable , recyclable , and reconfigurable wearable electronics. **Science Advances**, [S. l.], n. November, p. 1–9, 2020.

SHI, W. *et al.* Edge Computing: Vision and Challenges. **IEEE Internet of Things Journal**, [S. l.], v. 3, n. 5, p. 637–646, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/JIOT.2016.2579198>

SHIREHJINI, A. A. N.; YASSINE, A.; SHIRMOHAMMADI, S. Equipment location in hospitals using RFID-based positioning system. **IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine**, [S. l.], v. 16, n. 6, p. 1058–1069, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/TITB.2012.2204896>

SILVA, E. L. de; MENEZES, E. M. **Metodologia da Pesquisa e Elaboração de Dissertação**. 4. ed. [S. l.: s. n.]. v. 29 *E-book*. Disponível em: <http://www.mendeley.com/research/metodologia-da-pesquisa-e-elaborao-de-dissertao-4a-edio-revisada-e-atualizada/>

SITTÓN-CANDANEDO, I. *et al.* A review of edge computing reference architectures and a new global edge proposal. **Future Generation Computer Systems**, [S. l.], v. 99, n. 2019, p. 278–294, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.future.2019.04.016>

STANDARDIZATION COUNCIL INDUSTRIE 4.0. Alignment Report for Reference Architectural Model for Industrie 4.0 / Intelligent Manufacturing System Architecture. **Federal Ministry of Economic Affairs and Energy Germany**, [S. l.], p. 1–36, 2018.

STEVAN JR., S. L.; LEME, M. O.; SANTOS, M. M. D. **Indústria 4.0: Fundamentos, perspectivas e aplicações**. 1. ed. São Paulo: [s. n.], 2018. *E-book*.

SYAFRUDIN, M. *et al.* Application of bluetooth low energy-based real-time location system for indoor environments. **ACM International Conference Proceeding Series**, [S. l.], p. 167–171, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1145/3289430.3289470>

TANEJA, M.; DAVY, A. Resource Aware Placement of Data Analytics Platform in Fog Computing. **Procedia Computer Science**, [S. l.], v. 97, p. 153–156, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2016.08.295>

TANENBAUM, A. S. **Redes de Computadores**. [S. l.: s. n.]. v. 4E-book. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/TLA.2006.1642455>

TAO, F. *et al.* Digital twin driven prognostics and health management for complex equipment. **CIRP Annals**, [S. l.], v. 67, n. 1, p. 169–172, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2018.04.055>

TAO, F. *et al.* Digital Twins and Cyber–Physical Systems toward Smart Manufacturing and Industry 4.0: Correlation and Comparison. **Engineering**, [S. l.], v. 5, n. 4, p. 653–661, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.eng.2019.01.014>

TAO, F.; ZHANG, M.; NEE, A. Y. . **Digital Twin Driven Smart Manufacturing**. 1st. ed. London: Matthew Deans, 2019. *E-book*.

THE UNIVERSITY OF TEXAS AT EL PASO. **Basic vs. Applied Research**. [s. l.], [s. d.]. Disponível em: <https://www.utep.edu/couri/about-ug-research/basic-vs-applied-research.html>. Acesso em: 25 nov. 2020.

THUEMMLER, C.; BAI, C. **Health 4.0: How virtualization and big data are revolutionizing healthcare**. [S. l.: s. n.]. *E-book*. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-47617-9>

TOLLEFSEN, W. W. *et al.* iRevive: A pre-hospital database system for emergency medical services. **International Journal of Healthcare Technology and Management**, [S. l.], v. 6, n. 4–6, p. 454–469, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1504/IJHTM.2005.007008>

UDEMY. **Digital Twin : A Comprehensive Overview**. [s. l.], 2020. Disponível em: <https://www.udemy.com/course/digital-twin-a-comprehensive-overview/>. Acesso em: 20 set. 2020.

UHLEMANN, T. H. J.; LEHMANN, C.; STEINHILPER, R. The Digital Twin: Realizing the Cyber-Physical Production System for Industry 4.0. **Procedia CIRP**, [S. l.], v. 61, p. 335–340, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.11.152>

VIEW, G. R. **Digital Twin Market Size Worth \$26.07 Billion By 2025 | CAGR 38.2%**. [s. l.], 2018. Disponível em: <https://www.grandviewresearch.com/press-release/global-digital-twin-market>. Acesso em: 15 set. 2020.

VOGEL-HEUSER, B.; HESS, D. Guest Editorial Industry 4.0-Prerequisites and Visions. **IEEE Transactions on Automation Science and Engineering**, [S. l.], v. 13, n. 2, p. 411–413, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/TASE.2016.2523639>

WANG, J. *et al.* A secured health care application architecture for cyber-physical systems. **Control Engineering and Applied Informatics**, [S. l.], v. 13, n. 3, p. 101–108, 2011.

