MARCELO TEIXEIRA DE AZEVEDO

**Transformação Digital na Indústria:
Indústria 4.0 e a Rede de Água Inteligente no Brasil**

São Paulo

2017

MARCELO TEIXEIRA DE AZEVEDO

**Transformação Digital na Indústria:
Indústria 4.0 e a Rede de Água Inteligente no Brasil**

**Tese apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção
do título de Doutor em Ciências.**

São Paulo

2017

MARCELO TEIXEIRA DE AZEVEDO

**Transformação Digital na Indústria:
Indústria 4.0 e a Rede de Água Inteligente no Brasil**

**Tese apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção
do título de Doutor em Ciências.**

**Área de Concentração: Sistemas
Eletrônicos**

Orientador: Prof. Dr. Sergio Takeo Kofuji

São Paulo

2017

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, _____ de _____ de _____

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catálogo-na-publicação

Azevedo, Marcelo

Transformação Digital na Indústria: Indústria 4.0 e a Rede de Água inteligente no Brasil / M. Azevedo -- versão corr. -- São Paulo, 2017.
177 p.

Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos.

1.Transformação Digital 2.Tecnologias Habilitadoras 3.IoT 4.CPS
5.Indústria 4.0 I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica.
Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos II.t.

*A meus pais, familiares, amigos e especialmente à
Giovana Benelli, Carlos Alberto e Maria Helena.*

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Sergio Takeo Kofuji, por toda paciência e dedicação, também a toda a equipe do Grupo de Sistemas Pervasivos e de Alto Desempenho (PAD), pela ajuda direta e indireta na conclusão desta pesquisa.

Agradeço à Huawei e à USP, por permitirem a minha participação nos projetos de pesquisa do Centro de Treinamento de Internet do Futuro e no Projeto SafeCity, sendo possível colocar em prática todo o referencial teórico estudado.

Agradeço também à minha família e amigos, por todo apoio confiado a mim e também por entender os meus momentos de recolhimento e ausência.

Em especial, agradeço aos amigos Marco Quirino da Veiga, pela ajuda na aplicação do questionário e incentivo ao longo da pesquisa, e Alaíde Barbosa Martins, pela parceria e confiança, companheiros de grupo e incentivadores nos momentos de dificuldades.

Agradeço, enfim, à minha amada esposa, Giovana Benelli e a meus queridos filhos, Carlos Alberto e Maria Helena, por fazerem a minha vida mais divertida e acolhedora.

O homem foi programado por Deus para resolver problemas. Mas começou a criá-los. A máquina foi programada pelo homem para resolver os problemas que ele criou. Mas ela, a máquina, está começando também a criar problemas que desorientam e engolem o homem. A máquina continua crescendo. Está enorme. A ponto de que talvez o homem deixe de ser uma organização humana. E como perfeição de ser criado, só existirá a máquina. Deus criou um problema começando pela ignorância do homem diante da maçã. Ou o homem será um triste antepassado da máquina: melhor o mistério do paraíso.

(Clarice Lispector)

RESUMO

Atualmente vive-se uma transformação digital na indústria, que está sendo referenciada como uma nova revolução e conhecida como a quarta revolução industrial. Essa nova revolução foi precedida por três anteriores, sendo que a primeira foi baseada no carvão como fonte de energia, impulsionando, assim, as máquinas a vapor e transformando o trabalho artesanal em automatizado; posteriormente, houve a segunda revolução industrial, baseada em conceitos de eletricidade para atingir a produção em massa; já a terceira revolução industrial baseou-se em sistemas eletrônicos e computacionais, tendo como o seu maior expoente os sistemas *Supervisory Control and Data Acquisition* (SCADA), que foram utilizados para aprimoramento e eficiência da linha de produção. Hoje, vive-se no limiar da quarta revolução industrial, que se apoia fortemente nas tecnologias habilitadoras, tais como: *Internet of Things* (IoT), *machine learning*, *big data analytics*, *cyber-physical systems* (CPS), *machine-to-machine* (M2M) e *cloud computing*. Essas tecnologias, trabalhando cooperativamente, são utilizadas para promover a transformação digital descrita nas visões ao redor do mundo, entre as quais se destacam: *Industry 4.0*, *Industrial Internet Consortium* e Manufatura Avançada. A presente pesquisa visa caracterizar as tecnologias habilitadoras, as visões da transformação digital e o cenário Brasil para esta nova realidade. O objetivo central é a definição de uma plataforma de transformação digital aplicada ao cenário da indústria de *Utilities*. Para a identificação do setor industrial, optou-se pela aplicação de um questionário direcionado às indústrias da região metropolitana de Campinas. Esse questionário serviu para traçar o nível de conhecimento, aderência e perfil profissional desejado pelas empresas relacionadas com a transformação digital. Na análise do questionário para o grupo estudado, verificou-se desconhecimento estratégico sobre a transformação digital e resistência para aplicação dos novos conceitos na cadeia de suprimentos existente. Para suprir esta necessidade e como prova de conceito foi proposta uma plataforma para transformação digital para a questão da água, com o objetivo de alcançar uma gestão eficiente dos recursos atrelada ao uso racional da água. Para a definição da plataforma foi realizado o levantamento de todo o processo de uma planta de tratamento de água, implantada nos moldes da terceira revolução industrial, de modo a melhorar o processo aplicando-se os conceitos da transformação digital na nova plataforma definida. Como resultado, o estudo de caso contribuiu para o projeto PURA-USP juntamente com o projeto SafeCity, do convênio Huawei-USP no âmbito do conceito de cidades inteligentes, integrando a transformação digital na gestão eficiente dos recursos hídricos no *campus* USP da capital. Adicionalmente, inseriu-se a capacitação técnica também no projeto Huawei-USP, denominada Centro de Internet do Futuro, habilitando e capacitando os profissionais para as novas tecnologias.

Palavras-chave: Transformação Digital. Tecnologias Habilitadoras. IoT. CPS. Indústria 4.0.

ABSTRACT

Nowadays, there's a digital transformation in the industry, which is being referred to as a new revolution, known as the fourth industrial revolution. This new revolution was preceded by three previous ones, the first one was based on coal as a way of source energy, boosting the steam engines and turning the manual labor into automated; posteriorly the second industrial revolution was based on electricity concepts to achieve mass production; and the third industrial revolution, which was based on electronics and computer systems, having as its greatest exponent the systems Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) and programmable logic controllers (PLC), which were used for improvement and production line efficiency. Today we are on the bound of the fourth industrial revolution, which strongly supports itself at enabling technologies, such as: Internet of Things (IoT), big data analytics, cyber-physical systems (CPS), machine-to-machine (M2M) and cloud computing. These technologies are working cooperatively used to promote digital transformation described in the sights around the world, between them are: Industry 4.0, Industrial Internet Consortium and Advanced Manufacturing. This research aims to characterize the enabling technologies, the visions of the digital transformation and Brazil scenario for this new reality. The main objective is the definition of a digital transformation platform applied in the industry scenario. To identify the industry it was chosen the application of a questionnaire targeting the industries at the metropolitan region of Campinas. This questionnaire was used to trace the level of knowledge, adherence and professional profile required of companies related to digital transformation. In the questionnaire analysis for the group in the scope there was strategic unfamiliarity about the digital transformation and resistance to application of new concepts in the existing supply chain. To meet this need and as a proof of concept, a platform for digital transformation for the water issue was proposed with the objective of achieve an efficient management of resources linked to the rational use of water. For the platform definition was performed a survey of the whole process of a water treatment plant that was implemented along the lines of the third industrial revolution and improved the process by applying the concepts of digital transformation in the new set platform. The case study aimed to contribute to the PURA-USP project, integrating the digital transformation in the efficient management of water resources on campus USP capital. Additionally, technical training was also included in the Huawei-USP project, denominated the Future Internet Center, enabling and training professionals for new technologies.

Keywords: Digital Transformation. Enabling Technologies. IoT. CPS. Industry 4.0.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxograma das etapas da pesquisa.....	27
Figura 2 – Pirâmide de automação.	32
Figura 3 – Arquitetura <i>high-level</i> M2M.	35
Figura 4 – Estrutura de um sistema ciberfísico.	36
Figura 5 – Cabeçalho IPv4 e IPv6.....	37
Figura 6 – Arquitetura “Vs” do <i>Big Data</i>	38
Figura 7 – Arquitetura de Computação em Nuvem de Alto Nível.....	42
Figura 8 – Computação em Névoa.....	43
Figura 9 – Algoritmos para <i>Machine Learning</i>	46
Figura 10 – Os quatros estágios da revolução industrial.....	48
Figura 11 – Indústria 4.0 e Fábrica Inteligente.	49
Figura 12 – Integração da cadeia de valores.	50
Figura 13 – Ondas da Internet Industrial.	52
Figura 14 – Tecnologias Direcionadoras para Manufatura Avançada.....	54
Figura 15 – Fábrica de Xampu.	55
Figura 16 – Produto Final do Demonstrador.	56
Figura 17 – FEIMEC – Demonstrador.	56
Figura 18 – Global Industry Classification Standard.....	60
Figura 19 – Economia Brasileira.	65
Figura 20 – Espaço de Produtos – Brasil.	65
Figura 21 – Economia da Alemanha.	66
Figura 22 – Espaço de Produtos – Alemanha.....	66
Figura 23 – Espaço de Produtos para Maquinário Elétrico da Alemanha.	68
Figura 24 – Espaço de Produtos para Maquinário Elétrico do Brasil.	69
Figura 25 – Estação de Tratamento de Água (ETA).	72
Figura 26 – Estação de Tratamento de Água (ETA).	73
Figura 27 – Componentes – (a) Captação; (b) Floculação; (c) Decantação e (d) Filtragem.	74
Figura 28 – Componentes SCADA – (a) Bombas e (b) Painel de PLC.	74
Figura 29 – Diagrama da ETA.....	80
Figura 30 – Diagrama da ETA – malha de comunicação.	81
Figura 31 – Diagrama da casa de bombas – malha de comunicação.....	82

Figura 32 – Tela do Sistema Supervisório – Captação.	83
Figura 33 – Tela do Sistema Supervisório – Tratamento de água.	83
Figura 34 – Topologia da rede para tratamento de água.	84
Figura 35 – <i>Digital Utility</i> por Accenture.	90
Figura 36 – Plataforma SMART Energy.	92
Figura 37 – Terni – Smart Grid & Energy Marketplace.....	93
Figura 38 – Arquitetura de comunicação FINODEX Sevilha.	94
Figura 39 – <i>Smart Fountain</i>	94
Figura 40 – Arquitetura Piramidal de uma ETA.	95
Figura 41 – Nova Arquitetura <i>high-level</i> proposta.	96
Figura 42 – Arquitetura FIWARE para tratamento de água baseado na Indústria 4.0.	98
Figura 43 – Componentes – (a) conexões dos sensores (b) sensor.	100
Figura 44 – Plataforma da Transformação Digital.	101
Figura 45 – Racks do Projeto SafeCity – (a) Vista Frontal (b) Vista traseira.	101
Figura 46 – Racks – (a) Huawei (b) FIWARE.....	102
Figura 47 – IoT para Água - (a) Bancada 01 (b) Bancada 02.	103
Figura 48 – Sensores - (a) Fluxo (b) Pressão (c) Temperatura.....	103
Figura 49 – <i>FreeBoard on Water</i>	104
Figura 50 – Ambiente Simulado.	105
Figura 51 – Divulgação do Curso.	131
Figura 52 – Ajuste do modelo linear (reta) nas base de teste (pontos): PH_D x PH_S.	137
Figura 53 – Ajuste do modelo linear (reta) nas base de teste (pontos): DQO_D x DBO_S.	137
Figura 54 – Ajuste do modelo linear (reta) nas base de teste (pontos): DQO_D x DQO_S.....	138

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Ramo de Atividade.....	110
Gráfico 2 – Faturamento anual das empresas.	112
Gráfico 3 – Importância da Indústria 4.0.	113
Gráfico 4 – Situação das Empresas.	114
Gráfico 5 – Iniciativas para a Transformação Digital.	115
Gráfico 6 – Competências Importantes para a Transformação Digital.	117
Gráfico 7 – Grau Atual de Aderência na Formação.....	117
Gráfico 8 – Necessidades de Competências <i>Soft</i>	118
Gráfico 9 – Responsabilidade de desenvolvimento das Competências <i>Soft</i>	119
Gráfico 10 – Engenheiro com Competências Interdisciplinares.	119
Gráfico 11 – Dificuldades para Implantação da Transformação Digital.....	121
Gráfico 12 – Dificuldades para Implantação da Transformação Digital.....	121
Gráfico 13 – Complexidade para Implantação da Transformação Digital.	122
Gráfico 14 – Potenciais Benefícios da Transformação Digital.....	123
Gráfico 15 – Desenvolvimento da Transformação Digital.	124
Gráfico 16 – Evolução da Tecnologia e Impactos s da Transformação Digital.	125
Gráfico 17 – Indústria Brasileira preparada para a Transformação Digital.....	126
Gráfico 18 – Alteração da Cadeia Produtiva na Transformação Digital.	127
Gráfico 19 – Indústria Brasileira e a importância para a Transformação Digital.....	128

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Possíveis aplicações para M2M.	34
Tabela 2 – Comparativo de tecnologias com 5G.....	45
Tabela 3 – Principais Indústrias Brasileiras.....	61
Tabela 4 – PIB por setores da economia brasileira.....	62
Tabela 5 – Exportação e Importação no Brasil.....	62
Tabela 6 – Distribuição do número de cidades e sua respectiva população.	63
Tabela 7 – Distribuição do número de empresas por área de atuação.	64
Tabela 8 – Comparativo econômico entre países da Indústria 4.0.....	67
Tabela 9 – Acionamentos da ETA.....	97
Tabela 10 – Faturamento anual das empresas.....	108
Tabela 11 – Procedência do Capital Controlador.....	109
Tabela 12 – Número de Funcionários.	109
Tabela 13 – Ramo de Atividade.	109
Tabela 14 – Formação Acadêmica dos Entrevistados.	110
Tabela 15 – Universidade de Graduação.....	111
Tabela 16 – Ano de Graduação.	111
Tabela 17 – Especialização dos Entrevistados.	111
Tabela 18 – Envolvimento com a Indústria 4.0.....	112
Tabela 19 – Importância da Indústria 4.0.	112
Tabela 20 – Iniciativas para popularização.	113
Tabela 21 – Situação da Empresa.	113
Tabela 22 – Envolvimento com a Indústria 4.0.....	114
Tabela 23 – Conhecimento da Indústria 4.0.....	114
Tabela 24 – Iniciativas para a Transformação Digital.....	115
Tabela 25 – Relevância para a Transformação Digital.....	115
Tabela 26 – Transformação para o Engenheiro 4.0.....	116
Tabela 27 – Competências Necessárias para o Engenheiro 4.0.....	116
Tabela 28 – Grau Atual de Aderência na Formação.	117
Tabela 29 – Necessidades de Competências Soft.....	118
Tabela 30 – Responsabilidade de desenvolvimento das Competências Soft.	118
Tabela 31 – Engenheiro com Competências Interdisciplinares.....	119
Tabela 32 – Engenheiro e Trabalho em Equipe.....	120

Tabela 33 – Dificuldades para Implantação da Transformação Digital.	120
Tabela 34 – Tecnologias para Transformação Digital.	121
Tabela 35 – Complexidade para Implantação da Transformação Digital.	122
Tabela 36 – Potenciais Benefícios da Transformação Digital.	122
Tabela 37 – Desenvolvimento da Transformação Digital.	123
Tabela 38 – Evolução da Tecnologia e Impactos da Transformação Digital.	124
Tabela 39 – Indústria Brasileira preparada para a Transformação Digital.	125
Tabela 40 – Alteração da Cadeia Produtiva na Transformação Digital.	126
Tabela 41 – Indústria Brasileira e a importância para a Transformação Digital.	127
Tabela 42 – Desafios para a Transformação Digital.	128
Tabela 43 – Dificuldades para a Transformação Digital.	128
Tabela 44 – Descrição do banco de dados de tratamento de água.	133
Tabela 45 – Resultados da regressão linear dos três modelos avaliados.	136

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3GPP	3 rd Generation Partnership Project
ABD	After Big Data
ABIMAQ	Associação Brasileira de Máquinas e Equipamentos
API	Application Programming Interface
AT&T	American Telephone and Telegraph
BBD	Before Big Data
BI&A	Business Intelligence & Analytics
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CPS	Cyber-Physical System
DFX	Design for Excellence
DSE	Domain Specific Enablers
ETA	Estação de Tratamento de Água
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
FINESCE	Future Internet Smart Utility Services
FINODEX	Future Internet Open Data Expansion
FEIMEC	Feira Internacional de Máquinas e Equipamentos
GE	Generic Enablers
GICS	Global Industry Classification Standard
GPRS	General Packet Radio Services
HMI	Human Machine Interface
IaaS	Infrastructure As A Service
IBM	International Business Machine
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICE	Índice de Complexidade Econômica
ICT	Information and Communication Technology
IDC	International Data Corporation
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
IIC	Industrial Internet Consortium
IoT	Internet of Things

IPv4	Internet Protocol Version 4
IPv6	Internet Protocol Version 6
ISA	International Society of Automation
ITU	International Telecommunication Union
KET	Key Enabling Technologies
LMS	Learning Management System
M2M	Machine-to-Machine
MDIC	Ministério do Desenvolvimento da Indústria e Comércio
MIT	Massachusetts Institute of Technology
MOOC	Massive Open Online Course
NGMNA	Next Generation Mobile Networks
NIST	National Institute of Standards and Technology
NSF	National Science Foundation
OD	Oxigênio Dissolvido
OPC	OLE for Process Control
PaaS	Plataform As A Service
PH	Potencial Hidrogeniônico
PIB	Produto Interno Bruto
PLC	Programmable Logic Controller
P&D	Pesquisa & Desenvolvimento
P&G	Procter & Gamble
PURA	Programa de Uso Racional da Água
QR CODE	Quick Response Code
RFID	Radio-Frequency Identification
RTU	Remote Terminal Unit
SaaS	Software As A Service
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
SMLC	Smart Manufacturing Leadership Coalition
STAMP	System-Theoretic Accident Model and Processes
STPA	System-Theoretic Process Analysis
TIA	Totally Integration Automation

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	19
1.1 OBJETIVOS	22
1.1.1 <i>Objetivos Específicos</i>	22
1.3 JUSTIFICATIVA.....	22
1.4 METODOLOGIA	23
1.5 CONTRIBUIÇÕES	24
1.6 LIMITAÇÕES	25
1.7 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO	25
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	28
2.1 TRABALHOS RELACIONADOS	28
2.2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	31
2.2.1 <i>IoT (Internet of Things)</i>	33
2.2.2 <i>M2M</i>	34
2.2.3 <i>Cyber Physical Systems (CPS)</i>	35
2.2.4 <i>Protocolo Ipv6</i>	36
2.2.5 <i>Big Data e Analytics</i>	38
2.2.6 <i>Cloud Computing e Fog Computing</i>	40
2.2.7 <i>RFID E QR Code</i>	43
2.2.8 <i>Comunicação 5g</i>	44
2.2.9 <i>Machine Learning</i>	45
2.3 VISÕES DA TRANSFORMAÇÃO DIGITAL	46
2.3.1 <i>Indústria 4.0</i>	47
2.3.2 <i>Industrial Internet Consortium</i>	51
2.3.3 <i>Manufatura Avançada</i>	53
2.3.4 <i>Da Visão Para Implementação</i>	54
2.4 CONCEITOS DE SEGURANÇA E SAFETY	57
3 TRANSFORMAÇÃO DIGITAL NA INDÚSTRIA BRASILEIRA.....	59
3.1 INDÚSTRIA NO BRASIL E NA REGIÃO METROPOLITANA DE CAMPINAS.....	61
3.2 ESTUDO DA TRANSFORMAÇÃO DIGITAL NO BRASIL	70
3.2.1 <i>Descrição do Estudo</i>	70
4 TRANSFORMAÇÃO DIGITAL NA INDÚSTRIA DE UTILITIES	71
4.1 INDÚSTRIA DE UTILITIES NO SISTEMA DE TRATAMENTO E DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA.....	72
4.1.1 <i>Esquemático de uma Estação Tradicional de Tratamento de Água</i>	73
4.1.2 <i>Estação de Tratamento de Água</i>	73

4.1.3 Fluxograma do Processo de Tratamento de Água	75
4.1.4 Interligação do CLP ao Sistema Supervisório	81
5 METODOLOGIA	85
5.1 ESTUDO DA TRANSFORMAÇÃO DIGITAL NAS INDÚSTRIAS DA REGIÃO DE CAMPINAS	85
5.1.1 Planejamento e Pesquisa	87
5.2 INDÚSTRIA DE <i>UTILITIES</i>	90
5.2.1 Plataformas para a transformação digital	91
5.3 PROPOSTA BASEADA NA TRANSFORMAÇÃO DIGITAL	95
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO	108
6.1 TRANSFORMAÇÃO DIGITAL NAS INDÚSTRIAS DA REGIÃO DE CAMPINAS	108
6.2 TRANSFORMAÇÃO DIGITAL EM UMA PLANTA DE TRATAMENTO DE ÁGUA	132
7 CONCLUSÃO	140
7.1 TRABALHOS FUTUROS	143
REFERÊNCIAS	144
APÊNDICES	150
APÊNDICE A: Questionário - Indústria 4.0 - Manufatura Avançada no Brasil	150
PARTE 01 - IDENTIFICAÇÃO DA EMPRESA	151
PARTE 02 - IDENTIFICAÇÃO DO AVALIADOR	154
PARTE 02B - GRAU DE ENVOLVIMENTO E CONHECIMENTO DA MANUFATURA AVANÇADA	155
PARTE 03 - CONCEITUAÇÃO E ADEQUAÇÃO À INDÚSTRIA 4.0	158
PARTE 04 - EXPECTATIVAS DE FORMAÇÃO PROFISSIONAL	163
APÊNDICE B: Publicações	166
APÊNDICE C: Análise de Relevância pelo Ajuste de um Modelo Regressivo Linear	167

1 INTRODUÇÃO

A transformação digital é parte de um grande processo tecnológico e está associada à aplicação da tecnologia digital em todos os aspectos da sociedade humana. De acordo com Khan (2016) e Westerman (2014), existe uma confusão de conceitos entre digital, digitalização e transformação digital, não existindo uma determinação clara e amplamente aceita para se definir a transformação digital.

Ainda segundo Khan (2016), para definir transformação digital é necessário estabelecer o conceito de digital e digitalização. O digital está associado ao processo de conversão de informação analógica em formato digital; em Collin et al. (2015), é definido como a condição de converter, por exemplo, uma foto em papel para um meio digital. Já a digitalização, consoante Bounfour (2016), está relacionada à questão de transformar os processos físicos em processos virtuais utilizando-se tecnologias específicas para tal. De acordo com Khan (2016) e Collin et al. (2015), a transformação digital é o efeito desta digitalização, não sendo, portanto, somente a adoção de novas tecnologias, mas também de novas maneiras de tornar os negócios mais eficientes e competitivos. Todavia, não se sabe ainda como a transformação digital será realizada, qual o seu grau de complexidade, interconexão com setores e, sobretudo, os seus impactos na sociedade.

As novas formas de tecnologias que lidam com esta transformação trazem mudanças profundas em todos os setores da sociedade, afetando todo o modelo de negócio, produção, consumo, transporte, entrega e a forma como se vive. Portanto, é necessário ter uma visão compreensiva de como esta transformação digital muda em todos os aspectos o mundo no qual se vive, seja de modo social, cultural e econômico.

A indústria, nos últimos séculos, passou por mudanças em sua forma de atuação, gerando inovação e profundas mudanças sociais e econômicas. A primeira revolução industrial aconteceu na Inglaterra, no final do século XVIII e início do século XIX, sendo caracterizada pela utilização do carvão como fonte de energia, desenvolvendo assim a máquina a vapor, bem como a locomotiva. Um dos primeiros ramos a usufruir deste benefício foi a produção têxtil, que, antes da revolução, era realizada de modo artesanal. Este novo modelo acelerou o êxodo rural, provocando, por conseguinte, o crescimento dos centros urbanos. A partir da segunda metade do século XIX, e em busca de aprimoramento contínuo, surgiu a segunda revolução industrial, que basicamente se

apoiou na descoberta de fontes de energia fóssil e eletromagnetismo, utilizando a eletricidade como alternativa ao vapor. A utilização de tais recursos impulsionou a aceleração do ritmo industrial, descobrindo-se, assim, o potencial de reduzir tanto os custos como o tempo de fabricação de produtos, os quais poderiam ser consumidos em escala cada vez maior. Um dos exemplos mais evidentes dessa revolução é a introdução da linha de montagem, tendo como referência tradicional o *Ford T*. Já a terceira revolução industrial, que teve início em meados do século XX, ficou conhecida por meio do uso intenso de eletrônicos e da Tecnologia da Informação (TI) para se atingir o objetivo de automação da manufatura. Na área industrial, os sistemas *Supervisory Control and Data Acquisition* (SCADA – Controle Supervisório e de Aquisição de Dados), em conjunto com o controlador lógico programável (PLC), constituem o seu maior expoente, sendo que tais sistemas atualmente convergem para sistemas abertos e, em alguns casos, conectados à rede corporativa ou, até mesmo, à internet. A utilização de recursos de telecomunicação e o avanço tecnológico possibilitaram o acesso remoto, compartilhamento, integração e, conseqüentemente, o processamento de dados à distância, utilizando-se tais recursos. A integração com os diversos sistemas visa ao aumento da produtividade e da eficiência na tomada de decisões.

Atualmente, segundo Schwab (2016), vive-se no limiar de uma quarta revolução industrial, a chamada revolução industrial baseada no conceito de sistemas Cyber-Physical Systems (CPS – ciberfísicos). Além dos sistemas ciberfísicos, surgem novas tecnologias, as tecnologias habilitadoras atuais, que através do seu uso promovem o rompimento do atual paradigma, destacando-se: Internet das Coisas (IoT), *big data analytics* e computação em nuvem que visa atender aos requerimentos de um sistema de manufatura avançada, promovendo a integração de toda uma cadeia de suprimentos. Esta nova revolução é caracterizada pelo uso intensivo de tecnologias digitais com o intuito de fabricar novos produtos de forma rápida, com uma ágil resposta à demanda e otimização em tempo real da produção e da cadeia de suprimentos. Ainda segundo Schwab (2016), a quarta revolução industrial transforma basicamente três pilares, quais sejam: físico, digital e biológico, tendo impacto na economia, negócios, sociedade, indivíduo e governo.

A presente pesquisa visa contribuir para o entendimento e a compreensão da transformação digital e de seus impactos, pois como afirmado anteriormente, este novo

paradigma afeta todo o modelo de negócio já existente e toda a cadeia de suprimentos. Partindo do atual momento em que se encontra a sociedade, este estudo identifica as tecnologias habilitadoras, que são os pilares tecnológicos para que esta nova revolução entre em prática; de modo a fazer o mesmo trabalho para as visões ao redor do mundo que procuram compreender, qualificar e guiar as empresas, governo e sociedade civil para esta transformação.

Dado que a transformação digital afeta toda a cadeia produtiva nos mais diversos ramos e setores, esta torna-se muito ampla e com uma capilaridade complexa. Desta forma, a presente pesquisa procurou contextualizar o problema no âmbito de um único nicho, o da indústria de *Utilities*, e, em específico, na questão do uso da água de forma inteligente no Brasil. A indústria de *Utilities* é definida por McNabb (2005) como empresas dos setores de produção, transporte, distribuição e comercialização de energia (eletricidade e gás) e água, tendo como principal atributo ser essencial e, em caso de falha, ser crítico para a sociedade.

Os problemas relacionados ao uso da água de forma inteligente, considerando-se toda a cadeia fim a fim, são desafiadores e profundos. Desta forma, para a presente pesquisa, foi considerada somente uma parte de todo o processo, que é a planta do *campus* (Cidade Universitária, capital) da Universidade de São Paulo.

Partiu-se da análise e compreensão de projetos já existentes, que serviram como base para a definição da nova plataforma para a gestão eficiente e para o uso racional da água. A transformação da atual arquitetura existente (arquitetura clássica de 5 camadas) para este novo modelo que faz uso das tecnologias habilitadoras para promover a transformação digital utiliza-se do FIWARE, que é um ecossistema de inovação *opensource* composto de 3 camadas, em que se tem os sensores na primeira camada que se comunicam com a próxima por meio dos GEs ORION e COSMOS, que por sua vez interagem com a camadas superior das aplicações (FIWARE,2016).

Na aplicação do novo modelo, observou-se melhorias no que tange à tomada de decisão automatizada, à integração dos mais diversos componentes e fabricantes, à utilização de dados históricos para tomada de decisão, bem como em prever necessidades e integração com outras fontes de dados. Todavia, também trouxe preocupações, dentre elas, destacam-se questões de *safety* e *security*.

1.1 Objetivos

O objetivo central da presente pesquisa é compreender os impactos da transformação digital para a Indústria e melhorar a atual arquitetura existente para uma nova plataforma. A atual arquitetura de automação de 5 camadas piramidal se transforma em um novo modelo que se utiliza das tecnologias habilitadoras para transformar digitalmente toda a cadeia de suprimentos de um determinado nicho de mercado. A pesquisa se apoia na transformação digital no âmbito do contexto do projeto PURA do *campus* da USP, a fim de promover uma gestão eficiente com o uso racional da água.

1.1.1 Objetivos Específicos

- Demonstrar, por meio da identificação e categorização, as tecnologias habilitadoras e as visões existentes ao redor do mundo para a transformação digital;
- Entender e compreender os pontos-chave que a transformação digital procura resolver, utilizando-se como parâmetro uma arquitetura tradicional de automação contrastando com uma nova plataforma da transformação digital e aplicada a um projeto de uso da água;
- Avaliar a situação do Brasil para esta nova visão por meio de um questionário de avaliação direcionado aos empresários da região metropolitana de Campinas;
- Melhorar e validar a plataforma proposta por meio de um estudo de caso.

1.3 Justificativa

A transformação digital está se tornando uma realidade, entretanto, os estudos sobre o impacto da adoção das tecnologias que possibilitam a concretização da transformação digital não alcançaram um grau de maturidade que inspire confiança para torná-la uma realidade.

A escolha pelo segmento industrial se deu devido ao fato de não ter sido identificado um equilíbrio entre o conhecimento dos gestores destas indústrias com as visões da transformação digital. No momento atual, as indústrias operam com sistemas SCADA no modelo piramidal de 05 camadas, de modo a continuar realizando funções

vitais para a sociedade. Com o surgimento recente das tecnologias habilitadoras, é possível a mudança desta arquitetura e, conseqüentemente, alcançar os ganhos esperados pela transformação digital.

A definição e o conceito de transformação digital não é unânime e necessita de investigação em vários campos, tais como, a criação de padrões, arquitetura de referência, capacitação, adequação à legislação, plataforma, *framework* regulatório, entre outros. A ausência de políticas para transformação digital atrelada à criticidade das indústrias justifica a pesquisa referente à elaboração de uma plataforma para promover o uso inteligente da água no Brasil, além de também justificar o estudo sobre o cenário Brasil relativo aos conceitos e maturidade das empresas de um determinado setor.

1.4 Metodologia

A metodologia adotada na presente tese foi baseada nas etapas relacionadas a seguir, e o planejamento da pesquisa contemplou o estudo teórico e documental, e, por conseguinte, o estudo empírico com o desenvolvimento de um estudo de caso para o uso da água de forma inteligente no cenário do *campus* da USP.

- Estudo e compreensão do problema e do domínio realizados por meio de levantamento de referências relacionadas à transformação digital, tecnologias habilitadoras e visões da transformação, sendo que foi realizada pesquisa bibliográfica em diversas bases de conhecimento e periódicos (Portal CAPES, *Scopus*, *Sciencedirect*, IEEE, *Scielo*), bem como em teses e livros específicos da área relacionada, com o objetivo de suportar a viabilidade da realização da pesquisa. A literatura selecionada, de forma geral, ajudou a elucidar dúvidas referentes:
 - a) À justificativa e ao problema de pesquisa;
 - b) Às tecnologias habilitadoras e visões da transformação digital confrontadas com o modelo tradicional de automação e controle;
 - c) À integração computacional de redes e processos físicos;
 - d) Ao cenário Brasil para a transformação digital.

