

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

**MODELO DE AVALIAÇÃO DO NÍVEL DE MATURIDADE DAS
TECNOLOGIAS DA INDÚSTRIA 4.0 APLICADO AO SETOR
SUCROENERGÉTICO**

CLÉSIO APARECIDO MARINHO

São Carlos
2020

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

**MODELO DE AVALIAÇÃO DO NÍVEL DE MATURIDADE DAS
TECNOLOGIAS DA INDÚSTRIA 4.0 APLICADO AO SETOR
SUCROENERGÉTICO**

CLÉSIO APARECIDO MARINHO

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de São Carlos, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Produção.

Orientador: Prof. Dr. Pedro Carlos Oprime

São Carlos
2020



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção

Folha de Aprovação

Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato Clésio Aparecido Marinho, realizada em 24/09/2020.

Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Pedro Carlos Oprime (UFSCar)

Prof. Dr. Márcio Lopes Pimenta (UFU)

Prof. Dr. Ricardo Coser Mergulhão (UFSCar)

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção.

*Dedico este trabalho a
minha esposa Maria José,
e a meus filhos João Vitor e
Pedro Henrique.*

AGRADECIMENTOS

Como gesto de fé agradeço a DEUS por esta conquista.

A toda a minha família pelo apoio e incentivo.

Ao meu orientador professor Dr. Pedro Carlos Oprime por todo apoio e orientação na condução deste trabalho.

Aos colaboradores e professores do Departamento de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da UFSCar, pela atenção e por todo conhecimento compartilhado.

Aos colaboradores e gestores das empresas avaliadas pela disponibilidade e atenção durante a realização da pesquisa.

A todos os amigos verdadeiros, que contribuíram direta ou indiretamente para a concretização deste trabalho, de um modo especial ao meu amigo Juliano Endrigo Sordan, pelo apoio e incentivo do início ao fim da jornada.

Aos professores e amigos da Fatec Sertãozinho, Mauricio Angeloni, Mara Jabur, Rodrigo Ricardo, por me apoiarem durante o período de realização deste trabalho.

*“Mesmo que já tenha feito
uma longa caminhada,
sempre haverá mais um
caminho a percorrer”
(Santo Agostinho)*

RESUMO

MARINHO, Clesio A. **Modelo de avaliação do nível de maturidade das tecnologias da indústria 4.0 aplicado ao setor sucroenergético**. 2020. 148 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), São Carlos, 2020.

A intensificação das tecnologias digitais no ambiente industrial poderá demandar novas práticas de gestão, no contexto da Quarta Revolução Industrial, também conhecida como Indústria 4.0. Acredita-se que tais tecnologias sejam capazes de aumentar a competitividade das empresas, bem como a facilitar a interação homem/máquina e a integração entre clientes e fornecedores da cadeia produtiva. Esta dissertação tem por objetivo avaliar como os processos industriais do setor energético estão implementando as tecnologias e conceitos da Indústria 4.0, considerando os gargalos tecnológicos, gerenciais e estratégicos. Para isso, realizou-se uma revisão da literatura, de onde foi possível identificar sete modelos de maturidade para a Indústria 4.0. A análise em profundidade dessas publicações resultou na construção de um modelo de maturidade direcionado para o setor sucroenergético. O modelo proposto contempla cinco dimensões: Estratégia, Gestão de Dados, Equipes de Trabalho, Integração Vertical e Integração Horizontal. A operacionalização desse modelo de maturidade tem como base uma estrutura do Prêmio Nacional da Qualidade. Com o propósito de testar empiricamente esse modelo, foi conduzido um estudo de caso em duas empresas do setor sucroenergético. Tal estudo captou a percepção dos entrevistados quanto a implementação dos conceitos e tecnologias da Indústria 4.0 nos processos industriais. Os resultados revelaram que as empresas participantes da pesquisa já estão aplicando os conceitos da indústria 4.0 no gerenciamento dos seus processos industriais, de forma que as empresas avaliadas obtiveram 731 e 788 pontos dos 1000 possíveis, e que o modelo de maturidade proposto pode auxiliar o desenvolvimento de estratégias de transformação digital em organizações do setor sucroenergético.

Palavras-chave: Indústria 4.0. Tecnologias Digitais. Modelos de Maturidade. Setor Sucroenergético.

ABSTRACT

MARINHO, Clesio A. **Model for assessing the maturity level of industry 4.0 technologies applied to the sugar-energy sector.** 2020. 148 f. Dissertation (Master) - Federal University of São Carlos (UFSCar), São Carlos, 2020.

The intensification of digital technologies in the industrial environment may require new management practices in the context of the Fourth Industrial Revolution, also known as Industry 4.0. It is believed that such technologies are capable of increasing the competitiveness of companies, as well as facilitating human/machine interaction and integration between customers and suppliers in the production chain. This dissertation aims to evaluate how the industrial processes of the energy sector are implementing the technologies and concepts of Industry 4.0, considering the technological, managerial and strategic bottlenecks. For this, a literature review was conducted, from which it was possible to identify seven models of maturity for Industry 4.0. The in-depth analysis of these publications resulted in the construction of a maturity model directed to the sugar-energy sector. The proposed model contains five dimensions: Strategy, Data Management, Work Teams, Vertical Integration and Horizontal Integration. The operationalization of this maturity model is based on the structure of the National Quality Award. To empirically test this model, a case study was conducted in two companies in the sugar-energy sector. This study captured the interviewees' perception of the implementation of the concepts and technologies of Industry 4.0 in industrial processes. The results revealed that the companies participating in the research are already applying the concepts of industry 4.0 in the management of their industrial processes, so that the evaluated companies obtained 731 and 788 points out of 1000 possible, and that the proposed maturity model can help the development of digital transformation strategies in organizations in the sugar-energy sector.

Keywords: Industry 4.0. Digital Technologies. Maturity Models. Sugar-energy sector.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Evolução da produção de etanol total	18
Figura 2.1: processo de produção de açúcar, etanol e energia	23
Figura 2.2: tela de supervisor utilizado em usinas	28
Figura 2.3: Evolução Industrial	32
Figura 2.4: Tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0	33
Figura 2.5: Tecnologias da Inteligência Artificial	36
Figura 2.6: Integração na Indústria 4.0	40
Figura 2.7: Processo de Manufatura Aditiva	45
Figura 2.8: Cálculo do Nível de Maturidade	50
Figura 2.9: Resultado da Avaliação de Maturidade	50
Figura 2.10: Níveis de maturidade do modelo M2DDM	52
Figura 2.11: Níveis de maturidade do modelo de avaliação IMPULS-VDMA	56
Figura 2.12: Processo para o sucesso digital	58
Figura 2.13: Modelo de Avaliação de Maturidade de Geissbauer <i>et al.</i> (2016)	60
Figura 2.14: Modelo de Maturidade da ROCKWELL	63
Figura 2.15: Níveis de maturidade na transformação para a Indústria 4.0	67
Figura 2.16: Modelo de avaliação de maturidade proposto por Schuh <i>et al.</i> (2017)	69
Figura 2.17: Estrutura proposta para o modelo Indústria 4.0-MM	70
Figura 2.18: Dimensões do Modelo de Maturidade 4.0-MM	67
Figura 3.1: Relação entre os autores e os itens de avaliação	77
Figura 4.1: Etapas de desenvolvimento de modelos de maturidade	90
Figura 4.2: Modelo de Excelência do PNQ - Prêmio Nacional da Qualidade	97
Figura 4.3: Evolução e estágios de maturidade da gestão do PNQ	100
Figura 5.1: Método de Estudo de Caso	106
Figura 6.1: Pontuação obtida pela empresa “A”	115
Figura 6.2: Pontuação obtida pela empresa “B”	120
Figura 6.3: Porcentagem de pontos referentes a dimensão Estratégia	124
Figura 6.4: Porcentagem de pontos referentes a dimensão Gestão de Dados	125
Figura 6.5: Porcentagem de pontos referentes a dimensão Equipes de Trabalho	125
Figura 6.6: Porcentagem de pontos referentes a dimensão Integração Vertical	126
Figura 6.7: Porcentagem de pontos referentes a dimensão Integração Horizontal	126
Figura 6.8: Porcentagens totais obtidas pelas empresas avaliadas	127

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1: Integração das tecnologias habilitadoras	34
Quadro 2.2: Dimensões e Itens de avaliação de maturidade	49
Quadro 2.3: Dimensões e itens de avaliação de maturidade	51
Quadro 2.4: Dimensões e itens de avaliação propostos por Lichtblau <i>et al.</i> (2015)	53
Quadro 2.5: Dimensões e itens de avaliação propostas por Geissbauer <i>et al.</i> (2016)	59
Quadro 2.6: Áreas estruturais, princípios e itens de avaliação	68
Quadro 2.7: Comparativo entre os modelos de níveis de maturidade	73
Quadro 3.1: Identificação dos Modelos de Maturidade estudados	75
Quadro 3.2: Comparativo das dimensões dos modelos de maturidade	76
Quadro 3.3: Interações da categoria Estratégia	78
Quadro 3.4: Interações da categoria Governança de Dados	79
Quadro 3.5: Interações da categoria Integração Vertical	81
Quadro 3.6: Interações da categoria Integração Horizontal	82
Quadro 3.7: Interações da categoria Equipes de Trabalho	84
Quadro 3.8: Interações da categoria Digitalização	85
Quadro 3.9: Interações da categoria Rede / Infraestrutura	85
Quadro 3.10: Quantidade de citações por categoria	86
Quadro 3.11: Comparativo entre os Níveis de Maturidade	87
Quadro 4.1: Itens de avaliação do modelo de maturidade	95
Quadro 4.2: Critério e Pontuação do PNQ - Prêmio Nacional da Qualidade	98
Quadro 4.3: Percentuais de atendimento aos requisitos do PNQ	99
Quadro 4.4: Dimensões, itens de avaliação e pontuação máxima	102
Quadro 4.5: Escalas de alternativas	102
Quadro 4.6: Níveis de Maturidade	103
Quadro 4.7: Instrumento de Coleta de Dados	109
Quadro 6.1: Síntese da pontuação obtida pela empresa “A”	115
Quadro 6.2: Síntese da pontuação obtida pela empresa “B”	119
Quadro 6.3: Níveis de Maturidade das empresas avaliadas	124

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1. Contextualização do tema	13
1.2. Contextualização do Setor Sucroenergético.....	14
1.3. Problema e Objetivos de Pesquisa	16
1.4. Justificativa	17
1.5. Estrutura do Trabalho	19
2. REVISÃO DA LITERATURA	21
2.1. CARACTERIZAÇÃO DO SETOR SUCROENERGÉTICO.....	21
2.1.1. Setor Sucroenergético	21
2.1.2. Tecnologias de Controle de Processos da área industrial do setor sucroenergético	25
2.2. INDÚSTRIA 4.0: ORIGENS, EVOLUÇÃO E TECNOLOGIAS HABILITADORAS	31
2.2.1. Origens e evolução	31
2.2.2. Tecnologias habilitadoras	34
2.2.2.1. Robôs Autônomos e Inteligência Artificial	34
2.2.2.2. Internet Industrial das Coisas.....	36
2.2.2.3. Sistemas Cyber Físicos (CPS - <i>Cyber Physical System</i>)	37
2.2.2.4. Sistema de Integração Horizontal e Vertical	38
2.2.2.5. Segurança Digital	40
2.2.2.6. Computação em Nuvem	41
2.2.2.7. Big Data e Análise de Dados	42
2.2.2.8. Realidade Aumentada e Realidade Virtual	44
2.2.2.9. Manufatura Aditiva	45
2.3. MODELOS DE AVALIAÇÃO DO NÍVEL DE MATURIDADE PARA A INDÚSTRIA 4.0	46
2.3.1. Modelos de Avaliação de Nível de Maturidade	46
2.3.1.1. Modelo para Avaliação da Maturidade da Indústria 4.0 de Empresas de Manufatura	48
2.3.1.2. M2DDM – Modelo de Maturidade para Manufatura Baseada em Dados	50
2.3.1.3. Disponibilidade para Indústria 4.0 – Modelo IMPULS	53
2.3.1.4. Indústria 4.0: Construindo uma Empresa Digital	57
2.3.1.5. Modelo de Maturidade Empresarial Conectada	62
2.3.1.6. Indústria 4.0: Índice de Maturidade - ACATECH	65
2.3.1.7. Modelo de Avaliação da Indústria 4.0: Indústria 4.0 MM	70
3. ANÁLISE COMPARATIVA DOS MODELOS DE AVALIAÇÃO DE MATURIDADE	75
3.1. Dimensões	76
3.1.1. Categoria Estratégia	78
3.1.2. Categoria Governança de Dados	79
3.1.3. Categoria Integração Vertical	81
3.1.4. Categoria Integração Horizontal	82
3.1.5. Categoria Equipes de Trabalho	83
3.1.6. Categoria Digitalização	84
3.1.7. Categoria Rede / Infraestrutura	85
3.2. Níveis de Maturidade	87
4. DESENVOLVIMENTO DE MODELO DE AVALIAÇÃO DE MATURIDADE	90
4.1. Metodologia de desenvolvimento do modelo	90
4.2. Elaboração, validação e teste do modelo	93
4.2.1. Dimensões	94
4.2.2. Itens de Avaliação	95
4.2.3. Níveis de Maturidade	97

4.2.3.1. Modelo de Excelência do Plano Nacional da Qualidade	97
4.2.3.2. Instrumento de Avaliação do Modelo Proposto	101
5. MÉTODO E PROCEDIMENTOS DE PESQUISA	104
5.1. Abordagem de pesquisa	104
5.2. Método de Pesquisa	104
5.3. Definição e projeto de pesquisa	106
5.4. Seleção dos casos e unidades de análise	107
5.5. Instrumento de coleta de dados	109
5.6. Procedimento de organização e análise de dados	110
6. RESULTADOS E ANÁLISES	142
6.1. Apresentação das empresas	112
6.2. Resultados da avaliação	114
6.2.1. Empresa “A”	114
6.2.2. Empresa “B”	119
6.3. Resultados Globais	124
6.4. Análises e Discussões	127
7. CONCLUSÕES	130
7.1. Atendimento aos objetivos	130
7.2. Limitações e sugestões para pesquisas futuras	132
REFERÊNCIAS	134
APENDICE – QUESTIONÁRIO DE AVALIAÇÃO.....	143

1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo serão apresentados a contextualização do tema de pesquisa, o problema e os objetivos gerais e específicos, a justificativa do trabalho e a estrutura da dissertação.

1.1. Contextualização do Tema

A quarta revolução industrial, ou Indústria 4.0, como também é conhecida, trata-se de mais um estágio evolutivo, a qual está baseada na transformação digital das companhias, e com grande vertente para uso de tecnologias. Este conceito transformará a manufatura, as operações, serviços e os sistemas de produção, a conectividade e a interação entre máquinas e seres humanos que tornarão os sistemas de produção mais rápidos e mais eficientes, e elevarão a personalização de produtos a novos níveis (RÜßMANN *et al.*, 2015).

A expansão da automação nos processos empresariais tem apoiado o processo decisório em tempo real, bem como fornecido critérios para descentralizar e facilitar a reação rápida aos imprevistos. Diante deste fato, companhias investem cada vez mais recursos para integrar as tecnologias de ERP - *Enterprise Resource Planning* aos sistemas de manufatura para melhor o gerenciamento das informações (MARQUES *et al.*, 2017).

Possivelmente, uma das consequências desse aumento da automação será a de que o mercado consumidor procurará por produtos inteligentes e que possam ser oferecidos de modo cada vez mais personalizados. Para atender a este novo modelo de mercado emergiu nas últimas décadas tecnologias digitais inovadoras, tais como a Internet Industrial das coisas, computação em nuvem, Big Data, *Data Science*, cibersegurança, sistemas cyber-físicos, manufatura aditiva, entre outros (GHOBAKHLOO, 2018).

Nessa linha, Schlaepfer e Koch (2015) entendem que a Indústria 4.0 proporcionará a criação de redes inteligentes, que é o alicerce para as fábricas inteligentes, e estas farão interfaces com outras infraestruturas inteligentes, tais como logísticas inteligentes, casas e construções inteligentes, e todas estas integrações provocarão enormes mudanças no modo de produção. Desse modo, haverá um crescimento exponencial na produção de dados, devido ao aumento do número de equipamentos interligados, que são disponibilizados para auxiliar na tomada de decisão (O'DONOVAN *et al.*, 2015).

Hirsch (2016), constatou que o aumento da eficiência técnica ocorre mais rápido do que a absorção da mão de obra, e desta forma ocorrerá o desemprego tecnológico. Mas, se de um lado a Indústria 4.0 pode causar uma redução do número de operações manuais, com a utilização de grande quantidade de dispositivos tecnológicos, será também possível a criação

de novas competências para que colaboradores atuem no novo mercado digital a ser criado (HIRSCH, 2016; SCHUSTER, 2015)

A força de trabalho deverá possuir novas habilidades, como matemática e estatística, habilidades de programação de computadores e utilização de banco de dados, competências comportamentais e comunicação (MCIVER *et al.*, 2018). Acrescenta-se ainda que, segundo Ukko *et al.* (2019), os gerentes precisarão ter novas competências para orientar a organização rumo a estratégia digital e à sustentabilidade para obter resultados financeiros sustentáveis.

Quando se trata de medir ou monitorar as adaptações das organizações diante de novas práticas ou modos de operação, tanto no que se refere aos aspectos gerenciais como nos tecnológicos, se utiliza o termo “maturidade” para análise das adaptações realizadas ou a fazer. Esse termo, maturidade, implica em algum progresso de desenvolvimento, ou seja, monitorar as capacidades ao longo do tempo em relação a realização de um estado futuro desejável, que pode ser analisada de forma qualitativamente ou quantitativamente (SCHUMACHER *et al.*, 2016).

Portanto, um modelo de maturidade serve como um guia para avaliação da posição atual da organização no caminho de uma evolução planejada, pois fornece parâmetros e metas que precisam ser cumpridos para atingir determinados estágios de níveis de desempenho ou atributos (BECKER *et al.*, 2009).

1.2. Contextualização do Setor Sucroenergético

O setor sucroenergético no Brasil, tem tradição secular no cultivo e processamento da cana-de-açúcar. A cultura da cana-de-açúcar surgiu no país em meados do século XVI. Vários foram os motivos para a escolha da cana, entre eles, a existência de solo propício para este cultivo. Além disso, o açúcar era àquela época um produto muito bem cotado no comércio europeu. Atualmente, há outros produtos derivados da cana de açúcar, como por exemplo os vários tipos de álcool existentes no mercado e subprodutos derivados da cana de açúcar (UDOP, 2003).

Com a discussão da problemática ambiental, abriu-se novas perspectivas para as empresas sucroenergéticas, inclusive com investimentos estrangeiros, onde houve a modernização da governança, a especialização na produção e a intensa automatização e padronização do sistema produtivo (GARCIA *et al.*, 2015).

Esta modernização levou a necessidade da implantação da análise de desempenho das unidades, que de acordo com Bigaton *et al.* (2018), pode ser analisada tanto pela área agrícola, quanto na área industrial, e através da análise de variáveis como perdas, eficiência e custos de

produção pode-se ter de forma mais eficiente a rentabilidade da unidade, atribuindo grande importância para os fatores intrínsecos (teor de sacarose, fibras, minerais) e extrínsecos (terra, pedra, plantas invasoras), que afetam a qualidade da matéria prima, que pode contribuir para um melhor rendimento da indústria e melhor qualidade do produto.

Diversas ferramentas e técnicas tem sido aplicada nos processos produtivos com o intuito de melhorar a eficiência das unidades fabris do setor sucroenergético, conforme Pereira e Silveira (2016), que aplicou em unidades produtoras um método denominado DEA – Análise Envoltória de dados, o qual utiliza índices para medir o quanto dos insumos utilizados podem ser proporcionalmente reduzidos sem alterar a quantidade de produto final, e o resultado apresentou uma melhor eficiência das unidades, e que esta técnica em conjunto com investimentos em tecnologia e inovação pode contribuir para uma melhor eficiência das unidades.

Órgãos governamentais, como a ANP – Agência Nacional do Petróleo, entendem que este setor pode contribuir com a redução do efeito estufa e desenvolveram a Lei 13.576 / 2017, Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio). De acordo com esta lei, as unidades produtoras passarão por certificação e avaliação, e receberão notas pela produção de maior quantidade de energia limpa, com menor emissão de CO₂. A nota recebida refletirá na contribuição individual da mitigação da quantidade de gases do efeito estufa. Por esta contribuição com o meio ambiente as unidades receberão o CBIO – Crédito de Descarbonização por Biocombustíveis, um ativo financeiro que poderá ser negociado em mercados organizados, bem como por agentes de mercado, que poderá comprar e vender estes créditos. Estes créditos impulsionarão o desenvolvimento tecnológico das unidades, conforme apresenta em seu artigo 3º, que tem como um dos princípios:

VI - Impulso ao desenvolvimento tecnológico e à inovação, visando consolidar a base tecnológica, a aumentar a competitividade dos biocombustíveis na matriz energética nacional e a acelerar o desenvolvimento e a inserção comercial de biocombustíveis avançados e de novos biocombustíveis.

Consolidando as informações do Setor Sucroenergético, segundo a União da Indústria de Cana de Açúcar - Unica (2019), são 370 unidades produtoras em atividade no país, na safra 2017/2018, foram processadas 641 milhões de toneladas de cana-de-açúcar e cerca de 2,4 milhões de pessoas empregadas na cadeia produtiva. Foram produzidos 38,6 milhões de toneladas de Açúcar, 27,9 bilhões de litros de Etanol e 144,8 TWh (Terawatt-hora) de geração de Energia a partir da biomassa. O setor respondeu por 5% do saldo da Balança Comercial brasileira entre os anos de 2012 e 2018, gerou US\$ 70 bilhões em divisas com as exportações de açúcar e US\$ 8 bilhões de etanol.

1.3. Problema e Objetivos de Pesquisa

Para Buainain e Batalha (2007), com a desregulamentação do setor sucroenergético, as unidades produtoras tiveram de se reestruturar, valorar seus recursos para a geração de vantagens competitivas e investir no aumento de eficiência técnica da produção. Ainda, segundo estes autores foram implementadas melhorias tecnológicas, como a automação microeletrônica, que permite obter maior uniformidade do produto e maior produtividade da capacidade instalada.

Já para Dal Bem *et al.* (2003), a produção deste setor está sujeita a condições ambientais, que influenciam a qualidade da matéria prima, provocando variações técnicas e de fornecimento, e ainda apresenta elevado grau de complexidade, pois envolve equipamentos dos mais variados tipos e tamanho, geração de energia e processos químico, físico e biológico.

Segundo Duarte *et al.* (2018), para melhor gerenciar a eficiência industrial é importante medir e controlar processos, utilizando a modelagem matemática para identificar pontos de intervenção, explicar a variação da eficiência operacional e a eficiência geral das unidades produtoras do setor sucroenergético.

As empresas do agronegócio, segundo Pavani e Batalha (2017), estão procurando profissionalizar suas estratégias de gestão de processos para sobreviver no mercado e buscam aumentar o uso de sistemas de medição e controle usando os métodos que melhor se adaptam ao perfil de seu negócio. Ainda, segundo os autores, a busca por métodos mais eficientes de gestão de processos, tem levado estas empresas a investir em sistemas de medição de desempenho, troca de informações e aumento da visibilidade nos processos.

Através de sistemas de aquisição de dados, suportados por microprocessadores, é possível obter dados reais dos processos industriais, que caracterizam em detalhes sua dinâmica de entrada e saída. Diversos métodos de identificação permitem, a partir desses dados, obter modelos lineares e não lineares desses processos, que são a base para prever o comportamento do processo através de controladores preditivos (SUÁREZ *et al.*, 2011)

Para Petrassi *et al.* (2017), através de dados, projeções e análises de mercado, usinas sucroalcooleiras praticam a busca contínua por melhorias. Este fato indica a necessidade de desenvolvimento de indicadores para controlar, otimizar e reduzir perdas na produção. Para tal surge a necessidade de controle, e como alternativas interessantes estão os softwares, sensores e simuladores.

De acordo com o apresentado acima, é possível verificar que a área industrial do setor sucroenergético tem se desenvolvido e investido na implantação de diversas tecnologias de produção e de controles de seus processos produtivos. Ainda, a tecnologia tem se tornado uma

aliada no gerenciamento de processos, levando em consideração a existência de grande quantidade de variáveis, sejam elas das áreas agrícolas, industriais e de gestão.

Nesse sentido, percebe-se que os conceitos e tecnologias da indústria 4.0 tem a contribuir com as plantas do setor sucroenergético, podendo melhorar a tomada de decisão, a programação da produção e ampliar as ferramentas de comunicação interna e externa com os stakeholders.

Com a possibilidade da integração entre as principais áreas de produção, agrícola, industrial, se torna possível integrar a cadeia de valor e desta forma melhorar as eficiências da produção, utilizando para isso os dados dos processos agrícolas, e conseqüentemente melhorar a rentabilidade das unidades.

Conforme Marques *et al.* (2017), as tecnologias quando usadas corretamente, são capazes de causar um enorme impacto nas operações diárias das empresas, proporcionar uma consciência global e física aos sistemas de negócios e aprimorar a consciência geral do contexto e a oportunidade de melhores decisões.

Diante dessas considerações, o presente trabalho tem como objetivo geral estudar a aplicação dos conceitos e das tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0 nos processos industriais do Setor Sucroenergético e analisar seu nível de implementação e de utilização. Desta forma, as questões de pesquisa que emergiram da revisão teórica e que se deseja responder ao final deste trabalho são as seguintes: (i) como os processos industriais do setor sucroenergético estão planejando ou implementando os avanços tecnológicos proporcionados pela Indústria 4.0; (ii) como pode ser avaliada a maturidade da implementação das tecnologias da Indústria 4.0 nos processos industriais do setor sucroenergético, considerando os gargalos tecnológicos, gerenciais e estratégicos.

Entendendo que objetivos específicos são etapas, ou produtos, gerados durante o desenvolvimento da pesquisa, propõem-se neste trabalho os seguintes objetivos específicos:

1. Propor de um modelo de avaliação de maturidade do grau de implementação dos conceitos e tecnologias da Indústria 4.0, baseado em modelos existentes na literatura;
2. Validar o modelo proposto em estudos de casos envolvendo organizações do setor sucroenergético.

1.4. Justificativa

Nos últimos anos, organizações de proteção ao meio ambiente tem discutido a redução do efeito estufa que tem elevado a temperatura dos oceanos, degelo de calotas polares, bem como o aquecimento geral do planeta. Segundo o MMA - Ministério do Meio Ambiente (2020),

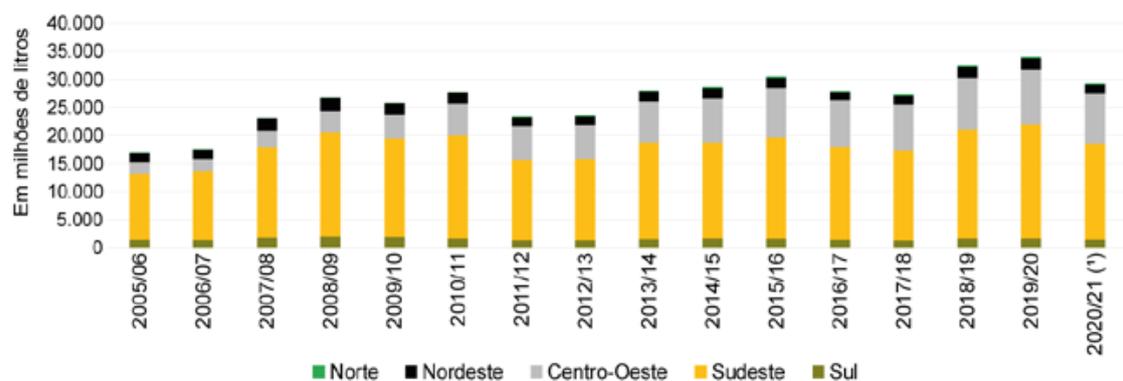
um dos principais gases do efeito estufa é o dióxido de carbono, emitido por meio da queima de combustíveis fósseis, e que houve um aumento de 35% desde a era industrial.