WANG, Y. *et al.* An integrated big data analytics-enabled transformation model: Application to health care. **Information and Management**, [S. l.], v. 55, n. 1, p. 64–79, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.im.2017.04.001>

WEINSTEIN, J. N. An industrial revolution in health care: The data tell us the time has come. **Spine**, [S. l.], v. 41, n. 1, p. 1–2, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1097/BRS.0000000000001296>

ZHANG, Y. *et al.* Health-CPS: Healthcare cyber-physical system assisted by cloud and big data. **IEEE Systems Journal**, [S. l.], v. 11, n. 1, p. 88–95, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/JSYST.2015.2460747>

ZIMMERMANN, H. Open Systems Interconnection. **IEEE Transactions on Communications**, [S. l.], v. 3, n. 1, p. 15–26, 1980. Disponível em: <https://doi.org/10.1108/eb047578>

APÊNDICE A – Classificação de autores, países e instituições

Quadro 4 – Classificação dos principais autores, países e instituições da Quarta Revolução Industrial.

Ranking	Autor	Score	País	Score	Instituição	Score
1°	Gromova E.A.	5.00	South Korea	181.03	University of Johannesburg	49.59
2°	Sinha S.	4.84	Italy	142.00	Sungkyunkwan University	11.92
3°	Kim S.	4.71	South Africa	127.53	Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University	11.32
4°	Lambrechts W.	4.67	Russian Federation	118.42	RWTH Aachen University	10.60
5°	Kim J.	4.39	Germany	117.48	University of Pretoria	10.07

Fonte: O autor (2020).

Quadro 5 – Classificação dos principais autores, países e instituições da Indústria 4.0.

Ranking	Autor	Score	País	Score	Instituição	Score
1°	Rauch E.	6.24	Germany	314.88	University of Patras	18.21
2°	Mourtzis D.	6.20	Italy	230.96	South China University of Technology	17.88
3°	Muller J.M.	6.02	China	130.51	RWTH Aachen University	17.62
4°	Ivanov D.	6.01	United Kingdom	103.14	University of Stuttgart	17.02
5°	Wan J.	5.87	Spain	99.82	University of Brescia	14.40

Fonte: O autor (2020).

Quadro 6 – Classificação dos principais autores, países e instituições de Sistemas Ciber-Físicos.

Ranking	Autor	Score	País	Score	Instituição	Score
1°	Lee E.A.	8.82	United States	667.32	University of California	59.54
2°	Wan J.	8.36	China	303.37	Carnegie Mellon University	41.80
3°	Liu X.	7.11	Germany	168.77	Vanderbilt University	21.03
4°	Zhu Q.	6.63	United Kingdom	73.02	University of Illinois	20.55
5°	Zhang Y.	6.49	Italy	70.08	Northeastern University	19.86

Fonte: O autor (2020).

Quadro 7 – Classificação dos principais autores, países e instituições de Gêmeo Digital.

Ranking	Autor	Score	País	Score	Instituição	Score
1°	Tao F.	9.38	Germany	276.11	Beihang University	29.46
2°	Zhang H.	5.13	China	256.19	RWTH Aachen University	25.16
3°	Raj P.	4.60	United States	194.06	Chalmers University of Technology	14.61
4°	Liu J.	4.39	Russian Federation	126.14	University of Stuttgart	14.20
5°	Liu Z.	4.23	United Kingdom	110.30	Budapest University of Technology and Economics	14.00

Fonte: O autor (2020).

Quadro 8 – Classificação dos principais autores, países e instituições de Internet das Coisas.

Ranking	Autor	Score	País	Score	Instituição	Score
1°	Zhang Y.	8.16	China	339.02	University of Surrey	17.78
2°	Xu L.D.	6.97	United States	309.78	Shanghai Jiao Tong University	16.89
3°	Tao F.	6.07	Italy	137.74	Beihang University	15.89
4°	Liu Y.	5.79	United Kingdom	120.57	Beijing University of Posts and Telecommunications	15.15
5°	Chen M.	4.99	India	94.36	University of California	14.99

Fonte: O autor (2020).