- Identificação dos sistemas e componentes críticos, avaliação, quantificação e modelagem de uma planta de tratamento e distribuição de água seguindo o modelo clássico de 05 camadas piramidal;
- No estudo teórico e documental, procedeu-se à análise das tecnologias habilitadoras e da transformação digital à luz da Indústria 4.0 (SCHWAB, 2016), gerando um questionário que foi aplicado a indústrias na região metropolitana de Campinas com o intuito de identificar o grau de maturidade, iniciativas de implantação da transformação digital e qualificações requeridas aos profissionais;
- Definição de uma plataforma de uso, tendo como referência as tecnologias habilitadoras, as visões ao redor do mundo para a transformação digital e a plataforma FINESCE para energia (FINESCE, 2016);
- Validação da proposta por meio da utilização da plataforma definida na pesquisa no projeto PURA-USP.

1.5 Contribuições

Como contribuição, tem-se a definição de uma plataforma para a transformação digital utilizando-se as tecnologias habilitadoras e contribuindo para o uso racional da água. Adicionalmente, colabora para o estudo da questão da transformação digital à luz da Indústria 4.0 para o cenário Brasil e no âmbito de um segmento específico, contribuindo também para:

- 1) Compreensão e impactos da transformação digital inseridas no contexto da Indústria de *Utilities* no cenário Brasil;
- 2) Preencher a lacuna sobre a falta de conhecimento sobre as tecnologias e os componentes que impulsionam esta nova transformação;
- 3) Compreender as características relativas ao Brasil para esta nova transformação digital.

Observa-se que, ao longo da elaboração da presente pesquisa, foram apresentados artigos em congressos, simpósios e revistas (Apêndice B), com o intuito de discutir entre especialistas a temática aqui proposta, trazendo contribuições para o refino e melhoramento dessa pesquisa.

1.6 Limitações

Não é objetivo deste estudo a determinação de um método para a validação de conformidade com as normas de segurança, tampouco a definição de quais são os critérios que devem ser considerados em problemas decisórios que envolvam a priorização de *safety* ou *security*. A pesquisa limita-se a discutir a questão de segurança na nova plataforma definida, recomendando o aprofundamento em trabalhos futuros

1.7 Organização do Texto

Para a realização desta pesquisa, optou-se pela estruturação das tecnologias habilitadoras e das visões ao redor do mundo relacionada à transformação digital. Complementarmente, baseou-se em estudos da situação da Indústria no Brasil, especificamente na região metropolitana de Campinas, identificando os principais mercados e os ganhos esperados, para então compor a proposta a ser seguida. Deste modo, obteve-se, assim, subsídios para a próxima etapa, a de discussão da contribuição e, posteriormente, para realização de um estudo de caso focado em um serviço de utilidade pública, e, finalmente, a conclusão e discussão acerca de trabalhos futuros. Os capítulos são explanados de maneira mais detalhada a seguir:

Capítulo 1: Introdução

No capítulo 1, são apresentadas a introdução e a contextualização da pesquisa, as motivações, a caracterização do problema, a solução proposta, os objetivos, as justificativas, as contribuições, bem como a metodologia da pesquisa.

Capítulo 2: Revisão da Literatura e Referencial Teórico

Este capítulo apresenta a fundamentação teórica e os trabalhos relevantes relacionados com a pesquisa; serão abordados os estudos nas áreas de interesse a seguir:

- Tecnologias Habilitadoras;
- Visões para a transformação digital;
- Arquiteturas existentes para a transformação digital.

Capítulo 3: Transformação Digital na Indústria Brasileira

Neste capítulo foi realizado um levantamento sobre a questão da indústria no Brasil com o objetivo de identificar o grau de maturidade do cenário Brasil para a transformação digital; tal capítulo serviu como subsídio para elaboração do questionário que foi aplicado a um conjunto de entrevistados.

Capítulo 4: Transformação Digital na Indústria de *Utilities*

As indústrias orientadas para processo, como as indústrias de *Utilities*, ainda não sabem ao certo os efeitos da transformação digital em seus processos. Ademais, há um agravante, pois para a equipe de gestão nestas indústrias, pode ser difícil saber como começar a implementar a transformação digital, ou até mesmo, como mensurar a sua real necessidade e ganho; a indústria de *Utilities* está entre o segmento que enfrenta grandes desafios e que pode encontrar inovação na transformação digital. Este capítulo visa contextualizar as tecnologias habilitadoras definindo uma plataforma.

Capítulo 5: Metodologia

No que concerne ao capítulo de metodologia, optou-se em dividi-lo em duas partes: a primeira trata do estudo da transformação digital nas indústrias da região de Campinas. Para tal, foi realizada uma pesquisa utilizando-se um questionário como instrumento e, posteriormente, a tabulação dos dados e apresentação gráfica das informações para, deste modo, conseguir alcançar a informação desejada; a segunda trata da transformação digital na Indústria de *Utilities*. Para isto, foi realizado todo o levantamento de um cenário real e tradicional do tratamento e distribuição de água, tendo como produto final a elaboração de fluxograma, processos e tecnologias, que posteriormente foram aplicados aos conceitos da transformação digital.

Capítulo 6: Resultados e Discussão

Da mesma forma estabelecida em relação à metodologia, o capítulo de resultados foi subdividido em duas partes, quais sejam: na seção 1 são discutidos os resultados da transformação digital nas indústrias da região de Campinas; na seção 2 são discutidos os resultados da transformação digital no âmbito do contexto do projeto PURA-USP.

Capítulo 7: Conclusões e Trabalhos Futuros

As devidas considerações são formuladas tendo por base o produto final da plataforma para uso racional da água. Os possíveis trabalhos futuros serão apresentados neste capítulo, bem como as linhas de pesquisa.

Na Figura 1 é apresentado o fluxograma das atividades seguidas a fim de alcançar o objetivo desta pesquisa.

Figura 1 – Fluxograma das etapas da pesquisa

Fonte: Próprio autor.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo são analisadas e comentadas as referências bibliográficas utilizadas e que serviram de base para o desenvolvimento, estruturação e elaboração da pesquisa. Todas as referências apresentam um breve resumo, seus objetivos e a relação com o tema abordado. O tema proposto, em sua totalidade, é muito amplo e pode atuar nas mais diversas áreas do conhecimento, sendo assim, as referências cobrem as diversas áreas correlacionadas, abordando conceitos, aplicações, protocolos e exemplos teóricos e práticos. Adicionalmente, são apresentados as visões de IoT na indústria e um descritivo sobre as tecnologias emergentes, tais como: IoT, *machine learning*, M2M, CPS, big data, *analytics* e outras. O principal objetivo deste capítulo é contextualizar o trabalho realizado, explorando as visões de IoT na indústria e as tecnologias emergentes que contribuem para tais visões.

2.1 Trabalhos Relacionados

Em “*Security and Privacy Challenges in Industrial Internet of Things*” (SADEGHI; WACHSMANN; WAIDNER, 2015), os autores partem do princípio que, devido à forte tendência de conectividade e das iniciativas baseadas em IoT, os equipamentos estão cada vez mais conectados, desde veículos até infraestrutura crítica, e, desta forma, encontram-se mais expostos a problemas de segurança e privacidade. Sendo assim, o artigo realiza uma breve introdução aos sistemas que utilizam conceito de Industrial IoT relacionando aos desafios de segurança e privacidade, apresentando uma perspectiva holística sobre possíveis soluções para esses problemas. Ademais, os autores realizam um levantamento sobre os ataques a um sistema industrial IoT e relacionam as arquiteturas existentes para CPS e técnicas de proteção. Por fim, concluem que as soluções atualmente existentes são inadequadas, sendo necessária uma visão holística para o desenvolvimento de um *framework* para cibersegurança que leve em consideração todas as camadas de abstração do sistema de IoT, além das fronteiras que interagem com a plataforma; porém, não existe uma demonstração prática dos conceitos e das soluções apresentadas, somente a questão conceitual.

Na pesquisa “*Internet of Things Applications in Future Manufacturing*” (SOLDATOS et al., 2016), os autores partem do princípio de que a fábrica do futuro é impulsionada pela flexibilidade da fabricação e respostas rápida às necessidades do

mercado, proporcionando assim um novo modelo de produção que vai além da produção em massa. Portanto, migrando de um modelo de produção para estoque para um novo modelo orientado à demanda. Para esta nova necessidade, é necessária uma plataforma que suporte este novo modelo. A pesquisa contempla iniciativas, tecnologias IoT e aplicações relacionadas às tecnologias de internet do futuro, entre elas, o projeto FITMAN. Um dos objetivos do artigo é demonstrar como IoT pode transformar a manufatura utilizando tecnologias emergentes e, para isto, ilustra implantações possíveis para a fábrica do futuro.

O artigo “*Towards Manufacturing 2.0: an innovative Architecture for the Factory of the Future*” (FIASCHETTI; PIETRABISSA; PRISCOLI, 2015) propõe um sistema de gestão da informação para o novo paradigma da fábrica do futuro. Os autores partem da ideia inicial que o novo modelo incorporado pela fábrica do futuro produz uma quantidade grande de informações para o operador, e com as ferramentas tradicionais disponíveis, o gerenciamento das informações torna-se um trabalho pouco efetivo para tomada de decisão. Partindo deste problema, os autores concluem que são necessárias novas tecnologias para lidar com os processos fabril inovadores. Sendo assim, o artigo demonstra uma solução de arquitetura inovadora baseada na utilização e integração em ICT, tendo como base o *framework Future Internet*, especificamente, o projeto PLATINO.

Já “*A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems*” (LEE; BAGHERI; KAO, 2015) tem como ponto de partida a evolução da indústria de manufatura; os autores propõem uma arquitetura unificada baseada em cinco níveis, funcionando como um guia para a implementação de CPS (Cyber-Physical Systems), sendo o objetivo melhorar a qualidade dos produtos e a confiabilidade do sistema com equipamentos mais inteligentes e resilientes. Para isto, são propostos 5 passos, quais sejam: conexão inteligente, conversão de dados para informação, *cyber*, cognição e configuração.

No artigo “*Implementing Smart Factory of Industrie 4.0: An Outlook*” (WANG; LI; ZHANG, 2015), os autores descrevem o conceito de Indústria 4.0 e a necessidade de integração horizontal, *end-to-end* e vertical para atingir a proposta da Indústria 4.0. O objetivo principal do artigo é tratar dos problemas da integração vertical; para atingir tal objetivo, os autores propõem um *framework* na perspectiva da engenharia de controle que incorpora rede sem fio industrial, *cloud computing*, *big data* e terminais inteligentes,

de modo a formar um sistema auto-organizado, que é assistido com os blocos de *feedback* e de coordenação que são implementados na nuvem e com base na análise de *big data*.

Neste artigo “*Smart Factories in Industry 4.0: A Review of the Concept and of Energy Management Approached in Production Based on the Internet of Things Paradigm*” (SHROUF; ORDIERES; MIRAGLIOTTA, 2014), os autores apresentam uma arquitetura de referência para as fábricas inteligentes baseados em Internet das coisas, definindo as principais características de tais fábricas com um foco sobre as perspectivas de sustentabilidade. E, então, propõem uma abordagem para o gerenciamento de energia. Esta tomada de decisão é realizada por meio da coleta de dados de consumo de energia a partir do chão de fábrica (linha de produção), fornecendo o consumo *on-line* em tempo real e para qualquer dispositivo.

A integração destes dados melhoram e eficiência pois podem ser descobertos e reduzidos os desperdícios, além de permitir a tomada de decisão consciente ao nível da gestão de produção (por exemplo: manutenção, programação de produção e gestão).

O estudo “*Service innovation and smart analytics for Industry 4.0 and big data environment*” (LEE; KAO; YANG, 2014) parte do princípio de que na Indústria 4.0 as máquinas estão conectadas como uma comunidade colaborativa, e, sendo assim, essa evolução requer a utilização de ferramentas de previsão avançada. Este artigo aborda as tendências de transformação de serviços de produção em ambiente de *big data*, bem como a disponibilidade de ferramentas para gerenciar *big data*, alcançando assim a transparência e a produtividade.

No artigo “*Classification Model for Water Quality using Machine Learning Techniques*” (MUHAMMAD et al., 2015), utilizou-se técnicas de *machine learning* como o objetivo de classificar a qualidade da água, descobrindo-se o melhor modelo para realizar esta classificação. Para isto, foram aplicados cinco modelos: *Naive Bayes*, *Conjunctive Rule*, *J48*, *Kstar* e *Bagging*. Nos testes proposto pelos autores, o algoritmo *Kstar* foi o que teve melhor precisão.

A pesquisa descrita no artigo “*Cloud based machine learning approaches for leakage assessment and management in smart water networks*” (MOUNCE et al., 2015) parte do problema de que um terço dos serviços públicos em todo o mundo relata uma perda de quase 40% da água limpa devido a vazamentos, sendo que esta perda poderia

ser minimizada por meio de um sistema de água inteligente. E para prova de conceito foi proposta a análise de perdas em um ambiente controlado, utilizando-se técnicas de *machine learning* para prever os vazamentos e tendo como parâmetro os dados históricos de vazão e pressão.

Nos estudos de “*Mathematical Model for Detection of Leakage in Domestic Water Supply Systems by Reading Consumption from an Analogue Water Meter*” (OREN; STROH, 2013) é apresentado um modelo matemático para detectar vazamentos em tempo real no consumo doméstico. O modelo utiliza dados que são medidos a partir de um *water meter* e emprega dois critérios simultaneamente, a saber: desvio do consumo médio e comparação de consumo de água durante um período de tempo. A simulação do modelo de consumo doméstico foi implementado em um equipamento construído pelos autores, denominado *Antileaks*. Este dispositivo transfere as informações analógicas de consumo para um formato digital e em tempo real.

2.2 Fundamentação Teórica

A arquitetura de automação industrial é representada por Moraes e Castrucci (2007) por meio de uma pirâmide, denominada Pirâmide de Automação, a qual tem por principal objetivo dividir os níveis dos equipamentos envolvidos de acordo com a sua atuação na indústria. A pirâmide pode ser observada na Figura 2, sendo que:

- **Nível 1:** é o nível das máquinas;
- **Nível 2:** é o nível dos controladores digitais, dinâmicos e lógicos;
- **Nível 3:** permite o controle do processo produtivo da planta;
- **Nível 4:** responsável pela programação e planejamento da produção;
- **Nível 5:** responsável pela administração dos recursos da empresa.

Figura 2 – Pirâmide de automação.

Fonte: Moraes e Castrucci (2007).

Nos próximos itens são identificadas as novas tecnologias que motivaram a mudança desta pirâmide tradicional para um novo conceito baseado nas tecnologias habilitadoras que são discutidas em seguida.

As tecnologias habilitadoras (*enabling technologies*) são os pilares tecnológicos para transformação digital, de modo que é o que permite a geração de novos processos e produtos. Segundo a Comissão Europeia, a formalização de tecnologias habilitadora, chamadas de KETs (*Key Enabling Technologies* - Tecnologias Habilitadoras Chave), é caracterizada com grande potencial de conhecimento e abundância em pesquisa e desenvolvimento (P&D), contendo ciclos rápidos de inovação e intensidade em capital e qualificação (KEY..., 2016). Na visão da Comissão Europeia, as tecnologias-chave são:

- Materiais Avançados;
- Nanotecnologia;
- Micro e nanoeletrônica;

- Biotecnologia industrial;
- Fotônica;
- Sistemas de Manufatura Avançada.

A manufatura avançada se baseia no uso e coordenação de automação, informação, computação, *software*, sensores e redes, sendo que para isto é necessário o uso intenso das tecnologias habilitadoras (LOURAL, 2014). O governo norte-americano elaborou o documento *A National Strategic Plan for Advanced Manufacturing*, definindo a manufatura avançada como:

[...] uma família de atividades que dependem do uso e coordenação de automação, informação, computação, *software*, sensores e redes, e / ou façam uso de materiais de ponta e capacidades emergentes habilitadas pelas ciências físicas e biológicas, por exemplo a nanotecnologia, química e biologia. Trata-se de duas maneiras novas para a fabricação de produtos já existentes, bem como para a fabricação de novos produtos surgindo de tecnologias novas e avançadas. (NSTC, 2012, não paginado).

Nas próximas páginas são descritas as tecnologias que podem ser aplicadas às várias etapas do processo industrial, a fim de que seja possível chegar à transformação digital.

2.2.1 IoT (*Internet of Things*)

A primeira referência ao conceito pelo qual é atualmente conhecida a IoT – *Internet of Things* ocorreu em 1982, circunstância em que pesquisadores da *Carnegie Mellon University* desenvolveram a primeira máquina de Coca-Cola com características de IoT (OLDEST..., 2017). Posteriormente, no início dos anos noventa, Mark Weiser desenvolveu o conceito mais aprofundado de tais características, descrevendo elementos especializados de *hardware* e *software* conectados por cabos, ondas de rádio e infravermelho dos quais não se percebia a sua presença, introduzindo assim o termo de computação ubíqua (WEISER, 1992). O termo Internet das Coisas foi definido por volta de 1999, por Kevin Ashton, durante uma apresentação na Procter & Gamble (P&G), na qual foi feita a ligação da ideia de RFID dentro da cadeia de suprimentos com o tema em foco na época, que era a Internet (ASHTON, 2009). Posteriormente, IoT foi formalmente introduzida pelo *International Telecommunication Union* (ITU) através do ITU *Internet Report* de 2005. E, em 2012, IoT foi definida por meio da recomendação

ITU-T Y.2060 como uma infraestrutura global para a sociedade da informação, permitindo que serviços avançados sejam fornecidos através da interligação de coisas (físicas e virtuais) com base na já existente tecnologia de informação e comunicação, bem como em sua evolução.

O termo *Internet of Things* (IoT) vem ganhando espaço no cenário de telecomunicações sem fio moderno, sendo a ideia principal a presença pervasiva ao redor dos indivíduos por meio de uma variedade de coisas ou objetos, como *radio-frequency IDentification* (RFID) *tags*, sensores, atuadores, telefones móveis, etc.

2.2.2 M2M

Segundo Kim et al. (2014), o termo *machine-to-machine* (M2M) refere-se à comunicação entre máquinas com capacidade computacional e de comunicação sem a necessidade de intervenção humana. Os dados gerados por essas máquinas podem ser armazenados e utilizados por uma aplicação para extrair dados úteis. A sua utilização em um grande espaço geográfico abre diversas possibilidades de aplicações e serviços, conforme descrito na Tabela 1, a seguir.

Tabela 1 – Possíveis aplicações para M2M.

Aplicação	Descrição
Segurança e Proteção	Controle de acesso físico, monitoramento de ambiente, sistemas de vigilância
<i>Utilities</i>	Eleticidade, água, gás, medição
Cuidados com a saúde	Monitoramento de sinais vitais, diagnóstico remoto, telemedicina
Manutenção e Controle	Automação industrial, sensores, luz, bomba
Veicular	Informação de tráfego, diagnóstico remoto, gestão de frotas

Fonte: Kim et al. (2014).

Na Figura 3, é possível visualizar uma arquitetura *high-level* para utilização em larga escala nos mais diversos campos do conhecimento.

Figura 3 – Arquitetura *high-level* M2M.

Fonte: Geng (2011).

Dentre os desafios da comunicação M2M para suportar o tráfego e oferecer condições mínimas de comunicação, podemos destacar: a) suportar a transmissão de dispositivos em massa; b) possuir alta confiabilidade; c) pouco consumo de energia; d) baixa mobilidade; e e) monitoração e segurança. Existem padrões que estão sendo desenvolvidos para garantir as condições para esta arquitetura, dentre eles, destacam-se: ETSI, 3GPP, TIA e outros.

2.2.3 Cyber Physical Systems (CPS)

Segundo Lee (2008), CPS é um ambiente de sistemas integrados com sensores inteligentes que podem se autoajustar ou configurar automaticamente os processos de produção de forma descentralizada e em conformidade com os dados coletados e analisados em tempo real, sendo a integração do mundo virtual com o físico.

O termo CPS surgiu em 2006, cunhado por Helen Gill, da *National Science Foundation* (NSF) dos Estados Unidos. Pode-se tentar associar o termo ciberespaço com o CPS, mas as raízes do CPS são mais antigas e profundas. Seria mais preciso

associar os termos ciberespaço e sistemas ciberfísicos como sendo decorrentes da mesma raiz, cibernética, em vez de visualizar um como sendo derivado do outro. Os sistemas ciberfísicos relacionam-se com termos atualmente populares, tais como: IoT, Indústria 4.0, Internet Industrial, M2M e Computação em nuvem. Todos estes refletem uma visão de uma tecnologia que conecta profundamente o mundo físico com o mundo de informações. O termo CPS é mais fundamental e durável do que tudo isso, porque ele não faz referência direta e não procura lidar com abordagens de implementação, tampouco aplicações específicas. Centra-se, em vez disto, sobre o problema intelectual fundamental da conjunção da engenharia tradicional cibernética e os mundos físicos (LEE; SESHIA, 2015). Na Figura 4 é possível visualizar uma estrutura de alto nível para sistemas ciberfísicos.

Figura 4 – Estrutura de um sistema ciberfísico.

Fonte: Lee e Seshia (2015).

2.2.4 Protocolo Ipv6

O protocolo conhecido como *Internet Protocol version 4* (IPv4) foi o protocolo utilizado desde o estágio inicial da Internet, e atualmente encontra-se muito próximo de seu esgotamento, devido à demanda de utilização (WU et al., 2013). Inicialmente, o IPv4 foi projetado para suportar pouco mais de 4 bilhões de endereços IPs, devido à sua limitação de 32 bits, o que, à época, pareceu satisfazer as necessidades existentes. Entretanto, com o advento de soluções de IoT, a necessidade de endereços subiu exponencialmente, e segundo a previsão da empresa Ericsson, realizada em 2011, a

quantidade de coisas interligadas poderá chegar a 50 bilhões de endereço até 2020 (NORDRUM, 2016). Um outro estudo do IDC prevê em torno de 28 bilhões até 2020 (LUND et al., 2014). Apesar de as previsões não serem próximas, fica evidente que a capacidade atual do IPv4 não suportará esta nova demanda, de modo que as empresas devem planejar a migração para o protocolo IPv6. (JARA et al., 2014).

Nesta linha, o IPv6 veio suprir esta lacuna, pois suporta até 340 undecilhões de endereços, pois é composto de duas partes (64 bits para prefixo da rede e 64 bits para identificador da interface), o que atenderá à necessidade de soluções de IoT em sua plenitude. Além disto, o IPv6 tem melhor mobilidade e segurança se comparado ao IPv4, haja vista que é considerado uma solução madura e viável para a próxima geração de Internet (WU et al., 2013). Na Figura 5 é possível visualizar a diferença entre o cabeçalho IPv4 e IPv6.

Figura 5 – Cabeçalho IPv4 e IPv6.

Fonte: Wu et al. (2013).

2.2.5 Big Data e Analytics

O Nist (2015) define o termo *big data* como um enorme conjunto de dados, em que a grande massa de dados é não estruturada e necessita de análise em tempo real. O termo *big data* trata a inabilidade das tradicionais arquiteturas de dados em eficientemente manusear uma grande quantidade de dados, sendo requerido uma arquitetura escalável para, de modo eficaz, armazenar, manipular e analisar. As características do *big data* implicam em uma nova arquitetura conhecida como “Vs” do *Big Data*, que são:

- Volume (tamanho do conjunto de dados);
- Variedade (dados a partir de múltiplos repositórios, domínios ou tipos);
- Velocidade (taxa do fluxo de dados);
- Variabilidade (Coerência no conjunto de dados).

Na Figura 6 é possível visualizar graficamente a arquitetura “Vs” do *Big Data*.

Figura 6 – Arquitetura “Vs” do *Big Data*.

Fonte: HP (2014).

Recentemente, as indústrias ficaram interessadas no potencial do *big data*, de maneira que muitas empresas anunciaram grandes planos para acelerar a pesquisa de *big data* e aplicações. Em sua relação com IoT, os sensores são incorporados em vários dispositivos e máquinas, sendo que tais sensores coletam vários tipos de dados: ambiental, logístico, geográfico, serviço de utilidade pública e outros, gerando uma massa crítica para o *big data* (CHEN; MAO; LIU, 2014). Embora os dados atuais de IoT

não sejam parte dominante do *big data*, estudos apontam que, em 2030, os dados desses sensores chegarão a um trilhão (quase 150 sensores por pessoa) e será a parte mais importante do *big data* (HP, 2014). Ainda segundo um estudo da INTEL (2013), é informado que os dados gerados por soluções de IoT são totalmente compatíveis com as necessidades do paradigma de *big data*, pois tais dados são: a) grande número de sensores gerando uma massa de dados abundante; b) não estruturado ou semiestruturado; e c) os dados de solução de IoT somente são úteis quando analisados. Muitas pesquisas perceberam que o sucesso de IoT está intimamente ligado ao *big data* e à sua integração efetiva com a computação em nuvem (CHEN; MAO; LIU, 2014), (Chen, Chiang e Storey, 2012), (HP, 2014) e (INTEL 2013).

O termo *analytics* é a descoberta, interpretação e comunicação dos padrões significativos nos dados, tendo valor significativo nas mais diversas áreas do conhecimento, pois pode-se aplicar à análise de dados no negócio a fim de se prever, melhorar o desempenho, gerenciar as decisões, análise de risco, aprimoramento de recursos, dentre outros (KOHAVI; ROTHLENDER; SIMOUDIS, 2002). No âmbito da fábrica, a aplicação deste conceito e de modelos matemáticos podem realizar o planejamento preditivo integrado aos sistemas ciberfísicos (CHIABURU, 2015).

Segundo Davenport (2013), os pesquisadores que estudam os conceitos relacionados a dados inteligentes já vivenciaram duas épocas do uso de *analytics*, as quais podem ser chamadas de BBD (*before big data* - antes do *big data*) e ABD (*after big data* - depois do *big data*).

No trabalho de Chen, Chiang e Storey (2012), foi criado uma convenção de nomenclatura para traçar uma linha do tempo em relação aos dados inteligentes, chamado de:

- BI&A 1.0, a era do BI – *business intelligence*: Compreensão dos fenômenos de negócio, possibilitando aos gestores irem além da intuição para tomada de decisões. Os dados sobre os processos de produção, vendas, interações com os clientes e outros foram registrados e analisados;
- BI&A 2.0, a era da *web*: Impulsionado por grandes empresas como Google, Yahoo, Amazon e eBay, em que os dados sobre clientes e produtos podem ser recolhidos a partir da *web* e organizados e visualizados através de técnicas de *web mining*. Por meio da análise de registro de dados e fluxo de cliques dos

clientes, as ferramentas de análise WEB – como o Google Analytics – podem fornecer um rastro de atividades e revelar padrões de comportamento e compra;

- **BI&A 3.0, a era móvel e dos sensores:** Com o grande aumento de sensores, motivados por RFID e IoT, gerou-se um grande volume de dados que precisam ser tratados e analisados, impulsionando, assim, o uso de conceitos *smart*, tais como: cidades inteligentes, carros inteligentes e outros.

2.2.6 Cloud Computing e Fog Computing

A definição de computação em nuvem dada pelo Nist (2011) é um modelo para permitir acesso ubíquo, conveniente e sob demanda aos recursos compartilhados e configuráveis, que podem ser rapidamente provisionados e liberados com mínimo esforço de gerenciamento. É composto por cinco características essenciais, três modelos de serviço e quatro modelos de implementação, sendo suas características essenciais:

- 1) **Sob demanda e autosserviço:** O consumidor pode provisionar a capacidade computacional sem requerer interação humana com o provedor de serviço;
- 2) **Acesso amplo à rede:** Os recursos estão disponíveis através da rede e podem ser acessados por meio de plataformas heterogêneas, tais como: celulares, *tablets*, *laptops* e estações de trabalho;
- 3) **Conjunto de recursos:** Os recursos computacionais do provedor de acesso são agrupados para servir vários consumidores com diferentes recursos físicos e virtuais, atribuídos dinamicamente e de acordo com a demanda do consumidor;
- 4) **Rápida Elasticidade:** Os recursos podem ser elasticamente provisionados (em qualquer quantidade e a qualquer momento) e liberados de acordo com a demanda;
- 5) **Serviço de Medição:** O sistema de nuvem automaticamente controla e otimiza o uso dos recursos, sendo estes monitorados, controlados e reportados oferecendo transparência tanto para o provedor como para o consumidor do serviço utilizado.

Os três modelos de serviço são:

- 1) **Software como Serviço (SaaS):** Utilização de aplicações de modo acessível por diversas plataformas. O consumidor não tem controle gerencial algum sobre os recursos computacionais;
- 2) **Plataforma como Serviço (PaaS):** O consumidor tem controle sobre a implementação da aplicação e sobre a possibilidade de configurações no ambiente da aplicação, entretanto, ele não gerencia a infraestrutura dos recursos computacionais da nuvem;
- 3) **Infraestrutura como Serviço (IaaS):** Fornece a capacidade do consumidor de gerenciar os recursos computacionais da nuvem e de implementar e executar aplicações de sua escolha.

Os quatros modelos de implementação são:

- 1) **Nuvem Privada:** A infraestrutura da nuvem é provisionada para uso exclusivo de uma única organização, compreendendo vários consumidores;
- 2) **Nuvem Comunitária:** A infraestrutura da nuvem é provisionada para uso comunitário e específico de certos usuários que possuem interesse compartilhados;
- 3) **Nuvem Pública:** A infraestrutura da nuvem é provisionada para uso aberto e para um público geral;
- 4) **Nuvem Híbrida:** A infraestrutura da nuvem é composta de duas ou mais infraestrutura de nuvem (exemplos: privada, pública ou comunitária), que permanecem entidades únicas, mas estão vinculadas em conformidade com a padronização.

Na Figura 7 é possível visualizar uma arquitetura de alto nível proposta por Buyya et al. (2009) para uso geral.

Figura 7 – Arquitetura de Computação em Nuvem de Alto Nível.

Fonte: Buyya et al. (2009).

A computação em névoa, conhecida como *fog computing*, é uma maneira de preservar os conceitos da computação em nuvem, porém, traz os recursos computacionais mais próximo de seu utilizador final. Segundo Dastjerdi e Buyya (2016), o potencial trazido pelas aplicações de Internet das Coisas gerará um tráfego intenso, e para resolver esta questão, a computação de borda (*edge computing*) constitui-se uma alternativa. O autor propõe a utilização de recursos computacionais perto dos sensores que geram o tráfego, podendo, assim, acelerar a análise, o processamento das informações e a tomada de decisão, e por conseguinte, diminuindo o congestionamento da rede. Na Figura 8 é demonstrada a proposta para atender à demanda.

Figura 8 – Computação em Névoa.

Fonte: Buyya et al. (2009).

2.2.7 RFID E QR Code

Segundo Want (2006), trata-se de um método de identificação automática à distância, realizado por meio de sinais de rádiofrequência, que, ao contrário do que ocorre com o código de barras, incorpora dados adicionais como fabricante, tipo de produto e, adicionalmente, pode até medir os fatores ambientais, como por exemplo, temperatura. Ainda consoante Want (2006), existem muitos tipos de RFID, e considerando um alto nível, podemos dividi-los em duas classes, quais sejam: ativo e passivo. As *tags* ativas requerem uma fonte de energia – de modo que, ou são conectadas a uma infraestrutura com alimentação de energia, ou utilizam a energia de baterias – e são utilizadas tipicamente para leitura/escrita. Já as passivas, respondem ao sinal enviado pela base transmissora, não requerem bateria ou fonte de energia alternativa e possuem uma vida útil indefinida e são pequenas o suficiente para se ajustar a uma etiqueta adesiva, tornando-se muito prática. A etiqueta passiva consiste

de 3 partes, a saber: antena, *chip* semicondutor anexado na antena e alguma forma de encapsulamento. O leitor da *tag* é o responsável pela energia e pela comunicação com a *tag*.