Na contramão dos combustíveis fósseis, o etanol de cana-de-açúcar, produzido por usinas brasileiras, tem se mostrado um grande aliado para a redução dos gases do efeito estufa e tem auxiliado na matriz energética do país, com a geração de energia através da queima do bagaço da cana. Conforme Macedo (2007), a capacidade de redução das emissões do efeito estufa do etanol produzido a partir da cana-de-açúcar é elevada em função de ser uma fonte renovável e por apresentar um balanço energético da ordem de 8,9, muito superior ao etanol de milho produzido pelos Estados Unidos da América, que é da ordem de 1,3. Desta forma, esse cenário abriu novas perspectivas para o Brasil sobre o futuro da produção de etanol.

O Relatório da CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento (2018) diz que o aumento da demanda mundial de etanol, aliado a mudanças edafoclimáticas, tornam o Brasil um participante com elevada competitividade na distribuição deste combustível sustentável. Para Costa Filho e Normey-Rico (2011), o etanol de cana-de-açúcar se mostra como uma alternativa concreta em substituição aos combustíveis fósseis.

Na safra 2019/2020 houve um aumento na produção de etanol em relação as safras anteriores, mas na projeção da safra 2020/2021 haverá uma projeção de redução da produção devido a pandemia da COVID-19. No geral, percebe-se um crescimento na produção do biocombustível (CONAB, 2020). A figura 1.1 apresenta a evolução da produção de etanol nas safras de cana-de-açúcar.

Figura 1.1: Evolução da produção de etanol total.



Fonte: CONAB (2020)

Para processar a matéria prima, cana-de-açúcar, e gerar o etanol e outros produtos, açúcar, energia, bioplásticos, entre outros, as unidades possuem uma grande quantidade de variáveis de processos, que necessitam ser acompanhadas continuamente. Neste sentido

Bigaton *et al.* (2018) apresentam que o desempenho de uma unidade produtiva pode ser analisado através de aspectos agrícolas, como a melhor forma de uso da terra e através de aspectos industriais, que inclui o melhor aproveitamento dos açúcares que entram na unidade.

No processo industrial, que é o objetivo deste estudo, as unidades produtoras se utilizam fortemente da tecnologia de automação de processos, coleta de dados através de instrumentos de medição de variáveis de processos, e de sistemas automatizados de supervisão de fábrica, para gerenciamento remoto e para segurança da planta.

As tecnologias da Indústria 4.0, através de suas tecnologias habilitadoras, podem contribuir significativamente com o processo produtivo das usinas, auxiliando na integração das áreas na indústria (recepção de cana, moagem, produção), bem como com a área agrícola, auxiliando na melhora da qualidade da matéria prima, que pode auxiliar na redução de custos e na melhoria da produtividade. Ainda, pode cooperar na tomada de decisão dos gestores, auxiliando nas análises online de dados, para definir a programação da produção e a se adaptar ao mercado cada vez mais competitivo. A tecnologia pode contribuir também para o controle de um item importante do processo produtivo, a água, utilizada em grande quantidade nos processos produtivos, que de acordo com Torquato Jr *et al.* (2004), se utiliza 21 m³ de água por tonelada de cana moída, auxiliando na redução do consumo e na melhora da reutilização desse insumo.

1.5. Estrutura do trabalho

Esta dissertação está estruturada em sete capítulos, sendo:

- **Capítulo 1 – Introdução:** contextualização sobre o tema de pesquisa; contextualização do Setor Sucroenergético; problema e objetivos de pesquisa; justificativa; estrutura do trabalho;
- **Capítulo 2 – Revisão da Literatura:** Caracterização do Setor Sucroenergético; Indústria 4.0: origens, evolução e Tecnologias Habilitadoras da Indústria 4.0; Modelos de Avaliação do Nível de Maturidade para a Indústria 4.0;
- **Capítulo 3 – Análise Comparativa dos Modelos de Avaliação de Maturidade:** análise comparativa das dimensões; análise comparativa dos níveis de maturidade;
- **Capítulo 4 – Desenvolvimento de Modelo de Avaliação de Maturidade:** metodologia de desenvolvimento do modelo; elaboração, validação e teste do modelo;

- **Capítulo 5 – Métodos e Procedimentos de Pesquisa:** abordagem de pesquisa; método de pesquisa; definição e projeto de pesquisa; seleção dos casos e unidade de análise; instrumento de coleta de dados; procedimento de organização e análise de dados;
- **Capítulo 6 – Resultados e análises:** apresentação das empresas avaliadas; resultados da avaliação das empresas; resultados globais;
- **Capítulo 7 – Conclusões:** conclusões gerais sobre o desenvolvimento do trabalho e aplicação do modelo de maturidade.

2. REVISÃO DA LITERATURA

A Revisão da Literatura deste trabalho compreende três temas centrais, a Caracterização do Setor Sucroenergético (2.1), as Origens, Evolução e as Tecnologias Habilitadoras da Indústria 4.0 (2.2) e os modelos de Avaliação do Nível de Maturidade para a Indústria 4.0 (2.3).

2.1. CARACTERIZAÇÃO DO SETOR SUCROENERGÉTICO

Nesta seção será apresentado uma caracterização do Setor Sucroenergético e as Tecnologias de Controle de Processos utilizadas nas unidades produtoras.

2.1.1. Setor Sucroenergético

A cultura da cana-de-açúcar no Brasil se confunde com a própria história do país, tendo sido uma das primeiras culturas agrícolas a serem organizadas no período da colonização. Até o século XIX, toda a atividade característica do setor sucroalcooleiro, tanto do cultivo da cana como da produção e comercialização do açúcar, era restrita, exclusivamente, à região nordeste do país, devido ao clima e solo propícios, e a incentivos através de financiamentos bancários para aqueles que se comprometessem a estabelecer a cultura da cana em suas terras (COSTA, 2003).

Para Garcia *et al.*, (2015), a entrada de capital externo no setor sucroenergético alterou sua dinâmica, em especial nas atividades de ciência e tecnologia, em parceria com instituições de pesquisas e investimentos em novos produtos, como etanol de segunda geração. Também, o capital externo proporcionou a internacionalização do setor sucroenergético.

Segundo a União da Indústria de Cana de Açúcar - Unica (2019), são 370 unidades produtoras em atividade no país, na safra 2017/2018 foram processadas 641 milhões de toneladas de cana. Ainda segundo a Única, o setor sucroenergético respondeu por 5% do saldo da Balança Comercial brasileira entre os anos de 2012 e 2018, gerou US\$ 70 bilhões em divisas com as exportações de açúcar e US\$ 8 bilhões com etanol.

O setor sucroenergético brasileiro opera em uma conjuntura sustentável, ofertando ao mercado um combustível ecologicamente correto, que não afeta a camada de ozônio. Além da produção do etanol e do açúcar, as unidades produtoras têm buscado eficiência na geração de energia elétrica, auxiliando no aumento da oferta e redução dos custos e contribuindo para ampliar a sustentabilidade do setor (CONAB, 2018).

De acordo com ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, com a promulgação da Lei 13.546/2017, Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio), a

contribuição para a sustentabilidade e meio ambiente será ainda mais fortalecida, pois esta lei tem como objetivos principais:

- Fornecer uma importante contribuição para o cumprimento dos compromissos determinados pelo Brasil no âmbito do Acordo de Paris;
- Promover a adequada expansão dos biocombustíveis na matriz energética, com ênfase na regularidade do abastecimento de combustíveis; e
- Assegurar previsibilidade para o mercado de combustíveis, induzindo ganhos de eficiência energética e de redução de emissões de gases causadores do efeito estufa na produção, comercialização e uso de biocombustíveis.

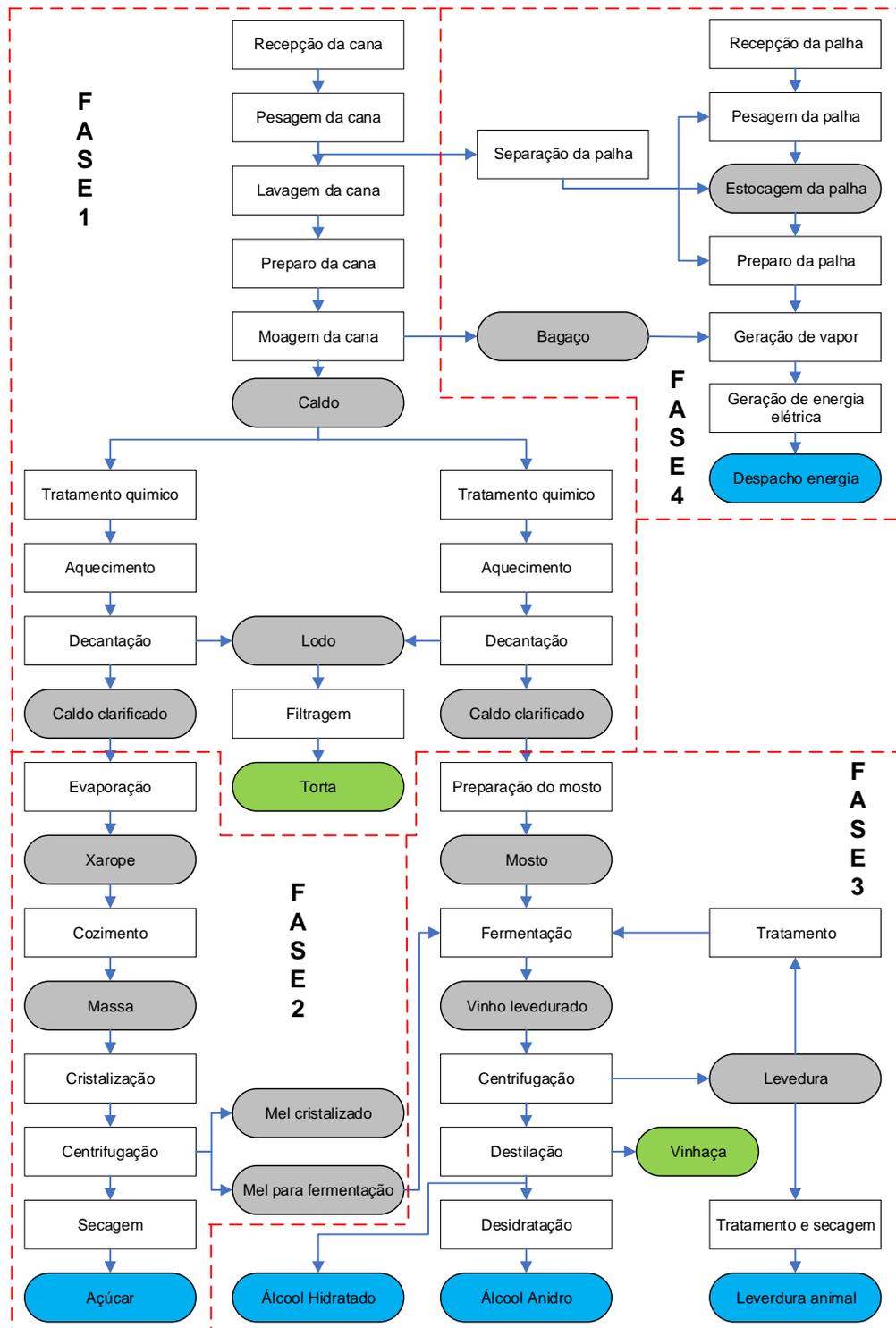
A Lei 13.546/2017 prevê que as unidades produtoras de biocombustíveis serão certificadas por empresas inspetoras, serão avaliadas continuamente e receberão uma nota de Eficiência Energética-Ambiental, o qual lhe proporcionará receber Créditos de Descarbonização (CBIO), que poderão ser negociados com as distribuidoras de combustíveis, bem como em bolsa de valores. Prevê ainda, um potencial geração de emprego e de renda, desenvolvimento regional, promoção da cadeia de valor da bioeconomia sustentável e desenvolvimento tecnológico e inovação.

A modernização e a competitividade sustentável do setor sucroenergético resulta da interação e integração entre usinas, destilarias, fornecedores de matérias primas e insumos, centros de pesquisas, universidades, fabricantes de equipamentos, instituições governamentais, chegando ao consumidor final. A cadeia central compreende fornecedores de matérias primas, máquinas, equipamentos e tecnologias. Já o núcleo central de produção engloba as etapas de elaboração dos produtos, açúcar, álcool, energia, e na sequência as atividades de promoção e comercialização e da distribuição para o mercado consumidor. Sendo assim, constitui-se em um sistema complexo, onde a cadeia produtiva depende de suas interações, para frente e para trás, numa relação sistêmica de encadeamento (SEBRAE, 2008).

Segundo Paiva e Morabito (2007), o processo agroindustrial de produção é dividido em três etapas principais, a etapa agrícola, a etapa de corte, carregamento e transporte e a etapa industrial. Especificamente na etapa industrial, que é o foco deste trabalho, ocorrem as macro-operações de pesagem, estocagem, lavagem, preparo/moagem, clarificação do caldo, evaporação, cozimento/turbinação, bem como os processos ocorridos na destilaria, fermentação, centrifugação e destilação e geração de energia elétrica.

A figura 2.1 apresenta os processos de produção de uma unidade produtiva do setor sucroenergético.

Figura 2.1: processo de produção de açúcar, etanol e energia.



Fonte: adaptado de Duarte (2017)

Na figura 2.1 é possível perceber a integração entre os processos produtivos de uma unidade produtora de açúcar, álcool e energia. Na fase 1 a matéria prima recebida na unidade é pesada e direcionada para o processo de lavagem. Este processo ocorre devido a existência de impurezas vegetais, que ocorrem no momento da colheita da cana. O processo de limpeza da

matéria prima é importante para evitar o desgaste abrasivo dos equipamentos de movimentação e moagem da cana. É importante ressaltar que no processo de pesagem é feita, aleatoriamente, amostragem da cana recebida para análise laboratorial e medição dos principais indicadores de qualidade da matéria prima, que irão ser a referência para pagamento dos fornecedores das usinas.

Após a lavagem da matéria prima, é feito o preparo, onde a cana passa pelos desfibradores. Esta etapa é importante para melhorar a eficiência do processo de moagem da cana de açúcar.

O processo de moagem tem a finalidade de extrair o caldo da cana, separando a parte líquida, caldo, da parte sólida, bagaço. O processo de extração do caldo é realizado pelos conjuntos de moendas, que geralmente são montadas em uma estrutura de três ternos. Após a extração, o caldo é peneirado para retirada de impurezas.

O próximo processo produtivo é o tratamento do caldo extraído da cana de açúcar. Neste processo é retirada as impurezas do caldo, de forma a produzir um produto de boa qualidade. Assim é gerada a torta de filtro, a qual é filtrado o caldo e é utilizado como adubo orgânico no processo de plantio da cana.

Na fase 2 do processo ocorre a produção do açúcar, onde o caldo passa pelo processo de evaporação, que tem a finalidade de concentrar o ART – Açúcares Redutores Totais, resultando no xarope, que vai para o processo de cozimento e cristalização. No processo de cozimento e cristalização, o xarope será transformado na massa cristalizada, que será centrifugada para separação do açúcar e do mel. Na centrifugação é feita a separação de dois produtos, a parte líquida, conhecido como mel, que é encaminhada para a destilaria, para a fabricação do álcool, e a parte composta por cristais, denominada magma, o qual passa novamente por cozedores, constituindo a chamada massa. Esta massa é enviada para os cristalizadores para separação do açúcar final, que passará por um processo de secagem e embalagem.

No processo de moagem são produzidas duas correntes de caldo, o caldo primário, que é direcionado para fabricação de açúcar, e o caldo secundário, direcionado para produção de álcool. O caldo secundário é misturado a sobra do caldo não utilizado na fabricação do açúcar, resultando no chamado caldo misto, sendo enviado à destilaria para fabricação do álcool. O caldo misto é tratado e gera o mosto.

Na fase 3 o mosto é fermentado em dornas, com a introdução de fermento tratado, convertendo os açúcares em etanol, gás carbônico e outros produtos. O resultado da fermentação é o vinho levedurado, que passa por um processo de centrifugação, se transforma

no vinho deslevedurado, e é enviado para o processo de destilação. A levedura retirada no processo de centrifugação, parte é tratada, seca, e embalada para comercialização, e o restante retorna ao processo de produção. O vinho deslevedurado é destilado, transformando-se em etanol hidratado, uma mistura de etanol-água. Em seguida o etanol hidratado é desidratado, retira-se a água do etanol e tem-se o etanol anidro.

Na fase 4, após a separação da parte líquida, o produto resultante da extração é o bagaço, o qual é utilizado como combustível para as caldeiras, que gera vapor, que movimenta as turbinas e ocorre a geração de energia elétrica, que alimenta todo o processo produtivo da unidade e as sobras são comercializadas.

Para gerenciar este complexo processo de produção, que utiliza grande quantidade de variáveis, são necessárias a utilização de tecnologias de controle, que serão discutidas no item 2.1.2 na sequência do texto.

2.1.2. Tecnologias de controle de processo da área industrial do setor sucroenergético

Um processo é um conjunto de atividades ou funções estruturadas em uma sequência lógico-temporal, com o objetivo definido, realizado por pessoas e máquinas, que visam transformar recursos (entradas), agregando valores, através de recursos de transformação e de uma lógica preestabelecida (metodologia de processamento), resultando em bens e serviços (produtos) para a sociedade e clientes (RODRIGUES, 2012).

Montgomery (2016) apresenta um processo como um sistema, com um conjunto de entradas e uma saída. No caso de um processo de manufatura, os fatores de entrada controláveis são variáveis do processo, tais como temperatura, pressão e taxas de alimentação. As entradas não controláveis, ou de difícil controle, tais como fatores ambientais ou propriedade das matérias primas apresentadas por um fornecedor externo. O processo transforma o produto de entrada, as partes de componentes e submontagens em um produto acabado que tem várias características de qualidade.

Para Chase (2006), o controle de processo se preocupa com o monitoramento da qualidade enquanto a produção ou serviço está sendo produzido. Os objetivos típicos dos planos de controle de processo são de proporcionar informações em tempo oportuno, sobre os itens produzidos, se estão satisfazendo as especificações do projeto e detectar mudanças no processo que sinalizam que os produtos podem não satisfazer as especificações.

Segundo Fransoo e Rutten (1994), a indústria de açúcar e etanol é caracterizada como uma indústria por processos, cujas características gerais estão definidas como empresas que agregam valor aos materiais através da mistura, separação, conformação ou reações químicas.

Esses processos podem ser contínuos ou descontínuos, lotes ou batelada, e requerem rígido controle de processo e altos investimentos de capital, pois somente podem ser executados de forma eficiente utilizando grandes instalações.

Para definir o processo como contínuo e por lote ou batelada, Borges e Dalcol (2002) utilizam-se da definição da *APICS – American Production and Inventory Control Society*, em que o processamento por bateladas, lotes, é definido como um processo industrial que prioritariamente programa curtos ciclos de produção de produtos, e o processamento contínuo é onde as interrupções são mínimas em qualquer corrida de produção ou entre corridas de produção de produtos que exibam características de processo, como líquidos, fibras, pulverizados, gases.

Segundo Toledo *et al.* (1986), as principais características tecnológicas em indústrias de processo contínuo são:

- a) Indivisibilidade das matérias-primas ao longo do processo: é muito comum que, após introduzidos no processo de fabricação, os insumos não sejam mais distinguíveis entre si e em relação ao produto;
- b) Alto nível de integração entre os equipamentos: em lugar de máquinas isoladas, realizando operações distintas, o equipamento tem a característica de ser interligado e interdependente, no sentido de não se poder intercambiar as transformações requeridas pelo processo (baixa flexibilidade, restrições de simultaneidade e/ou sucessividade, etc.);
- c) Maior possibilidade de centralizar o controle dos processos: uma vez que a interação da mão de obra com os materiais é reduzida e quase toda ela submetida à intermediação dos equipamentos, o controle do processo de fabricação não significa controle da mão de obra, mas sim do próprio equipamento, o que é realizado através do posicionamento de sensores de parâmetros variados, localizados em pontos estratégicos das instalações (exemplo: topo de colunas de destilação, saída e entrada de reatores etc.).

Segundo Duarte (2017), existem dezenove pontos de controle de processos agroindustriais que são utilizados para medir a eficiência dos processos de uma unidade produtora, são eles:

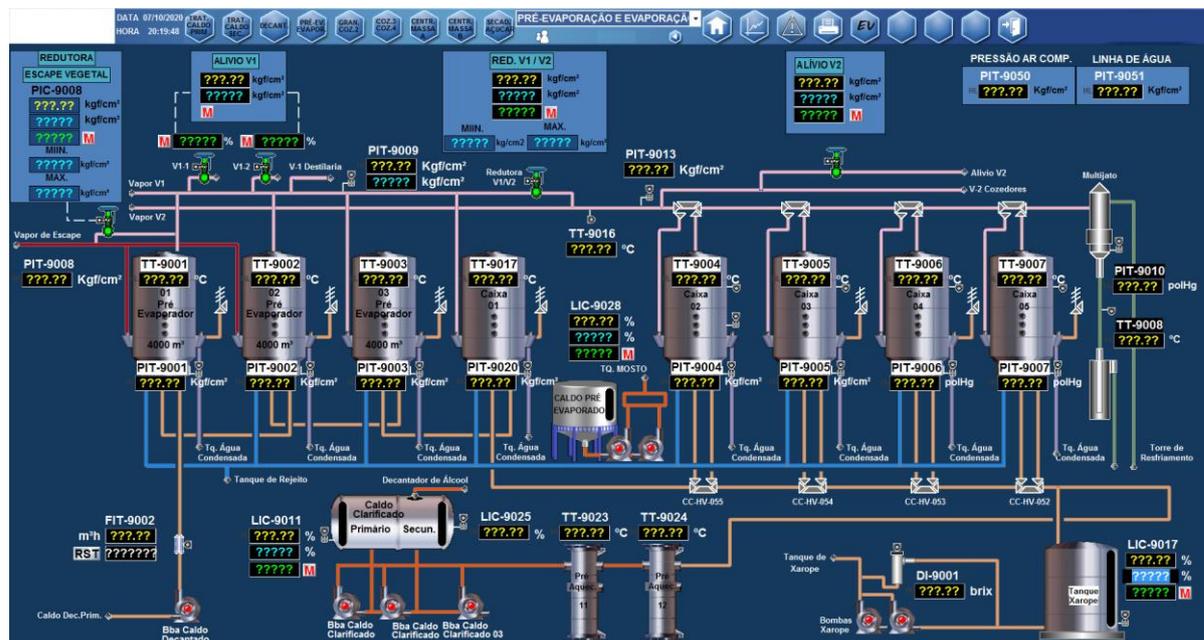
- **Cana ambiente:** determina o teor de açúcares para pagamento de fornecedores, avaliação das eficiências industriais e teor de impurezas. Dois métodos são utilizados para extração dos açúcares, a prensa e o digestor;
- **Cana:** monitora a perda de açúcar durante a lavagem da cana;

- **Extração do caldo:** monitora a perda de açúcar e os parâmetros para obtenção da eficiência de extração e monitorar a pureza do caldo e os teores de açúcares e de fósforo (P₂O₅) para a clarificação;
- **Tratamento do caldo:** monitora a pureza do caldo, o teor de açúcares, cor e o teor de impurezas;
- **Torta:** monitora a perda de açúcar pela torta de filtro;
- **Mosto:** monitora a pureza do caldo, o teor de açúcares, cor e o teor de impurezas e determina o teor de açúcares utilizados na fermentação para obtenção das eficiências da área, monitora seus nutrientes e outros parâmetros relacionados;
- **Mel final:** após as centrífugas, amostra de mel final coletada logo após a saída das centrífugas da fábrica de açúcar (antes da estocagem). Monitora a pureza do caldo, teor de açúcares e acidez para o mel final;
- **Vinho bruto:** determina o teor alcoólico, utilizado para o cálculo da eficiência de fermentação e destilação, glicerol e acidez para balanço destes subprodutos, além do teor de açúcar residual não convertido pelas leveduras;
- **Fermentação:** determina a quantidade de álcool recuperado e a eficiência da torre de recuperação;
- **Levedo tratado:** determina o teor alcoólico, utilizado para o cálculo da eficiência de fermentação, glicerol e acidez para balanço desses subprodutos e pH;
- **Centrifugas:** determina os teores alcoólicos e de levedo para cálculo da biomassa perdida;
- **Perdas de Álcool em Relação ao Álcool Produzido:** determina a perda de etanol na destilação;
- **Produção e rendimentos:** determina a perda de etanol na destilação;
- **Balanço de ART:** detalha as perdas de açúcares que estão ocorrendo no processo industrial para melhoria da eficiência industrial;
- **Análises complementares:** analisa dados complementares à entrada de matéria-prima e extração do caldo;
- **Análise do açúcar:** classifica e monitora a qualidade do produto;
- **Produtividade:** mede a produtividade da fábrica.

O processo de produção de uma usina é bastante complexo, segundo Rousselet (2011), utiliza diversas operações e processos biotecnológicos, além de atingirem condições de altas temperaturas e pressões, o que torna o processo perigoso e danoso ao meio ambiente caso

ocorram condições de instabilidade. Para monitorar as variáveis de processos, as unidades se utilizam da automação e de sistemas supervisórios, conforme modelo apresentado na figura 2.2, que monitoram e rastreiam informações do processo, coletados através de equipamentos de aquisição de dados, os quais podem ser armazenados e analisados. Os sistemas supervisórios obtêm dados em tempo real de sensores de temperatura, pressão, vazão, entre outros, e realiza controles automáticos na planta industrial.

Figura 2.2: tela de supervisório utilizado em usinas.



Fonte: Ribeiro (2003)

Ribeiro (2003), em seu livro “A Usina de Açúcar e sua Automação”, apresenta as variáveis de processos monitoradas através da implementação de ferramentas e equipamentos de automação nos processos de fabricação de uma unidade produtora, sendo a Moagem, Tratamento do Caldo, Evaporação, Cozimento e secagem do açúcar, Fermentação e destilaria e Geração de Vapor

A automação do processo de moagem ajuda na sincronização das esteiras de alimentação da cana, evitando travamento das moendas por embuchamento, ajuda a controlar os níveis de matéria prima nos equipamentos de moagem, controlar os níveis de caldo e atuar na velocidade das turbinas, bem como o controle da vazão do caldo para a fábrica de açúcar e para a destilaria. Também é possível controlar variáveis de processo, como temperatura, pressão, umidade e rotação de equipamentos. Para controlar todo este processo, existem os sistemas supervisórios, gerenciam dados do processo, históricos e emissão de relatórios, e que

são interligados a uma rede para comunicação com outros setores. Com estes controles de processo é possível obter a estabilidade de moagem, o aumento da extração do caldo, diminuição de perdas, economia de energia e vapor e segurança da operação.

No tratamento do caldo, a automação deste processo proporciona um melhor controle do pH, da temperatura e controle de vazão do caldo para os decantadores, controlando proporcionalmente o enchimento de cada decantador. Também controla a dosagem de polímeros no caldo, em função da vazão, bem como controla a densidade do lodo na saída do decantador. Com estes processos automatizados é possível controlar a temperatura da decantação, dosar produtos dentro de parâmetros pré-definidos, diminuição das perdas por inversão, menor afetação na cor e maior remoção do lodo.

No processo de evaporação, a automação permite controlar o nível da caixa e a temperatura do caldo. Controlar a divisão do caldo para os pré-evaporadores, evitando falta de caldo nos equipamentos, controlar a vazão do caldo para os evaporadores, controlar o brix do xarope e controlar a temperatura do vapor no processo. Ainda, controlar alarmes de controle de variáveis de processo, como temperatura e pressão e comandar e controlar motores dos equipamentos. Neste setor também são utilizados os sistemas de supervisão para controle de dados, histórico e relatórios. Com a automação destes processos de evaporação, ocorre a estabilidade do brix do xarope, garantia de geração de vapor vegetal na falta de caldo, melhora na eficiência da evaporação, diminuição da incrustação, menor afetação na cor, melhor aproveitamento da energia e controle dos parâmetros estabelecidos de pressão e temperatura.