APÊNDICE B – Principais estudos no contexto da saúde 4.0

Quadro 9 – Principais estudos e aplicações para a elaboração de uma arquitetura no contexto da saúde 4.0

Aplicação na saúde	Autores	Características
IIRA	(FILHO, 2018)	Arquitetura de <i>software</i> baseada na IIRA para a saúde – arquitetura RAH.
CPS	(WANG <i>et al.</i> , 2011)	Sistema ciber-físico com rede de sensores sem fio protegida – arquitetura CPeSC ³ .
CPS	(ZHANG <i>et al.</i> , 2017)	Sistema ciber-físico para aplicativos e serviços de saúde centrados no paciente, desenvolvido com computação em nuvem e tecnologias de análise de big data – arquitetura Health CPS.
CPS	(KOCABAS; SOYATA; AKTAS, 2016)	Sistemas ciber-físicos médicos com quatro camadas: aquisição de dados, agregação de dados, processamento na nuvem e ação – Arquitetura MCPS.
DT	(BAGARIA <i>et al.</i> , 2020)	Visão holística de gêmeos digitais aplicados no contexto de saúde 4.0.
DT	(LIU <i>et al.</i> , 2019)	Criação de um modelo de gêmeo digital em nuvem aplicado ao monitoramento de pacientes idosos.
DT, Simulação e IoT	(KARAKRA <i>et al.</i> , 2018, 2019)	Adaptação do conceito de gêmeo digital para um hospital futurístico – HospT’Win.
Sensores vestíveis e fusão de dados	(KING <i>et al.</i> , 2017)	Aplicação de técnicas e tecnologias de fusão de dados para o monitoramento de sensores vestíveis.
Sensores vestíveis	(SHI <i>et al.</i> , 2020)	Criação de um sensor vestível reciclável e auto reparável multifuncional que permite monitoramento do batimento cardíaco (ECG), temperatura corporal e detecção de movimento.
Sensores vestíveis	(AMENDOLA <i>et al.</i> , 2014)	Aplicação de RFID para coleta de informações de sistemas orientados ao paciente.
Sensores vestíveis	(BADAWI <i>et al.</i> , 2019)	Padronização de uma palmilha de sapato de acordo com a norma ISO/IEEE 11073 para dispositivos pessoais de saúde.
Sensores vestíveis	(JANJUA <i>et al.</i> , 2017)	Dispositivo sem fio para medição de sinais de eletrocardiograma (ECG), fotoplestímetro (PPG) e balistocardiograma (BCG) via bluetooth utilizando um smartphone como <i>gateway</i> .
IoT	(GRANADOS <i>et al.</i> , 2014)	Arquitetura IoT aplicada a saúde que utiliza portas de entrada inteligentes com eficiência energética.
IoT	(CATARINUCCI <i>et al.</i> , 2015)	Arquitetura IoT para monitoramento e rastreamento de pacientes e da equipe médica dentro de um hospital.
mIoT e Big Data	(DIMITROV, 2016)	Revisão de literatura de mIoT e big data aplicados à saúde.

Simulação	(SAUNDERS; MAKENS; LEBLANC, 1989)	Modelagem de operações do departamento de emergência.
Inteligência Artificial	(EL SADDIK; SHAMIM HOSSAIN; KANTARCI, 2019, p. 153)	Incorporação de inteligência artificial à sistemas ciber-físicos médicos.
<i>Deep Learning</i>	(EL SADDIK; SHAMIM HOSSAIN; KANTARCI, 2019, p. 23)	Técnicas de aprendizagem profunda de máquina aplicadas na saúde.
<i>Deep Learning</i>	(EL SADDIK; SHAMIM HOSSAIN; KANTARCI, 2019, p. 233)	Desenvolvimento do método de rede neural de convolução para classificação de imagens motoras de eletroencefalografia (EEG).
Sistema de localização em tempo-real (RTLS)	(KANG; HASWELL, 2020)	Utilização de RTLS e EHR para simulação de eventos discretos (DES) para melhoria do agendamento da equipe médica e do processo de atendimento no fluxo de pacientes.
Sistema de localização em tempo-real (RTLS)	(SYAFRUDIN <i>et al.</i> , 2018)	RTLS baseado em bluetooth de baixa energia que utiliza smartphones como <i>gateways</i> e banco de dados NoSQL para o armazenamento de dados.

Fonte: O autor (2020).

APÊNDICE C – Aplicação da camada física: leitor RFID ligado à nuvem

Figura 75 – Leitor de RFID vinculado à um SaaS.