Um dos exemplos de uma *tag* ativa é o *transponder* conectado a uma aeronave que identifica a sua origem nacional; um outro exemplo é o dispositivo LoJack conectado ao carro, que incorpora tecnologia de celular e GPS para localização em caso de roubo. Um exemplo de *tag* passiva é a utilização em estacionamentos e pedágios para agilizar o pagamento (FINKELZELLER, 2003).

O QR Code é a abreviação de *Quick Response Code*, ou seja, é um tipo de código de barras que consiste em um quadrado padrão composto de pequenos quadrados nas cores preta e branca que codificam os dados e são digitalizados em um sistema computacional. Os quadros pretos e brancos podem representar números de 0 a 9, letras de A a Z ou caracteres não latinos. A sua finalidade inicial foi rastrear peças de automóveis durante o processo de montagem, sendo atualmente muito utilizado na publicidade para divulgação de eventos ou produtos. Tais códigos são normalmente lidos através de *scanners a laser* ou câmera de telefones móveis que, em seguida, utilizam um programa especial para decodificar o padrão (PATEL; RAJPUT, 2016).

2.2.8 Comunicação 5g

A adoção de novas tecnologias como IoT, *Big Data Analytics* e Computação em nuvem criou uma enorme dependência em relação à comunicação em alta velocidade. Como exemplo, é possível citar as aplicações de IoT, que têm características de geração de pequenos dados em grande volume e em rápida velocidade, e necessitam de uma comunicação em alta velocidade, assim como a computação em nuvem necessita de alta velocidade para poder processar e armazenar. Neste sentido, a comunicação 5G, que possui características de alta taxa de comunicação e baixa latência, consegue transmitir esses dados de forma rápida e barata (LIN; LIN; TUNG, 2016).

Segundo Fagbohun (2014), atualmente não existe padrão para o 5G, o que existe são requisitos padronizados definidos pela NGMNA – *Next Generation Mobile Networks Alliance*, na qual a tecnologia deve cumprir alguns aspectos, dentre eles: fornecer a taxa de 1 Gbps simultâneo para diversos equipamentos em um mesmo local

físico; suportar milhares de conexões para dispositivos massivos; melhor cobertura e latência reduzida comparada com outras tecnologias. Na Tabela 2, é possível visualizar as comparações com as outras tecnologias.

Tabela 2 – Comparativo de tecnologias com 5G.

Tecnologia Características	1G	2/2.5G	3G	4G	5G
Início/Implantação	1970/1984	1980/1999	1990/2002	2000/2010	2010/2015
Largura de banda	2 kbps	14.4-64 kbps	2 Mbps	200 Mbps até 1 Gbps para baixa mobilidade	1 Gbps e superior
Padrões	AMPS	2G: TDMA, CDMA, GSM. 2.5G: GPRS, EDGE, 1xRTT	WCDMA, CDMA-2000	Padrão unificado	Padrão unificado
Tecnologia	Analógica	Digital	Banda larga CDMA e tecnologia IP	IP unificado com combinação de LAN/WAN/WLAN/PAN	4G+WWWW

Fonte: Fagbohun (2014).

2.2.9 Machine Learning

A primeira definição de *machine learning* partiu de Samuel (1959), definindo como sendo o campo de estudo que proporciona aos computadores a habilidade de aprender sem ser explicitamente programado. Posteriormente foi redefinida por Mitchell (1997) como sendo técnicas capazes de melhorar seu desempenho em uma dada tarefa utilizando-se experiências prévias. Ainda de acordo com Mitchell (1997), os algoritmos para *machine learning* podem ser divididos em 04 formas, a saber: supervisionado, não supervisionado, semisupervisionado e aprendizado por reforço.

Na aprendizagem supervisionada, os dados (*inputs* e *outputs*) são apresentados por meio de um modelo, fornecendo para cada *input* o *output* desejado, cujo objetivo principal é aprender uma regra geral a fim de compreender os *inputs* e *outputs*. Já na aprendizagem não supervisionada, nenhum tipo de informação é dada ao algoritmo, deixando que o próprio algoritmo compreenda a estrutura dos dados. E, no algoritmo semisupervisionado, é fornecido um conjunto de treinamentos com alguns *outputs* ausentes. O aprendizado por reforço trata-se da interação com um ambiente dinâmico no qual é proposto um determinado objetivo, tendo como exemplo clássico os veículos autônomos.

Os algoritmos de aprendizado podem ser divididos em preditivos (classificação e regressão) e descritivo (agrupamento, sumarização e associação). Os algoritmos são utilizados conforme o objetivo e o problema a ser resolvido. Como exemplo, é possível destacar as análises de séries temporais que utilizam os algoritmos com o objetivo de aprender uma função que mapeia um exemplo em valor real. Os exemplos de algoritmos para esta classe de problemas são: árvores de regressão, redes neurais artificiais, regressão linear e máquinas de vetores de suporte. Já para o objetivo de aprender uma função que associa descrição de um exemplo a uma classe, tem-se como exemplo as redes bayesianas, regressão logística, K-NN e outros. Na Figura 9 é possível visualizar a classe dos algoritmos.

Figura 9 – Algoritmos para *Machine Learning*.

Fonte: Fagbohun (2014).

2.3 Visões da Transformação digital

Durante a pesquisa foram encontradas diversas iniciativas que abordam a transformação digital como peça-chave para a inovação, tornando-se prioridade para universidades, empresas e governos. Estas visões tratam de desafios da produção do futuro, dentre eles, destacam-se (HERMANN; PENTEK; OTTO, 2015):

- Tecnologias inovadoras;
- Ritmo acelerado da mudança tecnológica;
- Flexibilidade e soluções individualizadas;
- Grande diversidade de clientes e mercados.

A Indústria 4.0 é a visão alemã da transformação e do modo como as empresas e pessoas se relacionarão em um futuro próximo. Existem outras visões, de outros países, que igualmente exploram tais aspectos, das quais se pode destacar:

- *Industrial Internet Consortium*;
- *Advanced Manufacturing Partnership 2.0*;
- *Smart Manufacturing Leadership Coalition*;
- *Catapult Centers*;
- *Factories of the Future*;
- *Made in China 2025*;
- *Industrie du future*;
- *Manufacturing Innovation 3.0*.

Em 2014, Brynjolfsson e McAfee (2014) lançaram o livro intitulado “*The second Machine Age: Work, Progress and Prosperity in a time of Brilliant Technologies*”, no qual é informado que a revolução industrial iniciou a “*first machine age*”. Com efeito, agora inicia-se a “*second machine age*”, em que computadores e outros avanços digitais estão fazendo pela capacidade mental do indivíduo o que a máquina a vapor fez pela força muscular (BRYNJOLFSSON; McAFEE, 2014).

No *World Economic Forum* de 2016, em sua reunião anual que acontece em Davos, na Suíça, foi explorado o tema da quarta revolução industrial; o seu fundador, Klaus M. Schwab, afirmou que a sociedade encontra-se no início de uma revolução que está fundamentalmente mudando a forma como vive, trabalha e se relaciona. Constitui o que ele considera ser a quarta revolução industrial (SCHWAB, 2016).

2.3.1 Indústria 4.0

A industrialização iniciou-se com a introdução da fabricação mecânica no final do século XVIII, conhecida como primeira revolução industrial, ocasionando uma

revolução na maneira como os produtos eram fabricados. Um exemplo de sua utilização é a máquina mecânica de tear, que proporcionou o aumento da produtividade. Posteriormente, ocorreu a segunda revolução industrial, que começou por volta da virada do século XX e envolveu o emprego de energia elétrica e a divisão de trabalho; um exemplo foi o motor a combustão. Já a terceira revolução industrial, ficou caracterizada pelo emprego de componentes eletrônicos e da tecnologia da informação (TI) para se atingir uma maior automatização dos processos de fabricação, tendo sido iniciada no começo dos anos 70 e continuando nos dias atuais. Por fim, a quarta revolução industrial, denominada pelo governo alemão como “Indústria 4.0”, é uma nova era da indústria, centralizada na utilização de recursos de informação e tecnologia da comunicação (ICT) para que, assim, seja possível melhorar o processo de manufatura e negócio (KAGERMANN et al., 2013).

Na Figura 10 são demonstrados os quatros estágios da revolução industrial e a sua evolução tecnológica.

Figura 10 – Os quatros estágios da revolução industrial.

Fonte: Adaptado de Kagermann et al. (2013).

O termo Indústria 4.0 ficou conhecido em 2011, quando uma associação de representantes do governo, empresas e academia promoveu a ideia de uma abordagem a fim de aprimorar a competitividade da indústria alemã. Deste modo, o governo alemão apoiou a iniciativa e anunciou que a Indústria 4.0 seria parte do projeto *High-Tech Strategy 2020 for Germany*, com o propósito de levar a Alemanha à liderança na inovação tecnológica. E criou-se, assim, um grupo de trabalho para a Indústria 4.0, de modo que a primeira recomendação que descreveu a visão da Indústria 4.0 foi publicada em abril de 2013 (KAGERMANN et al., 2013).

Ainda segundo Kagermann et al. (2013), a Indústria 4.0 cria o que tem sido chamado de *smart factory*, que é uma fábrica inteligente com uma estrutura modular em que os sistemas ciberfísicos monitoram processos físicos – criando-se uma cópia virtual do mundo físico – e tomam decisões descentralizadas; fazem o uso intenso de sistemas ciberfísicos e Internet das coisas, que se comunicam entre si e com humanos em tempo real. Os serviços internos da fábrica inteligente e entre as organizações que compõem o ciclo são oferecidos e praticados no âmbito da cadeia de valor. Na Figura 11 é possível observar a integração da fábrica inteligente com toda a cadeia de valor.

Figura 11 – Indústria 4.0 e Fábrica Inteligente.

Fonte: Kagermann et al. (2013).

A implementação da Indústria 4.0 tem como objetivo otimizar a cadeia de valor aproveitando a questão tecnológica e o potencial econômico por meio de uma sistemática de inovação de processo, tendo foco sobre os seguintes aspectos fundamentais representados na Figura 12:

- A integração horizontal através de redes de valores;
- Integração digital fim a fim da engenharia em toda a cadeia de valor;
- Integração vertical e sistema de manufatura em rede.

Figura 12 – Integração da cadeia de valores.

Fonte: Kagermann et al. (2013).

O grupo de trabalho alemão para a Indústria 4.0 definiu 8 áreas-chave que precisam de pesquisa e aprofundamento para que os conceitos da iniciativa sejam corretamente implementando. São elas:

- Normatização e padrões abertos para uma arquitetura de referência;
- Gestão de sistemas complexos;
- Possuir uma infraestrutura de banda larga abrangente para a indústria;
- Questões de *safety* e *security* como fator crítico para o sucesso da Indústria 4.0;
- Projeto e organização do trabalho adequado para a era digital industrial;
- Treinamento e desenvolvimento profissional contínuo;
- *Framework* regulatório;
- Uso eficiente dos recursos.

2.3.2 Industrial Internet Consortium

A *Industrial Internet Consortium* (Consórcio de Internet Industrial), ou IIC, foi fundada em março de 2014 pela AT&T, CISCO, GE, IBM e Intel com o objetivo de fomentar a inovação, desenvolver normas, aumentar a interoperabilidade e garantir a segurança no contexto da transformação digital, sendo o catalisador e coordenando as prioridades e as tecnologias facilitadoras para a internet industrial para eficiência dos recursos. Tem também como um de seus objetivos promover o desenvolvimento de *testbeds* para demonstrar a implementação real da internet industrial (EVANS; ANNUNZIATA, 2012). Baseia-se em 03 grandes ondas de inovação, quais sejam:

- **Onda 01 – Revolução Industrial:** As máquinas e fábricas ampliando o poder econômico em escala e escopo;
- **Onda 02 – Revolução da Internet:** O poder computacional e o crescimento das redes distribuídas;
- **Onda 03 – Internet Industrial:** Baseado em *analytics*, aprendizado de máquina, automatização e predição.

Na Figura 13 são mostradas as 03 ondas, sendo a última a *Internet Industrial*, conforme visão do *Industrial Internet Consortium*:

Figura 13 – Ondas da Internet Industrial.

Fonte: Evans e Annunziata (2012)

Ainda conforme Evans e Annunziata (2012), possui três elementos-chave para que a visão se torne real:

- **Máquinas inteligentes:** Conectando o ambiente de máquinas, *facilities*, frotas e redes com sensores avançados e aplicações;
- ***Analytics* Avançado:** Combina o poder de análise e algoritmos de previsão com a automação;
- **Pessoas no trabalho:** Conectar pessoas no trabalho ou em movimento a qualquer momento para apoio de decisões inteligentes, maior qualidade de serviço e manutenção.

2.3.3 Manufatura Avançada

A manufatura avançada é a visão brasileira da transformação digital tendo como base a Indústria 4.0, sendo que sua demonstração foi realizada na FEIMEC, em 2016. No documento intitulado como *e-book* sobre a Manufatura Avançada, é informado que esta é uma indústria em que: a) o produto é individualizado, levando as suas características e comunicação com as máquinas; b) o que acontece no mundo real acontece no mundo virtual; c) intensa comunicação entre máquina-máquina decidindo o que deve ser feito; d) integração de toda a cadeia de valor; e) está tudo conectado gerando *big data*, e o *analytics* identifica tendência e antecipa ações; e f) o ser humano é visto como elemento criativo e gestor de recursos. Considera-se que as mudanças propostas pela manufatura avançada têm um avanço exponencial da capacidade dos computadores, uma imensa quantidade de informação digitalizada e novas estratégias de inovação. Tem como benefícios:

- 1) Redução de custos;
- 2) Economia de energia;
- 3) Aumento de segurança;
- 4) Conservação ambiental;
- 5) Redução de erros;
- 6) Fim do desperdício;
- 7) Transparência nos negócios;
- 8) Aumento da qualidade de vida, personalização e escala sem precedentes.

Na Figura 14 é possível visualizar as tecnologias direcionadoras de ações ligadas à Manufatura Avançada.

Figura 14 – Tecnologias Direcionadoras para Manufatura Avançada.

Fonte: FEIMEC (2016)

2.3.4 Da Visão Para Implementação

Na visão de Kagermann et al. (2013, p. 19), “numa fábrica inteligente, trabalhadores, máquinas, produtos e matérias-primas se comunicam de forma tão natural quanto pessoas numa rede social”. A estimativa é que, em 20 anos, boa parte da indústria alemã tenha adotado esse padrão de produção. Atualmente, a Alemanha já conta com alguns exemplos de fábricas inteligentes.

Na unidade de equipamentos eletroeletrônicos da Siemens, em Amberg, as linhas de produção em nada se assemelham às tradicionais, que repetem continuamente a manufatura da mesma peça. Sem a interferência de funcionários, máquinas que operam 24 horas por dia fabricam 950 diferentes componentes que são encomendados pelo sistema. A automação extrema leva a um baixíssimo índice de defeitos - um estudo da consultoria norte-americana Gartner, em Amberg, registrou 15 peças com defeito a cada 1 milhão produzido (COSTA; STEFANO, 2014). “Não são apenas a competição e o aumento de custos que estão exigindo mudanças na manufatura. O ciclo de vida da tecnologia está se reduzindo e as demandas por uma produção sob medida estão aumentando”, como apontou Siegfried Russwurm, presidente mundial da divisão industrial da Siemens.

Na Alemanha foi criado um projeto-piloto para ilustrar as possibilidades advindas com a Indústria 4.0, e foram aplicados os conceitos da Indústria 4.0 em uma fábrica inteligente na fabricação de xampu. No processo de fabricação, cada frasco é equipado com uma etiqueta RFID que transmite a sua configuração para o sistema de produção, no qual os sistemas ciberfísicos recebem esta informação e, de forma totalmente automatizada e sem intervenção, realizam a preparação do produto. Na Figura 15 é possível visualizar a arquitetura em alto nível.

Figura 15 – Fábrica de Xampu.

Fonte: Capgemini (2016).

No Brasil, o exemplo da aplicação do conceito de transformação digital foi apresentado na FEIMEC com o nome de DEMONSTRADOR.

A ABIMAQ (Associação Brasileira de Máquinas e Equipamentos) liderou o projeto para concretizar a demonstração dos conceitos da manufatura avançada, e, para tal, contou com a ajuda de 22 empresas. O objetivo final era criar uma fábrica inteligente, capaz de desenvolver acessórios personalizados para porta-lápis e celular. Esta personalização se dá pela escolha do cliente em relação à cor dos lápis e as dimensões do seu próprio celular. Na Figura 16 é possível visualizar o produto final.

Figura 16 – Produto Final do Demonstrador.

Fonte: FEIMEC (2016).

O demonstrador foi projetado, simulado e validado a partir da digitalização da produção, de modo que todas as operações do Demonstrador podem ser acompanhadas em ambiente virtual. O objetivo do Demonstrador é colocar em prática os conceitos da Indústria 4.0, para tal, a Figura 17 apresenta o Demonstrador e, a seguir, as etapas (FEIMEC, 2016).

Figura 17 – FEIMEC – Demonstrador.

Fonte: FEIMEC (2016).

- **Etapa 01:** Leitura do QR *Code* para identificação do cliente e personalização de seu pedido, com a seleção de cores dos lápis e introdução do texto;
- **Etapa 02:** Aplicativo gera o projeto em 3D e associa o QR *Code* do cliente com o projeto;
- **Etapa 03:** As peças (*blanks*) com etiqueta RFID são retiradas por robô e posicionadas para gravação com as informações do produto;
- **Etapa 04:** O robô posiciona a peça no centro de usinagem, em que é realizada a comunicação para iniciar a personalização da peça;
- **Etapa 05:** A esteira inteligente posiciona a peça em 4 estações possíveis: usinagem, medição, descarte e montagem. Dessa forma, a peça se comunica com o processo;
- **Etapa 06:** O produto usinado é retirado pelo robô para inspeção da estação de medição;
- **Etapa 07:** Após a análise da estação de medição, caso o produto tenha alguma não conformidade, ele será retirado da linha de produção e será gerada uma nova ordem de produção para reposição;
- **Etapa 08:** Na estação de montagem de lápis, um robô identifica o produto e o outro posiciona o lápis nas cores e sequência escolhidas pelo cliente; posteriormente, é armazenado no sistema rotativo;
- **Etapa 09:** O cliente apresenta o seu QR *Code* no balcão para retirada do produto. O sistema identifica o produto e entrega ao cliente, finalizando o ciclo.

2.4 Conceitos de Segurança e *Safety*

Torna-se necessário definir as duas áreas mencionadas nesta pesquisa – *security* e *safety* –, pois na análise de risco ambas são contempladas, além de considerar a verificação de falhas para melhorar a segurança de um processo. Segundo Almeida Jr. (2003), é necessário compreender o termo ‘risco’ para melhor se definir os termos *security* e *safety*:

O risco pode ser visto como tendo relação direta com a frequência de possíveis eventos perigosos e com a severidade de suas consequências. Quanto maior a frequência de um evento perigoso, maior o risco e quanto maior a severidade de suas consequências, maior o risco assumido. [...] qualquer sistema tem a si associados os riscos inerentes, sendo que o risco representado por um sistema pode ou não ser aceito pela

sociedade, que em última análise, é quem define o conceito de risco aceitável. (ALMEIDA JR., 2003, 15).

Almeida define as nomenclaturas dos termos *security* e *safety* da seguinte forma:

Embora haja essa diferenciação de competências, na língua portuguesa essas duas atividades recebem a mesma denominação, ou seja, segurança, enquanto que na língua inglesa há dois termos distintos. O termo *safety* é utilizado para se fazer referência à segurança dos Sistemas Críticos, enquanto que o termo *security* é utilizado para referenciar a segurança dos Sistemas de Informação. (ALMEIDA JR., 2003, p. 19).

Na presente pesquisa, o termo *security* é adotado para definições de procedimentos, estruturas e processos de melhoria das condições de segurança da informação, do dado e da arquitetura da rede de comunicação; enquanto o termo *safety* refere-se ao estado que define uma condição de proteção a um sistema, pessoa, objeto, processo, e contempla os diversos tipos de erro, falha e problema. É diferenciado o termo de modo similar ao adotado por Almeida Jr. (2003) em sua pesquisa: *safety* para segurança do processo (segurança dos sistemas críticos) e *security* para segurança da informação (sistemas de informação).

A qualidade, confiabilidade, manutenção e segurança das pessoas e do meio ambiente são os elementos que relacionam a segurança do processo. O principal objetivo é conhecer e controlar os riscos (MARTINS, 2013). O processo de compreender a natureza do risco e de determinar o nível de risco é o que define a análise de risco.

A necessidade por sistemas cada vez mais confiáveis está inserida em um contexto que demanda um ponto de equilíbrio a ser alcançado, uma vez que a baixa confiabilidade pode acarretar perda de vidas humanas e prejuízos materiais; porém, a alta confiabilidade, por sua vez, pode inviabilizar financeiramente um projeto (MARTINS, 2013).

3 TRANSFORMAÇÃO DIGITAL NA INDÚSTRIA BRASILEIRA

Neste capítulo foi realizado um levantamento sobre a questão da indústria no Brasil com o objetivo de identificar o grau de maturidade do cenário Brasil para a transformação digital. Este capítulo serviu como subsídio para elaboração do questionário aplicado a um conjunto de entrevistados.

Segundo Kon (1994), indústria constitui um conjunto de firmas que elaboram produtos idênticos ou semelhantes quanto à constituição física, ou ainda, baseados na mesma matéria-prima, de modo que podem ser tratadas analiticamente em conjunto.

Ainda consoante Kon (1994), os tipos de indústria são divididos da seguinte forma: base, bens intermediários e consumo, estando detalhadas logo a seguir:

- **Base:** Transforma matéria-prima bruta em processada, para a utilização por outras indústrias;
- **Bens Intermediários:** Produzem máquinas e equipamentos utilizados nas indústrias de bens de consumo;
- **Consumo:** Transforma matéria-prima fabricada pela indústria de base em itens para o consumidor final.

Os setores da economia são divididos classicamente conforme os produtos que são produzidos, a sua forma de produção e os recursos utilizados. Tradicionalmente, os setores da economia são divididos da seguinte forma:

- **Setor Primário:** Extração direto da terra, não processam, enviam para as fábricas para que possam ter lucro. Ou seja, fornecem a matéria-prima para a indústria de consumo. Como exemplo é possível citar:
 - Agricultura;
 - Mineração;
 - Madeireira;
 - Pecuária.

Um dos maiores problemas deste setor constitui-se no fato de que é muito vulnerável e dependente dos fenômenos da natureza. Além de possuir baixo valor agregado, pois não industrializam os produtos.

- **Setor Secundário:** Processa os produtos vindos das indústrias primárias transformando-os em produtos industrializados. Embora possua conhecimento tecnológico agregado, consome muita energia e produz muitos resíduos
Exemplos:
 - Indústria de Aço;
 - Indústria Química;
 - Automobilísticas;
 - Maquinaria.
- **Setor Terciário:** Está relacionado ao oferecimento de serviços. Ou seja, produtos que pessoas ou empresas oferecem a fim de satisfazer necessidades específicas. São exemplos deste oferecimento: comércio, saúde, bancário, administrativo, transportes, entre outros.
- **Setor Quartenário:** Concentra pesquisa científica e tecnologia (P&D) e serviços baseado no conhecimento.

Para a classificação das indústrias, foi criado um índice chamado *Global Industry Classification Standard* – GICS (GICS, 2016). O GICS categoriza cada setor da indústria em um grande grupo, subdividindo-os conforme o seu grau de relacionamento. Na Figura 18 é possível verificar esta divisão de forma macro.

Figura 18 – Global Industry Classification Standard.

Fonte: Adaptado de GICS (2016).

3.1 Indústria no Brasil e na Região Metropolitana de Campinas

A indústria no Brasil é formada fortemente por empresas do setor econômico secundário, produzindo bens de consumo. Ademais, possui também indústrias de base, do setor econômico primário, transformando matéria-prima bruta em processada.

Segundo levantamento da Revista Exame (AS 10 MAIORES..., 2014), as 10 maiores indústrias do Brasil são as que constam na Tabela 3, pertencentes ao setor primário, secundário e terciário.

Tabela 3 – Principais Indústrias Brasileiras.

Indústria	Setor Economico	Atuação	Tipo	Sede Nacional	Vendas (em milhões)	País de Origem
Petrobras	Primário	Energia	Estatal	Rio de Janeiro, RJ	U\$ 126.339,8	Brasil
Vale	Primário	Mineração	Privada	Rio de Janeiro, RJ	U\$ 32.660,3	Brasil
Volkswa -gen	Secundário	Autoindústria	Privada	São Bernardo do Campo, SP	U\$ 18.535,0	Alemanha
Fiat	Secundário	Autoindústria	Privada	Betim, MG	U\$ 17.749,2	Itália
Ambev	Terciário	Bens de Consumo	Privada	São Paulo, SP	U\$ 16.640,4	Brasil
Braskem	Primário	Química e Petroquímica	Privada	Camaçari, BA	U\$ 13.070,0	Brasil
General Motors	Secundário	Autoindústria	Privada	São Caetano do Sul, SP	U\$ 12.411,8	Estados Unidos
Arcelor Mittal	Primário	Siderurgia e Metalurgia	Privada	Belo Horizonte, MG	U\$ 10.684,2	Luxemburgo
Bunge Alimentos	Terciário	Bens de Consumo	Privada	Gaspar, SC	U\$ 9.639,7	Estados Unidos
Usiminas	Primário	Siderurgia e Metalurgia	Privada	Belo Horizonte, MG	U\$ 9.579,0	Brasil

Fonte: Costa e Stefano (2014).

Segundo o IBGE (2016), o PIB Brasil de 2014 ficou em R\$ 5.122,785 trilhões, tendo a sua divisão conforme a Tabela 4. O setor de serviço foi o que mais contribuiu para o PIB do Brasil.

Tabela 4 – PIB por setores da economia brasileira.

Setor	Principais Produtos	PIB	Força de trabalho
Produção Agrícola	Café, soja, trigo, arroz, milho, cana-de-açúcar, cacau, citrinos e carne	3,5%	10%
Produção Industrial	Indústria automotiva, petroquímica, máquinas, eletrônicos, cimento e construção, aeronave, têxtil, alimentos e bebidas, mineração, bens de consumo duráveis e turismo	29,7%	19%
Serviços	Prestação de serviço	66,8%	71%

Fonte: IBGE (2016).

Na Tabela 5 é possível visualizar a importação e exportação e o seus valores, bem como os produtos comercializados em cada setor.

Tabela 5 – Exportação e Importação no Brasil.

Tipo	Valor	Produtos
Exportação	U\$ 225,1 bilhões	equipamentos de transporte, minério de ferro, soja, calçados, automóveis, café, suco de laranja
Importação	U\$ 229 bilhões	máquinas, equipamentos elétricos e de transporte, produtos químicos, petróleo, autopeças, eletrônicos

Fonte: IBGE (2016).

Atualmente, existe uma tendência de transformação da indústria no mundo todo. Como visto no capítulo anterior, os alemães chamam de Indústria 4.0 e os norte-americanos denominam de *Industrial Internet*. Com base nestas visões, a pesquisa procura contextualizar a indústria brasileira neste novo cenário, identificado os principais setores brasileiros de uma determinada região para serem explorados, os impactos, riscos e a mão de obra esperada para este novo cenário.

Para a presente pesquisa, considerou-se 06 cidades da região metropolitana de Campinas, das 20 que a compõem, quais sejam: Campinas, Hortolândia, Sumaré, Nova Odessa, Americana e Santa Bárbara d'Oeste.

As 06 cidades escolhidas da região metropolitana de Campinas se destacam no Estado de São Paulo pela localização privilegiada e pela proximidade em relação à capital de São Paulo. Está em uma das principais regiões do Estado, levando-se em consideração a grande concentração de Indústrias Nacionais e Internacionais (automação, química, petroquímica, borracha, alimentação, celulose e papel, montadoras, dentre outras); é grande polo da indústria têxtil e de confecção; possui

refinaria de petróleo e usinas produtoras de açúcar e álcool. Na área de Educação, estão presentes Universidades Privadas e Estaduais, Centros Universitários, Faculdades Integradas e outras. Na área de saúde, a região dispõe de renomados Centros de Investigações Científicas; Hospitais de Clínicas, além de vários Clubes de Serviços. Um outro fator importante diz respeito à facilidade de locomoção por meio de rodovias estaduais, intermunicipais e interestaduais, facilitando o transporte de acesso ao local, além de outros fatores que são fundamentais para o crescimento e desenvolvimento da região.

Na Tabela 6, segundo dados do IBGE referentes a 2014 (IBGE, 2016), é possível observar a distribuição das cidades e a sua respectiva população.

Tabela 6 – Distribuição do número de cidades e sua respectiva população.

Cidade	População
Americana	231.621
Campinas	1.173.370
Nova Odessa	57.504
Hortolândia	219.039
Sumaré	269.522
Santa Bárbara D'Oeste	191.024
Total	2.142. 080

Fonte: IBGE (2016).

A Tabela 7, referente os dados do IBGE de 2014, demonstra a distribuição do número de empresas por área de atuação, ilustrando, assim, a riqueza da região, com geração de futuros empregos e que representam áreas emergentes para o mercado de trabalho. Um outro setor que chama à atenção e merece destaque é das Indústrias de Transformações, o qual demanda mão de obra qualificada para ser competitiva, tanto no comércio interno como no externo. Também o setor de Comércio: reparação de veículos automotores, objetos pessoais e domésticos acumula um total de empresas bastante considerável quando comparado com outros setores. No âmbito da inserção regional, os setores apontados em seguida refletem a natureza de setores que poderiam ser privilegiados no mercado de trabalho e, no entanto, se colocam em classificações diferenciadas, talvez pela falta de mão-de-obra qualificada. Neste sentido os setores são: Alojamento e alimentação; Transporte, armazenagem e comunicações; Intermediação financeira; Educação; Saúde e serviços sociais.

Tabela 7 – Distribuição do número de empresas por área de atuação.

Cidades	Agricultura, pecuária, silvicultura e exploração florestal	Pesca – número de empresas	Indústrias extrativas	Indústrias de transformação	Produção e distribuição de eletricidade, gás e água	Construção	Comércio: reparação de veículos automotores, objetos pessoais e domésticos.	Alojamento e alimentação	Transporte, armazenagem e comunicações	Intermediação financeira	Atividades imobiliárias, aluguéis e serviços prestados às empresas	Administração pública, defesa e seguridade social	Educação	Saúde e serviços sociais	Outros serviços coletivos, sociais e pessoais	Organismos internacionais e outras instituições extraterritoriais
Americana	23	0	3	1.394	1	205	4.428	798	198	127	1.134	3	148	160	402	0
Campinas	103	9	21	2.658	10	1.980	19.501	2.836	1.995	416	6.735	14	678	1.005	2.368	0
Hortolândia	4	0	0	246	0	130	1.872	245	123	37	657	4	31	20	131	0
Nova Odessa	6	0	1	295	0	34	711	116	39	7	108	2	16	8	97	0
Santa Bárbara D'Oeste	24	1	3	749	1	81	2.623	487	83	21	278	2	57	32	228	0
Sumaré	3	0	2	432	2	177	2.332	302	201	23	296	3	69	57	247	0
Total	163	10	30	5.774	14	2.607	31.467	4.784	2.639	631	9.208	28	999	1.282	3.473	0

Fonte: IBGE (2016).

Para uma análise mais profunda, comparou-se o Brasil com outros países que já estão inseridos no contexto da transformação digital. O *Massachusetts Institute of Technology* - MIT disponibiliza o *site* atlas.media.mit.edu, no qual é possível checar dados econômicos de inúmeros países. Na Figura 19 é possível visualizar os dados de forma gráfica referentes ao Brasil de 1980 até 2014. E na Figura 20, o espaço de produtos da economia brasileira para as categorias de produto de origem animal, vegetal e mineral, indústrias de diferentes setores (têxtil, automobilística e outras). Cada cor representa um setor da economia, também é possível visualizar a sua interligação com outros setores. Sendo que uma das premissas da Indústria 4.0 é que toda a cadeia de suprimentos deve estar interligada para conseguir alcançar a integração.