No cozimento, a automação permite controlar o vácuo do cozedor, medir a pressão do cozedor, medir a concentração da massa cozida, controlar a temperatura do vapor do processo e controlar o nível da caixa do condensado. Na secagem, medir a temperatura do açúcar, controlar o nível e o brix da água no lavador e abertura de atuadores de ar quente/frio e do exaustor. Ainda, controlar alarmes de controle de processos, como nível, temperatura e pressão e controlar e comandar equipamentos, como válvulas e motores. Com a automação deste setor é possível obter a diminuição do tempo de duração do cozimento, manter a uniformidade e repetibilidade dos cozimentos, independente do operador que realiza o cozimento, obter economia de vapor, água e potência da fábrica, eliminação de formação de cristais falsos e grãos conglomerados, melhor esgotamento da massa cozida, padronização do tamanho e cor dos cristais e melhora no rendimento em cristais. O setor também conta com a utilização dos sistemas de supervisão de processos.

Na fermentação, a automação permite medir o brix do mosto, controlar a vazão de melação, medir a vazão do mosto para a fermentação, medir o nível, controlar a pressão e a

temperatura de dornas e controlar o pH e a vazão do fermento. A destilação auxilia no controle de vazão do vapor, controla a vazão do vinho para as colunas, controla a retirada de álcool através da temperatura e grau alcoólico e controle de nível e vazão das colunas. Bem como controles de monitoração e alarmes de variáveis, temperatura, pressão e vazão. Na fermentação e destilaria também são implementados softwares de supervisão. Com a automação do processo de fermentação e destilaria é possível obter o aumento de produção dos aparelhos, diminuição de perdas na vinhaça, melhor recuperação do benzol ou ciclo-hexano, melhora no produto (pH, grau alcoólico), uniformidade e padronização do produto e economia de vapor.

Quanto a geração de vapor, a automação apoia no controle de vazão e a pressão do vapor gerado pela caldeira, controla a combustão da caldeira, a vazão de gás na saída do chaminé da caldeira, o tempo de abertura dos sopradores de fuligem, o controle de tempo de abertura das grelhas e controle de segurança da caldeira, que compreende desarme de motores, desarme de turbina e desarme de alimentação em caso de emergências. Neste setor também é implementado o sistema de supervisão para controle do processo.

Devido a automação da área industrial de uma unidade produtora, segundo Ribeiro (2003), é possível obter uma maior eficiência energética, melhor controle sobre todo o processo, aumento na eficiência industrial, melhor qualidade de produto, diminuição de perdas, elevação do nível técnico de operadores, maior facilidade de manutenção de equipamentos e estatística real e confiável dos dados de processo.

Os dados agrícolas e industriais, são a base de dados para a projeção de produção da safra, bem como para análise de rentabilidade financeira, em conjunto com a análise mercadológica da companhia.

Com a automação dos processos industriais e com o monitoramento destes dados, a implementação de tecnologias da Indústria 4.0, como o Big Data, pode auxiliar nas análises de produção, podendo facilitar a tomada de decisões dos gestores da planta, como qual produto produzir e quantidade, bem como dar suporte na avaliação do rendimento e análise de custos da unidade.

Na sequência do trabalho é apresentada uma revisão bibliográfica a respeito da Indústria 4.0, contemplando a evolução da indústria, o nascimento da indústria 4.0 e suas tecnologias habilitadoras.

2.2. INDÚSTRIA 4.0: ORIGENS, EVOLUÇÃO E TECNOLOGIAS HABILITADORAS

Neste capítulo será apresentada uma revisão bibliográfica referente à Indústria 4.0, sua origem e evolução, bem como as tecnologias habilitadoras.

2.2.1. Origem e evolução

Diferentes fases marcaram as Revoluções Industriais, iniciando-se com a transição dos métodos de produção manual para as máquinas durante o século XVIII, para as modernas tecnologias digitais e de Internet. Revoluções industriais que ocorreram no passado serviram como principais pontos de virada na história, e afetaram quase todos os setores.

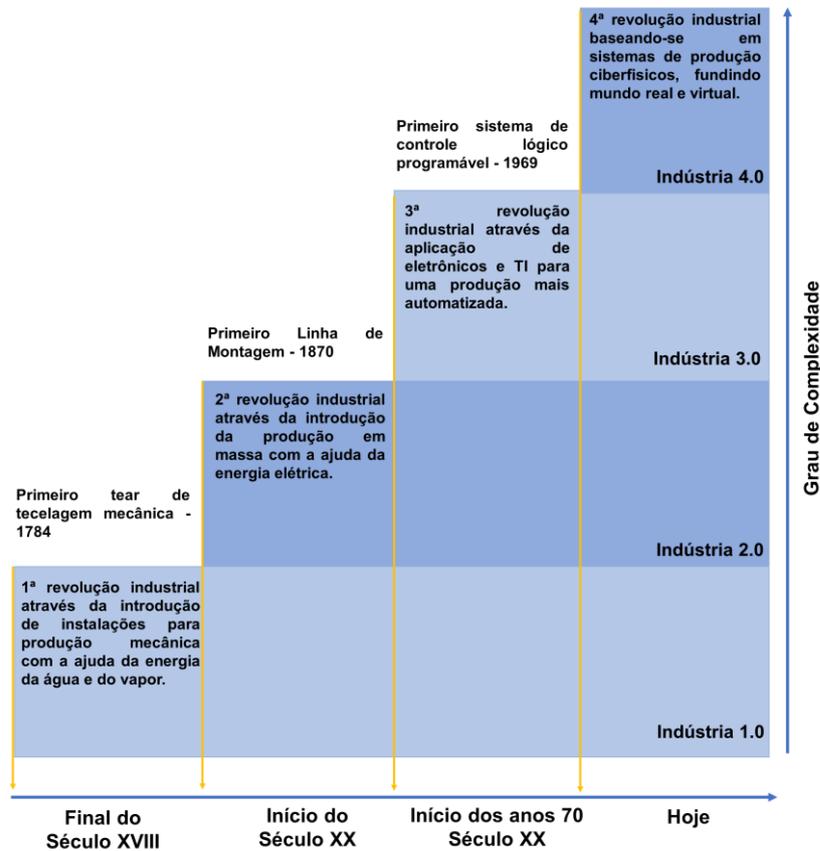
Segundo Giffi *et al.* (2015), durante o passar dos tempos os processos industriais têm melhorado com a utilização de tecnologias e com a automação da produção, impulsionado pelos desenvolvimentos da eletrônica e da tecnologia da informação.

Para Schlaepfer e Koch (2015), existiram quatro revoluções industriais, sendo:

- **INDÚSTRIA 1.0 - Final do Século XVIII:** a primeira revolução inicia-se com a invenção da produção mecânica alimentada por água e vapor;
- **INDÚSTRIA 2.0 - Início do Século XX:** alimentada pelo início da produção em massa, pela eletricidade e motores de combustão no início do século 20. As primeiras linhas de montagem foram introduzidas, o uso de novos materiais e produtos químicos tornou-se possível e a comunicação ficando mais fácil;
- **INDÚSTRIA 3.0 – 1970:** a introdução da automação e robótica inaugurou uma nova era, a terceira revolução industrial. Eletrônica e TI, computadores, robôs e a Internet constituem o início da era da informação;
- **INDÚSTRIA 4.0 - 2015 e seguintes:** início da quarta revolução industrial. Baseado em sistemas cyber-físico de produção visando conectar o mundo físico e o digital, a Indústria 4.0. Operações Digitais, compreende a digitalização e integração da cadeia de valor de produtos e/ou serviços. Tecnologia da Informação, máquinas e pessoas estão conectadas, interagindo em tempo real, criando assim uma conexão mais flexível, eficiente em recursos, maneira personalizada de fabricação, a fábrica inteligente que aproveita a Internet das coisas (IoT). A análise integrada de dados e a colaboração formam a chave do valor.

A figura 2.3 apresenta a evolução industrial, partindo da Indústria 1.0, final do século XVIII até a Indústria 4.0, que são transformações que ocorreram recentemente.

Figura 2.3: Evolução Industrial.



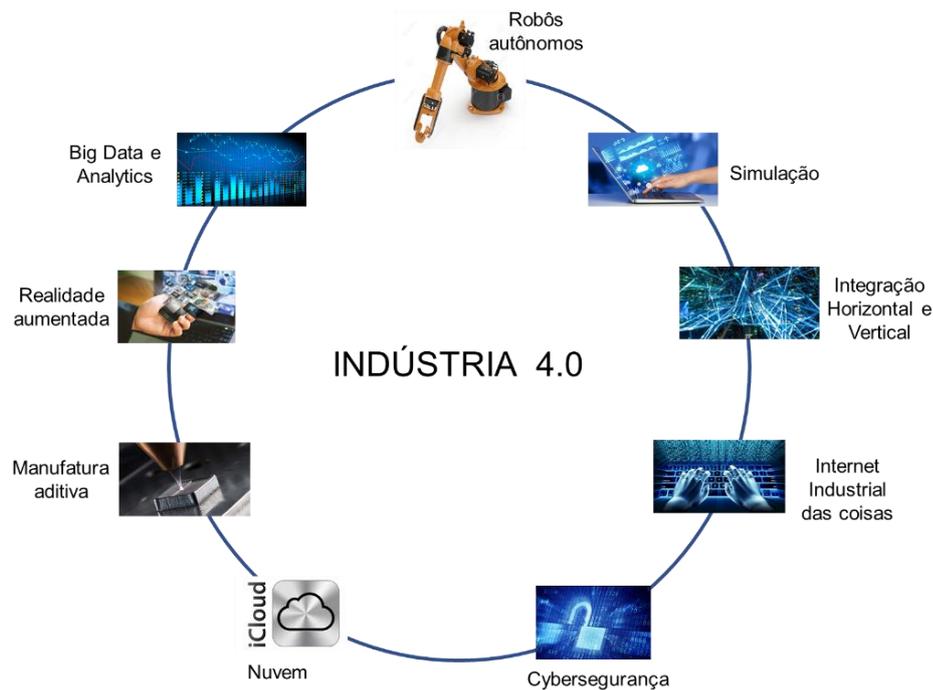
Fonte: Schlaepfer e Koch (2015).

Todas as chamadas Revoluções Industriais tiveram e têm o foco em gerar maior competitividade as empresas e aos sistemas produtivos, e oferecer aos clientes produtos cada vez mais individualizados, garantindo a fidelização dos clientes e a manutenção das companhias.

O desenvolvimento tecnológico tem direcionado dramáticas melhorias na produtividade industrial desde o início das revoluções industriais. Nas décadas seguintes, a tecnologia industrial foi somente incremental, especialmente comparada com os avanços da Tecnologia da Informação, comunicação móvel e e-commerce (RÜßMANN *et al.*, 2015).

Hoje em dia, porém, encontra-se no meio da quarta onda de avanço tecnológico, o surgimento da tecnologia industrial digital, conhecida como Indústria 4.0, uma transformação que segundo Rüßmann *et al.* (2015), está sendo impulsionada por nove tecnologias, que conforme o Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, pode ser classificada como tecnologias habilitadoras, que estão relacionadas com a capacidade de causarem mudanças tecnológicas radicais e potencial de gerar um ciclo acelerado de desenvolvimento, conforme apresentado na figura 2.4:

Figura 2.4: Tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0.



Fonte: Adaptado de Rüßmann *et al.* (2015)

Segundo Ghobakhloo (2018), o termo Indústria 4.0 foi introduzido na Feira de Hannover em 2011. Para Zancul (2017), a Alemanha tinha uma estratégia de desenvolvimento e fornecimento de tecnologias, para incrementar a produtividade do país, e com foco na exportação, na manutenção de empregos e a competitividade de pequenas e médias empresas. A indústria 4.0 tornou-se imediatamente o foco do governo alemão e de muitos outros países europeus. Em geral, a Indústria 4.0 é interpretada como a aplicação de sistemas cyber-físicos dentro dos sistemas de produção industrial.

De acordo com Giffi *et al.* (2015), a competitividade do século XXI converge totalmente para a combinação dos mundos digital e físico, onde hardware combinado com software avançados, grande quantidade de sensores e dados e análises, resultam em processos e clientes, fornecedores e fabricantes mais conectados. Com a integração das tecnologias habilitadoras, será possível desenvolver novos processos de trabalho, conforme apresentado no quadro 2.1.

Segundo Schlaepfer e Koch (2015), no ecossistema da indústria 4.0 as máquinas inteligentes compartilharão continuamente informações sobre nível de estoques, problemas, níveis de demanda e processos, prazos serão coordenadas com o objetivo de impulsionar a eficiência e otimizar as entregas, capacidade de utilização de equipamentos, qualidade, produção, mercado e compras.

Quadro 2.1: Integração das tecnologias habilitadoras

TECNOLOGIAS	
Análise preditiva	A análise preditiva utiliza uma variedade de técnicas estatísticas e analíticas usadas para desenvolver modelos matemáticos preditivos que preveem eventos ou comportamentos futuros com base em dados;
Produtos inteligentes e conectados (IoT) / Fábricas inteligentes (IoT)	Internet das coisas (IoT) refere-se à fusão de software avançado, sensores e conectividade de rede que permitem que objetos e máquinas interajam digitalmente;
Materiais avançados	Materiais avançados refere-se à descoberta e produção de novos materiais, como metais leves, de alta resistência e ligas de alto desempenho, cerâmicas avançadas, materiais críticos e polímeros de base biológica;
Design Digital, Simulação e Integração	Design digital, simulação e integração é a conceituação e construção digital de um protótipo virtual ou um processo obtido por simulação computacional de um produto físico ou de um processo;
Computação de alto desempenho	Computação de alto desempenho refere-se à prática de agregar poder de computação de uma forma que entrega maior desempenho, a fim de resolver problemas grandes e altamente complexos em ciência, engenharia ou negócios;
Robótica avançada	Robótica avançada são máquinas ou sistemas capazes de aceitar comandos de alto nível, se deslocar no local de trabalho e executar tarefas complexas em um ambiente semiestruturado com o mínimo de intervenção humana utilizando Inteligência Artificial e Aprendizado de Máquina;
Fabricação aditiva (impressão 3D / digitalização)	A digitalização 3D é um método rápido e preciso de transferir as medidas físicas de um objeto para um computador como um arquivo digital de uma forma organizada, resultando no que é chamado de dados de varredura 3D;
Design de fonte aberta / entrada direta do cliente	Design de código aberto ou inovação aberta refere-se à solução de problemas através da solicitação de ideias e opiniões sobre produtos ou serviços de entidades externas, contribuindo assim para o avanço do potencial de inovação com conjunto mais amplo de constituintes;
Realidade Aumentada (RA)	A Realidade Aumentada, adicionar visão computacional e reconhecimento de objetos, torna a informação interativa e manipulável ao usuário. Ao adicionar uma sobreposição de conteúdo digital e informações relevantes, melhora o ambiente ao redor do usuário.

Fonte: Adaptado de Giffi *et al.* (2015)

2.2.2. Tecnologias habilitadoras

Segundo Rüßmann *et al.* (2015), a Indústria 4.0 está fundamentada em nove tecnologias bases, denominadas tecnologias habilitadoras, i) Robôs Autônomos, ii) Simulação, iii) Integração Horizontal e Vertical, iv) Internet das Coisas (IoT), v) Cyber segurança, vi) Nuvem, vii) Manufatura Aditiva, viii) Realidade Aumentada e ix) *Big Data*.

Na sequência do texto, é apresentado a revisão bibliográfica a respeito das tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0.

2.2.2.1. Robôs Autônomos e Inteligência Artificial

Um robô é um mecanismo programável em dois ou mais eixos, com um certo grau de autonomia, movendo-se em um ambiente, para executar tarefas definidas. Trata-se de um manipulador multifuncional, controlado automaticamente, cujos movimentos podem ser programados e alterados, capaz de aplicações diferentes, com capacidade de movimento linear

ou rotativo. Os robôs são classificados como Robôs Industriais e Robôs de Serviços, e a classificação é feita de acordo com a aplicação pretendida (FIA - *INTERNATIONAL FEDERATION OF ROBOTICS*, 2017).

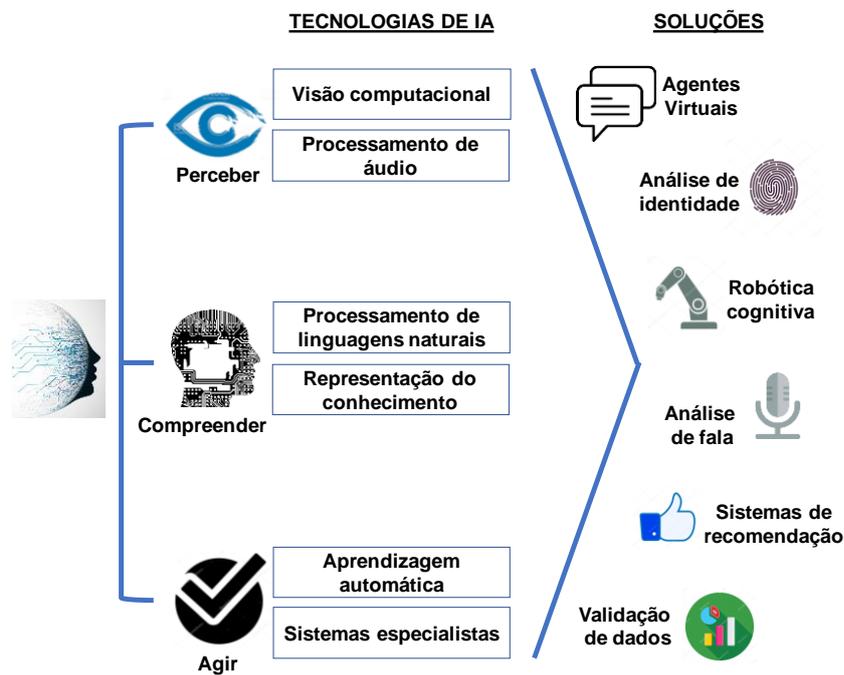
De acordo com Karabegović e Husak (2018), as tecnologias digitais, principalmente os sensores, influenciaram o desenvolvimento de tecnologias robóticas. A primeira revolução robótica que ocorre na década de 1960, através da automação industrial, que segundo o autor foi mais utilizada na indústria automotiva. As tecnologias digitais, da informação e comunicação e sensores levou ao desenvolvimento da segunda geração de robôs. Atualmente, os robôs têm mais tecnologia para sentir o ambiente e não há a necessidade de segregá-los da convivência dos humanos, trabalham juntos. A quarta revolução industrial tem contribuído para o desenvolvimento de novos robôs, que são capazes de automatizar completamente os processos.

Segundo Ovanessoff e Plastino (2017), a Inteligência Artificial (IA) refere-se a diferentes tecnologias que podem ser combinadas de diversas formas, para perceber e interpretar o ambiente por meio da aquisição e processamento de imagens, sons e voz, através da inferência nos dados e informações e agir por meio de tecnologias, como sistemas especialistas e mecanismos de inferência ou realizar ações no mundo físico, conforme apresentado na figura 2.5.

Os robôs estão sendo preparados para resolverem problemas, o que pode ser obtido recorrendo as técnicas da Inteligência Artificial, como a aprendizagem, raciocínio e resolução de problemas. Fornecer inteligência e flexibilidade aos robôs, para que este possa operar em ambientes dinâmicos e na presença de incertezas. Entre os algoritmos de aprendizagem, o mais utilizado é o aprendizado intuitivo, onde o robô aprende a partir de exemplos pré-selecionados (GARCIA *et al.*, 2007).

Segundo Zilis *et al.* (2016), as empresas têm a sua disposição um conjunto de ferramentas para melhorar a inteligência dos negócios, onde colaboradores podem usar a inteligência das máquinas para se tornarem mais produtivos, prever a melhor forma de expandir os negócios, tornar os clientes mais felizes ou cortar custos, e isto tem trazido vantagens competitivas as empresas. Isto se torna possível devido a capacidade da inteligência de máquina em analisar grande quantidade de dados, rapidamente, o que seria difícil e caro para serem analisadas por pessoas.

Figura 2.5: Tecnologias da Inteligência Artificial.



Fonte: Ovanessoff e Plastino (2017)

2.2.2.2. Internet Industrial das Coisas

Segundo Santucci (2010), o termo "Internet das Coisas", mais conhecido como IoT – *Internet of Things*, foi criado pelos fundadores do MIT - *Massachusetts Institute of Technology* - *Auto-ID Center*. O termo "Auto-ID" refere-se a qualquer classe ampla de tecnologias de identificação usadas na indústria para automatizar, reduzir erros e aumentar a eficiência. Essas tecnologias incluem códigos de barras, cartões inteligentes, sensores, reconhecimento de voz e biometria. Mas, desde 2003, o principal uso da tecnologia Auto-ID tem sido a identificação por radiofrequência, também conhecido como RFID.

O RFID - *Radio frequency identification*, foi uma das primeiras tecnologias a serem utilizadas com a Internet das Coisas. O RFID é uma tecnologia de rádio que permite a identificação e o rastreamento sem contato com dispositivos eletrônicos. Essa identificação é semelhante ao sistema de código de barras, o qual permite a comunicação entre dispositivos individuais em processos industriais, como transporte, cadeia de suprimentos e gerenciamento de armazéns. O RFID é uma tecnologia amplamente utilizada na indústria para gerenciamento de estoque e integração de dados com o Big Data (SEGARRA *et al.*, 2017).

Segundo Nanterme e Daugherty (2015), o ponto central da indústria digital serão a comunicação entre máquinas, M2M - *Machine-to-Machine*, e a Internet das coisas (IoT), que estão transformando a forma como os negócios funcionam, e acabará por afetar todas as indústrias. Plataformas industriais de todos os tipos, mas particularmente iniciativas baseadas

em M2M / IoT, exigirão cada vez mais arquiteturas técnicas em tempo real para permitir seus relacionamentos digitais. A verdadeira vantagem estratégica virá da existência de recursos em tempo real, para que as empresas possam atrair e criar oportunidades de negócios digitais e reagir rapidamente às ameaças da concorrência. A rápida proliferação do M2M / IoT aumentará a necessidade de ambientes escalonáveis, em tempo real e processamento baseado em eventos.

A tecnologia M2M tem apoiado novos cenários de uso em empresas, onde sensores, atuadores, etiquetas RFID - *Radio frequency identification* / NFC - *near-field communication*, veículos e máquinas inteligentes geram capacidade de comunicação entre si, praticamente sem intervenção humana. As aplicações M2M oferecem vantagens em vários tipos de projetos, desde a construção civil, energia, assistência médica, industrial, transporte, varejo, segurança e serviços ambientais. O mercado M2M tem sofrido enormes mudanças, saindo especificamente da integração vertical, para uma plataforma horizontal global, onde as interações entre aplicativos inteligentes vem crescendo consideravelmente (ALAYA *et al.*, 2014; KIM; YOUM, 2013; VERMESAN; FRIESS, 2013; LOPEZ *et al.*, 2014).

Segundo Evans (2012), a Internet das coisas (IoT), onde milhões de dispositivos estão regularmente conectados à Internet, e a medida que essas "coisas" adicionam recursos, como reconhecimento de contexto e maior poder de processamento, e à medida que mais pessoas e novos tipos de informações são conectados, ocorrerá a fase da Internet de Todas as coisas (*Internet of Everything* - IoE), uma rede onde bilhões ou até trilhões de conexões criam oportunidades sem precedentes, bem como novos riscos. Ainda, segundo o autor a IoE reunirá pessoas, processos, dados e coisas, para tornar as conexões em rede mais relevantes e valiosa, transformando informações em ações, que criam recursos, experiências mais ricas e oportunidades econômicas sem precedentes para empresas, indivíduos e países.

2.2.2.3. Sistemas Cyber Físicos (CPS - *Cyber Physical System*)

De acordo com Garetti *et al.* (2015) os Sistemas Cyber Físicos são uma evolução dos sistemas embarcados, e baseiam-se em uma combinação entre elementos computacionais colaborativos, unidades de microcomputação ou sistemas interconectados por um sistema de comunicação, que controlam entidades físicas.

A arquitetura de um sistema cyber-físico é composta por uma camada física e uma virtual. Na física, sensores e atuadores são responsáveis por coletar informações e atuar nos processos. Os diferentes tipos de informações coletadas pelos sensores são convertidos para o formato digital, e enviados para a camada virtual, fluxo de dados. Na camada virtual, os dados são armazenados e analisados. Após as análises, o sistema transmite as decisões aos atuadores

no mundo físico através de uma sequência de processos de controle (SCHROEDER, 2016; ALAM; EL SADDIK, 2017).

Para Lee *et al.* (2015), os conceitos principais do sistema cyber-físico são conectividade avançada para aquisição de dados e feedback e gerenciamento inteligente de dados, e distribui estes conceitos em cinco níveis; **i) Conexão Inteligente:** a aquisição precisa e confiável de dados de equipamentos, que podem ser obtidos de sensores ou sistemas, como ERP - *Enterprise Resource Planning*, MES - *Manufacturing Execution System*, SCM - *Supply Chain Management* e CMM - *Collaborative Manufacturing Management*; **ii) Conversão de dados para informações:** converter dados em informações significativas. Algoritmos podem ser desenvolvidos para criar a autoconsciência nas máquinas, para fazerem prognósticos e gerirem sua própria saúde; **iii) o CPS:** o nível cibernético, que atua como um ponto central de conexão, recebendo informações dos equipamentos conectados, formando a rede de máquinas e o conhecimento; **iv) Gerenciamento de conhecimento:** o sistema monitorado, apoiando as decisões a serem tomadas; **v) Configuração:** feedback do espaço cibernético ao espaço físico, para aplicar as decisões que foram tomadas, no gerenciamento de conhecimento do processo monitorado.

Para Majstorović *et al.* (2015), a digitalização e a tecnologia da informação levam a dois conceitos, o da Fábrica Digital e o da Fabricação Digital. Estes permitem melhorar o desenvolvimento de produtos e criar uma fase nos negócios e na manufatura. Através da fábrica digital é possível melhorar a tecnologia de fabricação, reduzir custos de planejamento, melhorar a qualidade da produção/produtos e aumentar a flexibilidade de novas demandas de clientes e de mercado. O modelo digital do produto pode ser utilizado para simular e analisar processos, cenários de planejamento de produção, cenários de utilização de equipamentos/ferramentas, inspeção e recursos. Também é possível integrar os sistemas de informação da produção, o planejamento de recursos, o sistema de execução da manufatura e o planejamento e programação da produção. A tecnologia permite integrar informações geométricas, bem como características e tolerâncias utilizados na cadeia produtiva, projeto do produto, planejamento de fábrica, processos, operação e manutenção.