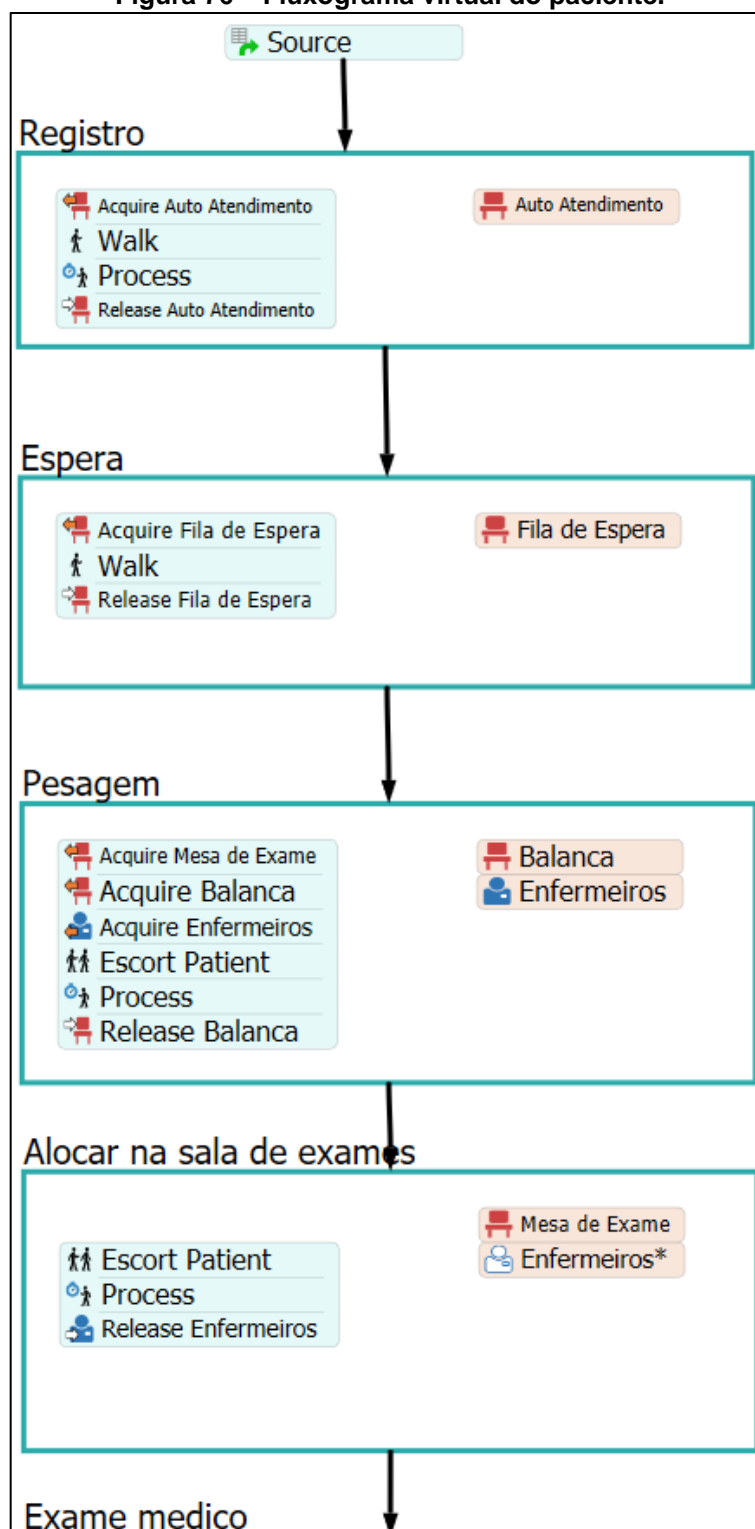
Google Sheets				
Data	Nº Cartão	Paciente	Protocolo de Manchester	Local
07/12/2020 23:16:00	9789640	Paciente 1	3	Triagem
07/12/2020 23:16:00	2970fa4	Paciente 2	2	Triagem

ESP32 – DEVKIT C	RC522
21	SDA
22	RST
19	MISO
18	SDK
23	MOSI
GND	GND
3V3	3V3

Fonte: O autor (2020).