Figura 19 – Economia Brasileira.

Fonte: Atlas (2016).

Figura 20 – Espaço de Produtos – Brasil.

Fonte: Atlas (2016).

Na Figura 21, é possível visualizar os dados de forma gráfica referentes à Alemanha de 1980 até 2014. E na Figura 22, o espaço de produtos da economia alemã para as categorias de produto de origem animal, vegetal e mineral, indústrias de diferentes sensores (têxtil, automobilística e outras).

Figura 21 – Economia da Alemanha.

Fonte: Atlas (2016).

Figura 22 – Espaço de Produtos – Alemanha.

Fonte: Atlas (2016).

O Brasil é a 23ª maior economia exportadora do mundo e a 32ª economia mais complexa, de acordo com o Índice de Complexidade Econômica (ICE). Em 2014, o Brasil exportou US\$ 228B e importou US\$ 228B, resultando em um saldo comercial

positivo de US\$ 124 milhões. No mesmo ano, o PIB do Brasil foi de US\$ 2.42T e o PIB *per capita* foi de US\$ 15.9K. As principais exportações do Brasil são: minério de ferro (US\$ 26.9B), soja (US\$ 23B), petróleo bruto (US\$ 16.4B), açúcar bruto (US\$ 9.8B) e carne de aves (US\$ 7.21B). As principais importações foram: refinados de petróleo (US\$ 17.2B), petróleo bruto (US\$ 14B), gás (US\$ 8.24B), carros (US\$ 7.7B) e peças veiculares (US\$ 7.17B). Os principais destinos das exportações brasileira são: China (US\$ 40B), Estados Unidos (US\$ 27.3B), Argentina (US\$ 14.3B), Países Baixos (US\$ 10.8B) e Alemanha (US\$ 8.19B). As importações têm como origens a China (US\$ 37.2 B), Estados Unidos (US\$ 35.1B), Argentina (US\$ 14B), Alemanha (US\$ 13.8B) e Nigéria (US\$ 8.77B).

A Alemanha é a terceira maior economia exportadora do mundo e a terceira economia mais complexa, de acordo com o Índice de Complexidade Econômica. Em 2014, a Alemanha exportou US\$ 1.41T e importou US\$ 1.13T, resultando em um saldo comercial positivo de US\$ 271B. No mesmo ano, o PIB da Alemanha foi de US\$ 3.8T e o PIB *per capita* foi de US\$ 46.4K. As principais exportações da Alemanha são: carros (US\$ 163B), peças de veículos (US\$ 63.2B), medicamentos embalados (US\$ 52B), aviões, helicópteros, e/ou nave espacial (US\$ 31.8B), sangue humano ou animal (US\$ 20.8B). As principal importações foram: petróleo cru (US\$ 53.3B), carros (US\$ 47.3B), peças de veículos (US\$ 38.2B), petróleo refinado (US\$ 31.1B) e computadores (US\$ 27.7B). Os principais destinos das exportações da Alemanha são: Estados Unidos (US\$ 121B), França (US\$ 119B), Reino Unido (US\$ 100B), China (US\$ 96.7B) e Países Baixos (US\$ 85B). As importações têm como origens: Países Baixos (US\$ 113B), China (US\$ 101B), França (US\$ 85.4B), Estados Unidos (US\$ 61.6B) e Itália (US\$ 61.3B).

Na Tabela 8 é possível verificar o comparativo econômico dos países inseridos no contexto da Indústria 4.0.

Tabela 8 – Comparativo econômico entre países da Indústria 4.0.

País	Exportação	Importação	ICE	PIB
Alemanha	\$1.41T	\$1.31T	2.05	\$46.4K
Estados Unidos	\$1.45T	\$2.19T	1.80	\$54.6K
China	\$2.37T	\$1.53T	0.74	\$13.2K
Brasil	\$228B	\$228B	0.81	\$15.9K

Fonte: Atlas (2016).

Na Figura 23 é mostrado o espaço de produtos específico do setor de máquina elétrica para a Alemanha. Sendo possível verificar uma forte interligação entre os diversos segmentos

Figura 23 – Espaço de Produtos para Maquinário Elétrico da Alemanha.

Fonte: Atlas (2016).

Na Figura 24 é mostrado o espaço de produtos específicos do setor de maquinário elétrico para o Brasil. É possível verificar um isolamento para a interligação entre os diversos setores.

Figura 24 – Espaço de Produtos para Maquinário Elétrico do Brasil.

Fonte: Atlas (2016).

Analisando os dados apresentados, conclui-se que o Brasil é um forte exportador de *commodities*, com produção em larga escala e comercialização em nível mundial. As *commodities* se caracterizam por poderem ser estocadas por um determinado período de tempo e, ainda, por não terem passado por nenhum processo industrial, ou seja, são geralmente matérias-primas. Em relação às importações, o Brasil é um grande importador de produtos eletrônicos e, de uma maneira geral, de produtos que passaram por algum processo industrial. Analisando ainda o espaço de produtos do Brasil, é observável que não existe uma interligação da cadeia de valores entre os setores relacionados e distintos. Já para outros países com forte expressão industrial e, em específico, a Alemanha, é verificada uma interligação ampla entre o seu espaço de produtos.

3.2 Estudo da transformação digital no Brasil

Com base nas informações prévias apresentadas, foi realizado um estudo da transformação digital no Brasil, partindo da premissa de que o Ministério do Desenvolvimento da Indústria e Comércio (MDIC) identificou um grande potencial em tal iniciativa e abriu financiamentos junto ao Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social – BNDES para que as mais variadas indústrias do Brasil possam ter recurso para implantar a Manufatura Avançada, que é visão brasileira da Indústria 4.0. São dois os programas do BNDES de incentivo à Manufatura Avançada (BNDES, 2016):

- Programa de apoio ao desenvolvimento do setor de bens de capital (BNDES ProBK): visa incentivar o aumento da capacidade produtiva, a modernização das instalações, novas fusões e aquisições;
- BNDES Fundo Tecnológico (BNDES Funtec): visa apoiar financeiramente projetos que estimulem o desenvolvimento tecnológico e a inovação de interesse estratégico para o Brasil.

3.2.1 Descrição do Estudo

O estudo planejado propõe-se a identificar o grau de maturidade e conhecimento das empresas inseridas no contexto da transformação digital, bem como o perfil dos profissionais para atender à nova demanda provinda deste novo paradigma. O presente estudo tem caráter exploratório e utilizou-se principalmente de técnicas de análise descritiva. O tamanho amostral reduzido não permitiu a utilização de técnicas inferenciais. Assim, o trabalho atuou com perguntas abertas e fechadas para delinear o perfil da transformação digital no Brasil (região metropolitana de Campinas) por meio do grupo estudado. Porém, deve-se ter cuidado ao expandir os resultados do grupo para toda a população. No capítulo 5 há detalhes do estudo e da metodologia adotada para a aplicação.

4 TRANSFORMAÇÃO DIGITAL NA INDÚSTRIA DE *UTILITIES*

Segundo o estudo da BCG (2015), as indústrias orientadas para processo, como as indústrias de *Utilities*, ainda não sabem ao certo os efeitos da transformação digital em seus processos. Ademais, há um agravante, pois para a equipe de gestão nestas indústrias pode ser difícil saber como iniciar a implementação da transformação digital ou até mesmo como mensurar a sua real necessidade e ganho.

A consultoria Mckinsey (2016), em seu relatório sobre a questão da transformação digital na Indústria de *Utilities*, informa que muitos gestores veem a transformação digital como uma ameaça para o seu modelo de negócio, entretanto, oportunidades estão surgindo junto a esta transformação. A indústria de *Utilities* está entre o segmento que enfrenta grandes desafios e pode encontrar inovação na transformação digital.

A consultoria Gartner (2015) concluiu que os principais setores que utilizam IoT são o da manufatura e o de *Utilities*. Em termos numéricos, são quase 307 milhões de unidades instaladas para a manufatura contra 299 milhões de unidades para *Utilities*. O estudo concluiu ainda que a implantação de medidores inteligentes é uma realidade, de modo que levam à melhoria da eficiência energética e de operações, dando como exemplo o faturamento automático, a gestão de produção e monitoramento.

No estudo I-scoop (2016), é informado que os desafios impostos para a Indústria de *Utilities* não podem ser combatidos de forma lenta, pois é um mercado extremamente competitivo e sensível a muitas flutuações em seu ecossistema, sendo necessário pensar à frente; portanto, utilizar os benefícios proporcionados pelas novas tecnologias é a chave para sobrevivência.

Ainda segundo I-scoop (2016), entre os desafios encontrados pela indústria de *Utilities* estão:

- Desafios regulatórios;
- O fato de recursos naturais não serem infinitos;
- Aumento da concorrência;
- Desafios Tecnológicos.

Nos próximos itens é informado o modo como funciona o processo de tratamento de água, bem como é detalhado o fluxograma e as suas interligações na arquitetura clássica.

4.1 Indústria de *Utilities* no Sistema de Tratamento e Distribuição de Água

A aplicação do conceito de transformação digital foi realizada em uma planta de tratamento de água. Desse modo, foi construído um sistema que refletisse todo o processo de tratamento de água. Esse processo estudado foi o baseado no que a empresa de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP) utiliza e disponibiliza na internet, de forma pública, para todos os interessados. O processo de tratamento de água da SABESP é largamente utilizado no Brasil; todo o processo que compõe o tratamento pode ser observado na Figura 25.

Figura 25 – Estação de Tratamento de Água (ETA).

Fonte: Próprio autor.

Porém, o controle da qualidade de água é de responsabilidade da empresa que realiza o serviço de tratamento juntamente com a vigilância sanitária e a CETESB. Esse controle é realizado por meio de análises físico-química e microbiológicas, entre elas destaca-se:

- pH;
- sabor e odor;
- turbidez;
- cor;

- dureza;
- concentração de: cloro, flúor, alumínio, ferro, manganês, entre outros;
- determinação de OD.

4.1.1 Esquemático de uma Estação Tradicional de Tratamento de Água

O esquemático definido na Figura 25 foi ilustrado a fim de evidenciar as etapas que compõem o processo de tratamento de água:

- Clarificação: Floculação, Decantação e Filtragem;
- Desinfecção.

Da mesma forma, o fluxograma e as etapas que compõem o processo como um todo são definidos e estudados nos próximos itens.

4.1.2 Estação de Tratamento de Água

Durante os estudos e a realização do levantamento do processo de tratamento de água foram realizadas visitas de campo com o objetivo de entender e desenhar o fluxograma de uma estação de tratamento de água, bem como as etapas que compõem o processo como um todo. Na Figura 26 é possível visualizar uma Estação de Tratamento de Água (ETA) em produção, na qual todas as etapas visualizadas na seção anterior são contempladas.

Figura 26 – Estação de Tratamento de Água (ETA).

Fonte: Próprio autor.

De forma mais detalhada, é possível observar na Figura 27(a) a captação da água bruta que chega até a ETA; posteriormente, passa-se pelo processo de floculação, mostrado na Figura 27(b). Na Figura 27(c) pode ser observada a decantação e, finalmente, na Figura 27(d), a filtragem da água.

Figura 27 – Componentes – (a) Captação; (b) Floculação; (c) Decantação e (d) Filtragem.

Fonte: Próprio autor.

Na Figura 28(a) são mostradas as bombas de captação e, na Figura 28(b), o painel de PLC que controla os sensores e atuadores.

Figura 28 – Componentes SCADA – (a) Bombas e (b) Pannel de PLC.

Fonte: Próprio autor.

O produto final dessa visitação foi a elaboração de um fluxograma (que se encontra no próximo item) do processo e da estação de tratamento contendo todo o

procedimento e as etapas do processo de tratamento de água. Ao final do fluxograma é possível ver de forma descritiva todas as etapas que fazem parte do processo.

4.1.3 Fluxograma do Processo de Tratamento de Água

No descritivo a seguir é possível observar as etapas detalhadas para o processo de tratamento de água. A primeira coluna é a referência da etapa, que vai do número 1 até o número 34. Já a segunda coluna é relativa à atividade que é esperada para cada etapa. Em resumo (SABESP, 2016):

- **Desinfecção preliminar / Cloração:** Reage com a matéria orgânica e substâncias presentes na água;
- **Correção do pH (entrada do tratamento):** Corrigir o pH para melhorar as reações químicas da próxima etapa;
- **Coagulação/Floculação:** Formação de flocos para auxiliar na decantação;
- **Decantação:** Separação dos flocos e deposita no fundo dos decantadores;
- **Filtração:** Remoção das partículas que passaram pelo processo de decantação;
- **Desinfecção/Cloração:** Eliminação de microorganismo prejudiciais para garantir o padrão de potabilidade;
- **Correção do pH (saída do tratamento):** Corrigir o pH para garantir o padrão de potabilidade;
- **Fluoretação:** Atendimento as legislações para redução da incidência de cáries.

ETAPAS

AÇÃO

1

Início

2

Verificar Turbidez, pH e OD na
captação e Turbidez e ph na
chegada da água bruta na ETA

3

Turbidez, pH e OD
OK?

N

Providenciar solução em
função da situação

4

S

5

Controlar Pré-dosagem
de Cal Hidratada

6

Pré-dosagem de Cal
Hidratada OK?

N

Corrigir

7

S

8

Controlar dosagem de
Policloreto de Alumínio

9

Dosagem de
Policloreto de
Alumínio OK?

N

Corrigir

10

S

Controlar a Pré-cloração

11

Vai para Etapa 12

ETAPAS

AÇÃO

12

13

14

15

16

17

18

19

ETAPAS

AÇÃO

20

21

22

23

24

25

26

27

Na Figura 29, é possível visualizar as etapas descritas no fluxograma de tratamento de água por meio de um diagrama de alto nível da ETA.

Figura 29 – Diagrama da ETA.

Fonte: Próprio autor.

4.1.4 Interligação do CLP ao Sistema Supervisório

O controlador lógico programável é interligado ao sistema supervisório conforme diagrama descrito na Figura 30. Na Figura 31, é possível visualizar tanto a malha de comunicação da casa de bombas como a comunicação da casa de bombas com o sistema supervisório através de GPRS.

Figura 30 – Diagrama da ETA – malha de comunicação.

Fonte: Próprio autor.

Figura 31 – Diagrama da casa de bombas – malha de comunicação.

Fonte: Próprio autor.

Na Figura 32 é demonstrada a tela elaborada no sistema supervisorio relativo ao processo de captação da água bruta. E na Figura 33, é apresentada a tela do sistema supervisorio relativo à planta de tratamento de água.

Figura 32 – Tela do Sistema Supervisório – Captação.

Fonte: Próprio autor.

Figura 33 – Tela do Sistema Supervisório – Tratamento de água.

Fonte: Próprio autor.

Na Figura 34, é possível visualizar uma topologia de alto nível com os elementos de comunicação entre o ambiente corporativo, descrito como sede administrativa com a estação de tratamento de água, descrita como ETA. Adicionalmente, é possível visualizar também a comunicação com a estação de tratamento de esgoto (ETE), a qual não é o foco da presente pesquisa.

Figura 34 – Topologia da rede para tratamento de água.

Fonte: Próprio autor.

5 METODOLOGIA

Para o capítulo de metodologia, optou-se em dividi-lo em duas partes, quais sejam: a primeira, que trata do estudo da transformação digital nas indústrias da região de Campinas. Para tal, foi realizada uma pesquisa utilizando-se um questionário como instrumento e, posteriormente, houve a realização da tabulação dos dados e apresentação gráfica para, assim, conseguir alcançar a informação desejada; a segunda parte trata da transformação digital na indústria de *Utilities*. Para isto, foi realizado todo o levantamento de um cenário real e tradicional do tratamento e distribuição de água, tendo como produto final a elaboração de fluxograma, processos e tecnologias, que, posteriormente, foram aplicados aos conceitos da transformação digital.

5.1 Estudo da Transformação Digital nas indústrias da região de Campinas

Segundo Severino (2007), o questionário é um conjunto de questões, sistematicamente articuladas, que objetiva levantar informações da população pesquisada, com vistas a conhecer a opinião dos mesmos sobre os assuntos em estudo. Desta forma, as questões devem ser pertinentes ao objeto e claramente formuladas, de modo a serem bem compreendidas pelos entrevistados. Podem ser questões fechadas ou questões abertas. No primeiro caso, as respostas são escolhidas dentre as opções pré-definidas pelo pesquisador; no segundo, o entrevistado pode conceber as respostas a partir de sua elaboração pessoal. Quanto aos seus objetivos, uma pesquisa pode ser exploratória, descritiva ou explicativa. A pesquisa exploratória busca levantar informações sobre um determinado objeto; a pesquisa descritiva realiza o estudo e a interpretação sem a interferência do pesquisador; e a pesquisa explicativa registra e analisa os fenômenos, buscando identificar suas causas.

Segundo Gonçalves (2014), a estatística descritiva envolve a organização, resumo e representação dos dados. Já a estatística inferencial utiliza-se das informações de uma amostra para chegar a conclusões sobre um grupo maior ao qual não se possui acesso.

O presente estudo tem caráter exploratório, tendo sido utilizadas principalmente de técnicas de análise descritiva. O tamanho amostral reduzido não permitiu a utilização de técnicas inferenciais. Assim, o trabalho focou em perguntas abertas e fechadas a fim

de delinear o perfil da transformação digital no Brasil (região metropolitana de Campinas) por meio do grupo estudado; porém, deve-se ter cuidado ao expandir os resultados do grupo para toda a população.

Ainda segundo Severino,

De modo geral o questionário deve ser previamente testado (pré-teste), mediante a sua aplicação a um grupo pequeno, antes de sua aplicação ao conjunto de sujeitos a que se destina, o que permite ao pesquisador avaliar e, se for o caso, revisá-lo e ajustá-lo. (SEVERINO, 2007, p. 124-125).

O presente estudo visa contribuir como preparação inicial para uma aplicação mais geral e abrangente do objeto estudado. O questionário descrito no Apêndice A foi aplicado de forma presencial a 34 executivos de empresas de capital nacional e internacional, a fim de atender aos seguintes objetivos:

- 1) Contextualizar as empresas no cenário brasileiro, identificando os setores de atuação, o setor da economia e os produtos comercializados;
- 2) Avaliar o grau de envolvimento dos executivos com os conceitos da Indústria 4.0, identificando se existe planejamento e/ou recurso financeiro para investir na compra ou modernização do parque tecnológico existente;
- 3) Medir o grau de conhecimento dos executivos em relação às necessidades e tecnologias envolvidas para implementação, utilização e manutenção da Indústria 4.0;
- 4) Identificar o novo perfil dos engenheiros que estas empresas procuram. Ou seja, quais são as qualificações e/ou conhecimento que os executivos e a empresa acreditam que este profissional deva ter; identificar quais são as tecnologias e habilidades que os atuais profissionais precisam desenvolver para atender à demanda da Indústria 4.0.
- 5) Apresentar a visão dos pesquisados a respeito da Indústria 4.0.

Em relação à sua categorização, as perguntas foram divididas da seguinte forma, de acordo com o objetivo que pretendem responder:

- **Objetivo 1:** Questões 1, 2.1, 2.2, 2.3, 3, 4.1, 4.2, 5, 6, 7, 8, 9;
- **Objetivo 2:** Questões 10, 11, 12, 15, 17, 19, 20, 29, 30;
- **Objetivo 3:** Questões 13, 18;
- **Objetivo 4:** Questões 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38;

- **Objetivo 5:** Questões 14, 16, 21, 22.1, 22.2, 23, 24, 25.1, 25.2, 26.1, 26.2, 27, 28.

De acordo com o formato das perguntas feitas, estas podem ser classificadas da seguinte forma:

- Perguntas abertas de identificação: 4.2, 5, 6, 7, 8, 9, 11;
- Perguntas categóricas de identificação: 1, 2, 2.2, 2.3, 3, 4.1, 12;
- Perguntas abertas de pesquisa de opinião: 10, 25.2, 27, 28, 29, 30, 37, 38;
- Perguntas categóricas de pesquisa de opinião: 13, 17, 18, 26.1, 26.2, 31;
- Perguntas com resposta em escala *Likert*: 14, 15, 21, 22.1, 22.2, 23, 24, 25.1, 32, 33, 34, 35, 36;
- Perguntas com resposta em escala de ordenamento: 16, 18;
- Perguntas com resposta por atribuição de nota: 19, 20.

Para o correto andamento da pesquisa foi definido que, antes da aplicação do questionário, os entrevistados deveriam ser apresentados formalmente aos conceitos da Indústria 4.0. A seguir, apresenta-se as análises estatísticas utilizadas na pesquisa.

5.1.1 Planejamento e Pesquisa

Perguntas abertas e categóricas de identificação: permitem a separação da amostra em grupos pré-definidos por meio de tabelas de frequência, tabelas de frequência cruzada, cálculos de percentual e gráficos de pizza e barras. Destarte, será possível visualizar o perfil das empresas e executivos envolvidos com a transformação digital.

Já as perguntas abertas de identificação possibilitam que o pesquisado se expresse livremente e, a partir das respostas obtidas, é possível identificar palavras-chave de interesse que condensem a opinião e o conhecimento dos pesquisados a respeito da transformação digital. Pelo caráter aberto das respostas, é possível que novas análises sejam propostas após a obtenção dos resultados.

Após a coleta de dados, serão identificados os principais grupos que compõem a amostra, acerca dos quais serão feitas análises comparativas descritivas em relação às demais perguntas quantitativas. Caso haja informações disponíveis, será comparado o perfil da empresa e do executivo brasileiros com o perfil oriundo de outros países.

Perguntas abertas e categóricas de pesquisa de opinião: Assim como as perguntas de identificação, as perguntas categóricas de pesquisa de opinião caracterizam a amostra por meio da análise das tabelas de frequência, tabelas de frequência cruzada, cálculos de percentual e gráficos de pizza e barras. Os resultados dessas questões auxiliarão a responder os objetivos 2, 3, 4 e 5. Da mesma forma, as respostas das perguntas abertas de pesquisa de opinião permitirão o mapeamento da posição dos pesquisados, avaliando subjetivamente as respostas.

Perguntas abertas e categóricas de pesquisa de opinião: No planejamento do questionário, foi definido que as perguntas em escala *Likert* possuem respostas em escala de opinião com 5 pontos, a cada resposta sendo atribuído um valor numérico, conforme o exemplo a seguir:

36. OPINE SOBRE A FRASE: o engenheiro deve ter competências que permitam a ele trabalhar bem em equipes.

(1) Discordo totalmente

(2) Discordo parcialmente

(3) Nem concordo nem discordo

4) Concordo parcialmente

5) Concordo totalmente

Os resultados das perguntas em escala *Likert* serão avaliados de duas formas, quais sejam: pelo cálculo da média dos resultados (através da soma das respostas) e através do cálculo de frequência dos resultados. Serão comparados os resultados entre os grupos identificados e entre as questões de mesma escala. Gráficos também serão utilizados para descrever os resultados.

Perguntas com resposta em escala de ordenamento: No planejamento do questionário, foi definido que as perguntas em escala de ordenamento apresentam opções a serem categorizadas por ordem de dificuldade ou relevância, conforme o exemplo a seguir:

16. ENUMERE os desafios relacionados com a implementação da Indústria 4.0 DE ACORDO COM SUA IMPORTÂNCIA E COMPLEXIDADE (na sua opinião, sendo 1 a mais importante e 7 a menos importante)

- () Padronização (Padronizar a empresa no modelo de Indústria 4.0)*
- () Mudança do Modelo*
- () Tradicional para um Novo Modelo de Negócio*
- () Disponibilidade dos produtos*
- () Falta de mão de obra qualificada*
- () Pesquisa (Financiamento de pesquisas)*
- () Framework regulatório*

Apesar de existirem técnicas estatísticas inferenciais para a análise de respostas em escala de ordenamento, estas não são aplicáveis em amostras pequenas. Assim, a avaliação dos resultados em escala de ordenamento será feita apenas através de cálculo de frequência e comparação descritiva dos resultados entre os grupos identificados.

Perguntas com resposta por atribuição de nota: No planejamento do questionário, foi definido que as perguntas com itens a serem atribuídas notas a quesitos, conforme o exemplo a seguir:

19. ATRIBUA NOTA de 1 (muito) a 5 (pouco), PARA AVALIAR a situação da sua empresa hoje, nos seguintes quesitos (adequação à Indústria 4.0)

- [] Integração vertical da cadeia*
- [] Integração horizontal da cadeia*
- [] Modelos Digitais de Negócios*
- [] Desenvolvimento e Engenharia de Produtos*
- [] Modelos Digitais de Negócios*
- [] Canais de acesso para marketing, vendas e assistência ao cliente*

Cada item da pergunta terá sua nota avaliada individualmente e entre si, pelo cálculo da média dos resultados. Além disso, serão comparados os resultados entre os grupos identificados. Gráficos também serão utilizados para descrever os resultados.

5.2 Indústria de *Utilities*

Como informado por Mckinsey (2016), BCG (2015), Gartner (2015) e I-scoop (2016), a indústria de *Utilities* ainda não sabe ao certo os efeitos da transformação digital e nem como começar a aplicar os conceitos, e, portanto, o estudo torna-se uma contribuição para o cenário da Indústria de *Utilities*.

Em Accenture (2016) é informado que a transformação digital deve ocorrer em toda a cadeia de *Utilities*. E, ao olhar para todo o ecossistema da indústria de *Utilities*, é necessário quebrar a cadeia para encontrar os desafios e oportunidade por cada elemento. A Accenture (2016) resumiu a cadeia de suprimentos da Indústria de *Utilities* em três grandes grupos, os quais podem ser observado na Figura 35:

- **Supply:** onde são gerados os recursos;
- **Network:** onde ocorre a transmissão e distribuição;
- **Retail:** consumidores.

Figura 35 – *Digital Utility* por Accenture.

Fonte: Accenture (2016).

Nas próximas etapas discute-se a questão da transformação digital na Indústria de *Utilities* e, especificamente, em uma estação de tratamento de água. O foco da presente pesquisa é na camada de *supply*, em que é realizada a captação da água bruta e para posterior tratamento.

5.2.1 Plataformas para a transformação digital

Nesta grande área de *Utilities* destaca-se uma plataforma para transformação digital para a área de energia denominada FINESCE (*Future Internet Smart Utility Services*) *Smart Energy Plataforma*, que serviu como base para a definição da nova plataforma para o tratamento e distribuição da água.

O projeto em questão fornece exemplos de melhores práticas que mostram a importância de se trabalhar com soluções digitalizadas e baseados em nuvem para o setor de energia, preparando-se para o futuro. A definição Utility 4.0 – que são novos serviços de energia ativados por plataformas de TIC – trata da implementação de sete diferentes *sites* na Europa, sendo que cada um destes *sites* mostra a viabilidade de utilização do FIWARE para uma solução específica de *Smart Energy*. Parte-se do princípio de que a energia tornar-se-á cada vez mais importante devido à transição para um sistema energético baseado principalmente em energias renováveis, os projetos (FINESCE, 2016) são:

- Malmö – Smart Buildings;
- Horsens – Smart Prosumer;
- Madrid – Smart Building;
- Aachen – Smart Factory & Virtual Power Plant;
- Terni – Smart Grid & Energy Marketplace;
- Dublin – E-Car Grid Integration;
- Ireland – Smart Grid Communication in Portlaoise.

Todos esses projetos utilizam o FIWARE, o conceito de GE (*Generic Enablers*), DSE (*Domain Specific Enablers*) e API (*Application Program Interface*) para prover a plataforma. Na Figura 36 é possível observar a arquitetura de alto nível do FIWARE.

Figura 36 – Plataforma SMART Energy.

Fonte: FINESCE (2016).

Dentre os projetos citados, o Terni – Smart Grid & Energy Marketplace, descrito na Figura 37, possui uma interface DSE para condição do tempo, na qual são coletados dados sobre a previsão do tempo a cada 5 minutos e enviados ao *ORION Context Broker*. Já a interface DSE de “eventos sociais” é um método em que um agente externo pode prover informações sobre eventos sociais que podem afetar a produção e o consumo de energia, tais como: concertos, partida de futebol e eventos sociais genéricos. O GE *Big Data* (COSMOS), *Context Broker* GE (ORION) e o *Complex Event Processing* GE (PROTON) são integrados como parte central da arquitetura.

Figura 37 – Terni – Smart Grid & Energy Marketplace.

Fonte: FINESCE (2016).

Adicionalmente, pesquisou-se o projeto da Finodex (*Future Internet Open Data Expansion*), que é uma iniciativa financiada pela Comissão Europeia cujo objetivo é fomentar a criação de produtos e serviços inovadores baseados em dados abertos. E, neste contexto, o projeto conta com a estrutura do FIWARE (utilizando a sua plataforma aberta para oferecer novos serviços e aplicativos) com a empresa Adevice, de Sevilha, na Espanha (que fornece *hardware* industrial adequado para aplicações FIWARE, tais como: *gateways* e *devices* para coleta de dados). O objetivo desta integração é a implementação de um projeto-piloto chamado *Smart Fountain*, que permite a medição de parâmetros de qualidade da água em fontes municipais e piscinas da cidade de Sevilha, sendo um exemplo de combinação dos requisitos da Indústria 4.0 com cidades inteligentes. Na Figura 38 é possível observar a arquitetura definida.

Figura 38 – Arquitetura de comunicação FINODEX Sevilha.

Fonte: Cabezas (2016).

Na Figura 39 é demonstrado o *dashboard* e a descrição do projeto apresentado no Congresso Mundial de Cidades Inteligentes, em Barcelona (CABEZAS, 2016).

Figura 39 – Smart Fountain.

Fonte: Cabezas (2016).

5.3 Proposta baseada na transformação digital

Considerando-se todo o processo relacionado com a Indústria de *Utilities* para o tratamento de água e tendo como base a plataforma FINESCE *Smart Energy*, é proposta uma nova arquitetura baseada nas tecnologias habilitadoras e nas visões para a transformação digital. Tal como informado no Capítulo 2, a arquitetura piramidal da automação é baseada nos conceitos de 5 camadas. Para efeitos de ilustração, na Figura 40 é demonstrada a planta de tratamento de água dentro deste modelo atual.

Figura 40 – Arquitetura Piramidal de uma ETA.

Fonte: Próprio autor.

Utilizando-se as tecnologias habilitadoras e as visões para a transformação digital, é proposta uma nova arquitetura baseada em 03 camadas, e não mais piramidal, mas sim, colaborativa. A nova arquitetura *high-level* pode ser observada na Figura 41, trabalhando conforme descrito a seguir:

- **Camada 1:** É a camada de borda, chamada de *edge computing*. Nesta camada encontram-se os sistemas ciberfísicos e IoT, bem como a sua comunicação para as camadas superiores;
- **Camada 2:** Nesta camada se encontram a operação e o controle da planta, que pode ser realizado de forma manual – através de decisão de um operador – ou de forma automática, através de decisão de algoritmo de *machine learning*. Nesta camada encontram-se também os dados para decisão gerencial;
- **Camada 3:** As aplicações com interação *real-time* no chão de fábrica e reorganização conforme demanda ou condição climática.

Figura 41 – Nova Arquitetura *high-level* proposta.

Fonte: Próprio autor.

Para que fosse possível a discussão para o novo modelo, foi realizada a migração do sistema de tratamento de água para esta nova arquitetura considerando os seguintes níveis de automação descritos na Tabela 9:

Tabela 9 – Acionamentos da ETA.

Id	Etapas	Ação física	Análise	Não Conformidade	Ação
01	Captação	Acionamento de bomba, válvula, sensor de nível e dosagem	Turbidez, PH e OD	Providenciar solução para correção	Controlar pré-dosagem de cal hidratada Controlar dosagem de Policloreto de Alumínio Controlar pré-cloração
02	Floculação	Bomba, Sensor de nível, dosagem e Inversor de frequência	Perda de floculação	Providenciar solução para correção	Aplicar solução para normalizar, identificando a necessidade de qual dosagem é necessária (cal hidratada, policloreto de alumínio ou pré-cloração)
03	Decantação	Bomba, Sensor de nível e dosagem	Perda de decantação	Providenciar solução para correção	Aplicar solução para normalizar, identificando a necessidade de qual dosagem é necessária (cal hidratada, policloreto de alumínio ou pré-cloração)
04	Filtragem	Bomba e sensor de nível	Filtragem dentro da norma	Lavar filtro	Parar bomba, esvaziar filtro e iniciar lavagem manual
05	Desinfecção	Bomba, sensor de nível e dosagem	Qualidade da água	Controlar adição de flúor e ph	Dosar valor recomendado
06	Distribuição	Bomba e sensor de nível	Perda de água	Identificar vazamento	Acionar equipe de manutenção
07	Consumo	Relógio de medição no consumidor	Consumo	Identificar perdas e/ou vazamento	Acionar equipe de manutenção

Fonte: Próprio autor.