2.2.2.4. Sistemas de Integração Horizontal e Vertical

A Indústria 4.0 permite que sensores onipresentes, sistemas embarcados, sistemas de controle inteligente e instalações de comunicação formem uma rede inteligente dentro dos Sistemas Cyber Físicos. A interconexão pode ser de homem para homem, de homem para

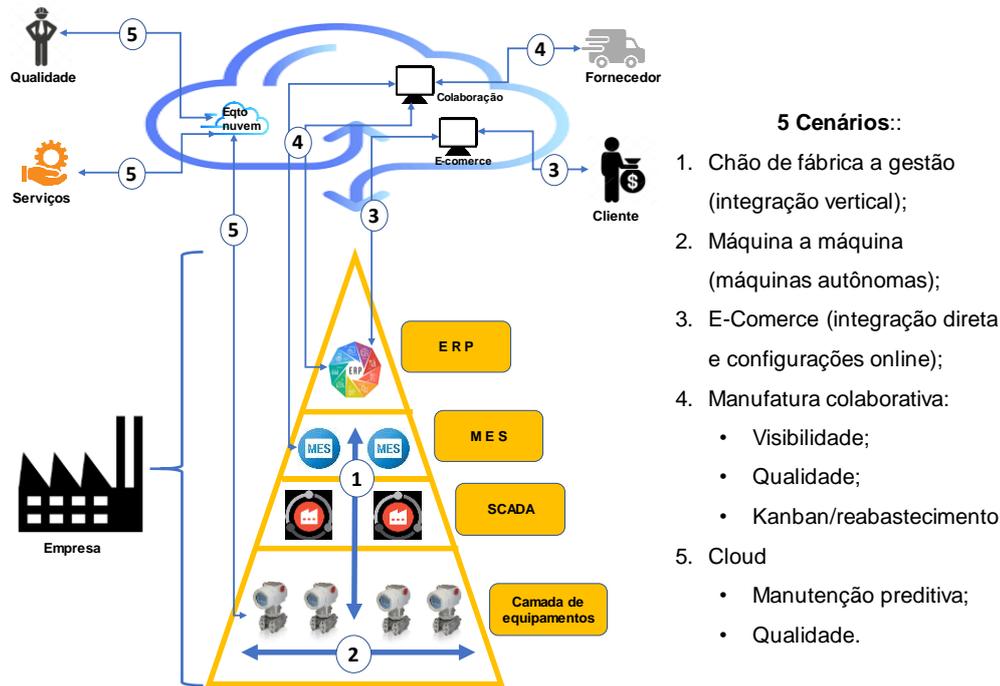
máquina, de máquina para máquina ou de serviço para serviço, a fim de obter uma completa integração horizontal, vertical e de ponta a ponta (ZHOU *et al.*, 2015)

Para Valino *et al.* (2016), a indústria 4.0 está focada na digitalização dos ativos físicos das empresas e na integração de ecossistemas digitais na cadeia de valor. As atividades de gerar, analisar e comunicar dados sustentam a criação de valor para as empresas. A indústria 4.0 é impulsionada pela **Digitalização e integração das cadeias de valor vertical e horizontal**, que integra os processos verticalmente em toda a organização, desde o desenvolvimento e a compra de produtos, até fabricação, logística e serviços, pela **Digitalização de produtos e ofertas de serviços**, que inclui a expansão dos produtos existentes, adicionando sensores inteligentes ou dispositivos de comunicação que podem ser usados com ferramentas de análise de dados, bem como a criação de novos produtos digitalizados, com foco em soluções completamente integradas e em **Modelos de negócios digitais e acesso de cliente**, que pode expandir ofertas, fornecer soluções digitais inovadoras, como serviços completos e orientados a dados, e soluções de plataformas integradas.

Segundo Kagermann *et al.* (2013), o objetivo principal da Indústria 4.0 é criar um pacote global otimizado, aproveitando o potencial tecnológico e econômico, por meio de um processo de inovação sistemática baseado em habilidades, desempenho e *know-how*, tendo como aspectos principais o desenvolvimento de cadeias de valor e redes entre empresas através da integração horizontal, engenharia de ponta a ponta (*end-to-end*), em toda a cadeia de valor do produto e do sistema de fabricação e desenvolvimento, implementação e integração vertical de sistemas de manufatura flexíveis e reconfiguráveis dentro das empresas. A figura 2.6 mostra um exemplo de integração.

No ecossistema da Indústria 4.0, existem diversos padrões de comunicação, desenvolvidas por diversos fornecedores de tecnologias de automação. No intuito de criar um modelo de comunicação aceito por diversos fabricantes, associações internacionais se reuniram e desenvolveram o Modelo de Arquitetura de Referência, o RAMI 4.0 - *Reference Architecture Model for industrie 4.0*. O qual contém aspectos fundamentais da Indústria 4.0, como o controle vertical e horizontal, controle do chão de fábrica e gestão dos dados da fábrica, e possível de ser gerenciado por pessoas (ADOLPHS, EPPLÉ; 2015).

Figura 2.6: Integração na Indústria 4.0



Fonte: Dorrow (2015)

2.2.2.5. Segurança Digital

A Segurança cibernética se preocupa com a questão que envolve os ataques e a definição de estratégias de defesa, ou contramedidas, que preservem a **confidencialidade**, impedir a divulgação de dados e informações a indivíduos não autorizados, a **integridade**, impedir qualquer modificação nos dados de maneira não autorizada, e a **disponibilidade**, assegurar que sistemas responsáveis por fornecer, armazenar e processar informações estejam disponíveis quando necessário e para quem precisa, de quaisquer tecnologias digitais e da informação (JANG-JACCARD; NEPAL, 2014).

Segundo Alves e Moreira (2012), é necessário ter uma atenção especial a um dos ativos mais importantes das companhias, a informação, no que tange ao manuseio e a segurança. Deve-se elaborar políticas de segurança da informação que abranja desde o processo de geração até o descarte das informações. Ainda é necessário responder algumas questões, como **O que proteger**, ter ciência que é um ativo de grande valor para empresa, **Por que proteger**, são as bases para a condução do negócio, **Proteger de que**, de acessos indevidos e de roubo ou de perda e **Como proteger**, definir direitos e forma de acesso.

Para Stallings (2011), Serviços de Segurança da Informação trata-se de uma camada de protocolos que garante a segurança adequada dos sistemas ou das transferências de dados. Estes serviços podem ser divididos em cinco categorias e seus serviços específicos, sendo i)

Autenticação, a garantia de que uma comunicação seja autêntica, garantir ao destinatário que a mensagem é da origem que alega ser; ii) **Controle de acesso**, prevenir o uso não autorizado de um recurso, definir quem pode ter acesso, sob quais condições e o que pode fazer; iii) **Confidencialidade de dados**, a proteção contra divulgação não autorizada; iv) **Integridade de dados**, a garantia de que os dados recebidos são exatamente como enviados, não contêm modificação, inserção, exclusão ou reprodução; v) **Não rejeição**, que fornece proteção contra a negação por uma das entidades envolvidas na comunicação de ter participado de toda ou parte da comunicação.

Segundo Lees *et al* (2018), uma companhia deve assumir sua própria segurança cibernética e não a terceirizar, pois caso ocorra algum ataque cibernético a corporação será a maior prejudicada. E para que as companhias possam se proteger recomendam quatro medidas práticas; i) o **Projeto de Infraestrutura**: desenvolvimento de arquiteturas mais resistentes a ameaças e mais fáceis de proteger. Minimizar a exposição, implantação de redundância e buscar reduzir os danos potenciais em caso de ataques; ii) o **Gerenciamento de mudanças**: as alterações na infraestrutura precisam ser bem gerenciadas para minimizar os riscos operacionais da infraestrutura cibernética. Manter software, hardware e firmware atualizados, pois caso fiquem obsoletos podem conter vulnerabilidades; iii) os **Backups**: a capacidade de recuperar dados danificados ou perdidos. Os sistemas estão sempre online, desta forma é necessário possuir ferramentas que reescrevam as informações constantemente, ter boas ferramentas de restauração de dados e garantir a segurança da infraestrutura de backup; iv) os **Recursos**: manter constantes investimentos na proteção de dados.

Quanto da importância da proteção de dados, sejam eles pessoais ou empresariais, cabe ressaltar que o Brasil desenvolveu a lei 13.709 / 2018 – Lei Geral de Proteção de Dados Pessoais, que dispõe em Art. 1º:

Art. 1º: Esta Lei dispõe sobre o tratamento de dados pessoais, inclusive nos meios digitais, por pessoa natural ou por pessoa jurídica de direito público ou privado, com o objetivo de proteger os direitos fundamentais de liberdade e de privacidade e o livre desenvolvimento da personalidade da pessoa natural.

2.2.2.6. Computação em Nuvem

Mell e Grance (2011) definem computação em nuvem como um modelo que permite acesso a uma rede onipresente, sob demanda, a um conjunto compartilhado de recursos de computação configuráveis, como, redes, servidores, armazenamento, aplicativos e serviços, que podem ser rapidamente provisionados e liberados com esforço mínimo de gerenciamento ou interação com o provedor de serviços.

A computação em nuvem é um novo paradigma da computação em larga escala, que é impulsionada pela economia de escala. Os modelos de computação em nuvens mais comuns são o SaaS, PaaS e IaaS, que são modelos de serviços mais conhecidos em computação em nuvem (KARAMOUZ *et al.*, 2013; YOU; HUANG, 2013). Na sequência são apresentados detalhes sobre cada um destes modelos:

- **SaaS - *Software as a Service***: onde os fornecedores de serviços em nuvem configuram e operam os aplicativos na nuvem, de acordo com as necessidades dos usuários;
- **PaaS - *Platform as a Service***: onde os provedores de nuvem fornecem uma plataforma de serviços que incluem o sistema operacional, ambiente para execução da linguagem de programação e banco de dados e servidor web;
- **IaaS - *Infrastructure as a Service***: nesse modelo os fornecedores sugerem as chamadas máquinas virtuais, as quais são gerenciadas por softwares específicos, onde é possível a criação de diversas máquinas virtuais, que dão suporte ao processo de negócio do cliente.

Segundo Cohen *et al.* (2013), as plataformas de infraestrutura de nuvem, se dividem em três modelos diferentes; **Nuvem Privada**, um modelo que utiliza recursos próprios, para utilização de um grupo fechado de indivíduos; **Nuvem Comunitária**, que estendem os modelos da nuvem privada para uma comunidade mais ampla, permitindo que um gama maior de usuários compartilhe recursos de nuvem; **Nuvem Pública**, nuvem comercial, fornecem diferentes tipos de recursos, e os usuários pagam pela quantidade e capacidade de recursos que utilizam. Essas plataformas fornecem uma interface através do qual os usuários podem processar e armazenar dados, bem como utilizar outros recursos da infraestrutura.

2.2.2.7. *Big Data e Análise de dados*

Segundo Gandomi e Haider (2015), Big Data é um termo que descreve grandes volumes de dados, de alta velocidade, com complexas variáveis que requerem técnicas e tecnologias avançadas para permitir a captura, armazenamento, distribuição, gerenciamento e análise das informações.

Para O'Donovan *et al.* (2015), instalações produtivas modernas são ambientes que geram, transmitem, compartilham e analisam dados através de redes e produzem inteligência empresarial, que são traduzidos em eficiência operacional e inovação de processos. Para manter esta inteligência em prol da empresa, os sistemas de informação devem armazenar uma quantidade de dados cada vez maiores, processar estes em tempo real, e desenvolver análises avançadas. Tecnologias como Internet das Coisas e Sistemas Cyber-físicos geram um

crescimento exponencial na produção de dados fabris, os quais podem ser analisados e modelados a fim de uma melhor compreensão dos processos e criar melhores recursos para o negócio.

Com a implementação de novas tecnologias, novos canais de comunicação, dados móveis, publicidade online, os dados gerados possuem diversos formatos ou padrões, e muitos não convencionais, e desta forma precisam receber tratamento especial para serem processados e serem utilizados pelas companhias. Estes dados são classificados como dados Estruturados, Semiestruturados e Não Estruturados (EBERENDU, 2016; YAN *et al.*, 2017; GANDOMI; HAIDER, 2015).

- Dados **estruturados**, referem-se a dados que têm formato e comprimento definidos, fáceis de armazenar e analisar com alto grau de organização;
- Dados **semiestruturados**, são dados irregulares que podem estar incompletos e ter uma estrutura que mude rapidamente ou imprevisivelmente, e não está em conformidade com um padrão fixo ou explícito (e-mail, XML, documentos);
- Dados **não estruturados**, que não possuem estrutura particular. Geralmente incluem imagens / objetos de bitmap, texto, e-mail e outros tipos de dados que não fazem parte de um banco de dados. São gerados de diferentes fontes, como sensores, postagens de mídias sociais e fotos digitais.

As novas ferramentas digitais permitem manusear grande quantidade de dados corriqueiramente, o que possibilita executar operações complexas em grandes conjuntos de dados. Nestas operações trabalha-se com alto volume, alta velocidade e alta veracidade de dados. O *Big Data* apresenta grande potencial de resolver problemas para a indústria, mas é necessário entender o mesmo através de 7Vs: i) o **Volume**, que refere-se à quantidade de dados que estão sendo criados, incluindo texto, áudio, vídeo, redes sociais, pesquisas, oriundos de diversas fontes; ii) a **Velocidade**, que se refere a rapidez e a velocidade que os dados são gerados, que pode dificultar o trabalho com eles; iii) a **Variedade**, o formato dos dados (áudio, vídeo, texto, imagens); iv) a **Veracidade**, trata-se da confiabilidade dos dados, quão confiáveis são; v) a **Validade** dos dados, entende-se a exatidão e a acurácia dos dados em relação ao uso pretendido; vi) a **Volatilidade**, que se refere a política de retenção de dados; vii) o **Valor**, que se refere ao resultado desejado do processamento dos dados do *big data*, ou seja, extrair o máximo valor de qualquer grande conjunto de dados para gerar inteligência empresarial (KHAN *et al.*, 2014; SHAO *et al.*, 2014):

Para apoiar a tomada de decisão, algumas ferramentas podem ser utilizadas, como a modelagem e a simulação, que tem sido usada por fabricantes para analisar suas operações e propor as melhores soluções. A análise dos dados tem sido usada como parte chave da simulação, onde os dados são fonte para a geração dos cenários que embasarão os gestores na definição do melhor caminho. A análise de dados pode ser feita de forma **Descritiva**, que inclui a apresentação de dados de forma resumida ou a consulta as informações significativas da situação real, na forma de **Diagnóstico**, que identifica as causas que levam a um desempenho percebido e a compreensão dos fatores que levaram a tal desempenho, a **Análise Preditiva**, a qual ajuda a identificar o que é provável que aconteça e a **Análise Prescritiva**, que se concentra na identificação de cenários que poderão levarão direcionar a empresa ao desempenho desejado (SHAO *et al.*; 2014).

2.2.2.8. Realidade Aumentada e Realidade Virtual

Realidade virtual e aumentada são simulações geradas por computador e que apresentam ao usuário uma realidade alterada. A Realidade Virtual é um substituto da realidade, é uma recriação de um ambiente real ou imaginário que mascara o ambiente real, através de estímulos da tecnologia da visão e audição. Os usuários sentem que estão em uma situação criada para eles, enquanto navegam e controlam as ações através de controladores. Já a Realidade Aumentada não substitui a realidade, em vez disso amplia a realidade. Esta tecnologia adiciona melhorias geradas por computador a realidade existente, permitindo que o usuário interaja com a realidade de maneira mais significativa (ISACA; 2017).

Com o aprimoramento das tecnologias de Realidade Aumentada (RA), dispositivos podem ser empregados para ajudar a aumentar a segurança nas fábricas e reduzir a demanda física dos trabalhadores. Podem ser utilizadas em conteúdos virtuais para treinamentos, orientação de montagem, interfaces de controles de equipamentos, simulação de processos e pesquisas para criar objetos virtuais em torno de objetos existentes. Uma das características da RA é que esta tecnologia introduz informações do ambiente físico para inspirar, contextualizar e guiar a criatividade dos usuários (ZHANG; KWOK, 2018).

Para Damiani *et al.* (2018), a Realidade Virtual e Aumentada está sendo amplamente utilizadas em treinamentos virtuais. O treinamento é utilizado para melhorar a qualidade dos sistemas de produção e auxiliar trabalhadores nas linhas de montagem, onde é feito a utilização de equipamentos inteligentes, de onde é possível ler procedimentos ou ver projetos de equipamentos. As principais vantagens da aplicação da realidade Virtual e Aumentada são o melhor controle da planta e diagnóstico de erros, segurança dos sistemas de produção, melhoria

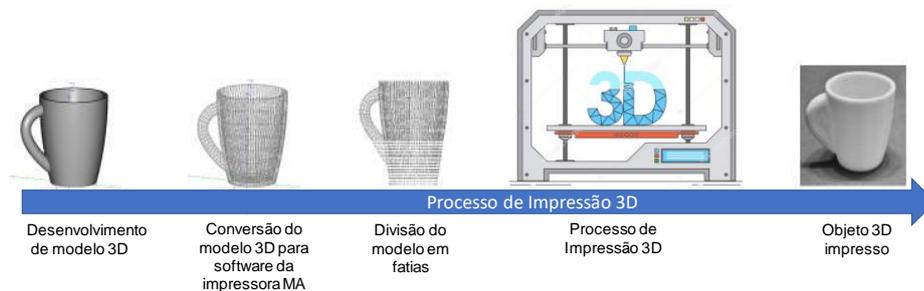
das atividades de planejamento, incluindo o uso de recursos, projeto e configuração de produtos, fornecimento de informações necessárias no nível operacional e empresarial, melhoria na cooperação entre humanos e máquinas e treinamento de tarefas complexas de maneira mais segura.

2.2.2.9. Manufatura Aditiva

O termo Manufatura Aditiva refere-se à produção de peças pela construção de camadas sucessivas de material, de forma uniforme, e possibilita a impressão de uma grande variedade de objetos, de formatos diferentes. Opera de maneira autônoma, e tem como base os modelos digitais em 3D. Englobam as etapas de preparação dos dados, a aplicação das camadas e o pós-processamento. Podem ser utilizados diversos métodos e materiais, como por exemplo os polímeros, copolímeros, metais e ceras, bem como combinações, dependendo dos atributos de cada produto a ser impresso. Também conhecida como Impressão 3D Industrial, está continuamente amadurecendo e tem uma enorme gama de aplicações na indústria (ACATECH *et al.*, 2017).

Segundo Bechthold *et al.* (2015), o processo de Manufatura Aditiva se inicia com a necessidade do usuário, o qual tem uma imagem abstrata do que deseja imprimir em 3D. O próximo passo é modelar este objeto em formato digital e em 3D, com a ajuda de um software que se comunique com o equipamento de Manufatura Aditiva, como por exemplo o CAD – *Computer Aided Design*. Também é possível utilizar a digitalização de um artefato ou obter arquivos de design de outras fontes. A figura 2.7 apresenta os passos do processo de fabricação utilizando a Manufatura Aditiva.

Figura 2.7: Processo de Manufatura Aditiva.



Fonte: Bechthold *et al.* (2015)

Para Conner *et al.* (2014), as empresas devem considerar diversos fatores ao determinar se a Manufatura Aditiva é apropriada ao negócio. Três atributos para a implantação da Manufatura Aditiva devem ser analisados, o volume de produção, a customização e a

complexidade. O volume de produção refere-se simplesmente ao número de peças feitas em um determinado período, como tamanho do lote ou quantidade do pedido. Quando se trata de fabricação, o volume de produção pode variar de uma grande quantidade a um único produto. Complexidade refere-se ao número de recursos que uma peça contém, como a geometria e a customização necessária.

Na sequência do texto será apresentado o levantamento bibliográfico referente a modelos de maturidades, específicos para a Indústria 4.0

2.3. MODELOS DE AVALIAÇÃO DO NÍVEL DE MATURIDADE PARA A INDÚSTRIA 4.0

Neste capítulo serão apresentados os modelos de avaliação de nível de maturidade, específicos para a Indústria 4.0, com detalhes de avaliação, os autores, dimensões avaliadas, os itens de avaliação e a representação gráfica de cada modelo.

2.3.1. Modelos de Avaliação de Nível de Maturidade

Maturidade refere-se a um estado de estar completo, pronto, e implica em progresso no desenvolvimento de algum tipo de sistema. Modelos de maturidade são usados como instrumentos para conceituar e medir a maturidade de uma organização, de um processo, em relação a um estado específico, ou seja, são modelos que tem como função captar e analisar a atual situação em que se encontra, enquanto processo de maturidade (SCHUMACHER *et al.*, 2016).

Um modelo de maturidade serve como uma escala para avaliação da posição atual no caminho da evolução, fornece itens que precisam ser cumpridos para atingir determinados níveis de critérios (BECKER *et al.* 2009).

Modelos de maturidade refletem aspectos da realidade para classificar capacidades de determinados domínios de interesse, que podem ser usados para análises, comparações com competidores, e comparações com as referências naquele domínio. Estes modelos tipicamente contemplam dimensões e níveis. O conteúdo de cada dimensão pode ser derivado de métodos qualitativos de pesquisa, incluindo estudos de caso, grupos focais, e outras metodologias de geração de ideias e tomada de decisão (O'DONOVAN *et al.*, 2016).

Os níveis são rótulos ordinais que significam estágios de maturidade, enquanto as dimensões representam capacidades específicas do domínio de interesse. Um nível de maturidade consiste na consolidação de práticas gerais e específicas relacionadas a um conjunto

de processos predefinidos que aumentam a performance geral de uma empresa, ou de um objetivo específico (SOUZA; GOMES, 2015).

Modelos de maturidade geralmente são limitados em medir um aspecto particular de um domínio de conhecimento, apesar de múltiplos modelos poderem ser combinados em uma mesma avaliação. No entanto, combinar vários modelos pode ser desafiador quando existem diferentes dimensões e níveis de maturidade. As críticas mais comuns a modelos de maturidade incluem acurácia insuficiente, documentação pobre, fundamentação teórica inadequada, e abordagens tendenciosas no escopo do modelo, mesmo quando existem métodos empíricos (O'DONOVAN *et al.*, 2016).

Ao invés de desenvolverem seus próprios modelos de maturidade, instituições muitas vezes adotam modelos existentes, desenvolvidos especificamente para algumas áreas, como para o desenvolvimento de software, Gestão de Projetos, Gestão da Qualidade, como o COBIT, ITIL, PMI, CMMI, e a ISO. Modelos prontos tem suas vantagens e desvantagens (GOKSEN *et al.*, 2015).

- Vantagens;
 - Estão prontos para uso, não há necessidade de gastar tempo para o desenvolvimento de um novo modelo de maturidade;
 - Já foram testados, usados por outras instituições e pessoas qualificadas;
 - Continua a ser desenvolvido, com a contribuição de diversas pessoas e instituições que utilizam e contribuem com o aprimoramento do modelo de maturidade;

- Desvantagens;
 - Os escopos do modelo foram desenvolvidos para atender a uma área específica, e podem atender parcialmente uma outra área;
 - Modelo pode não atender a dinâmica real de uma instituição que deseja utilizá-lo, ou seja, pode ser mais generalista;
 - São modelos únicos, construídos para atender a um objetivo específico, não são flexíveis.

Com o advento da Indústria 4.0, os padrões empresariais sofrem e sofrerão mudanças significativas, e provocarão diversas alterações no contexto das empresas. Considerando a necessidade de adaptação a estas mudanças, como a qualificação de colaboradores, investimentos em equipamentos, mudança de cultura, entre outros, é necessário adaptar as

companhias com este novo modelo trabalho, e desenvolvê-la em etapas incrementais, para que seja absorvida e gere ganhos de eficiência e de qualidade.

Pode não ser exatamente sincronizada em todos os processos de negócio, todas as plantas industriais, linhas de produção, ou mesmo em todas as células de produção em uma unidade. Fica a critério de cada empresa decidir qual estágio de desenvolvimento que representa um bom equilíbrio entre os custos e os benefícios da mudança, de acordo com as circunstâncias que envolvem o negócio, com a visão de um estado futuro desejado ao final do processo de transformação (SCHUH *et al.*, 2017).

Desta forma, empresas devem, antes de iniciar um projeto de transformação digital, precisam analisar o estado atual de utilização dos conceitos e tecnologias da Indústria 4.0, utilizando-se de uma análise sistemática e estratégica, que envolva todas as partes envolvidas no negócio e sua cadeia de valor.

Através da revisão bibliográfica foram analisados alguns modelos de maturidade, específicos para a Indústria 4.0, com o objetivo de fundamentar a análise e o desenvolvimento de um modelo específico para o Setor Sucroenergético. Os modelos analisados estão apresentados na sequência do texto.

2.3.1.1. Modelo para Avaliação da Maturidade da Indústria 4.0 de Empresas de Manufatura.

Para Schumacher *et al.* (2016), maturidade trata-se de um estado de avanço das condições internas e externas que sustentam os conceitos da Indústria 4.0, como a Integração Vertical e Horizontal de sistemas de manufatura e empresas, bem como a integração digital da engenharia em toda cadeia de valor.

A análise de cada item de maturidade é avaliada em uma escala do tipo Likert, de “não importante”, classificação = 1, a “muito importante”, avaliação = 5. Foram definidos um total de 62 itens de avaliação de maturidade, agrupados em nove dimensões organizacionais. Seguiu-se uma fase de transformação do modelo em uma ferramenta útil e de uma forma adequada de distribuição. Posteriormente, o modelo foi aplicado em duas empresas industriais para validação, e coleta de sugestões de melhorias. As dimensões organizacionais e itens de avaliação do modelo estão descritos no quadro 2.2.

Cada item é avaliado de acordo com cinco níveis de maturidade, onde o mais baixo, nível 1, representa a completa falta de atributos que suportam os conceitos da Indústria 4.0, e o nível mais alto, nível 5, representa o estado da arte dos atributos requeridos. As avaliações são resumidas em um processo de três etapas:

- Medição dos itens de maturidade nas empresas via questionários;
- Cálculo do nível de maturidade em cada uma das nove dimensões, auxiliado por *software*;
- Representação visual do nível de maturidade via relatórios de maturidade e gráficos radar.

Quadro 2.2: Dimensões e Itens de avaliação de maturidade

DIMENSÕES	ITENS DE AVALIAÇÃO DE MATURIDADE
Estratégia	Desenvolvimento de um roteiro para implementação da Indústria 4.0; Recursos disponíveis para implementação da Indústria 4.0, Adaptação de modelos de negócio;
Liderança	Disposição da liderança para a Indústria 4.0; Competências e métodos de gestão para Indústria 4.0; Existência de coordenação central para a implementação da Indústria 4.0;
Clientes	Utilização de dados do cliente; Digitalização de vendas / serviços; Competências de mídia digital do cliente;
Produtos	Individualização de produtos; Digitalização de produtos; Integração de produtos dentro de outros sistemas;
Operações	Descentralização de processos; Modelagem e simulação; Colaboração interdepartamental; Interdisciplinaridade;
Cultura	Partilha de conhecimento; Inovação aberta e colaboração entre empresas; Valor da Tecnologia de Informação e Comunicação na empresa;
Pessoas	Competências de Tecnologia de Informação e Comunicação dos colaboradores; Abertura de a novas tecnologias aos colaboradores; Autonomia dos colaboradores;
Governança	Regulamentos trabalhistas para a Indústria 4.0; Adequação de padrões tecnológicos; Proteção da propriedade intelectual;
Tecnologia	Existência de modernas Tecnologias de Informação e Comunicação; Utilização de dispositivos móveis; Utilização da comunicação máquina-a-máquina

Fonte: Schumacher *et al.* (2016).

Para o cálculo do nível de maturidade de cada dimensão, são feitas médias ponderadas dos resultados obtidos em cada item de avaliação multiplicado pelo respectivo fator de ponderação. Para a determinação do nível de maturidade global da empresa, são feitas médias ponderadas dos níveis de maturidade calculados de cada dimensão multiplicados pelo fator de ponderação de cada dimensão, conforme apresentado na figura 2.8:

Figura 2.8: Cálculo do Nível de Maturidade.

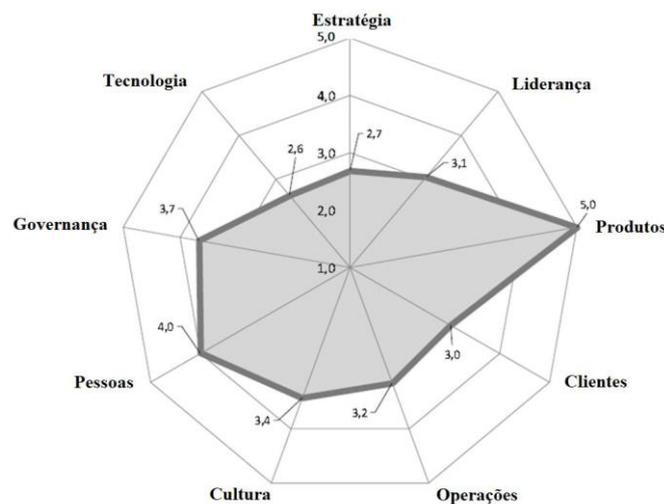
$$M_D = \frac{\sum_{i=1}^n M_{DII} * g_{DII}}{\sum_{i=1}^n g_{DII}}$$

Onde:
M = maturidade;
D = Dimensão;
I = item;
g = fator de ponderação;
n = item de maturidade

Fonte: Schumacher *et al.* (2016).