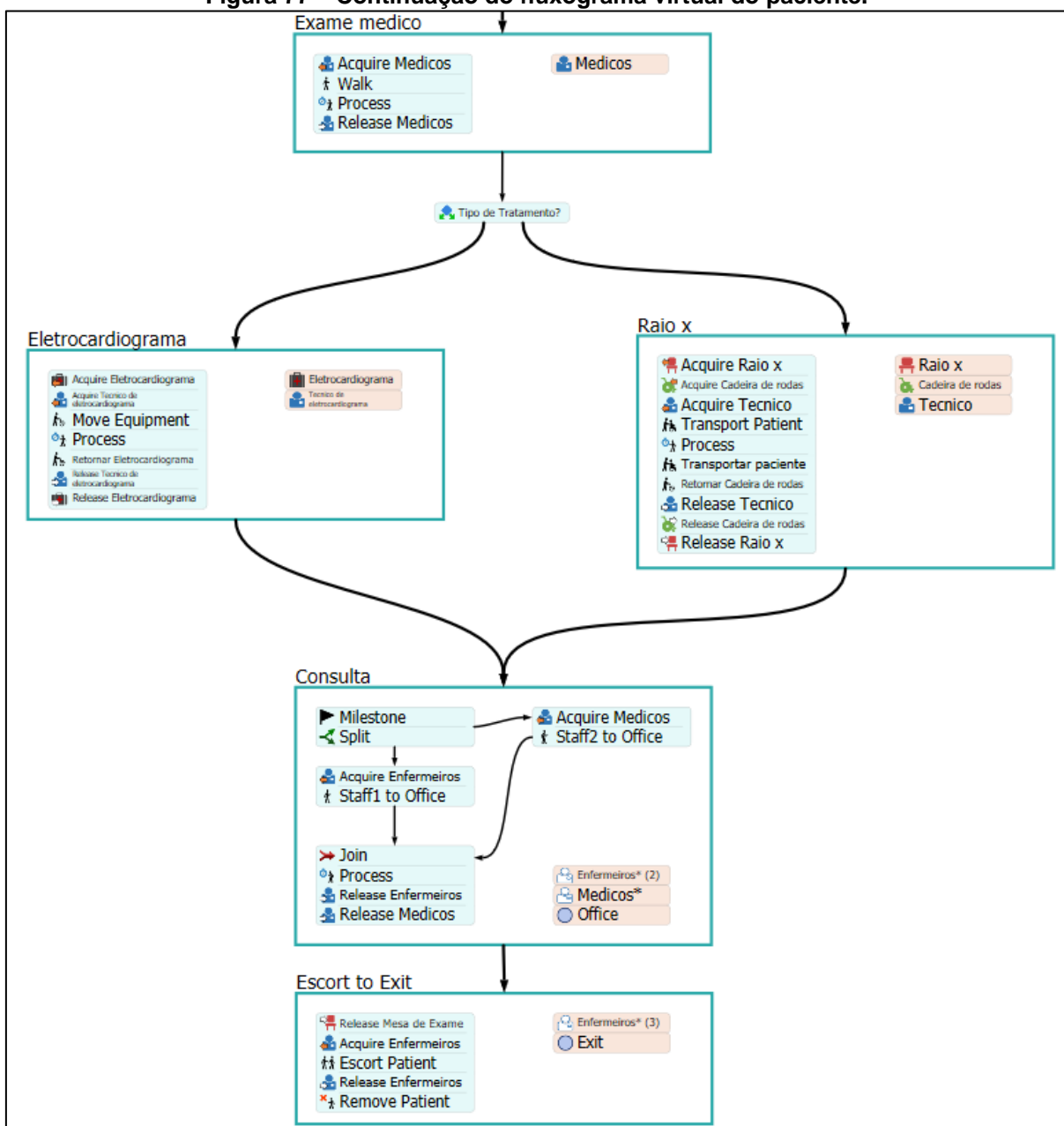
APÊNDICE D – Aplicação da camada virtual no *FlexSim Healthcare*

Figura 76 – Fluxograma virtual do paciente.