A escolha do FIWARE deu-se pelo fato de ser um ecossistema de inovação *open-source* que disponibiliza aos programadores as funcionalidades e as propriedades necessárias para o desenvolvimento de soluções e aplicações na *cloud*, assim como permite a disponibilização de dados abertos e a comunicação de suas necessidades específicas. Com base nestas definições, chegou-se à arquitetura definida a seguir, na Figura 42.

Figura 42 – Arquitetura utilizando FIWARE para tratamento de água baseado na Indústria 4.0.

Fonte: Próprio autor.

Os ganhos observados na utilização dessa arquitetura, se comparada com a arquitetura tradicional, são:

- 1) Utilização de dados históricos para prever necessidades, colaborando com toda a cadeia de suprimento para atender à demanda;
- 2) A partir de um local remoto, conseguir gerenciar as fontes de água e ter o controle e o uso definidos por processos automatizados;
- 3) Integrar-se a fontes de dados não relacionadas à água, tais como: governo, pesquisa e indústria, de uma maneira geral, para acompanhar os esforços de conservação e melhoria contínua da operação existente;
- 4) Por meio do uso de *dashboards*, aumentar a visibilidade das instalações de ativos e melhorar o desempenho e análise de dados;
- 5) Utilização de dados em tempo real sobre eventos climáticos para antecipar as mudanças na disponibilidade ou necessidades de recursos;
- 6) Propiciar aos consumidores um maior controle e visibilidade do consumo e dos recursos residencial e da cidade para direcionar esforços na conservação do recurso;
- 7) Utilização dos dados para descobrir melhorias nos procedimentos e, assim, proporcionar um melhor atendimento aos cidadãos;
- 8) Melhoria na precisão das leituras dos medidores de água com maior frequência.

Para a definição do cenário, foi incorporado o estudo do projeto PURA-USP e estendido ao projeto SafeCity junto ao convênio Huawei – USP, obtendo-se como estudo de caso o *campus* da Universidade de São Paulo. O principal objetivo é contribuir com o estudo de um dos problemas no conceito de cidades inteligentes, especificamente na distribuição e tratamento de água, podendo posteriormente ser expandido para um contexto e um cenário mais global.

O projeto PURA-USP foi criado em 1998 como um programa de uso racional da água na Universidade de São Paulo. O principal objetivo do Programa é reduzir o consumo e estabelecer um sistema estruturado de gestão da demanda. O estudo mostra que o projeto obteve destaque na eliminação de vazamentos, no apoio para decisão de substituição de equipamentos sanitários convencionais por modelos economizadores e minimização de desperdícios em processos. O projeto PURA-USP obteve resultados da ordem de 43% na redução do consumo e registrou necessidade de alterações nos sistemas prediais, nas rotinas administrativas e na manutenção predial, além de mudanças comportamentais dos usuários (SANCHES; TAMAKI; GONÇALVES, 2007).

Os autores Sanches, Tamaki e Gonçalves enfatizam que:

Um Programa de Uso Racional da Água faz-se com muito mais que a simples eliminação de vazamentos e a substituição de equipamentos. Faz-se com o caráter permanente do programa, com a gestão contínua da demanda de água e, principalmente, com a mudança de comportamento dos usuários, tornando-se estes cada vez mais conscientes. (SANCHES; TAMAKI; GONÇALVES, 2007, p. 55).

No estudo “A Medição Setorizada Como Instrumento De Gestão Da Demanda De Água Em Sistemas Prediais – Estudo De Caso: Programa De Uso Racional Da Água Da Universidade De São Paulo” (TAMAKI; SANCHES; GONÇALVES, 2006), concluiu-se que muitos dos benefícios obtidos e relatados do caso da Universidade de São Paulo podem ser extrapolados para situações semelhantes de implantação da medição setorizada com fins de gestão da demanda de água, devendo-se observar as considerações levantadas e as particularidades de cada aplicação.

No artigo “*Towards an IoT Based Water Management System for a Campus*” (VERMA et al., 2015), discute-se o projeto e os resultados de um sistema baseado em IoT para o gerenciamento da distribuição de água em um *campus*. O escopo é focado em dois componentes, quais sejam: 1) sensor de baixo custo e ultrassônico para medição do nível de água; e 2) uma rede *wireless* sub-GHz para conexão dos sensores.

A rede é conectada em um *gateway* que pode fazer atualização *online* dos dados para visualização e *analytics*. Na Figura 43(a) são apresentadas as conexões dos sensores e, na Figura 43(b), um exemplo de sensor.

Figura 43 – Componentes – (a) conexões dos sensores (b) sensor.

Fonte: PRACHET et al. (2015)

Observando-se os estudos mencionados – Prachet et al. (2015), Sanches, Tamaki e Gonçalves (2007), Sanches, Tamaki e Gonçalves (2006) e Tamaki, Sanches e Gonçalves (2006) –, a pesquisa visa contribuir com o projeto PURA-USP fornecendo uma plataforma que atenda aos requisitos expostos pelos autores do projeto PURA-USP (gestão contínua da demanda da água), utilizando-se para isto as tecnologias habilitadoras à luz das visões da transformação digital.

O escopo é centrado na questão da água, especificamente em uma região restrita e no *campus* da USP, denominada *SmartUSP*. Na Figura 44 é apresentada a plataforma para transformação digital tendo como ponto de partida o projeto PURA-USP.

Figura 44 – Plataforma da Transformação Digital.

Fonte: Adaptado de Smart City (2016).

A plataforma descrita na Figura 44 é parte integrante do projeto Huawei-USP – Safe City, sendo que sua implementação foi realizada no laboratório do LSI-PAD. Nas Figuras 45 e 46 é possível visualizar o rack no qual os equipamentos foram instalados.

Figura 45 – Racks do Projeto SafeCity – (a) Vista Frontal (b) Vista traseira.

(a)

(b)

Fonte: Próprio autor.

Figura 46 – Racks – (a) Huawei (b) FIWARE.

(a)

(b)

Fonte: Próprio autor.

Os equipamentos descritos na Figura 47 se comunicam com uma série de sensores utilizados para o controle da água, sendo que um desses sensores é demonstrado na Figura 48. Toda a comunicação é registrada no *dashboard* – um exemplo é descrito na Figura 49 – para que assim se tenha o acompanhamento *online* de todo o consumo e demais informações que forem necessárias (temperatura, localização, condição climática, etc.). As informações geradas pelos sensores também são armazenadas e podem ser utilizadas para tomada de decisões ou previsão de consumo. Adicionalmente, é incorporado um módulo de eventos sociais para que possa antecipar um eventual aumento de consumo devido a eventos ou necessidades específicas que venham a surgir no espaço monitorado.

Figura 47 – IoT para Água - (a) Bancada 01 (b) Bancada 02.

(a)

(b)

Fonte: Próprio autor.

Figura 48 – Sensores - (a) Fluxo (b) Pressão (c) Temperatura.

(a)

(b)

(c)

Fonte: Smart City (2016)

Figura 49 – FreeBoard on Water.

Fonte: Adaptado de Smart City (2016).

Para realização dos testes na nova plataforma foi utilizado o *dataset* obtido na pesquisa de Azevedo (2010). Na Figura 50 é possível observar o ambiente simulado com o sistema de controle e aquisição de dados e os componentes da rede industrial. Um analisador de protocolo foi utilizado para monitorar o tráfego, bem como a comunicação entre o servidor e o cliente.

O tráfego gerado por Azevedo (2010) trata-se de todo o processo de tratamento e distribuição de água, sendo que para a realidade do projeto PURA-USP foram utilizados os parâmetros de vazão e pressão de água, posteriormente foram aplicadas as técnicas de *machine learning*.

Figura 50 – Ambiente Simulado.

Fonte: Azevedo (2010).

O *dataset* informado foi estudado com o objetivo de identificar se com a leitura de dados históricos para as variáveis de pressão e vazão poderia se prever um vazamento, e adicionalmente se tais variáveis e outras podem influenciar na qualidade final da água. No contexto de *machine learning*, a técnica que melhor se adapta a esta necessidade é a regressão linear, pois através de um modelo matemático é possível analisar a relação entre as variáveis.

O conjunto de dados utilizado de Azevedo (2010) contém as informações de vazão, pressão e outras; adicionalmente foram utilizados dados de um projeto denominado *Faults in a urban waste water treatment plant*, criado por Manel Poch e Javier Bejar, respectivamente das universidades Autonoma de Barcelona e Politecnica de Catalunya. Sendo o objetivo considerar este conjunto de dados e obter uma função que permita, a um só tempo, acompanhar as variáveis descritas em tempo real e que seja possível prever um vazamento e, adicionalmente, a qualidade final da água. O modelo de regressão pode ser escrito genericamente como:

$$Y = f(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n) + \varepsilon$$

Considerando-se o contexto de *machine learning* e, por ter um conjunto de dados histórico, trata-se de um algoritmo supervisionado. Pretende-se prever os valores de uma variável em função da outra variável, para isto tem-se:

Variável Dependente – a que se procura prever;

Variável Independente – a que gera a previsão.

O objetivo é obter uma reta que melhor se aproxime da relação entre a variável dependente e a variável independente. A equação que melhor representa esta aproximação é:

$$Y_i = b_0 + b_1 X_i + \varepsilon_i$$

Em que:

Y_i = Variável dependente;

b_0 = Coeficiente linear;

b_1 = Coeficiente angular;

X_i = Variável independente;

ε_i = Fatores residuais e erros de medição.

Cálculo dos fatores b_0 e b_1 :

$$\hat{b}_0 = \bar{Y} - \hat{b}_1 \bar{X}$$

$$\hat{b}_1 = \frac{n(\sum xy) - (\sum x)(\sum y)}{n(\sum x^2) - (\sum x)^2}$$

Os resultados relacionados à primeira parte da metodologia, que diz respeito ao estudo da transformação digital nas indústrias da região de Campinas, podem ser

verificados no capítulo 6, na seção 6.1. Já os resultados para a segunda parte da metodologia, que concerne à transformação digital na indústria de *Utilities*, podem ser verificados na seção 6.2.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Do mesmo modo como se precedeu no que se refere à metodologia, o capítulo concernente aos resultados foi dividido em duas partes, a saber: na seção 1 são discutidos os resultados da transformação digital nas indústrias da região de Campinas; na seção 2 são discutidos os resultados da transformação digital no contexto do *campus* (capital) da Universidade de São Paulo.

6.1 Transformação digital nas indústrias da região de campinas

Nas seções a seguir – por meio das Tabelas de 10 a 43 e também pelos Gráficos de 1 a 19 – são apresentados os resultados relativos aos objetivos definidos:

- **Objetivo 01:** Contextualizar as empresas no cenário brasileiro;
- **Objetivo 02:** Avaliar o grau de envolvimento das empresas com os conceitos da transformação digital;
- **Objetivo 03:** Avaliar o grau de conhecimento dos executivos em relação às necessidades e tecnologias envolvidas para implementação, utilização e manutenção da transformação digital;
- **Objetivo 04:** Identificar o novo perfil dos engenheiros para este novo paradigma;
- **Objetivo 05:** Apresentar a visão dos pesquisados a respeito da transformação digital.

Ao final é apresentada uma breve discussão sobre os dados coletados. Para o objetivo 1, seguem os resultados e discussões:

Tabela 10 – Faturamento anual das empresas.

Pergunta 1	
Tamanho (Faturamento anual da empresa em milhões de Reais)	Qtde. (%)
até 16	18 (52,9)
de 16 a 90	8 (23,5)
de 90 a 300	6 (17,6)
acima de 300	2 (5,9)
Total	34 (100)

Fonte: Próprio autor.

Tabela 11 – Procedência do Capital Controlador.

Pergunta 2.1	
Procedência do capital controlador	Qtde. (%)
Estrangeiro*	4 (11,8)
Nacional	22 (64,7)
Nacional e Estrangeiro	8 (23,5)
Total	34 (100)

* Procedência relatada: Estados Unidos (todos)

Fonte: Próprio autor.

Tabela 12 – Número de Funcionários.

Pergunta 3	
Número de funcionários	Qtde. (%)
até 100	15 (44,1)
de 101 a 500	10 (29,4)
de 501 a 1000	5 (14,7)
acima de 1001	4 (11,8)
Total	34 (100)

Fonte: Próprio autor.

Tabela 13 – Ramo de Atividade.

Pergunta 4.1	
Ramo de atividade	Qtde. (%)
Empresa de Engenharia	5 (14,7)
Empresa de Serviço	15 (44,1)
Empresa Fabricante de Bens de Consumo	3 (8,8)
Empresa Fabricante de Máquina e Equipamentos de Produção	4 (11,8)
Outras	7 (20,6)
Total	34 (100)

Fonte: Próprio autor.

Gráfico 1 – Ramo de Atividade.

Fonte: Próprio autor.

Tabela 14 – Formação Acadêmica dos Entrevistados.

Pergunta 5 (agrupado)	
Graduação	Qtde. (%)
Eng. Produção	10 (29,4)
Administração	7 (20,6)
Eng. Elétrica	5 (14,7)
Ciências Econômicas	2 (5,9)
Ciência da Computação	4 (12)
Ciências Contábeis	1 (2,9)
Educação	1 (2,9)
Eng. Alimentos	1 (2,9)
Eng. Mecatrônica	1 (2,9)
Relações Públicas	1 (2,9)
Não Informado	1 (2,9)
Total	34 (100)

Fonte: Próprio autor.

Tabela 15 – Universidade de Graduação.

Pergunta 7 (agrupado)	
Universidade da graduação	Qtde. (%)
UNICAMP	3 (8,8)
Anhanguera	2 (5,9)
FAAP	2 (5,9)
UNINOVE	2 (5,9)
USP	2 (5,9)
FACAMP	2 (5,9)
FACH	2 (5,9)
UNESP	1 (2,9)
Outra	10 (29,4)
Total	31 (91,2)

Fonte: Próprio autor.

Tabela 16 – Ano de Graduação.

Pergunta 8		
Variável	Mínimo	Máximo
Ano de graduação	1987	2015

Fonte: Próprio autor.

Tabela 17 – Especialização dos Entrevistados.

Pergunta 9 (agrupado)	
Possui pós-graduação	Qtde. (%)
Nenhuma	8 (23,5)
Pós-Graduação	9 (26,5)
MBA	8 (23,5)
Mestrado	6 (17,6)
Doutorado	3 (8,8)
Total	34 (100)

Fonte: Próprio autor.

Para o objetivo 01, em relação à amostra estudada, foi constatado que ocorreu uma grande participação das empresas de pequeno porte com capital nacional e com até 100 funcionários em seu quadro de colaboradores, tendo como principal ramo a prestação de serviço. As grandes indústrias e fabricantes de bens de consumo e máquinas representam um número pequeno da amostra.

Para o objetivo 2, seguem os resultados e discussões:

Tabela 18 – Envolvimento com a Indústria 4.0.

Pergunta 12: De que forma está envolvido com este tópico? Marque mais de uma opção, se necessário.

Formas de Envolvimento	Qtde.
Obtendo informação	10
Envolvido em pesquisa	8
Colocando os conceitos em prática	5
Outras (Especifique)	1

Fonte: Próprio autor.

Gráfico 2 – Faturamento anual das empresas.

Fonte: Próprio autor.

Tabela 19 – Importância da Indústria 4.0.

Pergunta 15: Como você avalia a importância (da aplicação das práticas) da Indústria 4.0 para a competitividade da sua empresa?

Importância da prática	Qtde. (%)
Indispensável	8 (23,5)
Muito Importante	7 (20,6)
Importante	17 (50)
Pouco Importante	1 (2,9)
Sem Importância	1 (2,9)
Total	34 (100)

Fonte: Próprio autor.

Gráfico 3 – Importância da Indústria 4.0.

Fonte: Próprio autor.

Tabela 20 – Iniciativas para popularização.

Pergunta 17		Grau de importância da iniciativa							Posição Média
Iniciativa		1	2	3	4	5	6	7	
Oportunidades presenciais para compartilhar experiências		9	5	8	17	10	14	5	4,12
Fóruns <i>online</i>		8	16	6	4	8	1	7	3,38
Treinamentos e Seminários		4	3	3	3	0	1	1	2,93
Grupos de Trabalhos		1	2	2	4	4	4	0	4,18
Envolvimento em projetos de pesquisa		8	3	4	1	3	0	0	2,37
Laboratório de Testbed		4	12	7	6	10	7	4	3,86

Fonte: Próprio autor.

Tabela 21 – Situação da Empresa.

Pergunta 19 e 20		
Situação da empresa	Nota média atual	Nota média prevista
Integração vertical da cadeia	3,50	2,44
Integração horizontal da cadeia	2,35	2,38
Modelos Digitais de Negócios	2,47	2,76
Desenvolvimento e Engenharia de Produtos	3,15	3,35
Modelos Digitais de Negócios	4,50	4,71
Canais de acesso para <i>marketing</i> , vendas e assistência ao cliente	5,03	5,35

Fonte: Próprio autor.

Gráfico 4 – Situação das Empresas.

Fonte: Próprio autor.

Tabela 22 – Envolvimento com a Indústria 4.0.

Pergunta 11	
Envolvimento na Indústria 4.0	Qtde. (%)
Sim	15 (44,1)
Não	19 (55,9)
Total	34 (100)

Fonte: Próprio autor.

Tabela 23 – Conhecimento da Indústria 4.0.

Pergunta 10 (Agrupado)	
Como conhece a Indústria 4.0	Qtde. (%)
Vivência Profissional	7 (20,6)
Leitura de artigos sobre o tema	6 (17,6)
Pesquisa dentro da Universidade	3 (8,8)
Sem Experiência	18 (52,9)
Total	34 (100)

Fonte: Próprio autor.

Já para o objetivo 02, foi constatado que mais da metade dos entrevistados não está envolvida com a transformação digital e o conhecimento do tema ocorre somente pela questão teórica, de modo que não há aplicabilidade dos conceitos na realidade prática das empresas. Grande parte dos entrevistados considera importante a necessidade de oportunidades presenciais para compartilhar experiências e também a criação de grupo de trabalhos para discussão e disseminação do conhecimento sobre o tema. O modelo digital de negócio foi considerando o item mais relevante para caracterizar a transformação digital.

Para o objetivo 3, seguem os resultados e discussões:

Tabela 24 – Iniciativas para a Transformação Digital.

Iniciativa	Qtde.
Industrial Internet Consortium	6
Advanced Manufacturing Partnership 2.0	2
Smart Manufacturing Leadership Coalition	4
Catapult Centers	0
Factories of the Future	5
Made in China 2025	6
Industrie du futur	5
Manufacturing Innovation 3.0	9

Fonte: Próprio autor.

Gráfico 5 – Iniciativas para a Transformação Digital.

Fonte: Próprio autor.

Tabela 25 – Relevância para a Transformação Digital.

Pergunta 18	Relevância para caracterização da Indústria 4.0							
Tópico	1	2	3	4	5	6	7	Posição Média
Integração e melhor gerenciamento da cadeia de Valor	8	12	4	4	0	1	5	2,97
Integração da cadeia de valor na empresa	7	7	7	1	4	1	7	3,56
Sistema de produção integrando o "mundo" virtual com o real	8	7	5	6	3	4	1	3,15
Modelo de negócio digital	7	4	5	8	10	0	0	3,29
Digitalização e interconexão de produtos e serviços	0	1	4	13	9	7	0	4,50
Tecnologia de evolução exponencial	2	2	3	2	6	15	4	5,03
Analytics	2	1	6	0	2	6	17	5,50

Fonte: Próprio autor.

Tabela 26 – Transformação para o Engenheiro 4.0.

Pergunta 38 (agrupado)	
Tópicos necessários na educação do engenheiro formando	Qtde.
Aplicação Prática	6
Motivacional	1
Mudança de Currículo	1

Fonte: Próprio autor.

Para o objetivo 03, foi identificado que os entrevistados conhecem outras visões da transformação digital além da Indústria 4.0, porém, não de uma maneira unificada, haja vista ter ocorrido a incidência de várias visões. A pesquisa identificou que a relevância e o sucesso para a transformação digital no cenário Brasil ocorrerá em relação à correta aplicação do *big data analytics*, trabalhando de forma cooperativa com as tecnologias habilitadoras.

Para o objetivo 4, seguem os resultados e discussões:

Tabela 27 – Competências Necessárias para o Engenheiro 4.0.

Pergunta 31: MARQUE a competência técnica QUE CONSIDERA MAIS IMPORTANTE aos Engenheiros para o bom desempenho de suas atividades nos novos cenários da Indústria 4.0	
Competência técnica	Qtde. (%)
Digitalização e interconexão de produtos e serviços	3 (8,8)
Integração da cadeia de valor na empresa	4 (11,8)
Integração e melhor gerenciamento da cadeia de Valor	6 (17,6)
Modelo de negócio digital	10 (29,4)
Sistema de produção integrando o “mundo” virtual com o real	7 (20,6)
Tecnologia de evolução exponencial	4 (11,8)
Total	34 (100)

Fonte: Próprio autor.

Gráfico 6 – Competências Importantes para a Transformação Digital.

Fonte: Próprio autor.

Tabela 28 – Grau Atual de Aderência na Formação.

Pergunta 32	
Grau da aderência da formação	Qtde. (%)
Muito Alta	1 (2,9)
Alta	6 (17,6)
Média	13 (38,2)
Baixa	12 (35,3)
Baixíssima	2 (5,9)
Total	34 (100)

Fonte: Próprio autor.

Gráfico 7 – Grau Atual de Aderência na Formação.

Fonte: Próprio autor.

Tabela 29 – Necessidades de Competências Soft.

Pergunta 33: Para este novo cenário tecnológico haveria a necessidade de maior competência “soft”	
Opinião sobre a frase	Qtde. (%)
Concordo totalmente	6 (17,6)
Concordo parcialmente	15 (44,1)
Nem concordo nem discordo	9 (26,5)
Discordo parcialmente	3 (8,8)
Discordo totalmente	1 (2,9)
Total	34 (100)

Fonte: Próprio autor.

Gráfico 8 – Necessidades de Competências Soft.

Fonte: Próprio autor.

Tabela 30 – Responsabilidade de desenvolvimento das Competências Soft.

Pergunta 34: O papel do desenvolvimento das Competências “soft” deveria ser da Universidade.	
Opinião sobre a frase	Qtde. (%)
Concordo totalmente	6 (17,6)
Concordo parcialmente	17 (50)
Nem concordo nem discordo	7 (20,6)
Discordo parcialmente	4 (11,8)
Discordo totalmente	0 (0)
Total	34 (100)

Fonte: Próprio autor.

Gráfico 9 – Responsabilidade de desenvolvimento das Competências *Soft*.

Fonte: Próprio autor.

Tabela 31 – Engenheiro com Competências Interdisciplinares.

Pergunta 35: O engenheiro deve ter competências interdisciplinares.	
Opinião sobre a frase	Qtde. (%)
Concordo totalmente	19 (55,9)
Concordo parcialmente	7 (20,6)
Nem concordo nem discordo	6 (17,6)
Discordo parcialmente	2 (5,9)
Discordo totalmente	0 (0)
Total	34 (100)

Fonte: Próprio autor.

Gráfico 10 – Engenheiro com Competências Interdisciplinares.

Fonte: Próprio autor.

Tabela 32 – Engenheiro e Trabalho em Equipe.

Pergunta 36: O engenheiro deve ter competências que permitam a ele trabalhar bem em equipes.	
Opinião sobre a frase	Qtde. (%)
Concordo totalmente	20 (58,8)
Concordo parcialmente	8 (23,5)
Nem concordo nem discordo	5 (14,7)
Discordo parcialmente	1 (2,9)
Discordo totalmente	0 (0)
Total	34 (100)

Fonte: Próprio autor.

Para o objetivo 04, os entrevistados consideram que o novo engenheiro deve ter conhecimento de novas tecnologias aplicadas à capacidade de trabalhar em equipe, além do conhecimento de toda a cadeia produtiva aliada ao negócio da empresa. O questionário identificou que, segundo os entrevistados, a formação atual dos engenheiros não atende aos desafios proporcionados pela transformação digital e à complexidade que a transformação digital demanda, sendo necessário rever a questão de formação de novos profissionais.

Para o objetivo 5, seguem os resultados e discussões:

Tabela 33 – Dificuldades para Implantação da Transformação Digital.

Pergunta 26.1	
Problemas associados aos ajustes para a indústria 4.0	Qtde. (%)
Primordialmente administrativo (ajuste de procedimentos considerando a nova realidade)	5 (14,7)
Primordialmente técnico (novas tecnologias)	15 (44,1)
Balanceado entre técnico e administrativo	14 (41,2)
Total	34 (100)

Fonte: Próprio autor.

Gráfico 11 – Dificuldades para Implantação da Transformação Digital.

Fonte: Próprio autor.

Tabela 34 – Tecnologias para Transformação Digital.

Pergunta 26.2	
Tecnologias mais relevantes	Qtde.
Internet das Coisas (IoT)	24
Computação em Nuvem	26
Big Data	7
Sistemas Ciberfísicos (CPS)	8
Comunicação Máquina Máquina (M2M)	5
RFID	3
Analytics	13

Fonte: Próprio autor.

Gráfico 12 – Dificuldades para Implantação da Transformação Digital.

Fonte: Próprio autor.

Tabela 35 – Complexidade para Implantação da Transformação Digital.

Pergunta 14	
Grau de complexidade da implantação dos conceitos da Indústria 4.0	Qtde. (%)
Extremamente Complexo	11 (32,4)
Muito Complexo	7 (20,6)
Complexo	16 (47,1)
Baixa Complexidade	0 (0)
Mínima Complexidade	0 (0)
Total	34 (100)

Fonte: Próprio autor.

Gráfico 13 – Complexidade para Implantação da Transformação Digital.

Fonte: Próprio autor.

Tabela 36 – Potenciais Benefícios da Transformação Digital.

Pergunta 21: A indústria 4.0 trará potenciais benefícios e necessidades para o mundo.	
Opinião sobre a frase	Qtde. (%)
Concordo totalmente	12 (35,3)
Concordo parcialmente	14 (41,2)
Nem concordo nem discordo	8 (23,5)
Discordo parcialmente	0 (0)
Discordo totalmente	0 (0)
Total	34 (100)

Fonte: Próprio autor.

Gráfico 14 – Potenciais Benefícios da Transformação Digital.

Fonte: Próprio autor.

Tabela 37 – Desenvolvimento da Transformação Digital.

Pergunta 22.1: Para desenvolvimento da indústria 4.0 devemos identificar os conceitos e tendências em tecnologias e mercados relacionados, incluindo cadeias de valor	
Opinião sobre a frase	Qtde. (%)
Concordo totalmente	13 (38,2)
Concordo parcialmente	10 (29,4)
Nem concordo nem discordo	9 (26,5)
Discordo parcialmente	1 (2,9)
Discordo totalmente	1 (2,9)
Total	34 (100)

Fonte: Próprio autor.

Gráfico 15 – Desenvolvimento da Transformação Digital.

Fonte: Próprio autor.

Tabela 38 – Evolução da Tecnologia e Impactos da Transformação Digital.

Pergunta 22.2: A evolução das tecnologias e seus impactos na indústria 4.0 devem ser analisados e avaliados	
Opinião sobre a frase	Qtde. (%)
Concordo totalmente	18 (52,9)
Concordo parcialmente	5 (14,7)
Nem concordo nem discordo	9 (26,5)
Discordo parcialmente	2 (5,9)
Discordo totalmente	0 (0)
Total	34 (100)

Fonte: Próprio autor.

Gráfico 16 – Evolução da Tecnologia e Impactos s da Transformação Digital.

Fonte: Próprio autor.

Tabela 39 – Indústria Brasileira preparada para a Transformação Digital.

Pergunta 23: A indústria brasileira está preparada para assumir o risco para evolução para indústria 4.0	
Opinião sobre a frase	Qtde. (%)
Concordo totalmente	2 (5,9)
Concordo parcialmente	10 (29,4)
Nem concordo nem discordo	8 (23,5)
Discordo parcialmente	11 (32,4)
Discordo totalmente	3 (8,8)
Total	34 (100)

Fonte: Próprio autor.

Gráfico 17 – Indústria Brasileira preparada para a Transformação Digital.

Fonte: Próprio autor.

Tabela 40 – Alteração da Cadeia Produtiva na Transformação Digital.

Pergunta 24: O novo paradigma associado à Indústria 4.0 alterará a distribuição global da cadeia produtiva, aumentando a flexibilidade das linhas de produção, viabilizando a customização em massa e, desta forma, criando melhores oportunidades para aquelas regiões com baixo custo quando em comparação com as de mais alto custo.

Opinião sobre a frase	Qtde.	(%)
Concordo totalmente	11	(32,4)
Concordo parcialmente	10	(29,4)
Nem concordo nem discordo	10	(29,4)
Discordo parcialmente	1	(2,9)
Discordo totalmente	2	(5,9)
Total	34	(100)

Fonte: Próprio autor.

Gráfico 18 – Alteração da Cadeia Produtiva na Transformação Digital.

Fonte: Próprio autor.

Tabela 41 – Indústria Brasileira e a importância para a Transformação Digital.

Pergunta 25.1: A Indústria 4.0 criará oportunidades que permitam aumento da presença e importância da indústria nacional brasileira no cenário global

Opinião sobre a frase	Qtde. (%)
Concordo totalmente	12 (35,3)
Concordo parcialmente	11 (32,4)
Nem concordo nem discordo	10 (29,4)
Discordo parcialmente	1 (2,9)
Discordo totalmente	0 (0)
Total	34 (100)

Fonte: Próprio autor.

Gráfico 19 – Indústria Brasileira e a importância para a Transformação Digital.

Fonte: Próprio autor.

Tabela 42 – Desafios para a Transformação Digital.

Desafio	Importância e complexidade do desafio						Posição Média
	1	2	3	4	5	6	
Padronização (Padronizar a empresa no modelo de Indústria 4.0)	9	5	7	6	13	0	3,23
Mudança do Modelo Tradicional para um Novo Modelo de Negócio	14	8	10	6	0	3	2,49
Disponibilidade dos produtos	2	8	4	0	3	9	3,81
Falta de mão de obra qualificada	5	6	0	5	4	1	3,00
Pesquisa (Financiamento de pesquisas)	3	0	9	2	2	0	3,00
Framework regulatório	0	5	6	3	7	7	4,18

Fonte: Próprio autor.

Tabela 43 – Dificuldades para a Transformação Digital.

Pergunta 28 (agrupado)	
Dificuldades a serem enfrentadas pela Indústria 4.0	Qtde.
Profissionais capacitados	6
Investimento	5
Legislação	4
Legislação / Profissionais capacitados	1
Outras	2

Fonte: Próprio autor.

Para o objetivo 05, foi identificado que os entrevistados consideram a transformação digital como algo que ainda acontecerá, e que todos os envolvidos devem estar preparados para os novos desafios proporcionados. A transformação

digital muda todo modelo de negócio existente, de modo que gerará oportunidades para os que absorverem as novas tecnologias e conseguirem empregá-la de forma correta.

A seguir, a análise do questionário para situações que merecem atenção:

- Dentre as perguntas em Escala *Likert*, do tipo “Opine sobre a frase...”, todas alcançaram altos percentuais de concordância, exceto a de número 23: “A indústria brasileira está preparada para assumir o risco para evolução para indústria 4.0”.
- De acordo com as respostas das perguntas 19 e 20, os executivos preveem uma integração vertical menor em suas empresas no futuro;
- As atividades presenciais e práticas na formação do engenheiro e no aprendizado da Indústria 4.0 foram apontadas como muito importantes;
- A legislação, ou *framework* regulatório, foi apontada como grande desafio para implementação dos conceitos no Brasil;
- As tecnologias de evolução exponencial e *analytics* foram as mais lembradas para caracterizar a Indústria 4.0.