O modelo foi aplicado em uma empresa austríaca fornecedora de peças para o setor de aviação. A empresa foi escolhida, pelo fato de estar engajada na transformação para a Indústria 4.0 e possuir os conhecimentos necessários para a aplicação do questionário. A Figura 2.9 representa os resultados da avaliação de maturidade da empresa.

Figura 2.9: Resultado da Avaliação de Maturidade



Fonte: Schumacher *et al.* (2016).

2.3.1.2. M2DDM – Modelo de Maturidade para Manufatura Baseada em Dados.

Para Weber *et al* (2017), os principais objetivos da implantação da Indústria 4.0, são a integração vertical de sistemas de Tecnologia da Informação, integrando sistemas de produção e automação da engenharia, a integração horizontal em diferentes estágios da cadeia de valor, a consistência da engenharia ao longo da vida do produto e novas infraestruturas sociais para o trabalho. Estes itens estão intimamente ligados a coleta, armazenamento, processamento, transformação e integração de dados, que geram avanços na melhoria da tomada de decisões, produtividade e eficiência na fabricação.

Para desenvolver seu modelo, os autores se utilizaram de três arquiteturas de referência, que abordam o tema de perspectivas diferentes, o IIRA - Arquitetura Industrial de Referência

da Internet, desenvolvida por uma iniciativa liderada pela indústria, o RAMI - Modelo de Arquitetura de Referência para a Indústria 4.0, desenvolvido por uma iniciativa impulsionada pelo governo e a SITAM - Arquitetura de TI de *Stuttgart* para manufatura, desenvolvida como parte de vários projetos de pesquisa acadêmica.

A partir da análise das arquiteturas de referência, extraíram seis dimensões relevantes para a implementação da Indústria 4.0, as quais estão apresentadas no quadro 2.3.

Quadro 2.3: Dimensões e itens de avaliação de maturidade

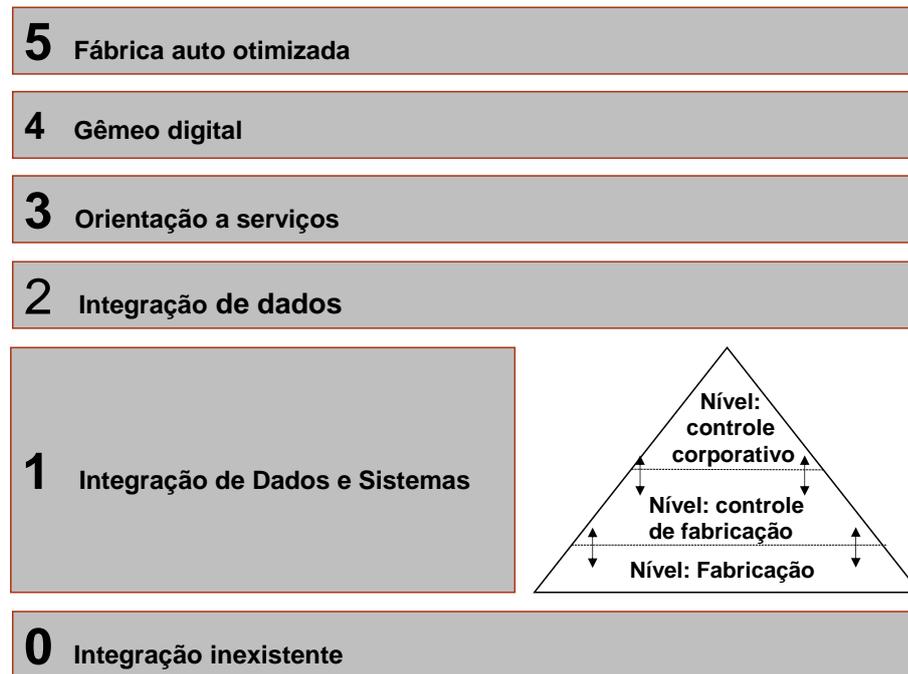
Dimensões	Itens de avaliação
Armazenamento e processamento de dados	Infraestrutura, no chão de fábrica, capaz de coletar, armazenar e processar dados em tempo real. Esta infraestrutura formam os sistemas cyber-físicos, que processam análises de dados mais simples e alimentam as análises mais complexas;
Arquitetura orientada a serviços	Integrar componentes que precisam trocar dados de diversas interfaces e formatos, os quais podem ser utilizados em análises de dados avançados;
Integração da informação	Acessar e analisar dados de diversos domínios, como por exemplo dados de pós-venda, para construir inteligência empresarial. Ainda, digitalizar diferentes domínios da cadeia de valor, bem como o ciclo de vida do produto;
Gêmeos digitais:	Representação digital de todos os estados e funções de um ativo físico, integrados por uma infraestrutura em rede, que realiza o controle autônomo dos ativos de manufatura e criam um tipo de inteligência holística, que possibilita a colaboração entre os atores do chão de fábrica para o alcance de objetivos comuns;
Análises avançadas	Infraestrutura de controle do chão de fábrica gera grande quantidade de dados brutos, e estes precisam ser lapidados, através de análises avançadas, para descobrir padrões existentes e prever resultados futuros. O conhecimento adquirido através dos dados permite melhores decisões, tanto em nível de máquina quanto humano, e mudam o foco de descritivo para preditivo e prescritivo;
Recursos em tempo real	Processos precisam ser controlados, muitos em intervalos pequenos e com restrição de tempo, e isto deve acontecer em tempo real para reagir dentro de um período crítico a determinados eventos. Portanto, a análise em tempo real, deve acontecer próximo onde os dados são gerados para garantir rapidez nas decisões. Devido as grandes limitações de armazenamento e processamento de dados no chão de fábrica, análises mais complexas podem ser executadas em um ambiente de nuvem remota.

Fonte: adaptado de Weber *et al.* (2017).

Segundo Weber *et al.* (2017), o Modelo de Maturidade para Manufatura Orientada por Dados - M2DDM, está alinhado a pirâmide de automação da manufatura, pois a construção da maturidade da indústria 4.0 deve ser realizado de forma interativa. O modelo consiste em seis níveis de avaliação, onde o nível 0 é o mais baixo e não existe integração e processamento dos dados. No outro extremo, o nível 5 descreve a fábrica auto otimizada, integrando sistemas e dados, e se utiliza destas análises para otimizar totalmente a fábrica e os processos de fabricação.

A figura 2.10 apresenta os níveis de maturidade do modelo M2DDM e suas respectivas classificações.

Figura 2.10: Níveis de maturidade do modelo M2DDM.



Fonte: Weber *et al.* (2017)

- **Nível 0 - Integração de Tecnologia da Informação inexistente.** Nesse nível, equipamentos de manufatura, como máquinas, ferramentas e peças não são integradas;
- **Nível 1 - Integração de dados e sistemas:** implantação da pirâmide de informações de fabricação, equipamentos integrados e gerenciados por uma instancia central, o MES - *Manufacturing Execution System*, e as ordens de produção são coordenadas por uma camada superior ao MES. Dados são coletados, armazenados e convertidos em indicadores de desempenho;
- **Nível 2 - Integração de dados com outras áreas:** integração de dados relevantes para a fabricação a outros dados de negócios, como o pós-vendas, logística e mídias sociais;
- **Nível 3 - Orientação para Serviço:** implementação de ferramenta de Orientação para Serviços, que integra os dados dos sistemas de chão de fábrica e o sistema corporativo, através do qual é possível a construção de análises simples;
- **Nível 4 – Gêmeo digital:** implementação de um modelo padrão e uniforme de dados, através de gêmeos digitais, integrados a uma plataforma central. Diferentes plantas e diferentes ativos podem se comunicar e formar uma inteligência empresarial, o que permite o auto controle descentralizado;

- **Nível 5 - Fábrica Auto Otimizadora:** realização de análises avançadas de dados, em tempo real, com a utilização de nuvem. Permite análises rápidas e complexas, em pequenos intervalos de tempo, permitindo ajustes rápidos e pontuais em processos e equipamentos.

2.3.1.3. DISPONIBILIDADE PARA INDÚSTRIA 4.0 – MODELO IMPULS

A Associação de Fabricantes de Máquinas da Alemanha (VDMA), através da Fundação IMPULS, auxiliada por empresas do setor industrial alemão, e por instituições de pesquisa como a *IW Consult*, uma subsidiária do *Cologne Institute for Economic Research*, e pelo *Institute for Industrial Management (FIR)*, pertencente a *RWTH Aachen University*, ambos na Alemanha, realizou um estudo acerca da preparação das empresas para a transformação na Indústria 4.0, e construiu uma ferramenta online para que empresas possam se auto avaliar. O estudo realizado traz as definições da Indústria 4.0 e a resume de forma que empresas obtenham um conjunto de quatro capacidades implementadas, indicados pelas próprias empresas: fábricas inteligentes, produtos inteligentes, operações inteligentes, e serviços baseados no uso de dados.

Este modelo de avaliação de maturidade é composto por seis dimensões de agrupamento, que contemplam dezoito áreas de interesse distribuídas nas dimensões, que são os fundamentos do modelo de avaliação. Quatro das seis dimensões definidas coincidiam com as capacidades descritas pela literatura, fábricas inteligentes, produtos inteligentes, operações inteligentes, e serviços baseados no uso de dados, e o grupo de trabalho identificou mais duas dimensões para compor o modelo, estratégia e organização, e força de trabalho. Os autores consideram a Indústria 4.0 uma questão estratégica, por isso merecem atenção a itens que envolvam os objetivos estratégicos, a disponibilidade de recursos, a gestão da inovação, e a capacidade de gestão da alta administração para os desafios da transformação provocados pela indústria 4.0. São apresentadas no quadro 2.4 as dimensões previstas no modelo e suas respectivas capacidades de transformação.

Quadro 2.4: Dimensões e itens de avaliação propostos por Lichtblau *et al.* (2015)

Dimensões	Itens de avaliação
Estratégia e organização	Gestão estratégica para operacionalização da Indústria 4.0
	Investimentos em tecnologias da Indústria 4.0
	Gestão da inovação e uso de tecnologia
Fábricas inteligentes	Modelagem digital
	Infraestrutura de equipamentos
	Uso de dados
	Sistemas de Informação
Operações inteligentes	Uso da nuvem
	Segurança das tecnologias de informação
	Processos autônomos
	Partilha de informações

Dimensões	Itens de avaliação
Produtos inteligentes	Softwares embarcados nos produtos
	Análise de dados durante a fase de utilização do produto
Serviços derivados de dados	Disponibilidade de serviços baseados em dados coletados
	Proporção de receitas derivadas de serviços baseados em dados coletados
	Proporção de dados utilizados na fase de uso do produto
Força de trabalho	Aquisição de habilidades
	Habilidades existentes da força de trabalho

Fonte: adaptado de Lichtblau *et al.* (2015)

As dimensões são usadas para desenvolver um modelo de seis níveis de maturidade, Leigo, Iniciante, Intermediário, Experiente, Especialista, Melhor Desempenho, e para medir a preparação da empresa para a Indústria 4.0.

Cada um dos seis níveis, descritos de 0 a 5, inclui os requisitos mínimos que devem ser identificados e encontrados para preencher completamente o respectivo nível. O nível “0” – leigo, são considerados fora do conceito da Indústria 4.0, ou seja, empresas que não fizeram nada ou muito pouco, para planejarem e implementarem medidas da Indústria 4.0. O nível “5” representa os de Melhor Desempenho, que são as empresas que implementaram com sucesso todas as medidas e atenderam todos os requisitos da Indústria 4.0, descritos no modelo. O nível de maturidade de uma determinada dimensão é definido pelo menor nível de maturidade das respectivas áreas de interesse que a compõem. Se por exemplo em uma dimensão, uma área de interesse tiver um nível de maturidade 1 e as demais áreas de interesse tiverem nível de maturidade 4, o nível de maturidade da dimensão será 1, pois o modelo entende que a empresa precisa preencher completamente os requisitos de cada dimensão de maneira que os desenvolvimentos das áreas de interesse caminhem de forma aproximadamente em paralelo, denotando uma sintonia e compatibilização das ações pertinentes a cada dimensão.

Cada dimensão do modelo possui seus próprios requisitos, os quais são apresentados abaixo de forma mais abrangente e caracterizam o nível de maturidade atribuído a empresa como um todo:

- **Nível 0 - Leigo:** uma empresa neste nível não possui nenhum dos requisitos. Este nível é automaticamente atribuído a empresas para as quais a Indústria 4.0 é desconhecida ou irrelevante;
- **Nível 1 - Iniciante:** a empresa está envolvida na Indústria 4.0 através de iniciativas piloto. Apenas alguns dos processos produtivos são suportados pela tecnologia da informação e comunicação, o que satisfaz apenas parcialmente as necessidades futuras de integração e comunicação. Sistemas integrados e partilha de informações são limitados a poucas áreas.

As capacidades para expandir a Indústria 4.0 são encontradas em apenas algumas áreas da empresa;

- **Nível 2 - Intermediário:** incorpora a Indústria 4.0 na sua orientação estratégica e desenvolve indicadores adequados para medir o *status* da implementação. Investimentos relevantes são feitos em algumas poucas áreas. Alguns dados de produção são automaticamente coletados e utilizados de forma limitada. A infraestrutura de equipamentos não satisfaz todos os requisitos para expansões futuras. Fabrica produtos com as primeiras funcionalidades de tecnologia embarcadas. Em algumas áreas, os funcionários possuem as habilidades necessárias para expandir a Indústria 4.0;
- **Nível 3 - Experiente:** já formulou uma estratégia para Indústria 4.0 e promove investimentos relacionados em diversas áreas, orientados por um departamento de gestão da inovação. Os sistemas de tecnologia da informação, incluindo soluções em nuvem, suportam os processos de produção, com os dados das principais áreas coletados automaticamente. Soluções de segurança das informações foram implantadas. Fabrica produtos com diversas funcionalidades de tecnologia embarcadas, que formam a base para os primeiros serviços orientados por dados. Grandes esforços sendo feitos para aumentar as habilidades dos empregados para responderem aos novos desafios;
- **Nível 4 - Especialista:** monitora a estratégia para a Indústria 4.0 com indicadores apropriados. Investimentos são feitos em todas as áreas relevantes e os processos são suportados pela gestão da inovação interdepartamental. Os produtos em processo e os produtos acabados possuem funcionalidades baseadas em tecnologias embarcadas que possibilitam a comunicação com os clientes, permitindo a coleta e a análise de dados durante a fase de uso dos produtos. Na maioria das áreas relevantes, a empresa possui as capacidades necessárias para atingir este nível de maturidade e expandir futuramente a Indústria 4.0;
- **Nível 5 – Melhor Desempenho:** tem implantada uma estratégia para a indústria 4.0, suportada por investimentos por toda a empresa. Soluções abrangentes de segurança estão implementadas, e soluções baseadas na nuvem entregam uma infraestrutura de tecnologia da informação e comunicação flexível, que suporta os processos de produção. Algumas áreas da produção já usam equipamentos guiados autonomamente e possuem processos autonomamente reativos. Os dados coletados na fase de uso dos produtos são utilizados para atividades como desenvolvimento de produtos, manutenção remota, e suporte a vendas. Serviços aos clientes orientados por dados colaboram para uma parcela significativa

das receitas. Possui as capacidades técnicas e habilidades dentro da organização para seguir adiante com os projetos da Indústria 4.0.

De acordo com o grau de maturidade obtido na aplicação do modelo, as empresas são classificadas em três tipos: “Iniciantes”, que são as empresas que ainda estão entrando para o caminho de transformação, as “Aprendizes”, que são as empresas que já se engajaram nos primeiros passos do processo de transformação, mas que ainda estão aprendendo a implementar as técnicas e conceitos, e as “Líderes”, que são aquelas que já alcançaram resultados satisfatórios e servem como exemplos de implementação dos conceitos da Indústria 4.0.

A Figura 2.11 representa os níveis de maturidade do modelo e as respectivas classificações da empresa com relação aos resultados obtidos.

Figura 2.11: Níveis de maturidade do modelo IMPULS-VDMA



Fonte: Lichtblau *et al.* (2015)

O modelo pressupõe a determinação de fatores de ponderação para as dimensões, de forma que a determinação do nível de maturidade da empresa com um todo seja feita através de uma média ponderada dos níveis de maturidade de cada dimensão, multiplicados pelos respectivos fatores de ponderação. A definição dos fatores de ponderação das dimensões foi desenvolvida com base em estudos realizados com um conjunto de empresas, através de questionamentos a respeito da importância relativa que cada dimensão tinha para as empresas. Assim, a partir de amostra avaliada, considerada representativa no universo das empresas de engenharia, foi obtido um resultado da importância relativa das dimensões, considerando um

total de 100 pontos possíveis, de forma que a dimensão Estratégia e Organização somam 25% dos pontos, Fábricas inteligentes 14%, Produtos inteligentes 19%, Serviços baseados em dados 14%, Operações inteligentes 10% e Força de trabalho 18%.

Foi desenvolvida uma ferramenta online, onde as empresas interessadas podem fazer uma auto avaliação quanto à preparação e adaptação na Indústria 4.0, e permite uma comparação com as empresas líderes, no mesmo segmento de atuação e do mesmo porte. A autoavaliação *online* é constituída por questões distribuídas pelas seis dimensões, e que buscam compreender o grau de entendimento e de ações de fato implantadas nas empresas, a fim de estabelecer o grau de maturidade nas dimensões e da empresa como um todo. A partir dos fatores de ponderação e do nível de maturidade de cada dimensão, a empresa como um todo terá um nível de maturidade, também classificado de 0 a 5.

2.3.1.4. INDÚSTRIA 4.0: CONSTRUINDO UMA EMPRESA DIGITAL

Para Geissbauer *et al.* (2016), os pontos principais da Indústria 4.0 são a Digitalização e integração de cadeias de valor verticais e horizontais, a Digitalização de ofertas de produtos e serviços e Modelos de negócios digitais e acesso ao cliente, e todos estes pontos devem ser suportados pela análise de dados.

Os autores desenvolveram uma pesquisa com 2.000 empresas, de 26 países, e encontraram oito passos principais para a transformação digital de uma empresa, sendo:

- 1) **Indústria 4.0 - da discussão à ação:** investimentos das empresas em implementação de conceitos e tecnologias da Indústria 4.0;
- 2) **A digitalização leva a saltos quânticos no desempenho:** redução de custos e aumento de receitas com a implementação da Indústria 4.0;
- 3) **Aprofundar o relacionamento digital com clientes:** implementar integração de dados com clientes para melhor atendê-los, melhorar a demanda por produtos e atender com mais eficiência;
- 4) **Foco nas pessoas e cultura para impulsionar a transformação:** desenvolver uma cultura digital robusta e garantir que a mudança seja impulsionada pelos executivos, bem como atrair, treinar e reter talentos para o novo ambiente de trabalho;
- 5) **Análise de dados e confiança digital são a base da Indústria 4.0:** entender quais dados estão disponíveis e o que vale a pena utilizar, melhorar a transparência e a segurança dos sistemas digitais, próprios e de terceiros;
- 6) **Recursos robustos de análise de dados em toda a empresa exigem mudanças significativas:** análise de dados como uma capacidade de nível corporativo;

- 7) **Indústria 4.0 está acelerando a globalização, mas com um item distintamente regional:** transformação digital em termos de ganhos de eficiência operacional, redução de custos e garantia da qualidade;
- 8) **Grandes investimentos com grandes impactos, é hora de arriscar:** investir em tecnologias digitais, dispositivos de conectividade e formação de colaboradores.

Ainda, segundo os autores, para implementar a Indústria 4.0 a utilização dos recursos digitais é importante, e leva-se tempo e dedicação, e a definição de um planejamento, um passo a passo, é importante para ter certa rapidez e não ficar para trás em relação aos concorrentes. E para isso desenvolveram um modelo de projeto digital para direcionar empresas na implantação dos conceitos da Indústria 4.0, conforme apresentado na figura 2.12.

Figura 2.12: Processo para o sucesso digital.



Fonte: Geissbauer *et al.* (2016)

1. **Mapeie sua estratégia Indústria 4.0:** a definição da estratégia para Indústria 4.0 moldará os passos a serem realizados para a transformação digital. Para a definição desses passos, deve-se realizar a avaliação da maturidade atual, e assim definir quais pontos precisam ser trabalhados, quais sistemas e quais soluções serão necessárias. Para a avaliar o estado de maturidade atual, os autores desenvolveram um modelo que utiliza sete dimensões para avaliar o nível de maturidade, o quais estão apresentados no quadro 2.5.

Quadro 2.5: Dimensões e itens de avaliação propostas por Geissbauer *et al.* (2016)

Dimensões	Itens de avaliação
Modelo de negócios digitais e acesso ao cliente	Portfólio de produtos e serviços digitais, rede (M2M) e análise de dados;
	Soluções integradas para os clientes e colaboração com parceiros externos;
	Desenvolvimento de novos modelos de negócios disruptivos com portfólio de produtos e serviços inovadores, lotes menores;
Digitalização de produtos e serviços	Distribuição multicanal com uso integrado de canais online e offline; análise de dados implementada, personalização;
	Abordagem individualizada do cliente e interação com parceiros da cadeia de valor. Interfaces compartilhadas e integradas;
	Gerenciamento integrado da jornada do cliente em todos os canais de marketing e vendas digitais com empatia do cliente e gerenciamento dos dados do cliente;
Digitalização e integração das cadeias de valor vertical e horizontal	Digitalização vertical e processos internos padronizados e harmonizados, fluxos de dados dentro da empresa; integração limitada com parceiros;
	Integração horizontal de processos e fluxos de dados com clientes e parceiros, uso intensivo de dados por meio de integração total na rede;
	Ecosistema de parceiros totalmente digitalizado e integrado, com processos virtualizados auto otimizados, com foco nas principais competências; autonomia descentralizada, acesso quase em tempo real a um conjunto extenso de informações operacionais;
Coleta e análise de dados como capacidade principal	Capacidade analítica suportada por sistema central de inteligência empresarial, sistemas de suporte a decisões não padronizados;
	Sistema central que consolida todas as fontes de informação relevantes, internas e externas, algumas análises preditivas, suporte específico a decisões e sistemas de gerenciamento de eventos;
	Uso central da análise preditiva, em tempo real, para otimização e manipulação automatizada de eventos com banco de dados inteligente e algoritmo de autoaprendizagem, permitindo análise de impacto e suporte a decisões;
Moderna Arquitetura de tecnologia da informação	Arquitetura interna de tecnologia da informação homogênea. Desenvolvimento e conexão entre diferentes cubos de dados;
	Arquiteturas de tecnologia da informação comuns com rede de parceiros. Interconexão única de dados com arquitetura de alto desempenho;
	Base de dados único com funcionalidades de integração de dados externos e organização flexível. Rede de serviços com parceiros, troca segura de dados;
Conformidade, segurança das áreas legal e fiscal	Desafios digitais reconhecidos, mas não abordados de forma abrangente;
	Risco legal tratado de forma consistente com parceiros;
	Otimizando a da cadeia de valor para conformidade, segurança, legal e tributária;
Cultura digital para empresa e colaboradores	Colaboração multifuncional, mas não estruturada e realizada de forma consistente;
	Colaboração além das fronteiras da empresa, cultura e incentivo ao compartilhamento;
	Colaboração como um fator-chave.

Fonte: adaptado de Geissbauer *et al.* (2016)

São utilizados quatro níveis para avaliar a maturidade das empresas na Indústria 4.0, i) Aprendiz Digital, ii) Integração Vertical, iii) Colaboração Horizontal e iv) Campeão Digital. O modelo de avaliação de maturidade é apresentado na figura 2.13. Foi criado pela PricewaterhouseCoopers uma ferramenta de avaliação online, onde as empresas podem se auto avaliar.

Figura 2.13: Modelo de Avaliação de Maturidade

	① Aprendiz Digital	② Integração Vertical	③ Colaboração Horizontal	④ Campeão Digital
Modelo de negócios digitais e acesso ao cliente	Primeiras soluções digitais e aplicações isoladas	Portfólio de produtos e serviços digitais, rede (M2M) e análise de dados como diferenciador chave	Soluções integradas para os clientes e colaboração com parceiros externos	Desenvolvimento de novos modelos de negócios disruptivos com portfólio de produtos e serviços inovadores, lotes menores
Digitalização de produtos e serviços	A presença online é separada dos canais offline, foco no produto em vez do foco no cliente	Distribuição multicanal com uso integrado de canais online e offline; análise de dados implementada, personalização	Abordagem individualizada do cliente e interação com parceiros da cadeia de valor. Interfaces compartilhadas e integradas	Gerenciamento integrado da jornada do cliente em todos os canais de marketing e vendas digitais com empatia do cliente e gerenciamento dos dados do cliente
Digitalização e integração das cadeias de valor vertical e horizontal	Subprocessos digitalizados e automatizados. Integração parcial, incluindo produção com parceiros e externos, processos padrão de colaboração parcialmente implementados	Digitalização vertical e processos internos padronizados e harmonizados, fluxos de dados dentro da empresa; integração limitada com parceiros	Integração horizontal de processos e fluxos de dados com clientes e parceiros, uso intensivo de dados por meio de integração total na rede	Ecossistema de parceiros totalmente digitalizado e integrado, com processos virtualizados auto otimizados, com foco nas principais competências; autonomia descentralizada, acesso quase em tempo real a um conjunto extenso de informações operacionais
Coleta e análise de dados como capacidade principal	Capacidade analítica baseada principalmente em extrações semanais de dados; processamento e monitoramento de dados selecionados, sem gerenciamento de eventos	Capacidade analítica suportada por sistema central de inteligência empresarial (BI), isolado, sistemas de suporte a decisões não padronizados	Sistema central de BI que consolida todas as fontes de informação relevantes, internas e externas, algumas análises preditivas, suporte específico a decisões e sistemas de gerenciamento de eventos	Uso central da análise preditiva, em tempo real, para otimização e manipulação automatizada de eventos com banco de dados inteligente e algoritmo de autoaprendizagem, permitindo análise de impacto e suporte a decisões
Moderna Arquitetura de tecnologia da informação	Arquitetura interna de tecnologia da informação fragmentada	Arquitetura interna de tecnologia da informação homogênea. Desenvolvimento e conexão entre diferentes cubos de dados	Arquiteturas de tecnologia da informação comuns com rede de parceiros. Interconexão única de dados com arquitetura de alto desempenho	Base de dados único com funcionalidades de integração de dados externos e organização flexível. Rede de serviços com parceiros, troca segura de dados
Conformidade, segurança das áreas legal e fiscal	Estruturas tradicionais, digitalização fora de foco	Desafios digitais reconhecidos, mas não abordados de forma abrangente	Risco legal tratado de forma consistente com parceiros	Otimizando a da cadeia de valor para conformidade, segurança, legal e tributária
Cultura digital para empresa e colaboradores	Foco funcional em "silos"	Colaboração multifuncional, mas não estruturada e realizada de forma consistente	Colaboração além das fronteiras da empresa, cultura e incentivo ao compartilhamento	Colaboração como um fator-chave

Fonte: adaptado de Geissbauer *et al.* (2016)

- 2. Crie projetos pilotos:** com o resultado da aplicação do modelo de maturidade, pode-se desenvolver os projetos pilotos, que ajudarão a entender melhor a abordagem da indústria 4.0 para as empresas, e ainda obter a participação da organização e a possibilidade de financiamentos para implementação. Os autores indicam como projetos iniciais a integração vertical em um dos locais de fabricação, a integração horizontal com os principais fornecedores, implementar sensores e atuadores em equipamentos críticos de fabricação e usar a análise de dados preditiva para explorar soluções para a manufatura. Embora os pilotos já possam trazer benefícios aos negócios, seu objetivo principal é gerar informações sobre como a empresa pode trabalhar em funções ou ecossistemas, e quais mudanças são necessárias em tecnologia da informação, segurança, ferramentas e recursos de processos e pessoas. Também, é importante colaborar com universidades ou organizações de setor para acelerar a inovação digital.
- 3. Defina os recursos necessários:** com base nas lições aprendidas nos projetos pilotos, é possível mapear em detalhes a arquitetura corporativa e quais recursos serão necessários.