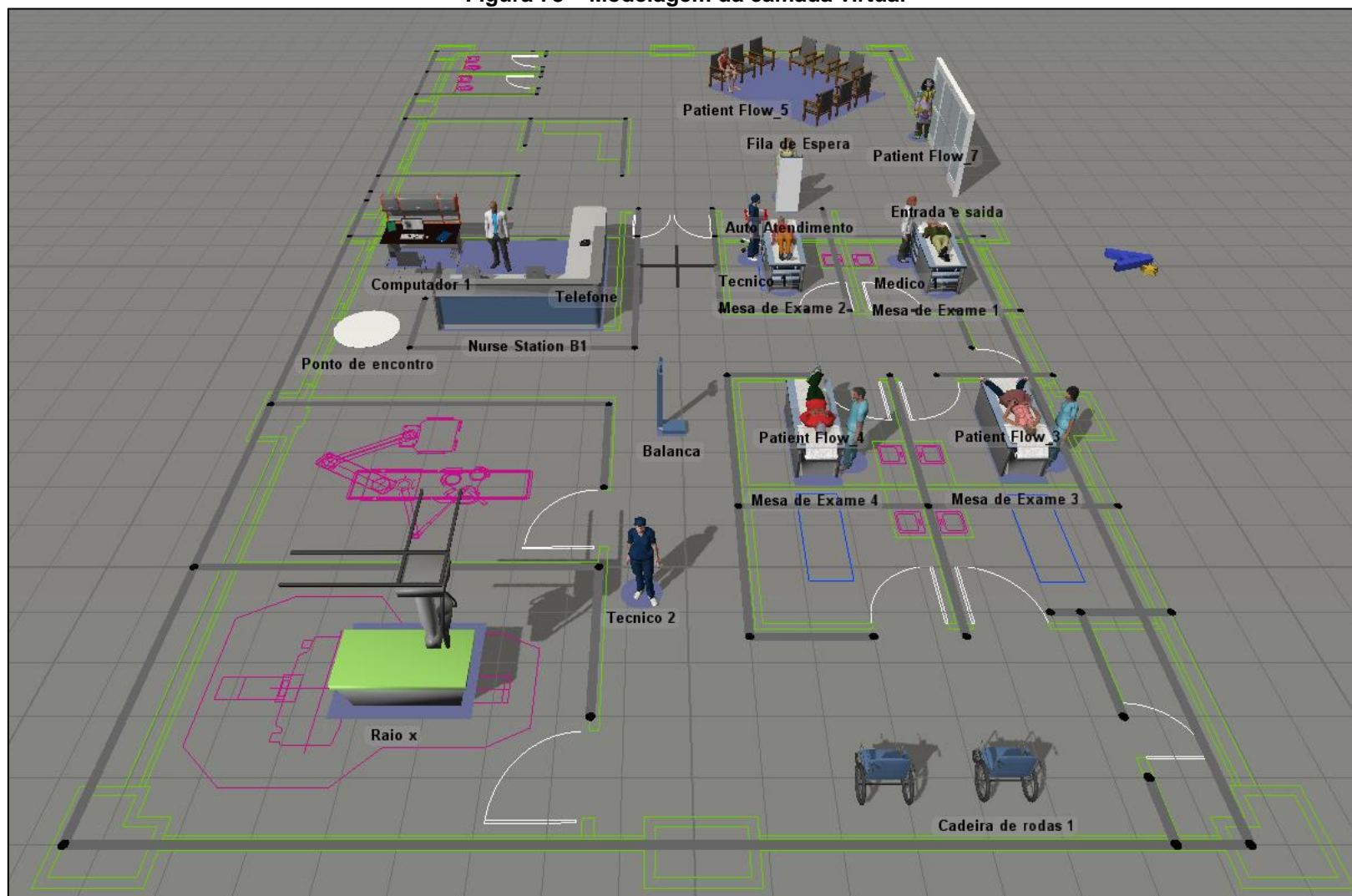
Fonte: O autor (2020).

Figura 77 – Continuação do fluxograma virtual do paciente.