De acordo com os grupos identificados, pode-se dividir a amostra de três formas, quais sejam:

- Empresas com menos ou mais de 100 funcionários;
- Empresas que faturam anualmente menos ou mais de R\$ 90 milhões;
- Empresas com capital controlador inteiramente brasileiro ou não.

Avaliou-se as diferenças de resultados entre esses grupos; chama a atenção os seguintes pontos (os resultados aqui não são definitivos, uma vez que a amostra é reduzida demais para inferir conclusões para a população):

Empresas com Faturamento maior que R\$ 90 milhões:

- 8 das empresas tinham algum tipo de capital estrangeiro;
- Mais da metade relatou não ter experiência com a Indústria 4.0.

Empresas com mais de 100 funcionários:

- Foi o grupo com maior diferença entre a nota atual e prevista de como considerava que estaria a integração vertical de sua empresa.

Empresas com menos de 100 funcionários:

- Não se destacou em outros aspectos.

Empresas com capital controlador inteiramente brasileiro ou não:

- Diferiam apenas em relação ao faturamento, não se destacando em outros aspectos.

Na análise do questionário, verificou-se desconhecimento estratégico sobre a transformação digital no grupo estudado, bem como resistência para aplicação de novos conceitos na cadeia de suprimento existente. Um percentual expressivo não sabia ao certo o real ganho considerando-se a transformação digital e também o retorno relativo ao investimento para ser realizado; entretanto, consideram ser uma necessidade estratégica para aplicação no futuro. O estudo pode ser aplicado em um grupo mais restrito e direcionado para grandes empresas, de modo a verificar se o perfil encontrado no presente estudo permanece para o novo cenário.

Com base nos resultados da pesquisa, identificou-se uma necessidade de capacitação dos funcionários para as novas tecnologias que possibilitam a transformação digital. Como resultado da pesquisa e no âmbito do cenário de transformação digital, foi inserida a capacitação em novas tecnologias no contexto do Projeto Huawei – USP e, especificamente, no Centro de Internet do Futuro. Num primeiro momento, a inserção se deu com o principal objetivo de capacitar alunos e funcionários da USP e, num segundo instante, expandir-se para as empresas e sociedade civil. Atualmente, o treinamento de capacitação está em sua segunda turma e tem previsão de mais 4 turmas até o final do primeiro semestre de 2017. Além da capacitação técnica informada, procura-se resolver as seguintes questões formuladas:

1) Quadro profissional dentro de uma empresa:

- Atualização contínua – Manter o quadro profissional atualizado;
- Quadro Profissional Competitivo – Inserir Inovação;
- Qualidade do Quadro Profissional – Certificações Técnicas.

2) Melhoria do processo de ensino-aprendizagem à luz dos avanços tecnológicos recentes:

- Internet das Coisas, BigData, Data Analytics e Machine Learning;
- Novas abordagens pedagógicas.

- 3) Novas Plataformas em Cloud para suporte ao processo de ensino-aprendizagem:
- LMS - Learning Management System;
 - MOOC – Massive Open Online Course;
 - Novos objetos de aprendizagem – vídeos interativos, realidade virtual e aumentada, games, etc.
- 4) Novas abordagens de trabalho em equipe para:
- Ensino-aprendizagem; e
 - PD&I.

Na Figura 51 é apresentado um *banner* informativo sobre o curso.

Figura 51 – Divulgação do Curso.

Fonte: Próprio autor.

6.2 Transformação digital em uma planta de tratamento de água

Partindo da análise dos resultados do questionário, optou-se pela aplicabilidade dos conceitos da transformação digital em uma indústria de *Utilities*. A escolha por este segmento deu-se devido ao fato de o tratamento e distribuição de água ter uma capilaridade maior entre os cidadãos e não necessariamente ficar restrito a um segmento da indústria tradicional. E também, considerando-se os estudos realizados por McKinsey (2016), BCG (2015), Gartner (2015), Accenture (2016) e I-scoop (2016), os quais mostraram que a indústria de *Utilities* ainda não sabe ao certo os efeitos da transformação digital e tampouco como iniciar a aplicação dos conceitos, e, portanto, o estudo torna-se uma contribuição para o cenário da indústria de *Utilities*.

Como prova de conceito, foram aplicados os conceitos para contribuir com melhorias no contexto do projeto PURA-USP, que trata do uso racional da água na Universidade de São Paulo. O objetivo desse programa é reduzir o consumo e estabelecer um sistema estruturado de gestão da demanda. Ao encontro desta linha e da necessidade apresentada pelo do projeto PURA-USP, utilizou-se de novas tecnologias e das visões da transformação digital para alcançar o objetivo desejado.

Aplicando *machine learning* e considerando que a influência de variáveis independentes em uma variável resposta é indicada por um modelo linear, de uma maneira geral, quando uma variável influi linearmente em outra, o aumento da primeira tende a causar acréscimo ou decréscimo na segunda. Como discutido anteriormente no capítulo de metodologia, dadas duas variáveis x (independente) e y (resposta), um modelo linear pode ser descrito na forma: $y_i = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_k X_k + e$, em que e indica um erro aleatório e $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k$ são parâmetros desconhecidos estimados com o Método dos Mínimos Quadrados. Uma das exigências de um modelo linear é que os resíduos (diferença entre o modelo ajustado e o modelo real) tenham distribuição normal, variância constante e esperança ($E(Y)=0$). Porém, como se trata de um ajuste nos dados para a observação de relevância para uso no projeto PURA-USP e como não acontecem inferências sobre os dados resultantes do modelo linear, esses requisitos não são observados.

Um modelo de regressão linear é utilizado na plataforma FIWARE para verificar quais são os campos analisados que mais influem na qualidade e na perda d'água. Os dados podem ser observados no Apêndice C: Análise de Relevância pelo Ajuste de um Modelo Regressivo Linear.

A fim de mostrar como algumas características (variáveis independentes) inicialmente acrescentadas em um fluxo de água influem diretamente nas propriedades finais (variáveis resposta) deste mesmo fluxo, um banco de dados com informações sobre o tratamento de água é modelado linearmente. Esses dados fazem parte do projeto *Faults in a urban waste water treatment plant*, criado por Manel Poch e Javier Bejar, respectivamente, das universidades Autònoma de Barcelona e Politècnica de Catalunya; a esses dados são associados os de Azevedo (2010). Os dados são compostos com medições diárias realizadas por sensores durante quase um ano e meio, cujo objetivo é prever falhas diversas por meio do estado das variáveis envolvidas.

A regressão linear é a técnica utilizada para verificar a ligação entre as variáveis independentes e as variáveis resposta. Apesar de exigir determinados requisitos (resíduos que possuem distribuição normal, com média zero e variância constante, DRAPER; SMITH, 1998), estes não são levados em conta já que a ideia aqui não é realizar inferências sobre os resultados, mas apenas verificar o alinhamento entre as principais variáveis. Supõe-se, portanto, que estes requisitos são atendidos na base de dados avaliada. O banco de dados é composto por 38 campos divididos entre dados de entrada e dados de saída e pode ser visto na Tabela 44:

Tabela 44 – Descrição do banco de dados de tratamento de água.

	Campo	Descrição	Tipo
1	Q-E	(fluxo de entrada para a planta)	Entrada
2	ZN-E	(entrada de zinco para a planta)	Entrada
3	PH-E	(entrada de ph para a planta)	Entrada
4	DBO-E	(demanda biológica de oxigênio para a planta)	Entrada
5	DQO-E	(demanda química de entrada de oxigênio para a planta)	Entrada
6	SS-E	(entrada de sólidos suspenso para a planta)	Entrada
7	SSV-E	(entrada de sólidos suspensos voláteis para a planta)	Entrada
8	SED-E	(entrada de sedimentos para a planta)	Entrada
9	COND-E	(condutividade de entrada para a planta)	Entrada
10	PH-P	(pH de entrada para o decantador primário)	Entrada
11	DBO-P	(entrada de demanda biológica de oxigênio para o assentamento primário)	Entrada
12	SS-P	(entrada de sólidos suspensos para o decantador primário)	Entrada
13	SSV-P	(entrada de sólidos suspensos voláteis para o decantador primário)	Entrada
14	SED-P	(sedimentos de entrada para o decantador primário)	Entrada
15	COND-P	(condutividade de entrada ao decantador primário)	Entrada

continua

continuação

	Campo	Descrição	Tipo
16	PH-D	(pH de entrada para o decantador secundário)	Entrada
17	DBO-D	(entrada de demanda biológica de oxigênio para o decantador secundário)	Entrada
18	DQO-D	(entrada de demanda química de oxigênio para o decantador secundário)	Entrada
19	SS-D	(entrada de sólidos suspensos para o decantador secundário)	Entrada
20	SSV-D	(entrada de sólidos suspensos voláteis para o decantador secundário)	Entrada
21	SED-D	(entrada de sedimentos para o decantador secundário)	Entrada
22	COND-D	(condutividade de entrada para o decantador secundário)	Entrada
23	PH-S	(saída de pH)	Saída
24	DBO-S	(saída biológica de demanda de oxigênio)	Saída
25	DQO-S	(saída de demanda química de oxigênio)	Saída
26	SS-S	(saída de sólidos suspensos)	Saída
27	SSV-S	(saída de sólidos suspensos voláteis)	Saída
28	SED-S	(sedimentos de saída)	Saída
29	COND-S	(condutividade de saída)	Saída
30	RD-DBO-P	(desempenho de saída biológica de oxigênio no decantador primário)	Saída
31	RD-SS-P	(desempenho de saída de sólidos suspensos no decantador primário)	Saída
32	RD-SED-P	(desempenho de saída de sedimentos no decantador primário)	Saída
33	RD-DBO-S	(desempenho de saída biológica de oxigênio no decantador secundário)	Saída
34	RD-DQO-S	(desempenho de saída de demanda de oxigênio no decantador secundário)	Saída
35	RD-DBO-G	(desempenho global da demanda biológica de oxigênio)	Saída
36	RD-DQO-G	(desempenho global da demanda química de oxigênio)	Saída
37	RD-SS-G	(desempenho global de sólidos suspensos)	Saída
38	RD-SED-G	(desempenho global de sedimentos)	Saída

conclusão

Fonte: Próprio autor.

Os campos de entrada são utilizados como variáveis independentes e os de saída como variáveis resposta. Há, portanto, 15 modelos lineares (total de campos do tipo saída) que usam os 22 campos de entrada como variáveis independentes. Todos estes modelos podem ser vistos no Apêndice C e os modelos cujos coeficientes tenham $p\text{-values} \leq 0,05$ são considerados significativos.

Um refinamento e uma discussão sobre os três primeiros modelos podem ser vistos no Apêndice C, com todos os modelos completos. Os três primeiros modelos são refeitos apenas com a variável independente mais significativa (menor p-value) ***. Em seguida, a base de dados é separada aleatoriamente em uma base de treinamento e uma base de teste. A base de treinamento serve para criação do modelo linear baseado apenas na variável independente mais significativa e a base de teste mostra dados nos quais o modelo deve ser aplicado. Ao final, um gráfico linear é traçado mostrando o ajuste do modelo aos dados de treinamento. O objetivo é mostrar que realmente algumas variáveis de entrada podem ser manipuladas e refletem direta e linearmente os resultados nas variáveis de saída. Esses três modelos iniciais foram escolhidos porque todos os três têm como característica comum variáveis independentes significativas relacionadas a um segundo reservatório pelo qual passa o fluxo de água.

No primeiro modelo avalia-se o *PH final da água (PH_S)*, e a variável independente mais significativa é o *PH do segundo reservatório (PH_D)*. No segundo modelo avalia-se a *demanda biológica por oxigênio na saída (DBO-S)*, tendo como base a variável independente *demanda química por oxigênio na entrada do segundo reservatório (DQO-D)*. No terceiro e último modelo, a variável resposta avaliada é a *demanda química por oxigênio na saída (DQO-S)*, sendo que a variável independente relevante é a mesma do segundo, a *demanda química por oxigênio na entrada do segundo reservatório (DQO-D)*.

A Tabela 45 mostra os resultados dos três modelos iniciais avaliados apenas pela variável independente mais significativa:

Tabela 45 – Resultados da regressão linear dos três modelos avaliados.

Modelo 1 - Variável resposta: <i>PH final da água (PH_S)</i>				
Coeficiente	Estimativa	Erro padrão	p-value	Significância
Intercepto	3,92811	0,34908	2e-16	Significativo
PH_D	0,48385	0,04464	2e-16	Significativo
Modelo 2 – Variável resposta: <i>demanda biológica por oxigênio na saída (DBO-S)</i>				
Coeficiente	Estimativa	Erro padrão	p-value	Significância
Intercepto	3,43953	4,38953	0,433854	Não significativo
DQO_D	0,06166	0,01574	0,000109	Significativo
Modelo 3 – Variável resposta: <i>demanda química por oxigênio na saída (DQO-S)</i>				
Coeficiente	Estimativa	Erro padrão	p-value	Significância
Intercepto	17,18477	7,63406	0,025	Significativo
DQO_D	0,25212	0,02726	2e-16	Significativo

Fonte: Próprio autor.

Os cálculos de regressão linear da Tabela 45 mostram as variáveis independentes de cada modelo na primeira coluna (o intercepto mostra o valor que o modelo assume quando as variáveis independentes possuem valores zerados). A segunda coluna *estimativa* mostra os valores lineares relacionados às variáveis independentes. Valores positivos na coluna *estimativa* indicam que o aumento/diminuição da variável independente aumenta/diminui a variável resposta, enquanto valores negativos indicam uma inversão nessa lógica. O *erro padrão* mostra um coeficiente de erro associado à estimativa, e a coluna *p-value* mostra a significância de cada coeficiente no modelo (quanto menor o *p-value*, menor a chance da *estimativa* estar errada – *p-values* abaixo de 0,05 indicam que a chance do modelo ser falso está abaixo de 5%).

Os gráficos da Figura 52, 53 e 54 mostram a aplicação dos três modelos na base de teste:

Figura 52 – Ajuste do modelo linear (reta) nas base de teste (pontos): PH_D x PH_S.

Fonte: Próprio autor.

Figura 53 – Ajuste do modelo linear (reta) nas base de teste (pontos): DQO_D x DBO_S.

Fonte: Próprio autor.

Figura 54 – Ajuste do modelo linear (reta) nas base de teste (pontos): DQO_D x DQO_S.

Fonte: Próprio autor.

Exceto por dois *outliers*, a Figura 52 mostra um alinhamento linear entre os dados da base de teste (pontos) com o modelo (reta). Apesar de os dados variarem um pouco em relação à média, a reta do modelo está bem centrada, indicando que, na média, o *PH final da água (PH_S)* pode vir a ser previsto por um modelo linear que tem como base os valores de *PH do segundo reservatório (PH_D)*.

É possível perceber que as Figuras 53 e 54 possuem a mesma variável independente: *demanda química por oxigênio na entrada do segundo reservatório (DQO_D)*. Na Figura 53, a variável resposta é a *demanda biológica por oxigênio na saída (DBO_S)* e pode-se perceber também uma dispersão menor (os pontos estão mais próximos da reta) em relação ao gráfico da Figura 54, cuja variável resposta é a *demanda química por oxigênio na saída (DQO_S)*. Além da maior dispersão dos pontos (o modelo não se ajusta tão bem à base de testes), o gráfico da Figura 54 tem valores mais altos no eixo das coordenadas (y) que o gráfico da Figura 53. Esse resultado é perfeitamente normal, visto que o modelo 2 tem uma estimativa baixa (0,06166) em relação à estimativa do modelo 3 (0,25212).

Outro resultado interessante diz respeito à possibilidade de analisar a interação entre demandas químicas e biológicas, já que as Figuras 53 e 54 usam a mesma variável independente (*DQO_D*), diferindo apenas nas variáveis resposta: biológica para a Figura 53, e química para a Figura 54. Nota-se que a *demanda de entrada química por oxigênio* influi menos na *demanda biológica por oxigênio de saída* com

baixas estimativas (Figura 53), mas apresenta menos dispersão, indicando que realmente **há uma relação tênue entre demanda química e biológica de oxigênio**. Por outro lado, na Figura 54, percebe-se que a *demandade entrada química por oxigênio* influi de forma mais enfática na *demanda química por oxigênio de saída*, porém, essa influência é mais dispersa.

Há, portanto, formas possíveis de avaliação dos dados por modelos regressivos lineares e mesmo por outros modelos de previsão estatísticos. Com a aplicação de técnicas de *machine learning*, em especial, de regressão linear, observou-se que por meio do estudo de dados históricos é possível prever perdas e vazamento de água.

Tendo como referência a plataforma proposta no capítulo 5, na seção 5.2.2, utilizando-se das tecnologias habilitadoras, das visões da transformação digital e comparando com atual arquitetura clássica da automação, observou-se os ganhos no processo, quais sejam:

- Automatização de toda tomada de decisão na planta de tratamento de água;
- Possibilidade de integração dos mais diversos componentes e fabricantes;
- Identificação de perdas e qualidade da água;
- Transparência para o usuário final, pois é possível acompanhar o consumo *online* através do *dashboard*;
- Armazenamento na nuvem de dados históricos dos sensores (não se limitando somente aos dados na camada dos sensores). Esses dados podem ser integrados ou confrontados com outras bases para tomada de decisão;
- Utilização de *analytics* para obtenção de melhoria nos processos;
- Utilização dos dados para promover melhorias nos procedimentos e proporcionar um melhor atendimento aos usuários;
- Melhoria na precisão das leituras dos medidores de água e com maior frequência;
- Possibilidade de simulação comportamental sem comprometer o ambiente real e produtivo.

7 CONCLUSÃO

O presente trabalho de pesquisa partiu da necessidade de avaliação da transformação digital para realizar melhorias na arquitetura tradicional de automação e controle das indústrias de *Utilities*. Para a realização deste estudo foram realizadas pesquisas bibliográficas atualizadas, abrangendo os mais variados temas sobre a transformação digital, e, para tal, foram estudadas as tecnologias habilitadoras que permitem esta mudança de paradigma. Chegou-se à conclusão de que as novas tecnologias que permitem esta mudança devem trabalhar de forma colaborativa e integrada pois a solução completa para a transformação digital depende do correto funcionamento entre as tecnologias habilitadoras, dentre elas se destacam: *Internet of Things*, *Machine Learning*, *Cloud & Fog Computing*, sistemas ciberfísicos, M2M, 5G e *big data analytics*. As visões que guiam essa transformação digital ao redor do mundo também foram estudadas, bem como a pesquisa de trabalhos relacionados ao tema em questão. Foi dada especial atenção à visão da Indústria 4.0, devido ao seu pioneirismo e ineditismo, e também por estar associada à Manufatura Avançada que é a visão do Brasil, e que se apoia na Indústria 4.0, sendo esta submetida à coordenação do Ministério do Desenvolvimento da Indústria e Comércio (MDIC).

Para que fosse possível inserir o contexto brasileiro da transformação digital, foi realizado um estudo no cenário Brasil, pois concluiu-se com a pesquisa realizada que a transformação digital afeta toda a cadeia de suprimentos e, para isto, foi feita uma pesquisa por meio da aplicação de questionário, a fim de que o contexto Brasil pudesse ser estudado e analisado para os problemas reais. Destarte, optou-se em ficar restrito a uma única região do Brasil, qual seja, a região metropolitana de Campinas. A escolha dessa região deu-se pelo fato de ser uma das principais regiões do estado de São Paulo e também levou-se em consideração a grande concentração de indústrias nacionais e internacionais (automação, química, petroquímica, borracha, alimentação, celulose e papel, montadoras, dentre outras); por ser grande polo da indústria têxtil e de confecção; por possuir refinaria de petróleo e usinas produtoras de açúcar e álcool. Na área de educação, encontram-se presentes universidades privadas e estaduais, centros universitários, faculdades integradas e outras. Na área de saúde, a região dispõe de renomados centros de investigações científicas, hospitais e clínicas. Um outro fator importante diz respeito à facilidade de locomoção por meio de rodovias estaduais, intermunicipais e interestaduais, facilitando o transporte de acesso ao local. A aplicação

do questionário teve como objetivo avaliar o grau de maturidade dos empresários da região relativo ao conhecimento das tecnologias e das visões presentes para esta transformação e também em relação às competências necessárias para o novo engenheiro. Por meio da análise das respostas ao questionário, verificou-se desconhecimento estratégico sobre a transformação digital na amostra estudada, além de resistência para aplicação dos novos conceitos no modelo já existente. Isto ocorreu devido ao fato de a grande maioria não saber ao certo o real ganho e o retorno relativo ao investimento para ser realizado, entretanto, a amostra considerou válida a necessidade estratégica de aplicação no futuro. Partindo desta análise inicial, optou-se pela aplicabilidade dos conceitos da transformação digital na indústria de *Utilities*. A escolha por este segmento deu-se devido ao fato de o tratamento e distribuição de água ter uma capilaridade maior entre os cidadãos e não necessariamente ficar restrito a um segmento da indústria tradicional. Adicionalmente e durante as pesquisas, foi encontrada uma plataforma para a energia tendo como ponto de partida o conceito de cidades inteligentes, porém, não foi encontrado nenhuma plataforma para o tratamento e/ou gestão do consumo de água. Desta forma, o estudo contribui para a questão do tratamento e distribuição de água em cidades inteligentes, integrando a outras necessidades igualmente prioritárias.

Partindo desta carência e necessidade de contribuição, foi realizada a visitação a uma unidade de tratamento e distribuição de água no interior de São Paulo. O objetivo dessa visita foi realizar entrevistas sobre o processo para que fosse possível gerar toda a documentação, fluxogramas e passos para o entendimento correto de todo o ciclo do tratamento e distribuição de água naquela região. Em relação à questão técnica, foi avaliada a utilização de controladores lógico-programáveis trabalhando em conjunto com os sensores. A arquitetura encontrada foi a clássica de automação, de cinco camadas em formato piramidal. A realização das etapas deste trabalho contribuiu para o conhecimento acerca do comportamento de uma estação de tratamento e distribuição de água, e o processo de caracterização permitiu o conhecimento dos equipamentos industriais e do sistema para realizar o controle e aquisição de dados, bem como os protocolos utilizados.

Com base no levantamento realizado sobre o tratamento e distribuição de água atrelado aos estudos das tecnologias habilitadores e às visões para a transformação digital, foi realizada a melhoria na arquitetura clássica de 05 camadas, passando a ser constituída em 03 camadas e utilizando as tecnologias habilitadoras por meio de um

ecossistema de inovação *open-source*, denominado FIWARE, que disponibiliza as funcionalidades e as propriedades necessárias para o desenvolvimento de soluções e aplicações na *cloud*, assim como permite a disponibilização de dados abertos e a comunicação de suas necessidades específicas.

A melhoria na arquitetura foi colocada em prática no âmbito do projeto PURA-USP existente na Universidade de São Paulo, sendo que para as medições foram realizadas uma experimentação e uma simulação comportamental, nas quais se observou as melhorias descritas a seguir:

- Toda a tomada de decisão foi automatizada, baseada nas decisões dos equipamentos e tendo como parâmetro os valores conhecidos;
- A integração dos mais diversos componentes e fabricantes, pois trata-se de uma arquitetura aberta com protocolo de comunicação igualmente aberto;
- Utilização de dados históricos para prever necessidades, colaborando com toda a cadeia de suprimento para atender à demanda;
- A partir de um local remoto, conseguir gerenciar a planta e ter o controle e o uso definido por processos automatizados;
- Observou-se a possibilidade de integração das fontes de dados não relacionadas à água, tais como: governo, pesquisa e indústria, de uma maneira geral, para acompanhar os esforços de conservação e melhoria contínua da operação existente;
- Através do uso de *dashboards* é possível aumentar a visibilidade das instalações de ativos e melhorar o desempenho e análise de dados;
- Utilização de dados em tempo real sobre eventos climáticos para antecipar as mudanças na disponibilidade ou necessidades de recursos;
- Propiciar aos consumidores um maior controle e visibilidade do consumo e dos recursos residencial e da cidade para direcionar esforços na conservação do recurso;
- Utilização dos dados para descobrir melhoria nos procedimentos e, assim, proporcionar um melhor atendimento aos cidadãos;
- Melhoria na precisão das leituras dos medidores de água com maior frequência;

Por fim, a utilização da nova plataforma obtida nesta pesquisa pode gerar benefícios no que tange ao consumo consciente e à gestão dos recursos hídricos. Pode

ser estendida, com adaptações, para outros ambientes igualmente críticos, tais como: fornecimento de energia, usina nuclear, petroquímica, entre outros.

7.1 Trabalhos Futuros

A presente tese possibilita a realização dos seguintes trabalhos futuros:

- 1) Estudos relativos à questão de *safety* e segurança na nova arquitetura proposta, tendo em vista a inserção de novas tecnologias e protocolos;
- 2) Com a crescente utilização de técnicas de inteligência artificial, é possível usar uma destas técnicas para aprimoramento do processo de tratamento de água;
- 3) Todo o processo e as etapas discutidas de tratamento de água podem ser reutilizados em trabalhos futuros. Ademais, pode-se realizar adaptações e aperfeiçoamentos na arquitetura para ser utilizada em outros setores da indústria;
- 4) Conduzir a investigação para um campo mais amplo, explorando as demais etapas do processo e, principalmente, gerar indicadores de referências de confiabilidade para sistemas de saneamento.

REFERÊNCIAS

ACCENTURE. Digital Utility Transforming for value and growth. 2016. Disponível em: <https://www.accenture.com/us-en/~/_media/Accenture/Conversion-Assets/Global/PDF/Industries_9/Accenture-Digital-Utility-Transforming-Value-Growth-Infographic.pdf>. Acesso em: 22 out. 2016.

ALMEIDA JR., J. R. **Segurança em sistemas críticos e em sistemas de informação**: um estudo comparativo. 2003. Tese (Livre Docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

AS 10 MAIORES INDÚSTRIAS NO BRASIL. **Revista Exame**, 7 ago. 2014. Disponível em: <<http://exame.abril.com.br/revista-exame/noticias/as-10-maiores-industrias-do-brasil>>. Acesso em: 12 out. 2016.

ASHTON, K. That ‘internet of things’ thing. **RFID Journal**, v. 22, n. 7, p. 97-114, 2009. Disponível em: <<http://www.rfidjournal.com/articles/view?4986>>. Acesso em: 16 out. 2016.

ATLAS. The observatory of Economic Complexity. 2016. Disponível em: <<http://atlas.media.mit.edu/en/>>. Acesso em: 12 out. 2016.

AZEVEDO, M. T. **Cibersegurança em sistemas de tratamento de água**. 2010. 155 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

BCG. How to Jump-Start a Digital Transformation. BCG Perspectives. 01 sep. 2015. Disponível em: <<https://www.bcgperspectives.com/content/articles/transformation-large-scale-change-technology-business-transformation-how-jump-start-digital-transformation/>>. Acesso em: 21 out. 2016.

BNDES. Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social. As melhores opções de financiamento para você. [2016]. Disponível em: <<http://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/financiamento/financiamentos>>. Acesso em: 10 out. 2016.

BOUNFOUR, A. **Digital Futures, Digital Transformation, Progress in IS**: From Lean Production to Accelution. Switzerland: Springer International Publishing, Cham. 2016.

BRYNJOLFSSON, E.; McAfee, A. **The Second Machine Age**: Work, Progress and Prosperity in a Time of Brilliant Technologies. W.W. Norton & Company, 2014. ISBN 978-0-393-23935-5.

BUYA, R. et al. Cloud computing and emerging IT platforms: Vision, hype, and reality for delivering computing as the 5th utility. **Future Generation computer systems**, v. 25, n. 6, p. 599-616, 2009. Disponível em: <<http://portal.acm.org/citation.cfm?id=1528937.1529211>>. Acesso em: 10 out. 2016.

CABEZAS, J. **FIWARE Experiences from a Hardware company**. [S.l: s.n.], 2016.

CAPGEMINI. Industry 4.0 – The Capgemini Consulting View: Sharpening the Picture beyond the Hype. 2016. Disponível em: <https://www.de.capgemini-consulting.com/resource-file-access/resource/pdf/capgemini-consulting-industrie-4.0_0.pdf>. Acesso em: 10 out. 2016.

CHEN, M.; MAO, S.; LIU, Y. Big data: A survey. **Mobile Networks and Applications**, v. 19, n. 2, p. 171–209, 2014.

CHEN, H.; CHIANG, R. H. L.; STOREY, V. C. Business intelligence and analytics: From big data to big impact. **MIS quarterly**, v. 36, n. 4, p. 1165-1188, 2012.

CHIABURU, D. S. Analytics: A Catalyst for Stagnant Science. **Journal of Management Inquiry**, v. 25, n. 1, p. 111-115, 2015. Disponível em: <<http://jmi.sagepub.com/content/early/2015/08/21/1056492615601342.abstract>>. Acesso em: 12 set. 2016.

COLLIN, J. et al. **IT leadership in transition-the impact of digitalization on finnish organizations**. Helsink-Finland: Unigrafia Oy, 2015.

COSTA, M.; STEFANO, F. A era das fábricas inteligentes está começando. **Revista Exame**, 7 ago. 2014. Disponível em: <<http://exame.abril.com.br/revista-exame/a-fabrica-do-futuro/>>. Acesso em: 05 mar. 2015.

DASTJERDI, A. V.; BUYYA, R. Fog Computing: Helping the Internet of Things Realize Its Potential. **Computer**, v. 49, n. 8, p. 112–116, 2016. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=7543455>>. Acesso em: 10 out. 2016.

DAVENPORT, T. H. Analytics 3.0. **Harvard Business Review**, v. 91, n. 12, p. 64-72, 2013.

DRAPER, N. R.; SMITH, H. **Applied Regression Analysis**. 3rd. ed. EUA: Wiley-Interscience, 1998.

ETSI. **Machine-to-Machine communications (M2M); M2M service requirements**. Technical Specification, v. 1, p. 1–34, 2010.

EVANS, P. C; ANNUNZIATA, M. Industrial Internet: Pushing the Boundaries of Minds and Machines. **General Electric**, p. 1-37, 2012.

FAGBOHUN, O. O. Comparative studies on 3G, 4G and 5G wireless technology. **IOSR Journal of Electronics and Communication Engineering**, v. 9, n. 3, p. 88-94, 2014.

FEIMEC, Feira Internacional de Máquinas e Equipamentos, 2016. Disponível em: <<http://www.feimec.com.br/pt/feimec-20161>>. Acesso em: 20 out. 2016.

FIASCHETTI, A.; PIETRABISSA, A.; DELLI PRISCOLI, F. Towards manufacturing 2.0: An innovative architecture for the Factory of the Future. 2015 European Conference on Networks and Communications, EuCNC 2015, p. 450–454, 2015.

FINESCE. Seventh Framework. **The FINESCE Smart Energy Platform**. n. 604677, 2016.

FINKELZELLER, K. **The RFID Handbook**, 2. ed. New Jersey-USA: John Wiley & Sons, 2003.

FIWARE. Core Platform for the Future Internet. Private Public Partnership Project (PPP). 2016. Disponível em: <<https://www.fiware.org>>. Acesso: em 13 out. 2016.

GARTNER. The Internet of Things Is a Revolution Waiting to Happen. 2015. Disponível em: <<http://www.gartner.com/smarterwithgartner/the-internet-of-things-is-a-revolution-waiting-to-happen/>>. Acesso em: 21 out. 2016.

GICS. The Global Industry Classification Standard, 2016. Disponível em: <<https://www.msci.com/gics>>. Acesso em: 11 out. 2016.

GONÇALVES, H. de A. **Manual de Metodologia da Pesquisa Científica**. 2. ed. São Paulo: Avercamp, 2014.

HERMANN, M.; PENTEK, T.; OTTO, B. **Working Paper A Literature Review**. [S.l.: s.n.], 2015.