Serão necessários considerar quatro dimensões estratégicas, o Ajuste da Organização, o Foco nas Pessoas, a Melhora dos Processos e a Implementação de Novas Tecnologias.

- 4. Torne-se competente na análise de dados:** identificar e coletar os dados estratégicos, implementar análises efetivas, é fundamental para tomar as decisões corretas na nova economia da Indústria 4.0. Desenvolver uma estratégia eficaz de análise de dados contribui para análise preditiva e previsão, análise prescritiva, tomada de decisão orientada aos negócios e feedback automatizado para a organização e conectividade com funcionários. Uma decisão importante é a escolha da plataforma de análise de dados, sendo o ideal uma única solução integrada. Os sistemas ERP existentes não possuem recursos completos para lidar com as tendências de dados, desta forma métodos analíticos e algoritmos mais sofisticados precisam ser usados para fornecer a inteligência comercial e a previsão de negócios mais avançadas. Uma abordagem mais sofisticada seria investir em uma camada de integração de dados vinculada aos sistemas ERP e uso de ferramentas de análise personalizadas.
- 5. Transforme-se em uma empresa digital:** desenvolver conjuntos de habilidades digitais em torno da estratégia digital, arquitetura e design da tecnologia, design da experiência do usuário ou recursos de prototipagem rápida. Ultrapassar os limites da empresa e expandir para parceiros e clientes, ser altamente colaborativo. Cultivar um ambiente digital só pode acontecer com uma liderança comprometida. Uma alternativa pode ser o estabelecimento de um conselho digital que gerencia ativamente o desenvolvimento de aprimoramentos, produtos e serviços digitais, desde o estágio da ideia até a implantação nas unidades operacionais. Um conselho digital pode apoiar equipes multifuncionais no gerenciamento proativo da implantação da empresa digital. A transformação digital só acontecerá se a alta gerência colocar a Indústria 4.0 diretamente no centro da estratégia e a tornar uma prioridade.
- 6. Planeje uma abordagem ecossistêmica:** a implementação da indústria 4.0 precisa ir além da integração horizontal e vertical, precisa alcançar um desempenho inovador, dando passos para entender as necessidades do consumidor e usar as tecnologias digitais para criar e agregar valor ao cliente em uma solução integrada e inovadora. Fundamentalmente, trata-se de desenvolver soluções completas de produtos e serviços para os clientes. As empresas podem evoluir sua oferta de mercado, passando de um produto físico tradicional para um ecossistema digital. Avanços reais no desempenho empresarial podem acontecer quando se entende ativamente o comportamento do consumidor e pode orquestrar o papel da empresa no ecossistema de parceiros, fornecedores e clientes.

2.3.1.5. MODELO DE MATURIDADE EMPRESARIAL CONECTADA

Segundo a Rockwell (2014), “a manufatura mudará mais radicalmente nos próximos cinco anos do que nos últimos vinte”. A conexão entre a tecnologia da operação e a tecnologia da informação permite vincular processos e instalações a clientes e fornecedores de novas maneiras, mas também provoca novos desafios na proteção dos dados e da infraestrutura. Essa conexão, graças a utilização de dispositivos interligados a internet no chão de fábrica, está transformando informações em conhecimento e permite uma nova visibilidade das operações, e possibilita novas oportunidades para melhorá-las em relação a:

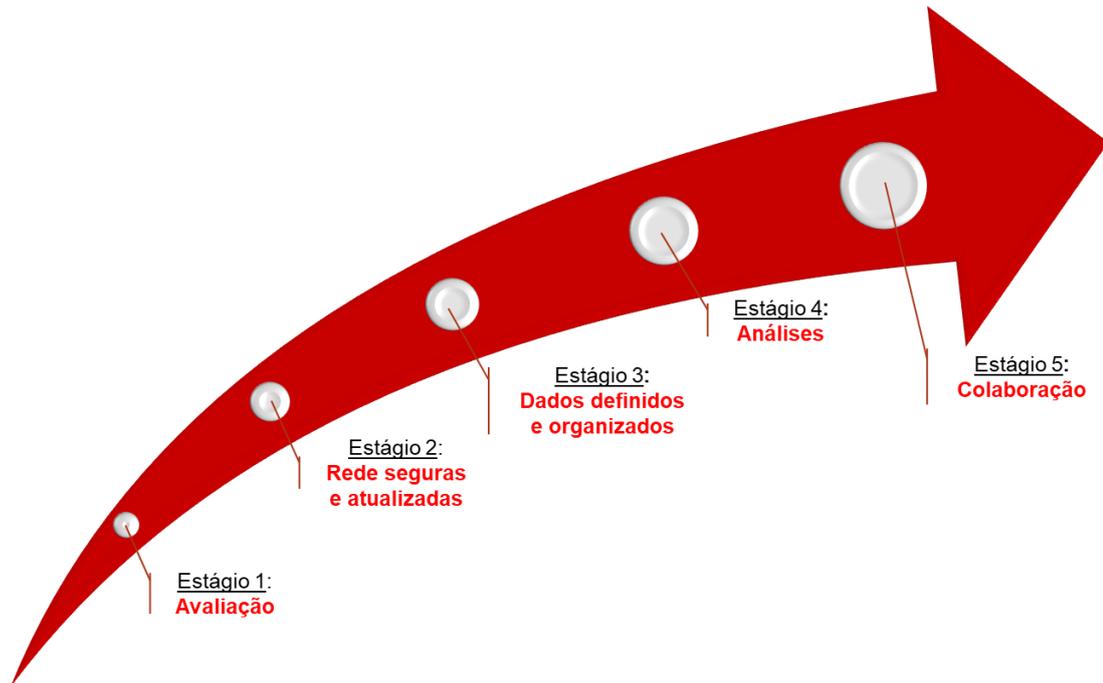
- **Medidas internas:** monitoramento em tempo real e compartilhamento dos principais indicadores de desempenho para que as equipes possam identificar e resolver problemas antes que aumentem ou até ocorram;
- **Atividades de negócios externas:** incorporar informações de demanda do cliente e / ou dados de desempenho do fornecedor, pois acionam a revisão da produção, mudanças de equipe, alternativas de compras, etc.;
- **Mudanças no mercado:** planejadores da cadeia de suprimentos e gerentes de compras contam com uma variedade de fornecedores de todo o mundo, complicando o gerenciamento de prazos, qualidade e controle de custos;

Esta inteligência também melhora a otimização de ativos, incluindo o uso de energia elétrica, confiabilidade e capacidade expandida. Bem como, ajudam executivos a planejar a estratégia empresarial, programando a produção com base em desempenho, logística, demanda de mercado, etc. Ainda, ajuda a mitigar os riscos de dados ficarem confinados em setores e/ou a colaboradores.

Para a Rockwell (2014), as políticas de segurança devem atender as áreas nas quais a tecnologia da informação tradicionalmente não atua, e que exigem colaboração entre a tecnologia da informação e tecnologia da operação, para garantir a segurança da operação. Também, investimentos em redes mais inteligentes podem evitar paradas não programadas, retrabalhos, clientes perdidos e problemas de segurança.

Para implementar uma rede de Tecnologia da Operação e Tecnologia da Informação mais inteligente a Rockwell desenvolveu o modelo de maturidade da Empresa Conectada, que compreende cinco estágios, e incorpora medidas necessárias para garantir as mudanças efetivas nas tecnologias e na cultura organizacional. O modelo está apresentado na figura 2.14 abaixo.

Figura 2.14: Modelo de Maturidade da ROCKWELL.



Fonte: ROCKWELL (2014)

- **Estágio 1 - Avaliação:** neste estágio é avaliado a infraestrutura de rede de TO – Tecnologia da Operação e da TI – Tecnologia da Informação existente na organização.
 - ✓ Infraestrutura de informação, *hardware* e *software*;
 - ✓ Controles e dispositivos que geram dados, sensores, atuadores, controle de motores, etc.,
 - ✓ Infraestrutura de rede, se integram estas informações;
 - ✓ Políticas de segurança da informação;
 - ✓ Pessoas e processos de gerenciamento da infraestrutura.

Na fase de avaliação é possível analisar o estado atual, e projetar o estado desejado, analisando a capacidade da rede existente, se precisa ser atualizada ou substituída, e quais atividades serão necessárias para a criação da rede de inteligência de negócios. Nesta avaliação, também é possível analisar a existência de problemas de segurança de rede, permitindo assim traçar estratégias de mitigação de riscos.

- **Estágio 2 - Rede e controles seguros e atualizados:** após a fase de análise, e identificação de possíveis lacunas e/ou fraquezas, inicia-se a fase de atualizações, com uma visão de longo prazo, a qual contempla expansões e instalações de novas tecnologias. Neste estágio, a organização evolui e cria uma espinha dorsal de rede integrada, que fornece conectividade

segura e adaptável as operações e sistemas de negócios da empresa. Nesta fase é construída a integração vertical, ou seja do chão de fábrica a rede corporativa, as atualizações necessárias de hardware, bem como definir as responsabilidades de gestão da nova rede integrada. Esse processo também permite mapear processos de negócios e fluxos de trabalho aceitáveis, e distribuir adequadamente o gerenciamento da rede inteligente. Nesta etapa a liderança sênior será responsável pela mudança de cultura, que deve procurar remover os obstáculos a mudança. Como resultado desta etapa, surge uma rede mais segura, com acesso a dados dos processos, com autorizações e autenticações de segurança integrados. Tem-se uma oportunidade de controlar o desempenho de equipamentos em tempo real, tornando-se possível a capacidade de resposta a demanda dos clientes.

- **Estágio 3 – Definição e organização de dados:** neste estágio, as equipes de trabalho definem e organizam todos os dados disponíveis para melhorar os processos de negócios, e determinar a forma de como aproveitá-los para obter ganhos de produtividade empresarial. Os dados devem ser padronizados e normalizados entre os sistemas. Este estágio apoia as empresas a estabelecer sistemas que lhes permitam identificar como transformar dados em gatilhos tangíveis e avaliar como as decisões estratégicas beneficiam os resultados. Nesse estágio também é possível controlar documentos em tempo real, necessárias para clientes, programas de certificação e para atendimento a legislação vigente.
- **Estágio 4 – Análises:** durante o estágio 4, o foco muda de hardware, dispositivos, software e redes para melhoria contínua, ou seja, definir qual a melhor forma de aproveitar as novas capacidades da rede integrada. Uma cultura em mutação na empresa reconhece a capacidade da rede apresentar problemas e oportunidades em tempo real. Em um nível operacional, a análise de dados ajudará a identificar as maiores necessidades de informações, destinatários autorizados a manipular as informação e protocolos padronizados que a informação irá disparar, muitos proativos e automáticos. No nível executivo a rede evolui para um ecossistema, que permite otimizar as operações da empresa, tomar melhores decisões sobre quais plantas produzem quais produtos e quando, e obter economias significativas no longo prazo. Novamente, a liderança será responsável pela mudança de cultura, promovendo o desenvolvimento de uma organização focada na excelência operacional. Quando a mudança cultural começa a ocorrer, os mecanismos internos responderão proativamente aos problemas à medida que surgirem, geralmente baseado em dados, que estimulam melhorias, e ajudam a organização a identificar e a projetar melhorias antes que problemas aumentem.

- **Estágio 5 – Colaboração:** neste estágio surgem as capacidades preditivas que tornam mais eficientes o planejamento de produção e o gerenciamento de ativos, nivelção de ordens, melhora da qualidade e indicadores de análise de performance da empresa. Informações em tempo real trazem a capacidade de detectar e resolver problemas em processos de forma mais rápida. Os objetivos são desenvolver a capacidade de resposta a eventos externos, atividades de fornecedores e clientes, tendências de negócios, mercados, eventos políticos e até mesmo padrões climáticos, minimizar eventos negativos e alavancar novas oportunidades. Neste estágio é possível desenvolver a integração horizontal, coordenar atividades com os fornecedores e com clientes.

Para a ROCKWELL (2014), a limitação da rede de fornecedores e clientes pode impedir a colaboração e o desempenho ideais. Mas a empresa pode incentivar os fornecedores a avançar em seus próprios modelos de maturidade, e fazer com que os clientes entendam como a colaboração pode melhorar produtos e preços. Para fornecedores, clientes e unidades de negócios que colaboraram dados, o acesso deve ter escopo definido por motivos de segurança de rede e para proteger processos proprietários.

2.3.1.6. INDÚSTRIA 4.0: INDICE DE MATURIDADE ACATECH

O Guia de maturidade da Indústria 4.0, elaborado pela Acatech - *National Academy of Science and Engineering*, que é a Academia Nacional de Ciências e Engenharia, da Alemanha, pode ser considerado um modelo de avaliação de maturidade em si, mas também um guia para que empresas compreendam o caminho que devem seguir para o desenvolvimento da Indústria 4.0, e para construírem seus próprios modelos. O modelo provê um guia para as empresas criarem seus próprios caminhos no sentido de se tornarem abertas ao aprendizado e ágeis nas respostas e na adaptação, e para auxiliar na criação de medidas que entreguem benefícios concretos. Ajuda a determinar em qual estágio estão atualmente no processo de transformação, a partir de perspectivas tecnológicas, organizacionais e culturais. Apesar das tecnologias avançadas tornarem possível o acesso a um amplo leque de dados, a habilidade de desenvolver o potencial de transformação desses dados depende de cada empresa, de acordo com sua cultura e estrutura organizacional. Os principais desafios para os negócios incluem o entendimento do significado da Indústria 4.0 e o desenvolvimento sistemático de implementação de estratégias de resposta (SCHUH *et al.*, 2017).

O guia sugere seis estágios para o desenvolvimento do processo de transformação:

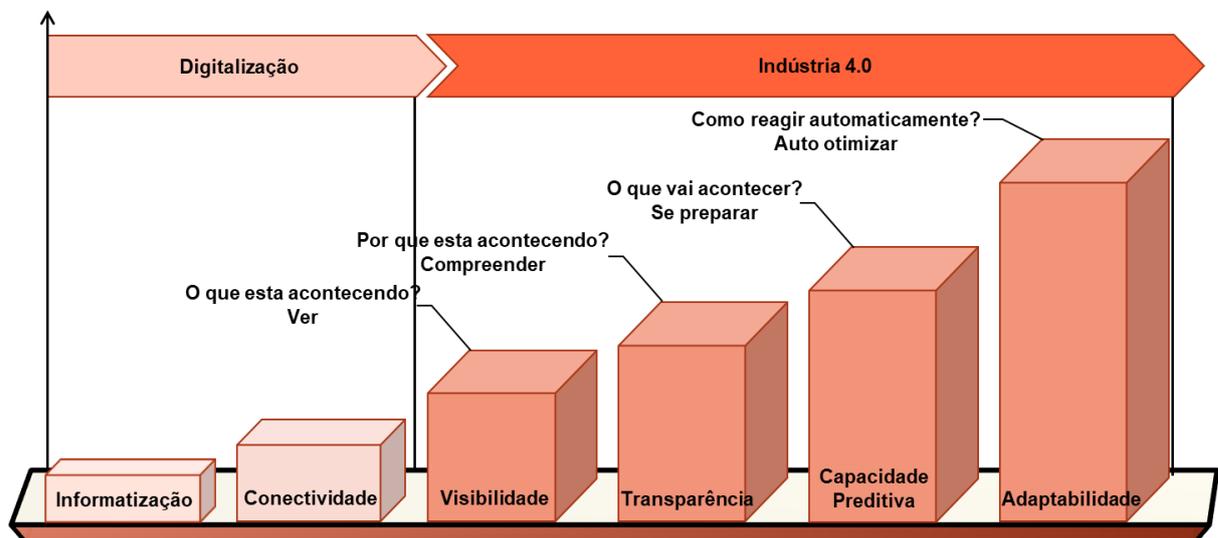
1. **Informatização:** provê a base para digitalização. Ainda que com sistemas operando de forma isolada, a informatização se encontra bem avançada, e é usada para execução de tarefas repetitivas de maneira mais eficiente. A informatização entrega benefícios, possibilitando uma produção mais barata, e um grau de precisão, sem o qual não seria possível a produção de produtos mais complexos. Importantes exemplos desse estágio são as máquinas CNC (Comando Numérico Computadorizado) não integradas a sistemas CAD (Computer Aided Design), ou MES (Manufacturing Execution Systems), e outros sistemas de aplicação não integrados ao ERP (Enterprise Resource Planning). Outro exemplo são testes de qualidade não vinculados às ordens de produção, o que leva a maior esforço na rastreabilidade de problemas de qualidade ocorrerem em quais ordens;
2. **Conectividade:** no estágio de conectividade, os sistemas de negócios informatizados são atualizados ou substituídos por sistemas conectados. Parte dos sistemas operacionais permitem a conectividade e interoperabilidade, mas a integração completa dos sistemas de informação e sistemas de operação ainda não está implantada;
3. **Visibilidade:** este estágio é dedicado a prover visibilidade de informações, obtidas através do sensoriamento e aquisição de dados, não se restringindo somente aos dados da produção, mas de toda a organização, e disponibilizados para os envolvidos ao longo da cadeia de valor, através da integração dos sistemas de planejamento de recursos, sistemas de gestão do ciclo de vida do produto, e sistemas de execução de manufatura. Possibilita que os gerentes tomem decisões baseadas em dados, que é uma evolução se comparada a decisões baseadas em experiência. Este é um importante conceito para suportar os próximos estágios.
4. **Transparência:** após a criação de uma estrutura digital, no estágio anterior, este estágio compreende o entendimento dos dados, e conseqüentemente dos problemas, passando a entender por que eventos passados e presentes ocorreram ou estão ocorrendo, em meio aos complexos sistemas que foram implementados. Busca a geração de conhecimento, através da sistematização da análise das informações, a identificação da causa raiz dos problemas, e cria padrões de ação para a rápida resolução destes. São característicos neste estágio sistemas de mineração de dados e *softwares* aplicados de simulação e análise. Esta transparência pode ser usada para o monitoramento de máquinas e equipamentos, da linha de produção, sistemas logísticos, monitoramento de inventários, além de informações de vendas, pedidos, e outras informações relevantes ao negócio;
5. **Capacidade preditiva:** após atingir este estágio, a empresa será capaz de simular diferentes cenários futuros e identificar com mais clareza e precisão os mais prováveis.

Essa maior previsibilidade pode ser explorada para automação dos processos de resposta, como por exemplo a antecipação de paradas de produção, ruptura de estoque, atrasos nas entregas de pedidos, variações de demanda, entre outras, que podem afetar eficiência e a lucratividade. Os requisitos para a capacidade de predição são algoritmos probabilísticos inteligentes de raciocínio baseado em casos, e da capacidade de identificar eventos que requerem decisões, que neste estágio ainda são tomadas por pessoas;

- 6. Adaptabilidade:** uma vez atingida a capacidade preditiva, a adaptação contínua permite à empresa delegar as ações a sistemas de informação e comunicação em conjunto com sistemas de operação, obtendo maior velocidade de resposta a situações de mudança. O grau de adaptabilidade depende da complexidade da decisão e do custo/benefício para sua implementação, além dos riscos de uma decisão automatizada, e como ela pode afetar a relação com os clientes e com fornecedores. O atingimento da adaptabilidade ocorre quando a empresa é capaz de usar dados do modelo digital para tomar decisões que possibilitem os melhores resultados em menores espaços de tempo possíveis, e implementar as ações de resposta de forma automática, com pouca ou nenhuma intervenção humana.

A figura 2.15 ilustra os níveis de maturidade do modelo.

Figura 2.15: Níveis de maturidade na transformação para a Indústria 4.0.



Fonte: Schuh *et al.* (2017)

Os quatro últimos estágios são mais inovadores e complexos, e mais diretamente relacionados aos benefícios da Indústria 4.0. Nenhum deles pode ser transposto, pois o atingimento de um nível de maturidade suporta os níveis que o sucedem, de forma que são interdependentes.

O guia define quatro áreas estruturais, os recursos, os sistemas de informação, a estrutura organizacional e a cultura organizacional. Em cada área estrutural estão contidos dois princípios fundamentais, e cada princípio possui as respectivas capacidades requeridas de transformação. As áreas estruturais, seus respectivos princípios e capacidades de transformação, estão descritos no quadro 2.6.

Quadro 2.6: Áreas estruturais, princípios e itens de avaliação

Área Estrutural	Princípio Fundamental	Itens de avaliação
1 - RECURSOS	Capacidade digital	Prover competências digitais;
		Aquisição automatizada de dados através de sensores e atuadores;
		Processamento descentralizado de dados através de sistemas embarcados;
	Comunicação estruturada	Comunicação eficiente;
		Projeto de interfaces baseado em tarefas;
2 - SISTEMAS DE INFORMAÇÃO	Auto aprendizado no processamento de informação	Análise automatizada de dados;
		Entrega de informação contextualizada;
		Interfaces adaptadas às tarefas específicas;
		Construir uma infraestrutura de TIC resiliente e implementar armazenagem de dados baseada no contexto;
	Integração dos sistemas de informação	Integrar os sistemas de informação de forma vertical e horizontal;
		Padronizar as interfaces de dados;
	Implementar governança de dados;	
	Atualizar e aumentar a proteção de dados;	
3 - ESTRUTURA ORGANIZACIONAL	Organização interna orgânica	Grupos de trabalho flexíveis;
		Gerenciamento sobre os níveis de autonomia de decisões;
		Sistema de metas motivadoras;
		Gerenciamento ágil;
Colaboração dinâmica ao longo da cadeia de valor	Foco nos benefícios ao cliente;	
	Cooperação na rede de valor;	
4 - CULTURA ORGANIZACIONAL	Abertura para mudança	Reconhecer o valor dos erros
		Abertura para inovação;
		Aprendizado baseado em dados e tomada de decisão;
		Desenvolvimento profissional contínuo;
	Colaboração social	Responsividade à mudança;
		Estilo de liderança democrático;
		Comunicação aberta;
		Confiança nos processos e nos sistemas de informação.

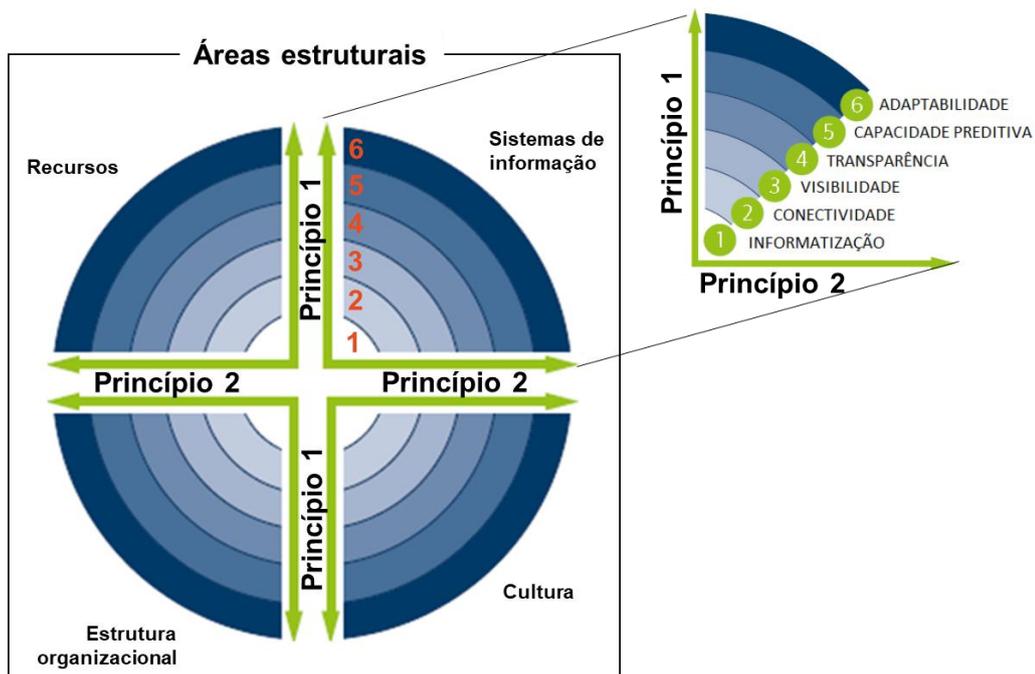
Fonte: adaptado de Schuh *et al.* (2017)

O grau de maturidade na Indústria 4.0 de uma empresa baseia-se na sua capacidade global de mudança e adaptação. Então, os seis estágios são refletidos nas quatro perspectivas apresentadas no quadro 2.6. Para que as transformações esperadas na empresa sejam realizadas de forma holística, um determinado nível de maturidade só é atingido quando todas as quatro perspectivas atingirem este nível. Só assim, pode-se considerar que a assimilação e implementação de medidas são extensivas a toda organização. Por exemplo, ainda que os

sistemas de informação estejam maduros na capacidade preditiva, a estrutura organizacional precisa ser habilitada para a execução das decisões derivadas das previsões, em ações que garantam o sucesso na implementação da solução.

A figura 2.16 representa o modelo de avaliação proposto, onde cada área estrutural, recursos, sistemas de informação, estrutura organizacional, cultura organizacional, é avaliada com relação aos seis estágios possíveis de maturidade.

Figura 2.16: Modelo de avaliação de maturidade proposto por ACATECH



Fonte: Schuh *et al.* (2017)

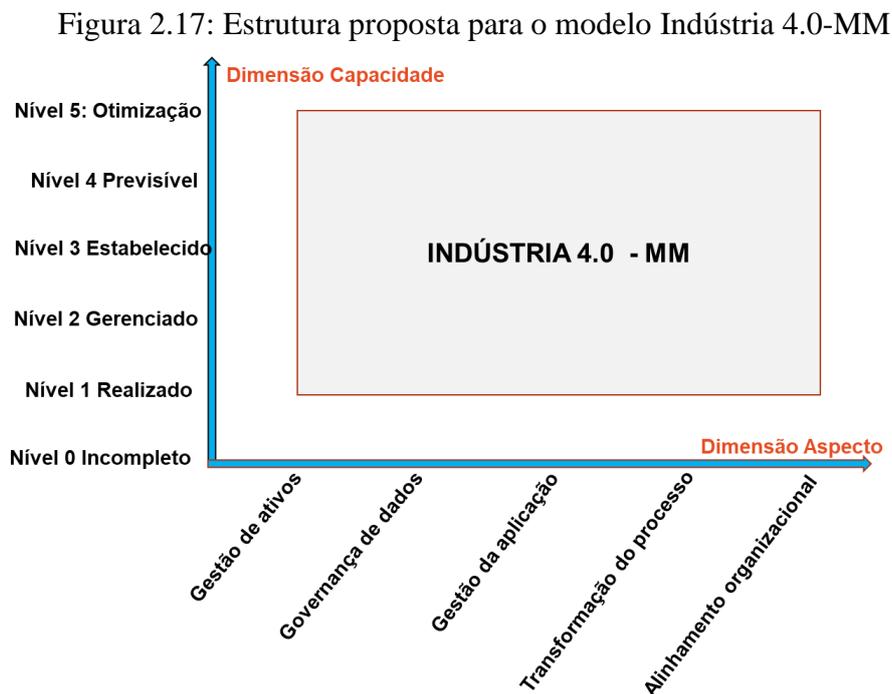
O modelo de maturidade é uma ferramenta prática de aplicação, mas também uma referência para a elaboração de modelos de avaliação de maturidade. Ele provê os fundamentos teóricos para que organizações, seja do setor industrial ou de serviços, desenvolvam ferramentas adequadas à suas realidades e mercados de atuação. A utilização do modelo compreende uma abordagem em três fases. A primeira é a identificação do estágio atual de maturidade nas diferentes áreas estruturais, através de questionário que relaciona as capacidades de transformação de cada área estrutural a um determinado nível de maturidade. A segunda fase é a definição por parte da organização do estágio de maturidade que ela pretende atingir ao final do processo de transformação, baseada na estratégia corporativa. Assim, ela é capaz de analisar o *gap* existente entre a sua situação atual e os objetivos perseguidos, assim como as capacidades necessárias para a obtenção da maturidade desejada. E a terceira fase envolve a definição de

ações para prover as capacidades necessárias, e a incorporação das mesmas em um mapa estratégico da Indústria 4.0.