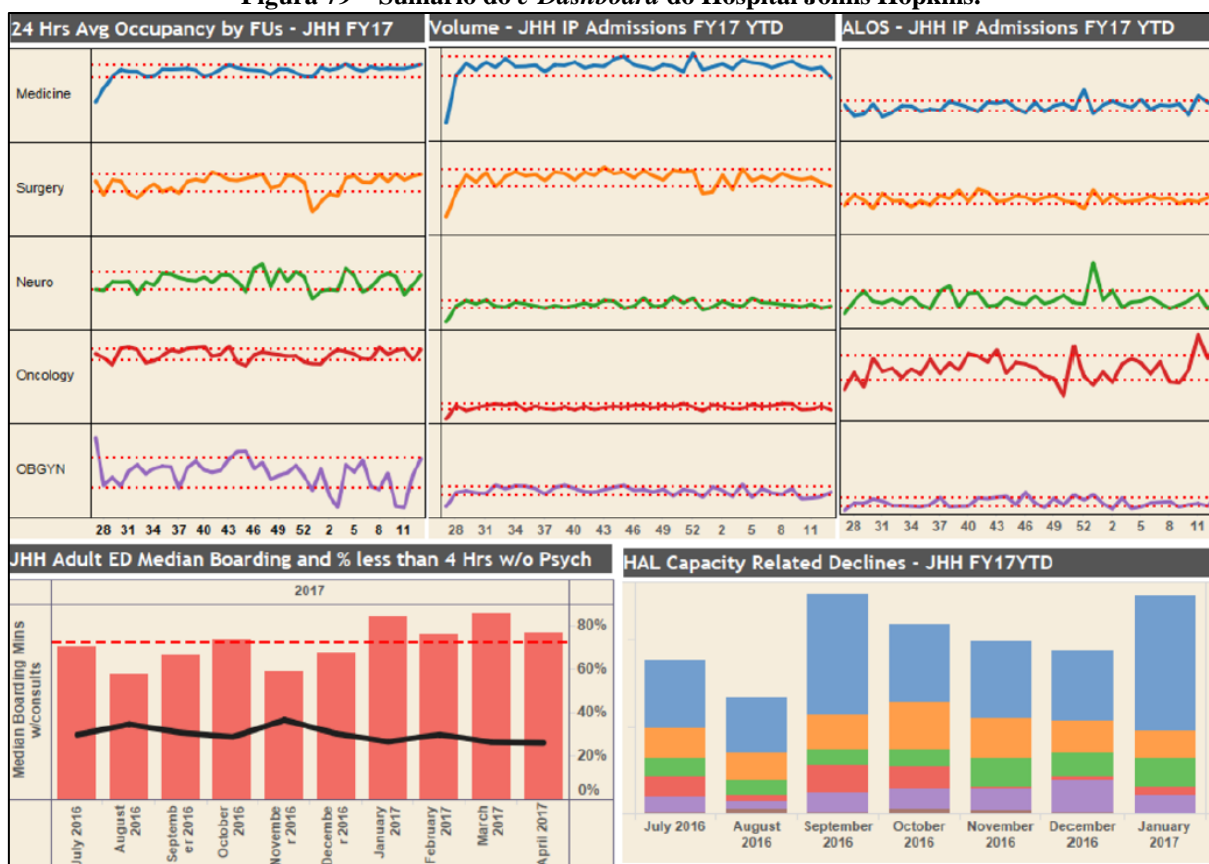


Fonte: O autor (2020).

Figura 78 – Modelagem da camada virtual

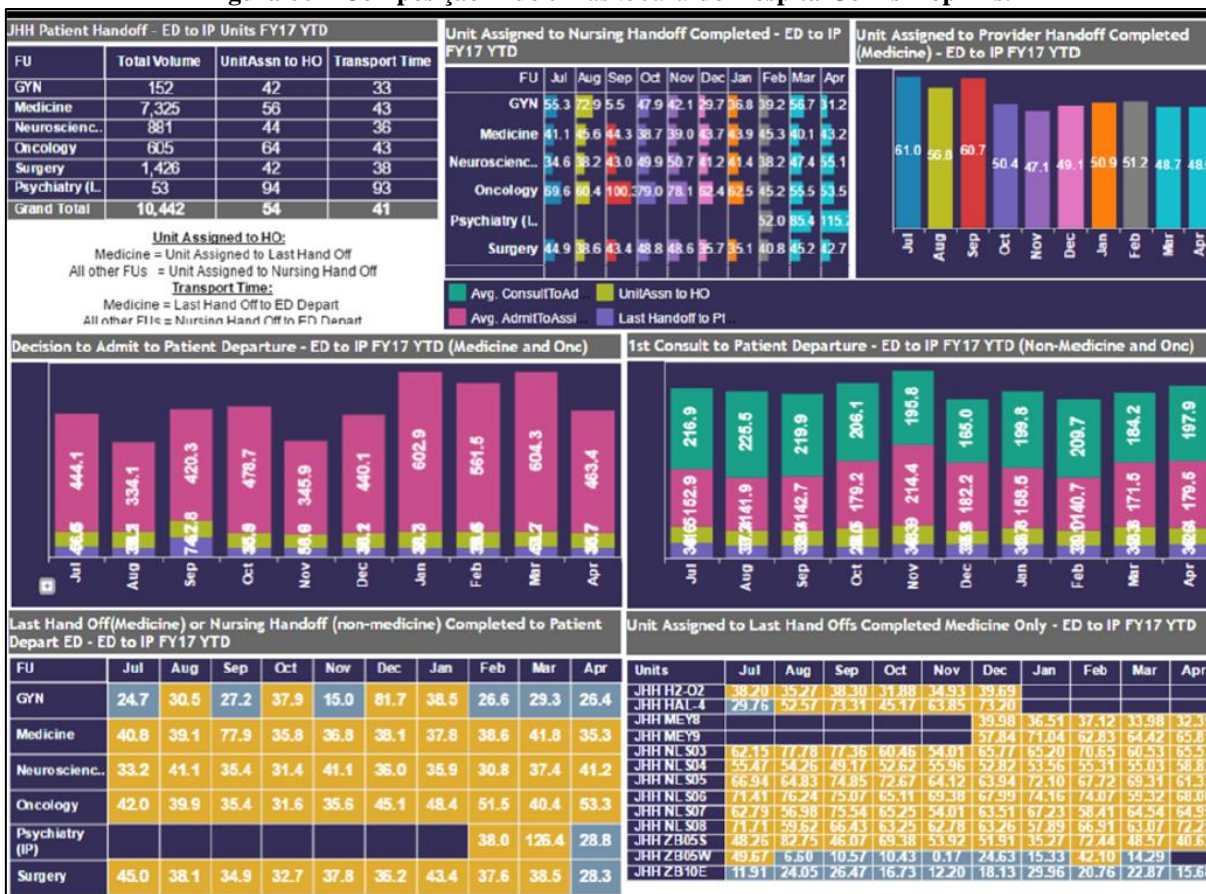


Fonte: O autor (2020).