HP. Big Data. Hewlett-Packard, 2014. Disponível em: <<http://www8.hp.com/h20195/v2/GetPDF.aspx/4AA4-4664ENW.pdf>>. Acesso em: 9 out. 2016.

IBGE. Informações sobre os municípios brasileiros. 2016. Disponível em: <<http://www.ibge.com.br/cidadesat/xtras/home.php>>. Acesso em: 11 out. 2016.

INTEL. **A vision for Big Data**. p. 1–9, 2013.

I-SCOOP. **Digital Transformation: focus on the Utilities industry**. 2016. Disponível em: <<http://www.i-scoop.eu/digital-transformation/digital-transformation-focus-on-the-utilities-industry/>>. Acesso em: 21 out. 2016.

JARA, A. J. et al. Extending the Internet of things to the future Internet through IPv6 support. **Mobile Information Systems**, v. 10, n. 1, p. 3-17, 2014.

KAGERMANN, H. et al. **Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0**. n. April, p. 4–7, 2013.

KEY ENABLING TECHNOLOGIES. **European Commission**. Growth. Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs. 2016. Disponível em: <https://ec.europa.eu/growth/industry/key-enabling-technologies_en>. Acesso em: 18 out. 2016.

KHAN, S. **Leadership in the Digital Age** - a study on the effects of digitalization on top management leadership. Shahyan Khan, 2016.

KIM, J. et al. M2M service platforms: Survey, issues, and enabling technologies. **IEEE Communications Surveys and Tutorials**, v. 16, n. 1, p. 61-76, 2014.

KOHAVI, R.; ROTHLENDER, N.; SIMOUDIS, E. Emerging Trends in Business Analytics. **Communications of the ACM**, v. 45, n. 8, p. 45-48, 2002.

KON, A. **Economia Industrial**. São Paulo: Nobel, 1994.

LEE, E. A. **Cyber Physical Systems: Design Challenges**. 11th IEEE International Symposium on Object and Component and Service-Oriented Real-Time Distributed Computing (ISORC 2008), p. 363–369, 2008. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4519604>>. Acesso em: 12 set. 2016.

LEE, E. A.; SESHIA, S. A. **Introduction to Embedded Systems Security: A Cyber-Physical Systems Approach**. Second ed. [S.l.]: LeeSeshia.org, 2015.

LEE, J.; BAGHERI, B.; KAO, H. A. A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems, **Manuf. Lett.**, v. 3, p. 18-23, 2015.

LEE, J.; KAO, H. A.; YANG, S. Service innovation and smart analytics for Industry 4.0 and big data environment, **Procedia CIRP**, v. 16, p. 3-8, 2014.

LIN, B. P.; LIN, F. J.; TUNG, L. P. **The Roles of 5G Mobile Broadband in the Development of IoT, Big Data, Cloud and SDN**. Communications and Network, v. 8, n. 01, p. 9-21, 2016.

LOURAL, C. de A. **Um panorama de novas tecnologias e seus impactos na indústria**. 26 jun. 2014. Disponível em: <https://www3.eco.unicamp.br/neit/images/stories/arquivos/Novas_tecnologias_e_seu_impacto_na_industria_-_v140626.pdf>. Acesso em: 10 maio 2015.

LUND, D. et al. Worldwide and Regional Internet of Things (IoT) 2014-2020. Forecast: A Virtuous Circle of Proven Value and Demand. **ICD Analyse the Future**, 2014.

MARTINS, A. B. **Desenvolvimento de uma metodologia para gestão de risco com base no método CORAS e avaliação quantitativa para aplicação em plantas de saneamento**. 2013. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

McAFEE, A.; BRYNJOLFSSON, E. Big Data: The Management Revolution. **Harvard Bus. Rev.**, v. 90, n. 10, p. 61-67, 2012.

McKINSEY. **The digital utility: New opportunities and challenges**. 2016. Disponível em: <<http://www.mckinsey.com/industries/electric-power-and-natural-gas/our-insights/the-digital-utility-new-opportunities-and-challenges>>. Acesso em: 21 out. 2016.

MCNABB, D. E. **Public utilities: management challenges for the 21st century**. Edward Elgar Publishing, 2005.

MITCHELL, T. M. **Machine Learning**. New York-USA: McGraw Hill, 1997.

MORAES, C. C.; CASTRUCCI, P. D. L. **Engenharia de automação industrial**. Rio de Janeiro: LTC, 2007.

MOUNCE, S. R. et al. Cloud based machine learning approaches for leakage assessment and management in smart water networks. **Procedia Engineering**, v. 119, p. 43-52, 2015.

MUHAMMAD, S. Y. et al. Classification Model for Water Quality using Machine Learning Techniques. **International Journal of Software Engineering and Its Applications**, v. 9, n. 6, p. 45-52, 2015.

NIST. **NIST Big Data Interoperability Framework**: Volume 1, Definitions. v. 1, p. 32, 2015.

NIST. **The NIST Definition of Cloud Computing Recommendations of the National Institute of Standards and Technology**. 2011.

NORDRUM, A. Popular Internet of Things Forecast of 50 Billion Devices by 2020 Is Outdated, **IEEE Spectrum**. 18 aug. 2016. Disponível em: <<http://spectrum.ieee.org/tech-talk/telecom/internet/popular-internet-of-things-forecast-of-50-billion-devices-by-2020-is-outdated>>. Acesso em: 12 out. 2016

NSTC. **A National Strategic Plan for Advanced Manufacturing**, US National Science and Technology Council, Washington, DC: Executive Office of the President of The US, 2012.

OLDEST INTERNET OF THINGS OBJECTS IN THE WORLD. **bism@rt**. 2017. Disponível em: <<https://bismart.com/en/oldest-internet-of-things-objects-in-the-world/>>. Acesso em: 12 out. 2016.

OREN, G.; STROH, N. Y. Mathematical Model for Detection of Leakage in Domestic Water Supply Systems by Reading Consumption from an Analogue Water Meter. **International Journal of Environmental Science and Development**, v. 4, n. 4, p. 386, 2013.

PATEL, K. D.; RAJPUT, I. J. Survey of Quick Response Code. **International Journal of Electronics, Electrical and Computational System**. v. 5, n. 5, p. 90-93, 2016.

SABESP. Tratamento de água. 2016. Disponível em: <<http://site.sabesp.com.br/site/interna/Default.aspx?secaold=47>>. Acesso em: 18 out. 2016.

SADEGHI, A. R.; WACHSMANN, C.; WAIDNER, M. Security and privacy challenges in industrial internet of things. In: **Design Automation Conference (DAC), 2015 52nd ACM/EDAC/IEEE**. IEEE, 2015. p. 1-6.

SAMUEL, A. L. Some Studies in Machine Learning Using the Game of Checkers. **IBM Journal**, v. 3, n. 3, p. 535–554, 1959.

SANCHES, G.; TAMAKI, H.; GONÇALVES, O. Implementação de programas de uso racional da água em campi universitários. **Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**, v. 6, n. 1, p. 49, 2006.

SANCHES, G.; TAMAKI, H.; GONÇALVES, O. **O PURA-USP e o uso sustentável da água na Universidade de São Paulo**. Encontro Latino Americano de Universidades Sustentáveis, n. 1, 2007.

SCHWAB, K. The Fourth Industrial Revolution. **VINT research report**, p. 1-39, 2016.

SMART CITY. Plataforma para transformação digital. 2016. Disponível em: <<http://www.pad.lsi.usp.br/ptd>>. Acesso em: 12 out. 2016.

SEVERINO, A. J. **Metodologia do Trabalho Científico**. 21. ed. São Paulo: Cortez, 2007.

SHROUF, F.; ORDIERES, J.; MIRAGLIOTTA, G. Smart Factories in Industry 4.0: A Review of the Concept and of Energy Management Approached in Production Based on the Internet of Things Paradigm. In: Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM), 2014 IEEE International Conference on. IEEE, 2014. p. 697-701.

SOLDATOS, J. K. Et al. **Internet of Things Applications in Future Manufacturing**. July, 2016.

TAMAKI, H.; SANCHES, G.; GONÇALVES, O. **A medição setorizada como instrumento de gestão da demanda de água em sistemas prediais** – Estudo de caso: programa de uso racional da água da Universidade de São Paulo. Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 2006.

VERMA, P. et al. Towards an IoT based water management system for a campus. In: **Smart Cities Conference (ISC2), 2015 IEEE First International**. IEEE, 2015. p. 1-6.

WANG, S. et al. Implementing Smart Factory of Industrie 4.0: An Outlook. **International Journal of Distributed Sensor Networks**, v. 12, n. 1, 2015.

WANT, R. An Introduction to RFID Technology. **IEEE ComSoc**, v. II, n. 2, p. 25-33, 2006.

WEISER. Ubiquitous Computing. 1992. Disponível em: <<http://www.ubiq.com/hypertext/weiser/UbiHome.html>>. Acesso em: 12 out. 2016.

WESTERMAN G.; BONNET, D.; McAFEE, A. **Leading Digital**: Turning technology into business transformation. Boston-USA: Harvard Business Press, 2014.

WU, G. et al. M2M: From mobile to embedded internet. **IEEE Communications Magazine**, v. 49, n. 4, 2011.

WU, P. et al. Transition from IPv4 to IPv6 : A State of the Art Survey. **Ieee Communications Surveys & Tutorials**, v. 15, n. 3, p. 1407-1424, 2013.

APÊNDICES

APÊNDICE A: Questionário - Indústria 4.0 - Manufatura Avançada no Brasil

O estudo propõe-se a identificar o grau de maturidade e conhecimento das empresas inseridas no contexto da Indústria 4.0, bem como o perfil e qualificação dos profissionais que essas empresas pretendem contratar para implementação dos conceitos.

ORIENTAÇÕES PARA O QUESTIONÁRIO

INTEGRAÇÃO E MELHOR GERENCIAMENTO DA CADEIA DE VALOR – possibilidade maior de interação com os fornecedores e clientes com produtos e processos inteligentes, comunicação fluída, maior rastreabilidade, maior inteligência na análise dos dados, etc.

INTEGRAÇÃO DA CADEIA DE VALOR DA EMPRESA - desenvolvimento de produtos e processos inteligentes, fábricas inteligentes, simulação da fábrica antes da sua construção, integração dos elos internos, etc.

SISTEMA DE PRODUÇÃO INTEGRANDO O "MUNDO" VIRTUAL COM O REAL – fábricas totalmente automatizadas, capacidade de simulação *on-line*, decisões autônomas, etc.

MODELO DE NEGÓCIO DIGITAL – capacidade de produção em lote unitário, crescente customização dos produtos e serviços

DIGITALIZAÇÃO E INTERCONEXÃO DE PRODUTOS E SERVIÇOS – produtos inteligentes e interligados possibilitando assistência técnica *on-line*, retroalimentação do modo de uso, manutenção preditiva total, etc.

TECNOLOGIA DE EVOLUÇÃO EXPONENCIAL – impressão 3D, nanotecnologia, sensores inteligentes, inteligência artificial, robótica, *drones*, etc.

ANALYTICS – ferramenta de extração de informação e conhecimento de grandes quantidades de dados.

Parte 01 - Identificação da Empresa**Qual o tamanho da empresa?**

(Faturamento anual da empresa em milhões de Reais)

- ☐ até 50,0
- ☐ de 50,0 a 200
- ☐ de 200 a 500
- ☐ acima de 500

Procedência do capital controlador

- ☐ Nacional
- ☐ Estrangeiro
- ☐ Nacional e Estrangeiro

No caso do capital controlador estrangeiro, qual a sua procedência?

Caso haja mais de uma, marcar a principal

- ☐ Canadá e México
- ☐ Estados Unidos
- ☐ Europa
- ☐ Mercosul
- ☐ Oceania ou África
- ☐ Outros países da América
- ☐ Ásia

Onde se localiza a empresa matriz do grupo que fornece o capital controlador estrangeiro?

(Caso haja mais de uma, marcar a principal)

- ☐ Brasil
- ☐ Mercosul
- ☐ Estados Unidos
- ☐ Europa
- ☐ Ásia
- ☐ Outros países

Número de funcionários

- ☐ até 100
- ☐ de 101 a 500
- ☐ de 501 a 1000
- ☐ acima de 1001

Ramo de atividade

- ☐ Empresa de Engenharia
- ☐ Empresa de Serviço
- ☐ Empresa Fabricante de Máquina e Equipamentos de Produção
- ☐ Empresa Fabricante de Bens de Consumo
- ☐ Outras

Faça uma breve descrição do produto ou serviço mais importante da sua empresa (em termos de faturamento)

--

Parte 02 - Identificação do Avaliador**Qual a sua graduação?**

Exemplo: Bacharelado em Administração

Qual a sua especialidade?

Você graduou-se em alguma especialidade dentro do seu curso de graduação?

Exemplo: Bach. Administração com Ênfase em Controladoria.

Escola de Graduação**Em que ano você se graduou?**

Você realizou curso(s) de pós-graduação? Cite quais e em que instituição de ensino. Cite, separadamente, Pós, Mestrados e Doutorados.

Exemplo: Pós-Graduação em Direito Empresarial pela USP e Mestrado em Finanças pela USP

Parte 02B - Grau de Envolvimento e Conhecimento da Manufatura Avançada

Relate suas experiências relacionadas à Indústria 4.0, através de algum projeto, treinamento ou algo semelhante.

Você já está envolvido com a Indústria 4.0?

- ☐ sim
- ☐ não

De que forma está envolvido com este tópico?

Marque mais de uma opção, se necessário.

- ☐ Obtendo Informação
- ☐ Envolvido em pesquisa
- ☐ Colocando os conceitos em prática
- ☐ Outras (Especifique)

Além da Indústria 4.0, marque quais são as iniciativas que você conhece dentre as apresentadas abaixo:

Marque todas as opções que conhece

- ☐ Industrial Internet Consortium
- ☐ Advanced Manufacturing Partnership 2.0
- ☐ Smart Manufacturing Leadership Coalition
- ☐ Catapult Centers
- ☐ Factories of the Future
- ☐ Made in China 2025
- ☐ Industrie du futur
- ☐ Manufacturing Innovation 3.0

Na sua opinião, qual é o grau de complexidade em relação à implantação dos conceitos da Indústria 4.0 no Brasil?

- ☐ Extremamente Complexo ☐ Muito Complexo ☐ Complexo ☐ Baixa Complexidade ☐ Mínima Complexidade

Como você avalia a importância (da aplicação das práticas) da Indústria 4.0 para a competitividade da sua empresa?

- ☐ Indispensável ☐ Muito importante ☐ Importante ☐ Pouco Importante ☐ Sem Importância

ENUMERE os desafios relacionados com a implementação da Indústria 4.0 DE ACORDO COM SUA IMPORTÂNCIA E COMPLEXIDADE (na sua opinião)

(1 = MAIOR E MAIS IMPORTANTE DESAFIO; 6 = MENOR E MENOS IMPORTANTE)

- Padronização (Padronizar a empresa no modelo de Indústria 4.0)
- Mudança do Modelo Tradicional para um Novo Modelo de Negócio
- Disponibilidade dos produtos
- Falta de mão de obra qualificada
- Pesquisa (Financiamento de pesquisas)
- *Framework* regulatório

Considerando que exista interesse de implementar os conceitos da Indústria 4.0, marque o grau de importância, numerando de 1 a 6, o tipo de iniciativa que gostaria de ter como ajuda para colaborar na implementação dos conceitos da Indústria 4.0.

Sendo 1 para a de maior preferência e 6 para a de menor preferência.

- Oportunidades presenciais para compartilhar experiências
- Fóruns *online*
- Treinamentos e Seminários
- Grupos de Trabalhos
- Envolvimento em projetos de pesquisa
- Laboratório de Testbed

Parte 03 - Conceituação e Adequação à Indústria 4.0

Em sua opinião, dentre os tópicos abaixo, quais seriam os mais relevantes para caracterizar a Indústria 4.0?

Sendo 1 para a mais relevante e 7 para a menos relevante

- Integração e melhor gerenciamento da cadeia de valor
- Integração da cadeia de valor na empresa
- Sistema de produção integrando o “mundo” virtual com o real
- Modelo de negócio digital
- Digitalização e interconexão de produtos e serviços
- Tecnologia de evolução exponencial
- Analytics

ATRIBUA NOTA de 1 (muito) a 6 (pouco) PARA AVALIAR a situação da sua empresa hoje, nos seguintes quesitos (adequação à Indústria 4.0)

É permitido marcar notas repetidas entre os quesitos

- Integração vertical da cadeia
- Integração horizontal da cadeia
- Modelos Digitais de Negócios
- Desenvolvimento e Engenharia de Produtos
- Modelos Digitais de Negócios
- Canais de acesso para *marketing*, vendas e assistência ao cliente

ATRIBUA NOTA de 1 (muito) a 6 (pouco) PARA AVALIAR COMO PREVÊ QUE SERÁ a situação da sua empresa num prazo de 5 anos, nos seguintes quesitos (adequação à Indústria 4.0)

É permitido marcar notas repetidas entre os quesitos

Integração vertical da cadeia

Integração horizontal da cadeia

Modelos Digitais de Negócios

Desenvolvimento e Engenharia de Produtos

Modelos Digitais de Negócios

Canais de acesso para *marketing*, vendas e assistência ao cliente

OPINE SOBRE A FRASE: A indústria 4.0 trará potenciais benefícios e necessidades para o mundo.

☐ Discordo totalmente

☐ Discordo parcialmente

☐ Nem concordo
Nem discordo

☐ Concordo parcialmente

☐ Concordo totalmente

OPINE SOBRE A FRASE: Para o desenvolvimento da indústria 4.0 devemos identificar os conceitos e tendências em tecnologias e mercados relacionados, incluindo cadeias de valor

☐ Discordo totalmente

☐ Discordo parcialmente

☐ Nem concordo
Nem discordo

☐ Concordo parcialmente

☐ Concordo totalmente

OPINE SOBRE A FRASE: A evolução das tecnologias e seus impactos na indústria 4.0 devem ser analisados e avaliados.

☐ Discordo totalmente
 ☐ Discordo parcialmente
 ☐ Nem concordo
Nem discordo
 ☐ Concordo parcialmente
 ☐ Concordo totalmente

OPINE SOBRE A FRASE: a indústria brasileira está preparada para assumir o risco para evolução para indústria 4.0

☐ Discordo totalmente
 ☐ Discordo parcialmente
 ☐ Nem concordo
Nem discordo
 ☐ Concordo parcialmente
 ☐ Concordo totalmente

OPINE SOBRE A FRASE: o novo paradigma associado à Indústria 4.0 irá alterar a distribuição global da cadeia produtiva, aumentando a flexibilidade das linhas de produção.

☐ Discordo totalmente
 ☐ Discordo parcialmente
 ☐ Nem concordo
Nem discordo
 ☐ Concordo parcialmente
 ☐ Concordo totalmente

OPINE SOBRE A FRASE: A indústria 4.0 criará oportunidades que permitam aumento da presença e importância da indústria nacional brasileira no cenário global

☐ Discordo totalmente
 ☐ Discordo parcialmente
 ☐ Nem concordo
Nem discordo
 ☐ Concordo parcialmente
 ☐ Concordo totalmente

Em sua opinião, os problemas associados aos ajustes para a uma adequação da Indústria 4.0 têm um caráter:

- ☐ Primordialmente técnico (novas tecnologias)
☐ Primordialmente administrativo (ajuste de procedimentos considerando a nova realidade)
☐ Balanceado entre técnico e administrativo
☐ Outro (cite qual)

Em sua opinião, dentre as tecnologias abaixo, quais seriam as mais relevantes para a Indústria 4.0

Pode marcar mais de uma

- ☐ Internet das Coisas (IoT)
- ☐ Computação em Nuvem
- ☐ Big Data
- ☐ Sistemas Ciberfísicos (CPS)
- ☐ Comunicação Máquina Máquina (M2M)
- ☐ RFID
- ☐ Analytics

Cite 3 pontos que considere estar entre as principais vantagens advindas da Indústria 4.0

Cite 3 pontos que considere estar entre as principais dificuldades a ser enfrentadas com a Indústria 4.0

Cite 3 pontos que considere estar entre as principais ações da sua empresa para se ajustar ao novo panorama da Indústria 4.0

--

Cite os 3 impactos mais significativos que as empresas vivenciarão ao se ajustar à nova realidade da Indústria 4.0

--

Parte 04 - Expectativas de Formação Profissional

ORIENTAÇÕES PARA O ENTREVISTADO

Hard Skills: Refere-se às competências técnicas e específicas para realizar o trabalho; Funcional.

Soft Skills: Refere-se ao interpessoal, habilidades sociais no trabalho; Comportamental.

MARQUE a competência técnica QUE CONSIDERA MAIS IMPORTANTE aos Engenheiros para o bom desempenho de suas atividades nos novos cenários da Indústria 4.0

- ☐ Integração e melhor gerenciamento da cadeia de valor
- ☐ Integração da cadeia de valor na empresa
- ☐ Sistema de produção integrando o “mundo” virtual com o real
- ☐ Modelo de negócio digital
- ☐ Digitalização e interconexão de produtos e serviços
- ☐ Tecnologia de evolução exponencial
- ☐ Analytics

Em sua opinião, qual seria o grau de aderência da formação técnica oferecida hoje pelas Universidades para este novo cenário?

- ☐ Baixíssima
- ☐ Baixa
- ☐ Média
- ☐ Alta
- ☐ Muito Alta

OPINE SOBRE A FRASE: para este novo cenário tecnológico, haveria a necessidade de maior competência “soft” se comparada com “hard”.

- ☐ Discordo totalmente
- ☐ Discordo parcialmente
- ☐ Nem concordo
Nem discordo
- ☐ Concordo parcialmente
- ☐ Concordo totalmente

OPINE SOBRE A FRASE: O papel do desenvolvimento das Competências “soft” deveria ser da Universidade.

☐ Discordo totalmente
 ☐ Discordo parcialmente
 ☐ Nem concordo Nem discordo
 ☐ Concordo parcialmente
 ☐ Concordo totalmente

OPINE SOBRE A FRASE: O engenheiro deve ter competências interdisciplinares.

☐ Discordo totalmente
 ☐ Discordo parcialmente
 ☐ Nem concordo Nem discordo
 ☐ Concordo parcialmente
 ☐ Concordo totalmente

OPINE SOBRE A FRASE: o engenheiro deve ter competências que permitam a ele trabalhar bem em equipes.

☐ Discordo totalmente
 ☐ Discordo parcialmente
 ☐ Nem concordo Nem discordo
 ☐ Concordo parcialmente
 ☐ Concordo totalmente

Em sua opinião, quais seriam as novas competências para este novo cenário tecnológico?

--

Cite 3 formas que considere adequadas para estimular uma melhor formação dos alunos de engenharia, considerando particularmente os novos cenários profissionais.

A large empty rectangular box with a thin black border, intended for the user to write their response to the question above. It occupies a significant portion of the page width and height.

Redirection to final page of Online Pesquisa

APÊNDICE B: Publicações

Durante o período da elaboração da presente tese foram apresentadas as seguintes contribuições científicas, relatando os estudos afins em desenvolvimento pelo grupo de pesquisa.

Publicações nos anos de 2012, 2013 e 2014 (como primeiro autor):

AZEVEDO, M. T.; KOFUJI, S. T.; MARTINS. Utilização das normas ISA 99 para minimizar os riscos de segurança – estudo de caso: plantas de tratamento de água. In: Congresso Brazil Automation, 2012, São Paulo. Anais... São Paulo: Brazil Automation, 2012. (ISBN: 978-193-60074-2-4).

AZEVEDO, M. T.; MARTINS, A. B.; KOFUJI, S. T. ISA99 - Security Standards in water treatment plants. In: **ISA Water/Wastewater and Automatic Controls Symposium**, 2013. Orlando: ISA, 2013.

AZEVEDO, M. T.; MARTINS, A. B.; KOFUJI, S. T. ISA99 - Security Standards in water treatment plants. **Revista Controle & Instrumentação**, 2014. (ISSN 0101-0794).

Publicações no ano de 2013 (como autor secundário):

MARTINS, A. B.; AZEVEDO, M. T.; KOFUJI, S. T. Utilização das normas ISA 99 para minimizar os riscos em plantas de tratamento de água. **Revista Controle & Instrumentação**, 2013. (ISSN 0101-0794).

MARTINS, A. B.; AZEVEDO, M. T.; KOFUJI, S. T. Análise de risco e confiabilidade em uma de planta de saneamento (estudo de caso). In: **ABES – Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental**, 2013, Goiânia. Goiânia: ABERS, 2013.

Publicações no ano de 2016 (Em revisão para publicação):

AZEVEDO, M. T.; MARTINS, A. B.; KOFUJI, S. T. *Machine Learning,, IoT e Big Data* para previsão de perdas e qualidade da água. **IEEE Latin America**, 2016. (ISSN 1548-0992).

APÊNDICE C: Análise de Relevância pelo Ajuste de um Modelo Regressivo Linear

```
> r1_PH_S
```

```
Call:
lm(formula = PH_S ~ Q_E + ZN_E + PH_E + DBO_E + DQO_E + SS_E +
    SSV_E + SED_E + COND_E + PH_P + DBO_P + SS_P + SSV_P + SED_P +
    COND_P + PH_D + DBO_D + DQO_D + SS_D + SSV_D + SED_D + COND_D,
    data = radio1)
```

```
Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-0.43347 -0.07473 -0.00528  0.07318  1.97358
```

```
Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  3.892e+00  3.361e-01  11.582  < 2e-16 ***
Q_E          -2.340e-06  1.350e-06  -1.733  0.08386 .
ZN_E         -5.891e-03  2.872e-03  -2.051  0.04090 *
PH_E         -8.231e-02  7.889e-02  -1.043  0.29743
DBO_E         1.261e-04  2.009e-04   0.628  0.53049
DQO_E         1.379e-04  1.116e-04   1.236  0.21720
SS_E          6.136e-05  1.998e-04   0.307  0.75892
SSV_E        -5.982e-04  1.617e-03  -0.370  0.71164
SED_E        -9.901e-04  6.813e-03  -0.145  0.88454
COND_E       -4.358e-05  8.496e-05  -0.513  0.60827
PH_P         -3.587e-02  9.908e-02  -0.362  0.71748
DBO_P         4.168e-05  1.736e-04   0.240  0.81042
SS_P          6.045e-05  1.814e-04   0.333  0.73915
SSV_P         2.862e-04  1.436e-03   0.199  0.84211
SED_P        -4.042e-03  6.866e-03  -0.589  0.55641
COND_P        1.192e-04  8.911e-05   1.338  0.18170
PH_D          6.366e-01  8.721e-02   7.300  1.63e-12 ***
DBO_D        -6.438e-04  4.339e-04  -1.484  0.13870
DQO_D        -7.125e-04  2.374e-04  -3.000  0.00287 **
SS_D          4.299e-04  5.766e-04   0.746  0.45637
SSV_D        -3.270e-04  1.368e-03  -0.239  0.81122
SED_D        -1.244e-03  2.699e-02  -0.046  0.96325
COND_D       -3.879e-05  5.969e-05  -0.650  0.51617
```

```
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

```
Residual standard error: 0.1536 on 389 degrees of freedom
(115 observations deleted due to missingness)
Multiple R-squared:  0.3331, Adjusted R-squared:  0.2954
F-statistic: 8.832 on 22 and 389 DF, p-value: < 2.2e-16
```

```
> r1_DBO_S
```

```
Call:
lm(formula = DBO_S ~ Q_E + ZN_E + PH_E + DBO_E + DQO_E + SS_E +
    SSV_E + SED_E + COND_E + PH_P + DBO_P + SS_P + SSV_P + SED_P +
    COND_P + PH_D + DBO_D + DQO_D + SS_D + SSV_D + SED_D + COND_D,
    data = radio1)
```

```
Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-21.189  -5.706  -1.373   3.059  279.618
```

```
Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  9.403e+01  3.787e+01   2.483  0.01346 *
Q_E          2.276e-06  1.520e-04   0.015  0.98806
ZN_E        -1.836e-01  3.234e-01  -0.568  0.57054
PH_E          8.068e+00  8.887e+00   0.908  0.36448
DBO_E         5.464e-02  2.275e-02   2.402  0.01678 *
```

DQO_E	-1.638e-02	1.254e-02	-1.306	0.19232
SS_E	1.477e-02	2.261e-02	0.653	0.51386
SSV_E	-1.344e-01	1.823e-01	-0.738	0.46126
SED_E	-7.215e-01	7.683e-01	-0.939	0.34822
COND_E	9.117e-03	9.549e-03	0.955	0.34029
PH_P	1.164e+01	1.118e+01	1.041	0.29851
DBO_P	-2.811e-02	1.979e-02	-1.420	0.15631
SS_P	-3.684e-02	2.054e-02	-1.793	0.07369 .
SSV_P	-2.373e-01	1.616e-01	-1.469	0.14272
SED_P	1.131e+00	7.748e-01	1.460	0.14520
COND_P	-1.441e-02	1.004e-02	-1.435	0.15198
PH_D	-2.837e+01	9.825e+00	-2.887	0.00411 **
DBO_D	4.340e-02	4.903e-02	0.885	0.37668
DQO_D	7.740e-02	2.680e-02	2.888	0.00410 **
SS_D	6.645e-03	6.601e-02	0.101	0.91986
SSV_D	-8.738e-03	1.548e-01	-0.056	0.95500
SED_D	-1.430e+00	3.048e+00	-0.469	0.63917
COND_D	2.777e-03	6.718e-03	0.413	0.67955

 Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 17.25 on 385 degrees of freedom
 (119 observations deleted due to missingness)
 Multiple R-squared: 0.1221, Adjusted R-squared: 0.07198
 F-statistic: 2.435 on 22 and 385 DF, p-value: 0.0003737

> r1_DQO_S

Call:

```
lm(formula = DQO_S ~ Q_E + ZN_E + PH_E + DBO_E + DQO_E + SS_E +  
    SSV_E + SED_E + COND_E + PH_P + DBO_P + SS_P + SSV_P + SED_P +  
    COND_P + PH_D + DBO_D + DQO_D + SS_D + SSV_D + SED_D + COND_D,  
    data = radiol)
```

Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-88.94	-16.24	-4.16	11.88	235.33

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)	
(Intercept)	3.005e+02	6.861e+01	4.380	1.54e-05	***
Q_E	2.234e-04	2.754e-04	0.811	0.41773	
ZN_E	3.043e-01	5.853e-01	0.520	0.60341	
PH_E	-3.379e+00	1.581e+01	-0.214	0.83091	
DBO_E	1.039e-01	4.071e-02	2.552	0.01109	*
DQO_E	-8.802e-03	2.260e-02	-0.389	0.69718	
SS_E	-6.926e-03	4.232e-02	-0.164	0.87009	
SSV_E	-5.275e-01	3.278e-01	-1.609	0.10843	
SED_E	-2.445e+00	1.367e+00	-1.789	0.07448	.
COND_E	-5.192e-03	1.821e-02	-0.285	0.77573	
PH_P	2.413e+01	1.986e+01	1.215	0.22514	
DBO_P	-1.055e-02	3.551e-02	-0.297	0.76661	
SS_P	-3.130e-02	3.717e-02	-0.842	0.40028	
SSV_P	1.640e-01	2.892e-01	0.567	0.57094	
SED_P	2.663e+00	1.380e+00	1.930	0.05441	.
COND_P	-1.880e-03	1.852e-02	-0.101	0.91921	
PH_D	-5.401e+01	1.757e+01	-3.074	0.00227	**
DBO_D	-1.571e-01	8.772e-02	-1.791	0.07414	.
DQO_D	3.657e-01	4.796e-02	7.625	2.01e-13	***
SS_D	-1.301e-01	1.190e-01	-1.094	0.27481	
SSV_D	-2.245e-01	2.783e-01	-0.807	0.42030	
SED_D	-1.026e+01	5.468e+00	-1.876	0.06139	.
COND_D	9.427e-03	1.220e-02	0.773	0.44028	

 Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 30.66 on 377 degrees of freedom
 (127 observations deleted due to missingness)
 Multiple R-squared: 0.322, Adjusted R-squared: 0.2824
 F-statistic: 8.139 on 22 and 377 DF, p-value: < 2.2e-16