2.3.1.7. MODELO DE AVALIAÇÃO PARA A INDÚSTRIA 4.0: INDÚSTRIA 4.0 - MM

O objetivo de Gokalp *et al.* (2017), é o de determinar quais recursos uma organização precisa adquirir para implementar com sucesso a Indústria 4.0, de maneira padronizada, bem como servir de roteiro para a transição do modelo atual para um novo modelo de negócio. Visa fornecer uma diretriz completa e abrangente para observação de suas áreas, suas fraquezas, e assim poder transformar o negócio de forma mais consistente.

Para desenvolver a estrutura do modelo, os autores utilizaram o *Automotive SPICE Process Assessment / Reference Model* desenvolvido pela VDA QMC Working Group 13 / *Automotive*, um centro de Gestão da Qualidade da Associação Automotiva da Indústria Alemã, para avaliação de softwares embarcados em veículos. Baseado no SPICE definiram o modelo apresentado na figura 2.17.



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

Para Gokalp *et al.* (2017), é difícil identificar os limites da transformação do processo para utilização da Indústria 4.0, pois outras dimensões são fundamentais para a isso, como a infraestrutura, sistemas de informação, organização dos dados e sua integração. E desta forma, um novo arranjo de processos e práticas deve ser realizado para integrá-los de forma

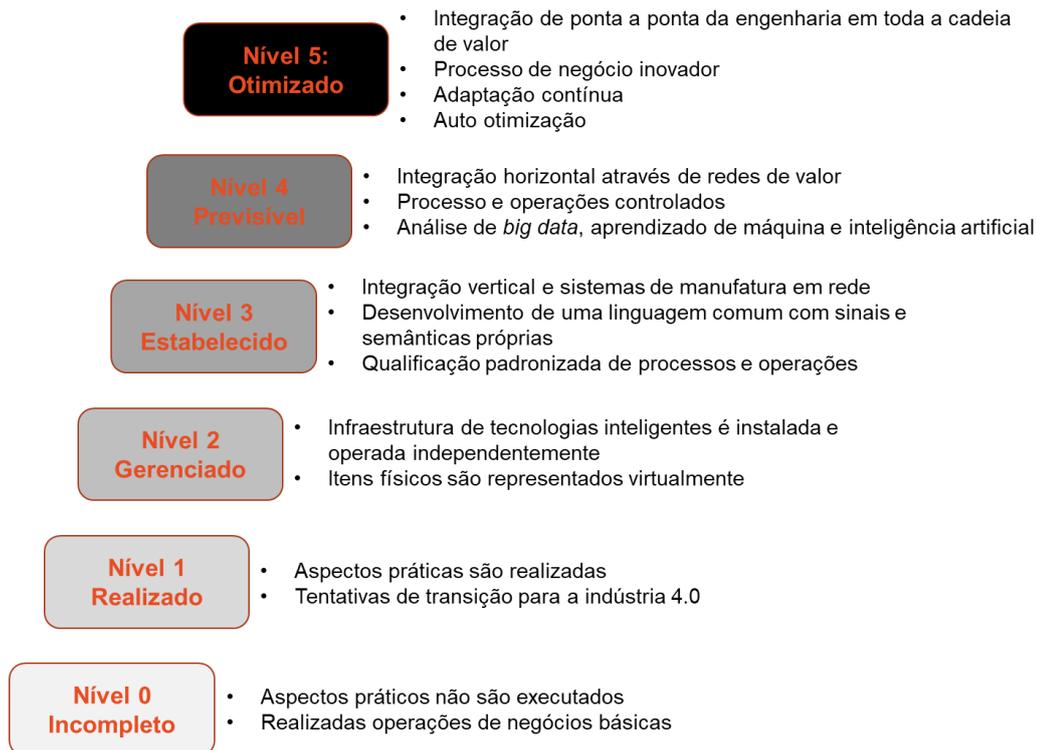
significativa, definido pelos autores como Aspectos, os quais foram classificados em categorias, Gerenciamento de Ativos, Governança de Dados, Gerenciamento de Aplicativos, Transformação de Processos e Alinhamento Organizacional.

- **Gerenciamento de ativos:** abrange a infraestrutura local e os sistemas de tecnologia da informação, como equipamentos de rede, hardware, software e outras aplicações, e a necessidade de novas tecnologias para a implementação da indústria 4.0, como soluções em nuvem, questões de segurança, internet das coisas, arquitetura orientada a serviços. Essa dimensão mede o nível de suporte que a organização pode fornecer para a implementação da Indústria 4.0;
- **Governança de dados:** analisa a capacidade da empresa quanto a coleta, análise e uso de dados, a utilização de ferramentas de *big data* e serviços orientados a dados. A coleta e avaliação dos dados de diversas fontes, incluindo a infraestrutura de fabricação, sistemas de informação, para que possam auxiliar a organização na tomada de decisões em tempo real em relação as operações atuais e futuras;
- **Gerenciamento da aplicação:** com a implementação da Indústria 4.0 espera-se que ocorram novas aplicações com a combinação de tecnologias de manufatura e automação, com o objetivo de garantir um projeto e construção de ideias de sistemas de informações que melhor funcionem para a empresa e para os usuários, para melhor suportar as regras de negócios. As novas aplicações e fluxo de informações devem ser estruturadas, conectadas, padronizadas, controladas e interoperáveis.
- **Transformação de Processos:** este aspecto abrange a transformação dos processos básicos de cada sistema corporativo, que são Planejamento, Aquisição, Produção e Venda e Distribuição. De acordo com a estrutura de negócios da empresa, uma vez iniciada a transformação para a Indústria 4.0, cada processo do sistema corporativo deve ser mapeado para o mundo digital. Além disso, diferentes processos de valor agregado devem ser integrados em toda a arquitetura corporativa de maneira padronizada.
- **Alinhamento Organizacional:** refere-se a gestão da empresa em termos de estrutura organizacional e estratégia do negócio. Do ponto de vista gerencial, o conhecimento sobre as vantagens do conceito de manufatura inteligente afeta significativamente a decisão de investimento e implementação de tecnologias da informação. Como o conjunto de habilidades do pessoal da área de tecnologia da informação e outras necessidades essenciais de recursos humanos para transformação estão relacionadas à gestão organizacional da

empresa, essa dimensão é considerada um fator significativo para avaliar a capacidade de implementação da indústria 4.0.

A avaliação de cada item é adotada a partir do SPICE, possui seis níveis, de “Nível 0: Incompleto” a “Nível 5: Otimizando”, conforme apresentado na figura 2.18.

Figura 2.18: Dimensões do modelo de maturidade Industria 4.0-MM



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

- **Nível 0 - Incompleto:** as práticas de aspectos básicos são parcialmente atingidas ou ainda não há implementação. A organização concentra-se apenas nas operações fundamentais, como análise de requisitos, aquisição, produção e vendas;
- **Nível 1 - Realizado:** as práticas de aspectos correspondentes são alcançadas. A transformação foi iniciada. A infraestrutura tecnológica da transição para a Indústria 4.0 é adquirida e a organização tende a empregar tecnologias inteligentes, como a internet das coisas. A visão do Indústria 4.0 existe, e existe um roteiro para a estratégia de transição, ainda que não esteja totalmente implementado;
- **Nível 2 - Gerenciado:** o conjunto de dados relacionados a cada operação é definida e inicia-se a coleta, mas não está integrado às diferentes funcionalidades das operações. Itens físicos estão começando a ser representados no mundo virtual;

- **Nível 3 - Estabelecido:** as principais atividades do negócio, as operações de valor agregado, são bem definidas e os processos e operações são consistentes com a padronização correspondente. O conjunto de dados é claramente identificado, para cada operação da organização é coletado e sistematicamente armazenado em um banco de dados bem gerenciado. A integração vertical, incluindo integração de sensores e atuadores dos equipamentos até os sistemas de planejamento de recursos - ERP, foi alcançada;
- **Nível 4 - Previsível:** a integração horizontal é alcançada pela integração da cadeia de suprimentos, com a possibilidade de inclusão de novos itens no futuro, quando informações em tempo real, específicas do produto ou do processo, serão trocadas para aumentar o nível de detalhe e qualidade. Ferramentas de análise de dados são empregadas para melhorar a produtividade da manufatura. Os dados são usados para controlar o processo e as operações em tempo real para aumentar a eficiência das operações;
- **Nível 5 - Otimização:** A integração com a engenharia e a vida útil do produto / produção permite o compartilhamento de conhecimento e a sincronização entre o desenvolvimento de produtos e serviços e os ambientes de fabricação. A organização começa a aprender com os dados e procura melhorar seus negócios continuamente, e evolui para uma organização inovadora.

Na sequência é apresentado o quadro 2.7, um comparativo entre os modelos de avaliação de níveis de maturidade para a Indústria 4.0.

Quadro 2.7: Comparativo entre os modelos de níveis de maturidade.

Mod.	Nome do modelo / pesquisa	Níveis de maturidade	Dimensões
MM 1	Modelo para Avaliação da Maturidade da Indústria 4.0 de Empresas de Manufatura Schumacher et al. (2016)	1 - Falta de atributos 5 - Estado da arte	Estratégia, liderança, clientes, produtos, operações, cultura, pessoas, governança, tecnologia
MM 2	M2DDM – Modelo de Maturidade para Manufatura Baseada em Dados Weber et al. (2017)	Integração de Tecnologia da Informação inexistente, Integração de dados e sistemas, Integração de dados com outras áreas, Orientação para Serviço, Gêmeo digital, Fábrica Auto Otimizadora	Armazenamento e processamento de dados, Arquitetura orientada a serviços, Integração da informação, Gêmeos digitais, Análises avançadas, Recursos em tempo real
MM 3	Disponibilidade para Indústria 4.0 – Modelo IMPULS Lichtblau et al. (2015)	Leigo, Iniciante, Intermediário, Experiente, Especialista, Melhor Desempenho	Estratégia e organização, Fábricas inteligentes, Operações inteligentes, Produtos inteligentes, Serviços derivados de dados, Força de trabalho

Mod.	Nome do modelo / pesquisa	Níveis de maturidade	Dimensões
MM 4	Indústria 4.0: Construindo uma Empresa Digital Geissbauer et al. (2016)	Aprendiz Digital, Integração Vertical, Colaboração horizontal, Campeão Digital.	Modelo de negócios digitais e acesso ao cliente, Digitalização de produtos e serviços, Digitalização e integração das cadeias de valor vertical e horizontal, Coleta e análise de dados como capacidade principal, Moderna Arquitetura de tecnologia da informação, Conformidade, segurança das áreas legal e fiscal, Cultura digital para empresa e colaboradores
MM 5	Modelo de Maturidade Empresarial Conectada Rockwell (2014)	Avaliação, Rede e controles seguros e atualizados, Definição e organização de dados, Análises, Colaboração	Infraestrutura de informação, controle e dispositivos de controle de dados, infraestrutura de rede, políticas de segurança da informação, pessoas e processos de controle da informação
MM 6	Indústria 4.0: Índice de Maturidade – ACATECH Schuh et al. (2017)	Informatização, Conectividade, Visibilidade, Transparência, Capacidade Preditiva, Adaptabilidade	Capacidade Digital, Comunicação Estruturada, Processamento de informações de autoaprendizagem, Integração dos Sistemas de Informação, Organização Interna Orgânica, Colaboração Dinâmica Dentro da Rede de Valor, Disposição para Mudar, Colaboração Social
MM 7	Modelo de Avaliação da Indústria 4.0: Indústria 4.0 MM Gokalp et al. (2017)	Incompleto, Realizado, Gerenciado, Estabelecido, Previsível, Otimização	Gestão de Bens, Governança de Dados, Gestão da Aplicação, Transformação do Processo, Alinhamento Organizacional

Fonte: Elaborado pelo autor

3. ANÁLISE COMPARATIVA DOS MODELOS DE AVALIAÇÃO DE MATURIDADE

Os modelos de maturidade analisados são todos baseados nos principais conceitos e tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0, entre elas os sistemas cyber-físicos, a internet das coisas, a computação em nuvem, o *Big Data* e suas análises, os sistemas autônomos, a comunicação entre máquinas, a integração vertical e horizontal, dentre outras. Todos os modelos analisados consideram que essas tecnologias, aplicadas ao ambiente industrial, são capazes de provocar mudanças significativas para a competitividade das empresas, e abrir novas oportunidades de negócios, gerando mudanças em toda a cadeia de valor.

Pode-se perceber em todos os modelos, através dos itens de avaliação propostos, o entendimento de que os principais atributos da quarta revolução industrial será a integração, primeiramente a vertical, que possibilita a integração de processos e dados da empresa, para então partir para a integração horizontal, que integra a cadeia de valor, empresa, fornecedores e clientes, possibilitada e apoiada pelas tecnologias da informação, comunicação e de operação.

De forma geral, os modelos analisados cobrem as principais áreas estruturais das empresas, contemplando as instalações, processos de produção, operação e gestão, colaboradores, e se estende para a definição de estratégias de implementação da Indústria 4.0 nas mesmas. Todos os modelos buscam avaliar os principais conceitos e as tecnologias da Indústria 4.0.

Diversos pontos divergem entre os modelos, como o conteúdo avaliado, as diferenças na quantidade e descrição dos níveis de maturidade, nos itens avaliados em cada dimensão, as profundidades e objetividade, e os critérios de mensuração dos níveis de maturidade.

Para agrupar os modelos identificados na literatura em uma estrutura de análise de pesquisa, foram selecionados os sete modelos de maturidade estudados, Schumacher *et al.* (2016), Weber *et al.* (2017), Lichtblau *et al.* (2015), Geissbauer *et al.* (2016), Rockwell (2014), Schuh *et al.* (2017), Gokalp *et al.* (2017), assim como os elementos inerentes a cada modelo.

Para simplificar a identificação dos modelos de maturidade, eles serão identificados como MM – Modelo de Maturidade, conforme apresentado no quadro 3.1.

Quadro 3.1: Identificação dos Modelos de Maturidade

MM	Modelo / Autor / Seção
MM 1	Modelo para Avaliação da Maturidade da Indústria 4.0 de Empresas de Manufatura – Schumacher <i>et al.</i> (2016) - Seção 2.3.1.1;
MM 2	M2DDM – Modelo de Maturidade para Manufatura Baseada em Dados - Weber <i>et al.</i> (2017) – Seção 2.3.1.2;
MM 3	Disponibilidade para Indústria 4.0 – Modelo IMPULS - Lichtblau <i>et al.</i> (2015) – Seção 2.3.1.3;

MM	Modelo / Autor / Seção
MM 4	Indústria 4.0: Construindo uma Empresa Digital - Geissbauer <i>et al.</i> (2016) – Seção 2.3.1.4;
MM 5	Modelo de Maturidade Empresarial Conectada - Rockwell (2014) – Seção 2.3.1.5;
MM 6	Indústria 4.0: Índice de Maturidade - ACATECH - Schuh <i>et al.</i> (2017) – Seção 2.3.1.6;
MM 7	Modelo de Avaliação da Indústria 4.0: Indústria 4.0 MM - Gokalp <i>et al.</i> (2017) – Seção 2.3.1.7.

Fonte: elaborado pelo autor

Para melhor compreensão das semelhanças e diferenças dos modelos analisados, foram realizadas análises comparativas, detalhando as dimensões utilizadas pelos autores, assim como os níveis de maturidade, para melhor compreensão de suas semelhanças e diferenças.

3.1. Dimensões

Nas dimensões, os modelos analisados apresentam uma certa correlação entre eles, não exata, devido as diferenças de abordagens e denominações utilizadas pelos autores. São discutidos aspectos que abrangem desde o planejamento e alinhamento empresarial, passando pela governança de dados e a utilização destes para a melhor integração interna e externa, bem como aspectos de qualificação de colaboradores. No quadro 3.2 é apresentado uma análise comparativa entre as dimensões dos modelos analisados

Quadro 3.2: Comparativo das dimensões dos modelos de maturidade

MM 1	MM 4	MM 2	MM 3	MM 5	MM 7	MM 6
Estratégia	Modelo de negócios digitais e acesso ao cliente	Armazenamento e processamento de dados	Estratégia e organização	Avaliação	Gestão de Ativos	Recursos
Liderança	Digitalização de produtos e serviços	Arquitetura orientada a serviços	Fábricas inteligentes	Rede e controles seguros e atualizados	Governança de Dados	Sistemas de Informação
Clientes	Digitalização e integração das cadeias de valor vertical e horizontal	Integração da informação	Operações inteligentes	Definição e organização de dados	Gerenciamento de Aplicativos	Estrutura Organizacional
Produtos	Coleta e análise de dados como capacidade principal	Gêmeos digitais:	Produtos inteligentes	Análises	Alinhamento Organizacional	Cultura
Operações	Moderna Arquitetura de tecnologia da informação	Análises avançadas	Serviços derivados de dados coletados	Colaboração	Transformação de processos	-
Cultura	Conformidade, segurança das áreas legal e fiscal	Recursos em tempo real	Força de trabalho	-	-	-

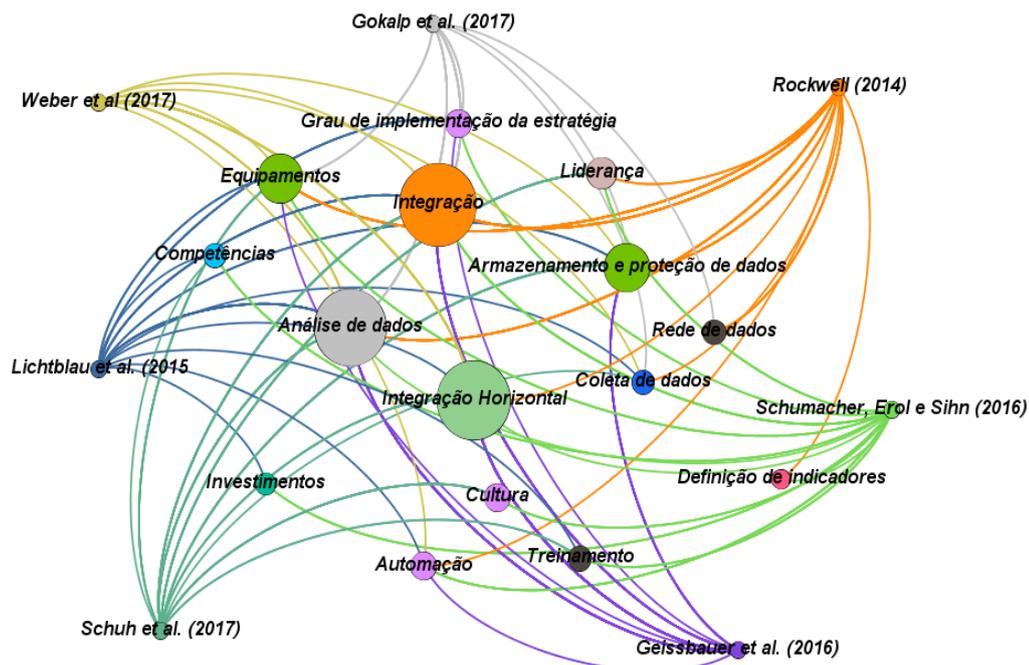
MM 1	MM 4	MM 2	MM 3	MM 5	MM 7	MM 6
Pessoas	Cultura digital para empresa e colaboradores	-	-	-	-	-
Governança	-	-	-	-	-	-
Tecnologia	-	-	-	-	-	-

Fonte: elaborado pelo autor.

Nesta comparação, apresentada no quadro 3.2, percebeu-se a existência de uma interação entre as dimensões apresentadas pelos autores, de forma que, esta interação, foi categorizada em sete dimensões principais, a **Estratégia** para implementação da Indústria 4.0 nas empresas, a **Governança de Dados**, que compreende o processo de coleta, análise e tomada de decisões baseadas em dados, a **Integração Vertical**, que se refere a integração entre as diversas áreas da empresa, a **Integração Horizontal**, a integração com clientes e parceiros, as **Equipes de Trabalho**, que a abrange a liderança, colaboradores e a cultura da empresa, a **Digitalização**, modelagem e simulação de processos e **Rede / infraestrutura**, que se refere a rede de comunicação, equipamentos e infraestrutura de tecnologia da informação.

Para elucidar as relações entre os modelos foi elaborada uma rede social, figura 3.1, com o auxílio do *software* Gephi v.0.9.2. Uma rede é um tipo de grafo que associa nomes aos círculos (nós), às arestas (linhas), ou a ambos, de modo a reduzir o nível de abstração e facilitar o entendimento do grafo (MUELLER; MASSARON, 2018).

Figura 3.1: Relação entre os autores e os itens de avaliação



Fonte: elaborado pelo autor

Na Figura 3.1 é apresentada a integração entre os autores e os itens de avaliação. Esta rede possui 22 nós e 246 arestas, onde os nós representam os autores e os itens de avaliação e as arestas representam as integrações entre os modelos. O volume e a intensidade de coloração em cada nó são proporcionais aos relacionamentos.

Na sequência são apresentadas as interações entre estas sete categorias, seus autores e as dimensões, de cada modelo, que se relacionam.

3.1.1. Dimensão Estratégia

No quadro 3.3 são apresentadas as interações existentes nesta dimensão, a qual analisa a existência de uma estratégia definida pela empresa para a implementação da Indústria 4.0.

Quadro 3.3: Interações da dimensão Estratégia

Modelo	Autores	Dimensões
MM 1	Schumacher <i>et al.</i> (2016)	Estratégia
MM 1	Schumacher <i>et al.</i> (2016)	Governança
MM 1	Schumacher <i>et al.</i> (2016)	Liderança
MM 3	Lichtblau <i>et al.</i> (2015)	Estratégia e organização
MM 4	Geissbauer <i>et al.</i> (2016)	Conformidade, segurança das áreas legal e fiscal
MM 5	Rockwell (2014)	Avaliação
MM 7	Gokalp <i>et al.</i> (2017)	Alinhamento Organizacional

Fonte: Elaborado pelo autor

No MM 1, a dimensão Estratégia analisa a existência de um roteiro para implementação da Indústria 4.0, os recursos para implementação e a necessidade de adaptação do modelo de negócios a indústria 4.0. Na dimensão Governança analisa a adequação aos novos padrões tecnológicos e a proteção à propriedade intelectual e na dimensão Liderança a existência de uma coordenação central para implantação da Indústria 4.0.

Para o MM 3, a dimensão Estratégia e Organização, procura analisar a existência de uma estratégia para a operacionalização da Indústria 4.0 e a existência de investimentos em tecnologias e a gestão da inovação de processos.

O modelo MM 4, na dimensão Conformidade, Segurança Legal e Fiscal, procura analisar os desafios digitais que são reconhecidos, mas que ainda não abordados de forma mais abrangente pela companhia;

Já para o MM 5, na dimensão Avaliação, busca identificar qual o estado atual e onde se deseja chegar com a Indústria 4.0;

O MM 7, na dimensão Alinhamento Organizacional procura identificar qual a estrutura organizacional e qual a estratégia de negócio para a Indústria 4.0 da empresa.

3.1.2. Dimensão Governança de Dados

No quadro 3.4. são apresentadas as interações existentes na dimensão Governança de Dados, que analisa a coleta, armazenamento, análise, colaboração e o desenvolvimento de inteligência empresarial baseado em dados.

Quadro 3.4: Interações da dimensão Governança de Dados.

Modelo	Autores	Dimensões
MM 1	Schumacher <i>et al.</i> (2016)	Clientes
MM 2	Weber <i>et al.</i> (2017)	Análise avançada
MM 2	Weber <i>et al.</i> (2017)	Armazenamento de dados
MM 3	Lichtblau <i>et al.</i> (2015)	Fábrica inteligente
MM 3	Lichtblau <i>et al.</i> (2015)	Operações inteligentes
MM 3	Lichtblau <i>et al.</i> (2015)	Produtos inteligentes
MM 3	Lichtblau <i>et al.</i> (2015)	Serviços baseados em dados
MM 4	Geissbauer <i>et al.</i> (2016)	Coleta e análise de dados como capacidade principal
MM 4	Geissbauer <i>et al.</i> (2016)	Digitalização de produtos e serviços
MM 4	Geissbauer <i>et al.</i> (2016)	Digitalização e integração das cadeias de valor vertical e horizontal
MM 4	Geissbauer <i>et al.</i> (2016)	Modelo de negócios digitais e acesso ao cliente
MM 4	Geissbauer <i>et al.</i> (2016)	Moderna Arquitetura de tecnologia da informação
MM 5	Rockwell (2014)	Análises
MM 5	Rockwell (2014)	Avaliação
MM 5	Rockwell (2014)	Colaboração
MM 5	Rockwell (2014)	Definição e organização de dados
MM 6	Schuh <i>et al.</i> (2017)	Cultura
MM 6	Schuh <i>et al.</i> (2017)	Estrutura Organizacional
MM 6	Schuh <i>et al.</i> (2017)	Recursos
MM 6	Schuh <i>et al.</i> (2017)	Sistemas de Informação
MM 7	Gokalp <i>et al.</i> (2017)	Governança de Dados

Fonte: Elaborado pelo autor

O modelo MM 1, na dimensão Clientes, analisa a utilização de dados dos clientes como diferencial competitivo pela empresa.

Na dimensão Armazenamento de Dados o MM 2 analisa a existência de sensores que coletam dados, de ferramentas de armazenamento e processamento de dados e na dimensão Análise Avançada avalia a existência de ferramentas de análise dos dados gerados na cadeia de valor e se estes são utilizados para gerar inteligência empresarial.

O MM 3, na dimensão Fábrica Inteligente, analisa a utilização de dados na tomada de decisões, em Operações Inteligentes a segurança e o compartilhamento das informações no âmbito empresarial, em Produtos Inteligentes a utilização de dados gerados pelos produtos na fase de utilização pelos clientes, e em Serviços Baseados em Dados se a empresa disponibiliza serviços baseados em dados coletados, se estes serviços estão gerando novas receitas e qual a proporção de dados que são analisados na fase de uso dos produtos;

O MM 4 na dimensão Modelo de Negócios Digitais e Acesso ao Clientes analisa se a empresa utiliza a análise de dados como um diferenciador chave, em Digitalização de Produtos e Serviços se a análise de dados está implementada e personalizada, e se a empresa gerencia os dados gerados pelos clientes, em Digitalização e integração das Cadeias de Valor Vertical e Horizontal se a empresa possui acesso em tempo real ao conjunto de informações gerados nos processos operacionais, em Coleta e Análise de Dados como Capacidade Principal a existência de sistemas centrais de inteligência empresarial, suportado por ferramentas de análise de dados, que consolida as informações e realiza análises preditivas, em tempo real, a existência de um algoritmo de aprendizagem permitindo análise de impacto e suporte a decisões e em Moderna Arquitetura de Tecnologia da Informação a existência de uma base de dados única, com funcionalidades de integração dos dados gerados pela cadeia de valor.

O MM 5 na dimensão Avaliação analisa a existência de políticas de segurança para os dados. Na dimensão Definição e Organização de Dados se a empresa definiu quais dados possui e a forma de utilização deles, se estes dados estão padronizados entre os sistemas da empresa e se existe gestão de documentos. Na dimensão Análises procura identificar a existência de análises de dados em tempo real, a utilização destes na organização da produção, quais pessoas estão autorizadas a acessar quais dados, se existem protocolos e respostas automáticas em caso de problemas e análises para a melhoria contínua. Na dimensão Colaboração analisa se as informações estão sendo utilizadas como capacidade preditiva e ação imediata e como capacidade de respostas a eventos externos;

O MM 6 na dimensão Recursos analisa a existência de ferramentas de aquisição automatizada de dados e se estes são processados de forma descentralizada através de sistemas embarcados, em Sistemas de Informação a capacidade de análise automatizada de dados, a distribuição de informações de forma contextualizada, a padronização das interfaces de dados, a existência de uma governança de dados e o monitoramento atualizado da proteção de dados. Em Estrutura Organizacional analisa a utilização dos dados como fonte de benefícios aos clientes e em Cultura se a empresa desenvolveu o aprendizado baseado em dados e se os utiliza nas tomadas de decisões.