ANEXO A – Sumário do *e-Dashboard* do Hospital Johns HopkinsFigura 79 – Sumário do *e-Dashboard* do Hospital Johns Hopkins.Fonte: Martinez *et al.* (2018).

ANEXO B – Composição A do e-Dashboard do Hospital Johns Hopkins

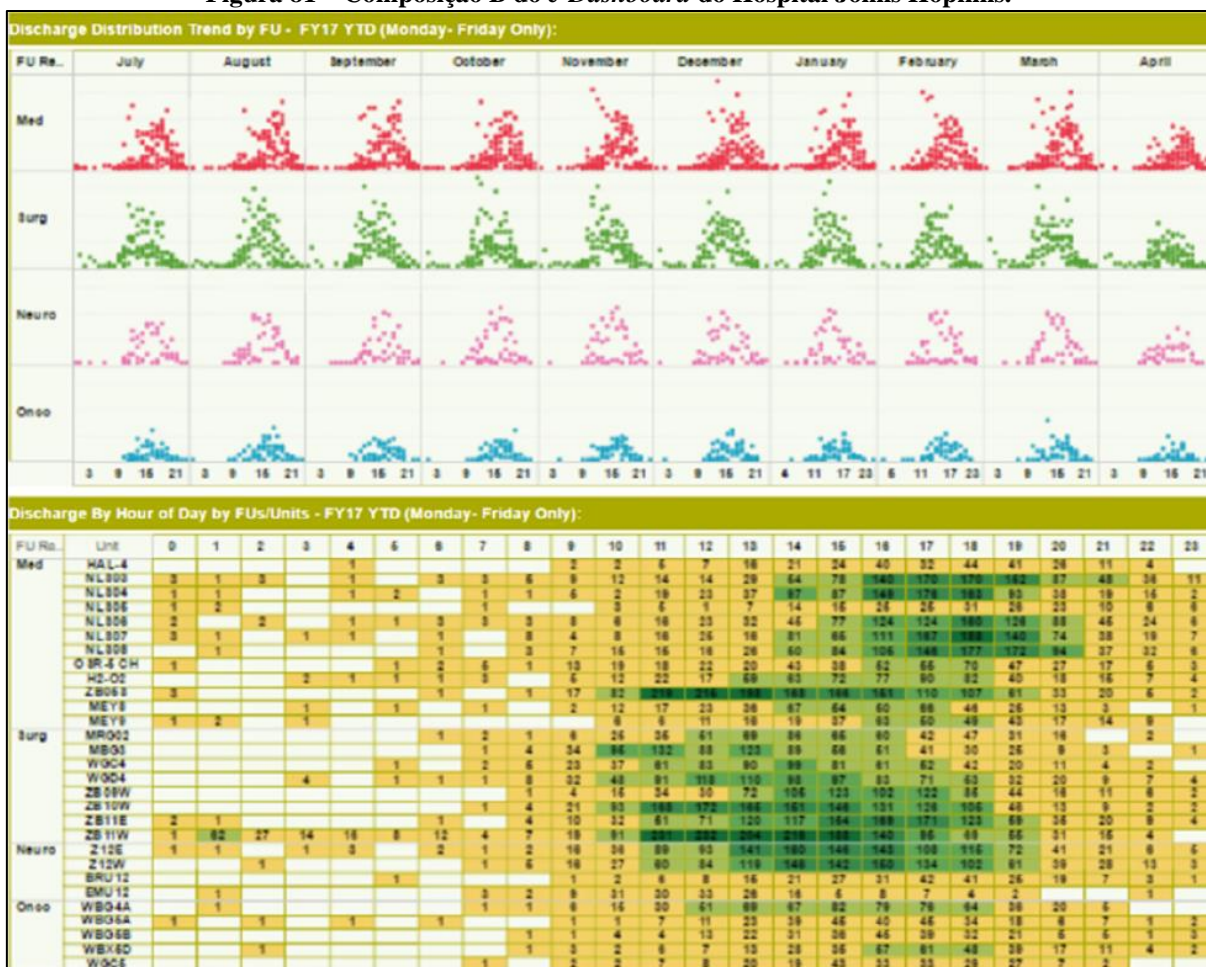
Figura 80 – Composição A do e-Dashboard do Hospital Johns Hopkins.



Fonte: Martinez et al. (2018).

ANEXO C – Composição B do e-Dashboard do Hospital Johns Hopkins

Figura 81 – Composição B do e-Dashboard do Hospital Johns Hopkins.



Fonte: Martinez et al. (2018).