```
> r1_ss_s
```

```
Call:
```

```
lm(formula = SS_S ~ Q_E + ZN_E + PH_E + DBO_E + DQO_E + SS_E +  
    SSV_E + SED_E + COND_E + PH_P + DBO_P + SS_P + SSV_P + SED_P +  
    COND_P + PH_D + DBO_D + DQO_D + SS_D + SSV_D + SED_D + COND_D,  
    data = radiol)
```

```
Residuals:
```

Min	1Q	Median	3Q	Max
-24.871	-6.811	-1.866	3.352	195.621

```
Coefficients:
```

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)	
(Intercept)	1.519e+02	3.292e+01	4.614	5.38e-06	***
Q_E	-1.574e-05	1.323e-04	-0.119	0.90535	
ZN_E	-6.511e-01	3.368e-01	-1.933	0.05392	.
PH_E	6.095e+00	7.731e+00	0.788	0.43100	
DBO_E	4.358e-02	1.969e-02	2.213	0.02745	*
DQO_E	-1.764e-02	1.093e-02	-1.614	0.10726	
SS_E	3.461e-02	1.958e-02	1.768	0.07786	.
SSV_E	-1.657e-01	1.584e-01	-1.046	0.29625	
SED_E	-1.102e+00	6.678e-01	-1.650	0.09983	.
COND_E	8.047e-04	8.323e-03	0.097	0.92303	
PH_P	1.471e+01	9.725e+00	1.513	0.13116	
DBO_P	-2.204e-02	1.702e-02	-1.295	0.19623	
SS_P	-5.278e-02	1.780e-02	-2.965	0.00321	**
SSV_P	-1.287e-01	1.407e-01	-0.914	0.36110	
SED_P	1.424e+00	6.733e-01	2.115	0.03506	*
COND_P	-5.618e-03	8.729e-03	-0.644	0.52021	
PH_D	-3.701e+01	8.580e+00	-4.314	2.04e-05	***
DBO_D	4.691e-02	4.256e-02	1.102	0.27103	
DQO_D	6.649e-02	2.327e-02	2.858	0.00449	**
SS_D	5.146e-02	5.648e-02	0.911	0.36283	
SSV_D	-1.543e-02	1.340e-01	-0.115	0.90840	
SED_D	-4.066e+00	2.645e+00	-1.537	0.12503	
COND_D	3.082e-03	5.854e-03	0.527	0.59880	

```
---
```

```
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

```
Residual standard error: 15.05 on 388 degrees of freedom  
(116 observations deleted due to missingness)
```

```
Multiple R-squared:  0.173,    Adjusted R-squared:  0.1261
```

```
F-statistic: 3.688 on 22 and 388 DF,  p-value: 8.651e-08
```

```
> r1_ssv_s
```

```
Call:
```

```
lm(formula = SSV_S ~ Q_E + ZN_E + PH_E + DBO_E + DQO_E + SS_E +  
    SSV_E + SED_E + COND_E + PH_P + DBO_P + SS_P + SSV_P + SED_P +  
    COND_P + PH_D + DBO_D + DQO_D + SS_D + SSV_D + SED_D + COND_D,  
    data = radiol)
```

```
Residuals:
```

Min	1Q	Median	3Q	Max
-41.017	-3.875	0.458	4.497	24.307

```
Coefficients:
```

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)	
(Intercept)	2.788e+01	1.750e+01	1.593	0.11194	
Q_E	6.177e-05	7.030e-05	0.879	0.38017	
ZN_E	5.110e-01	1.779e-01	2.873	0.00429	**
PH_E	-1.303e+00	4.084e+00	-0.319	0.74983	
DBO_E	-2.671e-02	1.040e-02	-2.568	0.01060	*
DQO_E	-4.561e-03	5.786e-03	-0.788	0.43105	
SS_E	1.326e-02	1.037e-02	1.278	0.20198	
SSV_E	2.244e-01	8.377e-02	2.679	0.00770	**
SED_E	-2.712e-01	3.573e-01	-0.759	0.44833	
COND_E	2.378e-03	4.398e-03	0.541	0.58908	

PH_P	7.377e+00	5.139e+00	1.436	0.15194
DBO_P	7.264e-03	9.037e-03	0.804	0.42198
SS_P	-2.638e-03	9.464e-03	-0.279	0.78057
SSV_P	-1.236e-01	7.512e-02	-1.646	0.10064
SED_P	1.695e-01	3.611e-01	0.469	0.63906
COND_P	-2.916e-03	4.612e-03	-0.632	0.52766
PH_D	-4.330e+00	4.531e+00	-0.956	0.33989
DBO_D	-1.445e-02	2.251e-02	-0.642	0.52138
DQO_D	8.156e-03	1.237e-02	0.659	0.51024
SS_D	2.455e-02	2.985e-02	0.823	0.41124
SSV_D	4.379e-01	7.103e-02	6.165	1.78e-09 ***
SED_D	3.570e+00	1.397e+00	2.555	0.01099 *
COND_D	-2.239e-03	3.098e-03	-0.723	0.47022

 signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 7.945 on 386 degrees of freedom
 (118 observations deleted due to missingness)
 Multiple R-squared: 0.3007, Adjusted R-squared: 0.2608
 F-statistic: 7.545 on 22 and 386 DF, p-value: < 2.2e-16

> r1_SED_S

Call:
 lm(formula = SED_S ~ Q_E + ZN_E + PH_E + DBO_E + DQO_E + SS_E +
 SSV_E + SED_E + COND_E + PH_P + DBO_P + SS_P + SSV_P + SED_P +
 COND_P + PH_D + DBO_D + DQO_D + SS_D + SSV_D + SED_D + COND_D,
 data = radiol)

Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-0.22380	-0.05936	-0.01812	0.03028	3.14881

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)	
(Intercept)	1.229e+00	4.596e-01	2.675	0.00779	**
Q_E	-8.294e-07	1.847e-06	-0.449	0.65359	
ZN_E	-6.495e-03	4.702e-03	-1.381	0.16793	
PH_E	5.907e-02	1.079e-01	0.547	0.58453	
DBO_E	1.674e-04	2.749e-04	0.609	0.54289	
DQO_E	-2.838e-04	1.526e-04	-1.860	0.06366	.
SS_E	4.664e-04	2.733e-04	1.707	0.08870	.
SSV_E	1.354e-03	2.212e-03	0.612	0.54084	
SED_E	3.845e-04	9.323e-03	0.041	0.96713	
COND_E	7.133e-05	1.162e-04	0.614	0.53970	
PH_P	3.045e-01	1.358e-01	2.243	0.02549	*
DBO_P	2.687e-05	2.376e-04	0.113	0.91002	
SS_P	-4.529e-04	2.485e-04	-1.823	0.06913	.
SSV_P	-3.151e-03	1.965e-03	-1.604	0.10960	
SED_P	2.168e-03	9.400e-03	0.231	0.81772	
COND_P	-1.917e-04	1.219e-04	-1.573	0.11649	
PH_D	-4.900e-01	1.198e-01	-4.091	5.24e-05	***
DBO_D	1.182e-04	5.941e-04	0.199	0.84244	
DQO_D	9.323e-04	3.248e-04	2.870	0.00433	**
SS_D	-4.997e-04	7.885e-04	-0.634	0.52663	
SSV_D	-1.875e-03	1.871e-03	-1.002	0.31698	
SED_D	4.702e-03	3.693e-02	0.127	0.89874	
COND_D	7.825e-05	8.172e-05	0.958	0.33891	

 signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.2101 on 388 degrees of freedom
 (116 observations deleted due to missingness)
 Multiple R-squared: 0.103, Adjusted R-squared: 0.05214
 F-statistic: 2.025 on 22 and 388 DF, p-value: 0.004398

> r1_COND_S

Call:
 lm(formula = COND_S ~ Q_E + ZN_E + PH_E + DBO_E + DQO_E + SS_E +

```
SSV_E + SED_E + COND_E + PH_P + DBO_P + SS_P + SSV_P + SED_P +  
COND_P + PH_D + DBO_D + DQO_D + SS_D + SSV_D + SED_D + COND_D,  
data = radio1)
```

Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-487.60	-60.76	-2.43	54.75	822.72

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	2.445e+02	2.679e+02	0.913	0.36199
Q_E	-9.699e-05	1.076e-03	-0.090	0.92825
ZN_E	3.767e-01	2.289e+00	0.165	0.86938
PH_E	5.625e+01	6.289e+01	0.894	0.37164
DBO_E	-1.080e-01	1.601e-01	-0.674	0.50054
DQO_E	-2.079e-02	8.893e-02	-0.234	0.81524
SS_E	1.565e-01	1.593e-01	0.983	0.32623
SSV_E	-7.186e-01	1.289e+00	-0.557	0.57751
SED_E	-1.934e+00	5.431e+00	-0.356	0.72194
COND_E	-6.401e-02	6.773e-02	-0.945	0.34518
PH_P	-4.196e+01	7.898e+01	-0.531	0.59552
DBO_P	-1.913e-01	1.384e-01	-1.382	0.16770
SS_P	-3.883e-02	1.446e-01	-0.269	0.78842
SSV_P	1.310e+00	1.145e+00	1.145	0.25306
SED_P	-3.288e+00	5.473e+00	-0.601	0.54835
COND_P	2.224e-01	7.103e-02	3.130	0.00188 **
PH_D	-3.170e+01	6.952e+01	-0.456	0.64864
DBO_D	7.758e-01	3.459e-01	2.243	0.02545 *
DQO_D	-5.256e-01	1.893e-01	-2.777	0.00576 **
SS_D	4.942e-01	4.596e-01	1.075	0.28295
SSV_D	2.507e-02	1.091e+00	0.023	0.98168
SED_D	2.906e+01	2.151e+01	1.351	0.17755
COND_D	7.886e-01	4.758e-02	16.573	< 2e-16 ***

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 122.4 on 389 degrees of freedom

(115 observations deleted due to missingness)

Multiple R-squared: 0.9062, Adjusted R-squared: 0.9009

F-statistic: 170.8 on 22 and 389 DF, p-value: < 2.2e-16

> r1_RD_DBO_P

Call:

```
lm(formula = RD_DBO_P ~ Q_E + ZN_E + PH_E + DBO_E + DQO_E + SS_E +  
SSV_E + SED_E + COND_E + PH_P + DBO_P + SS_P + SSV_P + SED_P +  
COND_P + PH_D + DBO_D + DQO_D + SS_D + SSV_D + SED_D + COND_D,  
data = radio1)
```

Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-17.547	-1.733	1.143	2.733	13.923

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	2.928e+01	1.070e+01	2.736	0.00652 **
Q_E	-9.699e-05	4.269e-05	-2.272	0.02367 *
ZN_E	8.415e-02	8.984e-02	0.937	0.34952
PH_E	2.130e+00	2.477e+00	0.860	0.39038
DBO_E	1.914e-02	6.299e-03	3.039	0.00254 **
DQO_E	-9.059e-04	3.566e-03	-0.254	0.79961
SS_E	3.129e-03	6.299e-03	0.497	0.61965
SSV_E	4.239e-02	5.088e-02	0.833	0.40524
SED_E	-2.023e-01	2.149e-01	-0.941	0.34716
COND_E	7.369e-04	2.661e-03	0.277	0.78200
PH_P	1.748e+00	3.129e+00	0.559	0.57670
DBO_P	2.363e-01	5.598e-03	42.215	< 2e-16 ***
SS_P	4.456e-03	5.709e-03	0.781	0.43555
SSV_P	-2.309e-02	4.510e-02	-0.512	0.60897
SED_P	7.109e-02	2.166e-01	0.328	0.74294

COND_P	-1.814e-03	2.786e-03	-0.651	0.51548
PH_D	-1.156e+00	2.746e+00	-0.421	0.67399
DBO_D	-4.434e-01	1.412e-02	-31.401	< 2e-16 ***
DQO_D	-3.268e-03	7.544e-03	-0.433	0.66511
SS_D	-4.035e-02	1.827e-02	-2.208	0.02784 *
SSV_D	-6.695e-02	4.338e-02	-1.543	0.12357
SED_D	4.391e-01	8.468e-01	0.519	0.60436
COND_D	1.334e-03	1.867e-03	0.715	0.47526

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 4.787 on 377 degrees of freedom
(127 observations deleted due to missingness)

Multiple R-squared: 0.902, Adjusted R-squared: 0.8963

F-statistic: 157.8 on 22 and 377 DF, p-value: < 2.2e-16

> r1_RD_SS_P

Call:

```
lm(formula = RD_SS_P ~ Q_E + ZN_E + PH_E + DBO_E + DQO_E + SS_E +
    SSV_E + SED_E + COND_E + PH_P + DBO_P + SS_P + SSV_P + SED_P +
    COND_P + PH_D + DBO_D + DQO_D + SS_D + SSV_D + SED_D + COND_D,
    data = radiol)
```

Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-38.688	-2.562	0.744	3.813	14.247

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)	
(Intercept)	9.042e+01	1.429e+01	6.327	6.90e-10	***
Q_E	-7.899e-05	5.728e-05	-1.379	0.168687	
ZN_E	2.544e-01	1.215e-01	2.093	0.036964	*
PH_E	-1.378e+00	3.344e+00	-0.412	0.680447	
DBO_E	4.311e-03	8.498e-03	0.507	0.612261	
DQO_E	3.683e-02	4.728e-03	7.790	6.23e-14	***
SS_E	-3.029e-02	8.479e-03	-3.572	0.000399	***
SSV_E	-1.078e-01	6.858e-02	-1.571	0.116950	
SED_E	-4.409e-01	2.909e-01	-1.516	0.130344	
COND_E	-1.175e-03	3.598e-03	-0.327	0.744197	
PH_P	-3.097e+00	4.195e+00	-0.738	0.460735	
DBO_P	1.492e-02	7.386e-03	2.021	0.044010	*
SS_P	7.492e-02	7.705e-03	9.723	< 2e-16	***
SSV_P	-3.539e-01	6.076e-02	-5.823	1.21e-08	***
SED_P	-1.961e-01	2.930e-01	-0.669	0.503800	
COND_P	1.574e-03	3.773e-03	0.417	0.676815	
PH_D	2.941e+00	3.691e+00	0.797	0.426019	
DBO_D	-1.898e-03	1.838e-02	-0.103	0.917812	
DQO_D	-1.034e-02	1.007e-02	-1.028	0.304817	
SS_D	-2.564e-01	2.441e-02	-10.502	< 2e-16	***
SSV_D	1.342e-01	5.798e-02	2.314	0.021183	*
SED_D	-4.387e+00	1.142e+00	-3.840	0.000144	***
COND_D	6.757e-04	2.526e-03	0.267	0.789250	

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 6.498 on 387 degrees of freedom
(117 observations deleted due to missingness)

Multiple R-squared: 0.756, Adjusted R-squared: 0.7421

F-statistic: 54.5 on 22 and 387 DF, p-value: < 2.2e-16

> r1_RD_SED_P

Call:

```
lm(formula = RD_SED_P ~ Q_E + ZN_E + PH_E + DBO_E + DQO_E + SS_E +
    SSV_E + SED_E + COND_E + PH_P + DBO_P + SS_P + SSV_P + SED_P +
    COND_P + PH_D + DBO_D + DQO_D + SS_D + SSV_D + SED_D + COND_D,
    data = radiol)
```

Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-27.5273	-0.9316	0.5487	1.7960	24.3966

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)	
(Intercept)	8.763e+01	8.910e+00	9.836	< 2e-16	***
Q_E	-4.274e-05	3.571e-05	-1.197	0.23212	
ZN_E	6.787e-02	7.577e-02	0.896	0.37090	
PH_E	2.369e+00	2.085e+00	1.136	0.25652	
DBO_E	-3.147e-03	5.298e-03	-0.594	0.55290	
DQO_E	1.515e-02	2.948e-03	5.140	4.36e-07	***
SS_E	-8.619e-03	5.287e-03	-1.630	0.10386	
SSV_E	-5.087e-02	4.276e-02	-1.190	0.23490	
SED_E	-2.357e-01	1.813e-01	-1.300	0.19437	
COND_E	3.275e-03	2.244e-03	1.460	0.14519	
PH_P	-2.445e+00	2.615e+00	-0.935	0.35049	
DBO_P	1.067e-02	4.605e-03	2.316	0.02107	*
SS_P	-8.443e-05	4.804e-03	-0.018	0.98599	
SSV_P	-7.874e-02	3.788e-02	-2.078	0.03833	*
SED_P	8.374e-01	1.827e-01	4.584	6.16e-06	***
COND_P	-2.113e-03	2.353e-03	-0.898	0.36962	
PH_D	3.860e-01	2.301e+00	0.168	0.86688	
DBO_D	-6.660e-03	1.146e-02	-0.581	0.56150	
DQO_D	-9.158e-03	6.277e-03	-1.459	0.14540	
SS_D	4.021e-02	1.522e-02	2.642	0.00858	**
SSV_D	1.098e-01	3.615e-02	3.038	0.00254	**
SED_D	-2.088e+01	7.122e-01	-29.317	< 2e-16	***
COND_D	-3.453e-04	1.575e-03	-0.219	0.82660	

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 4.051 on 387 degrees of freedom

(117 observations deleted due to missingness)

Multiple R-squared: 0.795, Adjusted R-squared: 0.7834

F-statistic: 68.24 on 22 and 387 DF, p-value: < 2.2e-16

> r1_RD_DBO_S

Call:

```
lm(formula = RD_DBO_S ~ Q_E + ZN_E + PH_E + DBO_E + DQO_E + SS_E +
    SSV_E + SED_E + COND_E + PH_P + DBO_P + SS_P + SSV_P + SED_P +
    COND_P + PH_D + DBO_D + DQO_D + SS_D + SSV_D + SED_D + COND_D,
    data = radiol)
```

Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-69.382	-2.446	0.971	3.779	10.893

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)	
(Intercept)	4.531e+01	1.428e+01	3.173	0.001629	**
Q_E	2.418e-05	5.714e-05	0.423	0.672460	
ZN_E	1.293e-03	1.212e-01	0.011	0.991490	
PH_E	-5.098e-02	3.377e+00	-0.015	0.987963	
DBO_E	-1.403e-02	8.567e-03	-1.638	0.102189	
DQO_E	1.251e-03	4.716e-03	0.265	0.790865	
SS_E	-4.510e-04	8.494e-03	-0.053	0.957679	
SSV_E	4.241e-02	6.856e-02	0.619	0.536593	
SED_E	2.686e-01	2.912e-01	0.922	0.356938	
COND_E	4.238e-04	3.586e-03	0.118	0.905984	
PH_P	-8.888e+00	4.239e+00	-2.097	0.036696	*
DBO_P	1.145e-02	7.458e-03	1.535	0.125493	
SS_P	2.535e-03	7.749e-03	0.327	0.743702	
SSV_P	2.052e-02	6.077e-02	0.338	0.735831	
SED_P	-3.344e-01	2.935e-01	-1.140	0.255123	
COND_P	-4.370e-04	3.770e-03	-0.116	0.907791	
PH_D	1.247e+01	3.687e+00	3.382	0.000795	***
DBO_D	8.290e-02	1.840e-02	4.506	8.78e-06	***
DQO_D	-2.748e-02	1.011e-02	-2.719	0.006856	**
SS_D	1.818e-02	2.473e-02	0.735	0.462779	

```
SSV_D      -6.810e-03  5.823e-02  -0.117  0.906952
SED_D      -7.929e-01  1.142e+00  -0.694  0.487948
COND_D      1.788e-03  2.516e-03   0.711  0.477680
```

```
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

```
Residual standard error: 6.458 on 381 degrees of freedom
(123 observations deleted due to missingness)
Multiple R-squared:  0.1659, Adjusted R-squared:  0.1177
F-statistic: 3.444 on 22 and 381 DF, p-value: 4.794e-07
```

```
> r1_RD_DQO_S
```

```
Call:
```

```
lm(formula = RD_DQO_S ~ Q_E + ZN_E + PH_E + DBO_E + DQO_E + SS_E +
    SSV_E + SED_E + COND_E + PH_P + DBO_P + SS_P + SSV_P + SED_P +
    COND_P + PH_D + DBO_D + DQO_D + SS_D + SSV_D + SED_D + COND_D,
    data = radio1)
```

```
Residuals:
```

```
      Min       1Q   Median       3Q      Max
-42.669  -4.769   1.095   6.411  31.301
```

```
Coefficients:
```

```
      Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept) -2.220e+01  2.293e+01  -0.968   0.3336
Q_E          -1.157e-04  9.172e-05  -1.262   0.2078
ZN_E         -2.140e-01  1.945e-01  -1.100   0.2718
PH_E          6.467e+00  5.277e+00   1.226   0.2211
DBO_E        -2.741e-02  1.360e-02  -2.016   0.0446 *
DQO_E        -9.235e-03  7.539e-03  -1.225   0.2214
SS_E          1.591e-02  1.409e-02   1.129   0.2596
SSV_E         2.414e-01  1.089e-01   2.216   0.0273 *
SED_E         8.388e-01  4.575e-01   1.833   0.0675 .
COND_E        3.850e-03  6.064e-03   0.635   0.5259
PH_P         -1.234e+01  6.613e+00  -1.866   0.0629 .
DBO_P         2.559e-03  1.187e-02   0.216   0.8294
SS_P         -3.038e-03  1.243e-02  -0.244   0.8071
SSV_P        -1.564e-01  9.636e-02  -1.623   0.1054
SED_P        -7.834e-01  4.625e-01  -1.694   0.0912 .
COND_P       -3.077e-03  6.173e-03  -0.498   0.6185
PH_D          1.607e+01  5.838e+00   2.753   0.0062 **
DBO_D         5.812e-02  2.919e-02   1.991   0.0472 *
DQO_D         2.686e-03  1.601e-02   0.168   0.8669
SS_D          5.081e-02  3.955e-02   1.285   0.1997
SSV_D         5.788e-02  9.260e-02   0.625   0.5323
SED_D         2.486e+00  1.817e+00   1.368   0.1722
COND_D       -1.865e-03  4.055e-03  -0.460   0.6458
```

```
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

```
Residual standard error: 10.18 on 375 degrees of freedom
(129 observations deleted due to missingness)
Multiple R-squared:  0.1561, Adjusted R-squared:  0.1065
F-statistic: 3.152 on 22 and 375 DF, p-value: 3.568e-06
```

```
> r1_RD_DBO_G
```

```
Call:
```

```
lm(formula = RD_DBO_G ~ Q_E + ZN_E + PH_E + DBO_E + DQO_E + SS_E +
    SSV_E + SED_E + COND_E + PH_P + DBO_P + SS_P + SSV_P + SED_P +
    COND_P + PH_D + DBO_D + DQO_D + SS_D + SSV_D + SED_D + COND_D,
    data = radio1)
```

```
Residuals:
```

```
      Min       1Q   Median       3Q      Max
-60.997  -1.438   0.631   2.471   8.781
```

```
Coefficients:
```

```
      Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
```

```

(Intercept)  5.889e+01  1.249e+01  4.716  3.37e-06 ***
Q_E          -4.100e-05  4.987e-05  -0.822  0.411490
ZN_E          5.672e-02  1.058e-01  0.536  0.592372
PH_E          4.600e+00  2.926e+00  1.572  0.116776
DBO_E         3.773e-02  7.486e-03  5.041  7.19e-07 ***
DQO_E         1.566e-03  4.130e-03  0.379  0.704718
SS_E          -8.425e-04  7.430e-03  -0.113  0.909777
SSV_E         6.256e-02  5.977e-02  1.047  0.295982
SED_E         3.316e-01  2.536e-01  1.308  0.191785
COND_E        -3.117e-04  3.136e-03  -0.099  0.920871
PH_P          -1.390e+01  3.668e+00  -3.790  0.000175 ***
DBO_P          9.932e-03  6.517e-03  1.524  0.128343
SS_P           4.022e-03  6.775e-03  0.594  0.553078
SSV_P         -2.666e-03  5.304e-02  -0.050  0.959940
SED_P         -3.799e-01  2.559e-01  -1.485  0.138454
COND_P         8.762e-04  3.299e-03  0.266  0.790691
PH_D           1.285e+01  3.222e+00  3.988  7.98e-05 ***
DBO_D         -2.920e-02  1.607e-02  -1.817  0.069949 .
DQO_D         -1.729e-02  8.833e-03  -1.958  0.050984 .
SS_D           2.592e-03  2.161e-02  0.120  0.904620
SSV_D         -4.760e-02  5.071e-02  -0.939  0.348534
SED_D         -1.242e-01  9.979e-01  -0.124  0.901038
COND_D         7.333e-04  2.198e-03  0.334  0.738909
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 5.643 on 381 degrees of freedom
(123 observations deleted due to missingness)
Multiple R-squared:  0.2291, Adjusted R-squared:  0.1846
F-statistic: 5.146 on 22 and 381 DF, p-value: 3.309e-12

```

```
> r1_RD_DQO_G
```

```

Call:
lm(formula = RD_DQO_G ~ Q_E + ZN_E + PH_E + DBO_E + DQO_E + SS_E +
    SSV_E + SED_E + COND_E + PH_P + DBO_P + SS_P + SSV_P + SED_P +
    COND_P + PH_D + DBO_D + DQO_D + SS_D + SSV_D + SED_D + COND_D,
    data = radiol)

```

```

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-37.473  -3.015   1.097   4.417  20.248

```

```

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  1.716e+01  1.644e+01  1.043   0.2974
Q_E          -1.137e-04  6.575e-05  -1.729   0.0846 .
ZN_E          -8.135e-02  1.395e-01  -0.583   0.5601
PH_E          4.688e+00  3.804e+00  1.232   0.2187
DBO_E         -1.098e-02  9.744e-03  -1.127   0.2605
DQO_E         3.826e-02  5.401e-03  7.083  7.09e-12 ***
SS_E          4.692e-03  1.011e-02  0.464   0.6428
SSV_E         1.774e-01  7.848e-02  2.260   0.0244 *
SED_E         6.303e-01  3.283e-01  1.920   0.0556 .
COND_E        3.076e-03  4.350e-03  0.707   0.4800
PH_P          -8.327e+00  4.742e+00  -1.756   0.0799 .
DBO_P         -2.182e-03  8.505e-03  -0.257   0.7976
SS_P          4.391e-03  8.911e-03  0.493   0.6225
SSV_P         -9.883e-02  6.905e-02  -1.431   0.1532
SED_P         -5.836e-01  3.316e-01  -1.760   0.0792 .
COND_P        -2.231e-03  4.425e-03  -0.504   0.6144
PH_D           1.083e+01  4.195e+00  2.581   0.0102 *
DBO_D          3.022e-02  2.091e-02  1.445   0.1493
DQO_D         -6.747e-02  1.150e-02  -5.868  9.76e-09 ***
SS_D           2.557e-02  2.835e-02  0.902   0.3676
SSV_D         1.739e-02  6.665e-02  0.261   0.7943
SED_D         1.645e+00  1.302e+00  1.263   0.2073
COND_D        -9.759e-04  2.918e-03  -0.334   0.7383

```

```

---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

```

Residual standard error: 7.295 on 373 degrees of freedom
 (131 observations deleted due to missingness)
 Multiple R-squared: 0.3065, Adjusted R-squared: 0.2656
 F-statistic: 7.495 on 22 and 373 DF, p-value: < 2.2e-16

```
> r1_RD_SS_G
```

```
Call:
lm(formula = RD_SS_G ~ Q_E + ZN_E + PH_E + DBO_E + DQO_E + SS_E +
    SSV_E + SED_E + COND_E + PH_P + DBO_P + SS_P + SSV_P + SED_P +
    COND_P + PH_D + DBO_D + DQO_D + SS_D + SSV_D + SED_D + COND_D,
    data = radiol)
```

Residuals:

	Min	1Q	Median	3Q	Max
	-72.721	-1.728	1.316	3.451	10.797

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	3.129e+01	1.595e+01	1.962	0.05049 .
Q_E	-4.000e-05	6.393e-05	-0.626	0.53191
ZN_E	3.864e-01	1.624e-01	2.380	0.01782 *
PH_E	1.257e+00	3.734e+00	0.337	0.73647
DBO_E	-1.052e-02	9.490e-03	-1.108	0.26848
DQO_E	1.497e-02	5.277e-03	2.837	0.00479 **
SS_E	-2.451e-03	9.467e-03	-0.259	0.79585
SSV_E	2.366e-02	7.654e-02	0.309	0.75741
SED_E	5.632e-01	3.248e-01	1.734	0.08373 .
COND_E	4.405e-04	4.016e-03	0.110	0.91273
PH_P	-1.214e+01	4.691e+00	-2.588	0.01002 *
DBO_P	9.676e-03	8.250e-03	1.173	0.24157
SS_P	1.861e-02	8.615e-03	2.160	0.03138 *
SSV_P	-3.517e-02	6.786e-02	-0.518	0.60459
SED_P	-7.093e-01	3.274e-01	-2.166	0.03089 *
COND_P	8.633e-04	4.211e-03	0.205	0.83768
PH_D	1.806e+01	4.138e+00	4.366	1.63e-05 ***
DBO_D	-3.041e-02	2.054e-02	-1.481	0.13953
DQO_D	-2.523e-02	1.124e-02	-2.245	0.02533 *
SS_D	5.584e-03	2.725e-02	0.205	0.83774
SSV_D	3.040e-02	6.471e-02	0.470	0.63872
SED_D	7.566e-01	1.276e+00	0.593	0.55347
COND_D	-2.909e-04	2.823e-03	-0.103	0.91797

 Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 7.252 on 386 degrees of freedom
 (118 observations deleted due to missingness)
 Multiple R-squared: 0.2197, Adjusted R-squared: 0.1752
 F-statistic: 4.939 on 22 and 386 DF, p-value: 1.353e-11

```
> r1_RD_SED_G
```

```
Call:
lm(formula = RD_SED_G ~ Q_E + ZN_E + PH_E + DBO_E + DQO_E + SS_E +
    SSV_E + SED_E + COND_E + PH_P + DBO_P + SS_P + SSV_P + SED_P +
    COND_P + PH_D + DBO_D + DQO_D + SS_D + SSV_D + SED_D + COND_D,
    data = radiol)
```

Residuals:

	Min	1Q	Median	3Q	Max
	-56.654	-0.659	0.505	1.408	4.704

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	7.054e+01	1.043e+01	6.764	5e-11 ***
Q_E	2.239e-05	4.184e-05	0.535	0.592933
ZN_E	1.230e-01	1.062e-01	1.158	0.247404
PH_E	-2.425e+00	2.446e+00	-0.991	0.322233
DBO_E	-4.140e-03	6.233e-03	-0.664	0.506901

DQO_E	6.965e-03	3.470e-03	2.007	0.045457	*
SS_E	-1.420e-02	6.192e-03	-2.293	0.022391	*
SSV_E	-1.550e-02	5.014e-02	-0.309	0.757366	
SED_E	2.674e-01	2.124e-01	1.259	0.208691	
COND_E	-2.002e-03	2.628e-03	-0.762	0.446537	
PH_P	-4.666e+00	3.082e+00	-1.514	0.130931	
DBO_P	-2.300e-03	5.395e-03	-0.426	0.670093	
SS_P	1.405e-02	5.635e-03	2.493	0.013084	*
SSV_P	5.814e-02	4.452e-02	1.306	0.192369	
SED_P	-2.332e-01	2.140e-01	-1.089	0.276640	
COND_P	4.222e-03	2.761e-03	1.529	0.126985	
PH_D	1.005e+01	2.709e+00	3.709	0.000239	***
DBO_D	-3.665e-04	1.351e-02	-0.027	0.978372	
DQO_D	-2.060e-02	7.418e-03	-2.778	0.005741	**
SS_D	1.044e-02	1.784e-02	0.585	0.558841	
SSV_D	4.216e-02	4.231e-02	0.996	0.319701	
SED_D	-5.109e-01	8.356e-01	-0.611	0.541272	
COND_D	-1.194e-03	1.847e-03	-0.646	0.518516	

 Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 4.741 on 385 degrees of freedom
 (119 observations deleted due to missingness)
 Multiple R-squared: 0.1034, Adjusted R-squared: 0.05218
 F-statistic: 2.019 on 22 and 385 DF, p-value: 0.004582