Através da dimensão Governança de Dados, o MM 7 busca analisar a existência de ferramentas de coleta de dados de forma geral na empresa, se estes dados são analisados e utilizados, se são protegidos e se existem serviços baseados nos dados analisados.

3.1.3. Dimensão Integração Vertical

No quadro 3.5. são apresentadas as interações existentes na dimensão Integração Vertical, que analisa a digitalização dos processos e a integração entre os diversos setores, bem como a integração entre os sistemas de gestão da empresa.

Quadro 3.5: Interações da dimensão Integração Vertical.

Modelo	Autores	Dimensões
MM 1	Schumacher <i>et al.</i> (2016)	Cultura
MM 1	Schumacher <i>et al.</i> (2016)	Operações
MM 1	Schumacher <i>et al.</i> (2016)	Produtos
MM 3	Lichtblau <i>et al.</i> (2015)	Operações inteligentes
MM 4	Geissbauer <i>et al.</i> (2016)	Conformidade, segurança das áreas legal e fiscal
MM 4	Geissbauer <i>et al.</i> (2016)	Cultura digital para empresa e colaboradores
MM 4	Geissbauer <i>et al.</i> (2016)	Digitalização e integração das cadeias de valor vertical e horizontal
MM 4	Geissbauer <i>et al.</i> (2016)	Modelo de negócios digitais e acesso ao cliente
MM 5	Rockwell (2014)	Colaboração
MM 5	Rockwell (2014)	Definição e organização de dados
MM 5	Rockwell (2014)	Rede e controles seguros e atualizados
MM 6	Schuh <i>et al.</i> (2017)	Estrutura Organizacional
MM 6	Schuh <i>et al.</i> (2017)	Recursos
MM 6	Schuh <i>et al.</i> (2017)	Sistemas de Informação
MM 7	Gokalp <i>et al.</i> (2017)	Gerenciamento de Aplicativos

Fonte: elaborado pelo autor.

O MM 1 na dimensão Produtos verifica a existência da integração entre os sistemas de tecnologia da informação da empresa, em Operações a existência de colaboração entre os departamentos e em Cultura o valor da tecnologia da informação e comunicação para as empresas.

Na dimensão Operações Inteligentes o MM 3 analisa a existência de processos autônomos em funcionamento na empresa.

O MM 4 na dimensão Modelo de Negócios Digitais e Acesso ao Cliente analisa a existência de rede de comunicação máquina-máquina (M2M), em Digitalização e Integração das Cadeias de Valor Vertical e Horizontal a existência da digitalização vertical, com processos padronizados e fluxo de dados entre os setores, em Conformidade, Segurança das Áreas Legal e Fiscal busca analisar a cadeia de valor para conformidade da segurança, legal e tributária e em Cultura Digital para Empresa e Colaboradores se a colaboração multifuncional é realizada de forma consistente.

Na dimensão Redes e Controles Seguros e Atualizados o MM 5 analisa a existência da integração vertical na empresa, se os processos estão mapeados e qual o fluxo de negócios, em

Definição e Organização de Dados se a empresa definiu novos fluxos de trabalhos, agendas e responsabilidades para eles, em Colaboração se a empresa possui a capacidade de antecipar atividades através das cadeias de oferta e de demanda, e através desta antecipação possui ferramentas de planejamento, gerenciamento de ativos, nivelamento de ordens de produção e gestão da qualidade.

O MM 6 através da dimensão Recursos analisa a existência de interfaces de comunicação baseadas em tarefas, em Sistemas de Informação a integração dos sistemas de informação entre os setores e em Estrutura Organizacional a existência de procedimentos de gerenciamento ágil de atividades.

Na dimensão Gerenciamento de Aplicativos o MM 7 analisa a existência de integração entre os sistemas de informação, e se estes estão padronizados, controlados e interoperáveis.

3.1.4. Dimensão Integração Horizontal

No quadro 3.6. são apresentadas as interações existentes na dimensão Integração Horizontal, que analisa a integração entre os diversos atores da cadeia de valor, de dados e de sistemas.

Quadro 3.6: Interações da dimensão Integração Horizontal.

Modelo	Autores	Dimensões
MM 1	Schumacher <i>et al.</i> (2016)	Clientes
MM 2	Weber <i>et al.</i> (2017)	Arquitetura Orientada a Serviços
MM 2	Weber <i>et al.</i> (2017)	Integração de Informação
MM 2	Weber <i>et al.</i> (2017)	Recursos em tempo real
MM 3	Lichtblau <i>et al.</i> (2015)	Produtos inteligentes
MM 4	Geissbauer <i>et al.</i> (2016)	Conformidade, segurança das áreas legal e fiscal
MM 4	Geissbauer <i>et al.</i> (2016)	Cultura digital para empresa e colaboradores
MM 4	Geissbauer <i>et al.</i> (2016)	Digitalização de produtos e serviços
MM 4	Geissbauer <i>et al.</i> (2016)	Digitalização e integração das cadeias de valor vertical e horizontal
MM 4	Geissbauer <i>et al.</i> (2016)	Modelo de negócios digitais e acesso ao cliente
MM 4	Geissbauer <i>et al.</i> (2016)	Moderna Arquitetura de tecnologia da informação
MM 5	Rockwell (2014)	Colaboração
MM 6	Schuh <i>et al.</i> (2017)	Estrutura Organizacional
MM 6	Schuh <i>et al.</i> (2017)	Sistemas de Informação

Fonte: elaborado pelo autor.

O MM 1 na dimensão Clientes analisa as competências de utilização de mídias digitais voltadas ao atendimento aos clientes.

Na dimensão Arquitetura Orientada a Serviços o MM 2 analisa a integração de dados, com suporte aos diversos formatos entre os stakeholders da cadeia de valor, em Integração da Informação a integração dos dados da cadeia de valor para criar inteligência empresarial e em

Recursos em Tempo Real a coordenação das atividades, em tempo real, entre os integrantes das cadeias de valor.

O MM 3 na dimensão Produtos Inteligentes analisa a existência de softwares embarcados nos produtos para controle de dados de uso destes.

O MM 4 na dimensão Modelo de Negócios Digitais e Acesso ao Cliente analisa a existência de um portfólio de produtos e serviços digitais, soluções integradas para atender os clientes, a colaboração com parceiros externos e o desenvolvimento de novos produtos e serviços inovadores e com lotes menores. Em Digitalização de Produtos e Serviços analisa a distribuição multicanal com o uso integrado de canais online e offline, a abordagem individualizada do cliente, a interação com parceiros da cadeia de valor, as interfaces de compartilhamento e integração e o gerenciamento da jornada do cliente em todos os canais de marketing e vendas digitais. Em Digitalização e Integração das Cadeias de Valor Vertical e Horizontal analisa a integração com parceiros, a integração de processos e fluxos de dados com clientes e parceiros, a existência de um ecossistema de parceiros totalmente digitalizada e integrada, em Moderna Arquitetura de Tecnologia da Informação analisa a arquitetura de tecnologia da informação comuns entre os parceiros da rede, a interconexão única de dados com parceiros e a troca segura de dados com a rede de parceiros. Já em Conformidade, Segurança das Áreas Legal e Fiscal analisa o risco legal da integração com parceiros e na dimensão Cultura digital para Empresa e Colaboradores a existência de uma cultura de incentivo ao compartilhamento com parceiros e a colaboração como um fator chave.

Na dimensão Colaboração o MM 5 considera o estágio de coordenação de atividades com clientes e parceiros.

O MM 6 na dimensão Sistemas de Informação avalia a integração dos sistemas de informação com clientes e parceiros e em Estrutura Organizacional a forma de cooperação na rede de valor.

3.1.5. Dimensão Equipes de Trabalho

No quadro 3.7 são apresentadas as interações existentes na dimensão Pessoas, que analisa as habilidades das pessoas, a liderança e a cultura da empresa.

O MM 1 na dimensão Liderança considera a disposição da liderança, as competências e o método de gestão da liderança para a Indústria 4.0, em Operações a descentralização de processos e a interdisciplinaridade. Já em Cultura avalia a partilha de conhecimentos na empresa e a abertura da inovação aos colaboradores. Em Governança avalia os regulamentos trabalhistas na empresa digitalizada e em Pessoas as competências dos colaboradores em

relação as tecnologias da informação e comunicação, a abertura de novas tecnologias aos colaboradores e a autonomia de decisões deles.

Quadro 3.7: Interações da dimensão Equipes de Trabalho

Modelo	Autor	Dimensões
MM 1	Schumacher <i>et al.</i> (2016)	Cultura
MM 1	Schumacher <i>et al.</i> (2016)	Governança
MM 1	Schumacher <i>et al.</i> (2016)	Liderança
MM 1	Schumacher <i>et al.</i> (2016)	Operações
MM 1	Schumacher <i>et al.</i> (2016)	Pessoas
MM 3	Lichtblau <i>et al.</i> (2015)	Funcionários
MM 5	Rockwell (2014)	Análises
MM 5	Rockwell (2014)	Rede e controles seguros e atualizados
MM 6	Schuh <i>et al.</i> (2017)	Cultura
MM 6	Schuh <i>et al.</i> (2017)	Estrutura Organizacional
MM 6	Schuh <i>et al.</i> (2017)	Recursos

Fonte: elaborado pelo autor.

O MM 3 na dimensão Funcionários analisa a necessidade de aquisição de novas habilidades e as habilidades existentes na força de trabalho.

Na dimensão Rede e Controles Seguros e Atualizados o MM 5 estuda a responsabilidade da liderança na implementação de novos modelos de integração, e em Análise a responsabilidade da liderança pela implementação do novo modelo de cultura digital.

O MM 6 na dimensão Recursos examina as formas de prover competências digitais aos colaboradores, em Estrutura Organizacional a existência de grupos de trabalhos flexíveis, o gerenciamento dos níveis de autonomia de decisões e a existência de um sistema de metas motivadoras para os colaboradores. Em Cultura observa o reconhecimento do valor dos erros como aprendizado, a abertura para inovação, o desenvolvimento contínuo dos profissionais, a adaptação rápida as mudanças, o estilo de liderança, a forma de comunicação e a confiança nos processos e nos sistemas de informação existentes na empresa.

3.1.6. Dimensão Digitalização

No quadro 3.8 são apresentadas as interações existentes na dimensão Digitalização, que analisa a implementação de gêmeos digitais, modelagem e simulação.

No MM 1, na dimensão Clientes é avaliado a digitalização dos setores, como vendas e serviços, em Produtos o nível de digitalização dos produtos e a individualização deles e em Operações a modelagem e a simulação dos processos produtivos.

Quadro 3.8: Interações da dimensão Digitalização.

Modelo	Autor	Dimensões
MM 1	Schumacher <i>et al.</i> (2016)	Clientes
MM 1	Schumacher <i>et al.</i> (2016)	Operações
MM 1	Schumacher <i>et al.</i> (2016)	Produtos
MM 2	Weber et al (2017)	Gêmeo Digital
MM 3	Lichtblau <i>et al.</i> (2015)	Fábrica inteligente
MM 7	Gokalp <i>et al.</i> (2017)	Transformação de processos

Fonte: elaborado pelo autor.

O MM 2 na dimensão Gêmeo Digital examina a implementação de gêmeos digitais para controle autônomo de processos e de ativos fabris.

Na dimensão Fábrica Inteligente o MM 3 estuda a criação de modelos digitais de equipamentos e de processos produtivos.

No MM 7, através da dimensão Transformação de Processos examina a transformação dos processos para o mundo digital.

3.1.7. Dimensão Rede / Infraestrutura

No quadro 3.9 são apresentadas as interações existentes na dimensão Rede e Infraestrutura, que estuda a infraestrutura de equipamentos e a infraestrutura de ativos de comunicação entre os equipamentos e entre os setores.

Quadro 3.9: Interações da dimensão Rede / Infraestrutura.

Modelo	Autor	Dimensões
MM 1	Schumacher <i>et al.</i> (2016)	Tecnologia
MM 3	Lichtblau <i>et al.</i> (2015)	Fábrica inteligente
MM 3	Lichtblau <i>et al.</i> (2015)	Operações inteligentes
MM 4	Geissbauer <i>et al.</i> (2016)	Moderna Arquitetura de tecnologia da informação
MM 5	Rockwell (2014)	Avaliação
MM 5	Rockwell (2014)	Rede e controles seguros e atualizados
MM 6	Schuh <i>et al.</i> (2017)	Recursos
MM 6	Schuh <i>et al.</i> (2017)	Sistemas de Informação
MM 7	Gokalp <i>et al.</i> (2017)	Gestão de Ativos

Fonte: elaborado pelo autor.

O MM 1 através da dimensão Tecnologia estuda a comunicação máquina/máquina – M2M, a existência de modernas tecnologias de informação e comunicação e a utilização de dispositivos móveis no controle de processos.

Por sua vez, o MM 3, na dimensão Fábrica Inteligente, analisa a infraestrutura de equipamentos, se podem ser controlados de forma automática e a utilização de sistemas de informação para controle de dados e em Operações Inteligentes a utilização de nuvens para armazenamento de dados na empresa.

Na dimensão Moderna Arquitetura de Tecnologia da Informação o MM 4 observa o desenvolvimento e a conexão entre os diferentes cubos de dados e a arquitetura interna de tecnologia da informação.

Já o MM 5, na dimensão Avaliação, examina a infraestrutura de rede da empresa e a necessidade de atualização/substituição dela para a Indústria 4.0, os controles e dispositivos que alimentam e recebem dados e os processos de gerenciamento da infraestrutura de rede. Em Rede e Controles Seguros e Atualizados pesquisa a necessidade de expansão da rede ou a necessidade de novas tecnologias, a conectividade segura e adaptável da planta aos sistemas, a definição dos responsáveis pelo gerenciamento da rede, os novos projetos de rede com novas tecnologias e novos fornecedores, a forma de reconhecimento dos ativos dentro da rede e o controle de desempenho da produção e dos equipamentos em tempo real.

O MM 6, através da Dimensão Recursos, considera a qualidade da comunicação entre os ativos, em Sistemas de Informação a existência de interfaces adaptadas a tarefas específicas e a construção de uma infraestrutura de tecnologia resiliente e o compartilhamento de dados contextualizados.

Na dimensão Gestão de Ativos, o MM 7 considera a infraestrutura de rede, os sistemas de tecnologia da informação e a prontidão para uso de novas tecnologias.

No quadro 3.10 foram inseridas as quantidades de citações dos autores, por categoria e dimensão, e marcado em verde o item que o modelo mais explora.

Quadro 3.10: Quantidade de citações por dimensão

Dimensões	Estratégia	Governança de dados	Integração Vertical	Integração Horizontal	Equipes de trabalho	Digitalização	Rede/Infraestrutura
Modelos							
MM 1	3	1	3	1	5	3	1
MM 2	0	2	0	3	0	1	0
MM 3	1	4	1	1	1	1	2
MM 4	1	5	4	6	0	0	1
MM 5	1	5	3	1	2	0	2
MM 6	0	4	3	2	3	0	2
MM 7	7	7	1	0	0	1	1
Totais	13	28	15	14	11	6	9

Fonte: elaborado pelo autor.

Através deste quadro é possível verificar que o modelo MM1 explora mais a dimensão Equipes de Trabalho, mas também considera as dimensões Estratégia, Integração Vertical e

Digitalização como importantes. Já para o modelo MM2 a dimensão mais explorada é a Integração Horizontal, seguido pela Governança de Dados. O MM3 a dimensão mais explorada é a Governança de Dados. No modelo MM4 a dimensão mais importante é a Dimensão Integração Horizontal, mas também considera a Governança de Dados e a Integração Vertical como importantes. O MM5 tem como foco principal a Governança de Dados, seguido pela Integração Vertical. No modelo MM6 considera a Governança cita mais a Governança de Dados, bem como a Integração Vertical e Equipes de Trabalho. E finalmente, o modelo MM7 cita mais a dimensão Governança de Dados e a Estratégia Empresarial. Também, é possível perceber que o foco principal dos modelos está na dimensão Governança de Dados, o qual é citado em todos os modelos e percebe-se que esta dimensão é uma das mais importantes para a implementação dos conceitos da Indústria 4.0.

3.2. Níveis de Maturidade

Assim como no item dimensões, também se realizou um comparativo entre os níveis de maturidade estudados em cada modelo de maturidade. O quadro 3.11 apresenta uma comparação entre os níveis de maturidade dos modelos analisados.

Quadro 3.11: Comparativo entre os Níveis de Maturidade

Modelo	Níveis de Maturidade					
MM 1	1	2	3	4	5	
MM 2	0 - Integração inexistente	1 - Integração de dados e sistemas	2 - Integração de dados com outras áreas	3 - Orientação para Serviço	4 – Gêmeo digital	5 - Fábrica Auto Otimizadora
MM 3	Nível 0 - Leigo	Nível 1 - Iniciante	Nível 2 - Intermediário	Nível 3 - Experiente	Nível 4 - Especialista	Nível 5 - Melhor desempenho
MM 4	Nível 1 - aprendiz digital	Nível 2 - integração vertical	Nível 3 - colaboração horizontal	Nível 4 - campeão digital		
MM 5	Estágio 1	Estágio 2	Estágio 3	Estágio 4	Estágio 5	
MM 6	Informatização	Conectividade	Visibilidade	Transparência	Capacidade preditiva	Adaptabilidade
MM 7	Incompleto	Realizado	Gerenciado	Estabelecido	Previsível	Otimização

Fonte: elaborado pelo autor.

No MM 1 o nível de maturidade é avaliado em 5 níveis, sendo 1 o mais baixo, completa falta de atributos, e o nível 5 o estado da arte dos atributos requeridos. Para o cálculo no nível de maturidade são feitas médias ponderadas dos resultados obtidos em cada item, multiplicado pelo respectivo fator de ponderação.

Já no artigo referente ao MM 2 não consta a forma de cálculo do nível de maturidade. Mas, é possível perceber que o autor se preocupa em analisar a integração existente na empresa,

essencialmente a integração dos dados e em entre as áreas, para então analisar se a empresa se utiliza desta integração para orientar serviços na empresa. Igualmente, analisa a existência dos sistemas cyber-físicos, e por fim, se aplica os conceitos da Indústria 4.0 para auto otimizar sua estrutura produtiva.

O MM 3 avalia a maturidade pela evolução no conhecimento e implementação dos conceitos e ferramentas da Indústria 4.0. Conforme o avanço da implementação e utilização dos conceitos da Indústria 4.0 a empresa vai progredindo em novos conhecimentos até obter um melhor desempenho empresarial. Para calcular a maturidade o modelo pressupõe fatores de ponderação para as dimensões, e para determinar o nível de maturidade calcula uma média ponderada de cada dimensão, multiplicado pelo fator de ponderação. Para cada dimensão atribui-se uma pontuação, dentro de um total de 100 pontos possíveis, onde Estratégia e Organização correspondem a 25 pontos, Fábricas Inteligentes 14 pontos, Produtos Inteligentes 19 pontos, Serviços Baseados em Dados 14 pontos, Operações Inteligentes 10 pontos e Força de Trabalho 18 pontos. Ainda, foi desenvolvido uma avaliação online com questões relativas a cada dimensão.

No MM 4 é observado o nível de conhecimento e utilização dos conceitos da Indústria 4.0. No primeiro nível analisa-se a existência dos primeiros passos de digitalização dos processos empresariais. No segundo nível analisa a evolução do primeiro nível, ou seja, os processos estão digitalizados e já possível realizar a integração vertical. Finalizado o nível 1 e 2, o nível 3 examina a existência de colaboração com clientes e parceiros. Finalmente, no nível 4 avalia se a empresa colhe os benefícios da cultura digital. O artigo referente ao modelo MM 4 não demonstra a forma de cálculo do nível de maturidade.

Da mesma forma o MM 3 e o MM 5 considera a evolução da empresa nos quesitos da Indústria 4.0. O primeiro passo é avaliar qual a integração entre as tecnologias de operação e a tecnologia da informação. Após a análise de integração inicial, o próximo item a ser considerado é a segurança e a conectividade entre as operações da empresa, bem como quais dados já estão digitalizados e como utilizar estes para criar inteligência empresarial. E no último estágio desenvolver a colaboração entre os setores e aprimorar as decisões estratégicas.

No MM 6 afere-se o crescimento da organização nos conceitos e tecnologias da Indústria 4.0. Examina-se primeiramente a digitalização dos processos empresariais e o estágio de conectividade entre os setores digitalizados. No segundo momento, a existência da integração de sistemas e informações na empresa. Estando os dados integrados, observa se a empresa utiliza os dados para criar inteligência empresarial, ou seja, o comportamento dos dados, e se utiliza estes para realizar análises preditivas, possíveis cenários, comportamento de

equipamentos, de estoques, entre outros. E no último estágio, se a implementação dos conceitos e tecnologias tornou a empresa mais adaptável a novas situações e se os sistemas são auto gerenciáveis.

Finalmente, o MM 7 também acompanha a evolução da implementação. Avalia primeiramente a existência de práticas básicas, como a digitalização de processos e a coleta e análise de dados das diferentes operações do negócio. No segundo momento considera a integração entre os setores e entre os sistemas, bem como a integração horizontal com clientes e parceiros. Finalmente com todas as etapas implementadas, observa a utilização dos dados para criar inteligência e propor melhorias contínuas, e evoluir para uma organização inovadora.

4. DESENVOLVIMENTO DE MODELO DE AVALIAÇÃO DO NÍVEL DE MATURIDADE

Neste capítulo será apresentado o desenvolvimento do modelo de Avaliação do Nível de Maturidade da implementação de conceitos e tecnologias da Indústria 4.0, específico para a área industrial do Setor Sucroenergético. Podendo este ser utilizado para identificar o estágio atual, bem como ser utilizado para o desenvolvimento de ações que possam nortear uma melhor utilização da Indústria 4.0 neste setor.

4.1. Metodologia de desenvolvimento do modelo

A metodologia adotada para o desenvolvimento do modelo baseia-se no processo de desenvolvimento de modelos de maturidade de De Bruin *et al.* (2005), a qual trata-se de uma metodologia que pode ser aplicada a diversas áreas, não se restringindo ao domínio da Indústria 4.0. O modelo também foi utilizado por O'Donovan *et al.* (2016), para o desenvolvimento do IAMM – *Industrial Analytics Maturity Model*.

De Bruim *et al.* (2005), propõem em sua metodologia uma sequência de seis etapas interativas, pois os itens de determinada fase podem requerer que uma outra necessite ser alterada. A figura 4.1 apresenta as etapas do processo de desenvolvimento apresentados pelo autor.

Figura 4.1: Etapas de desenvolvimento de modelos de maturidade.



Fonte: De Bruim *et al.* (2005)

Na etapa **Escopo** configura-se as fronteiras para aplicação e uso do modelo. As principais definições nesta fase são o foco do modelo, compreendendo se atende a um domínio específico ou possui um domínio geral, e o público-alvo que pretende atingir, se por exemplo pesquisadores acadêmicos e profissionais de empresas, instituições governamentais, ou mesmo uma combinação deles.

A etapa **Projeto** trata da análise das necessidades do público-alvo, e como essas necessidades serão atendidas. Tais necessidades tratam o *porquê* buscam aplicar o modelo, *como* o modelo pode ser aplicado em diferentes estruturas, *quem* precisa estar envolvido na aplicação e o *que* pode ser alcançado através da aplicação do modelo. O modelo precisa encontrar o equilíbrio entre a complexidade e a simplicidade, pois simplificado demais pode

não refletir a realidade e não fornecer informações suficientes para análises, bem como um modelo complexo pode gerar aplicação incorreta e resultar análises incorretas. O autor sugere que de acordo com os modelos existentes, um princípio de projeto mais comumente utilizado é representar os níveis de maturidade em número cumulativo de estágios, sendo o menor número o de menor maturidade e o maior número o de maior maturidade, e sugere que sejam identificados através de rótulos simples e objetivos. O número de estágios pode variar de cada modelo, mas o mais importante é que o último estágio seja distintivo e bem definido, e que haja um progresso lógico através dos estágios. Os métodos de aplicação possíveis são a autoavaliação, quando a própria equipe de uma determinada empresa realiza a avaliação, e a avaliação de terceira parte, quando a avaliação é delegada a uma organização independente, podendo ser por exemplo uma empresa de consultoria ou de auditoria. A motivação da aplicação pode ser interna ou externa, a depender do requerente, se da própria organização, ou de terceiros, como ocorre nos casos de pesquisas científicas de universidades ou de órgãos governamentais e setoriais ou pode ser uma combinação dos dois. Outra definição é sobre o perfil dos respondentes, que podem ser da equipe gerencial ou do corpo técnico da instituição avaliada, do corpo técnico da avaliadora de terceira parte, ou uma combinação deles. O perfil dos respondentes pode variar a cada instituição, de acordo com nível de detalhamento (componentes e subcomponentes) do modelo, podendo contemplar respondentes desde a presidência e áreas estratégicas, diretores e executivos, até o corpo gerencial e técnico. Também pode ser definida a abrangência da aplicação do modelo, se por exemplo apenas uma instituição e apenas uma localidade, múltiplas instituições e apenas uma região, ou múltiplas instituições em mais de uma região.

A etapa **Compór** é dedicada a composição e validação do modelo, compreende as etapas de concepção e construção do conteúdo, identificando o que precisa ser medido e como será avaliado. Em domínios maduros e complexos, as definições dos componentes e subcomponentes é uma tarefa crítica, pois requer um conhecimento profundo da maturidade do assunto, para que os resultados da avaliação possam prover estratégias de melhorias específicas. Um ponto importante nestas definições é que os componentes e subcomponentes do modelo sejam mutuamente excludentes e coletivamente exaustivos, ou seja, que sejam minimizadas as sobreposições de conceitos e ambiguidades, e sejam abordados os aspectos mais relevantes daquele domínio. Isso pode ser obtido através de uma consistente revisão de literatura e análise de modelos existentes. Entrevistas podem ser feitas para confirmar os componentes e subcomponentes previamente definidos. A confirmação deles em fontes diversas aumenta a abrangência e adequação do modelo final. É necessário também definir como a medição de

maturidade dos componentes e subcomponentes será feita, ou seja, os instrumentos utilizados na condução das avaliações, e a inclusão de questões apropriadas neste instrumento. Podem ser empregados por exemplo um método quantitativo para um público diverso e representativo, disponível em meios eletrônicos e *online*, o que permite uma análise estatística consistente, além de comparações de variadas fontes. Com relação à utilização de questões orientadoras, as principais referências são os próprios componentes e subcomponentes definidos previamente, e questões utilizadas em outros modelos do mesmo domínio. A utilização de uma escala de *Likert*, ou outra semelhante, pode aumentar a confiabilidade e consistência das respostas, e facilitar para que os resultados obtidos sejam relacionados aos estágios de maturidade. Outra possibilidade é a atribuição direta pelos respondentes de um nível de maturidade dos componentes e subcomponentes. É importante que haja um equilíbrio na quantidade de questões a serem utilizadas, para que haja uma compreensão adequada do item avaliado, mas que não seja exaustivo para evitar confusões e duplicidades, e causar desinteresse por parte dos intervenientes da pesquisa.

Após cumprir as etapas anteriores, deve-se realizar a etapa **Testar**, ou seja, aplicação do modelo junto ao público alvo, para verificar a adequação do modelo. O teste de validação pode ser feito avaliando-se o entendimento dos conceitos utilizados no modelo, dos componentes e subcomponentes, das questões e da praticidade da sua utilização. Essa validação é feita em conjunto aos colaboradores da construção do modelo, especialistas, empresas etc., analisando-se assim a necessidade de revisão do modelo.

Em seguida, após a validação do modelo junto ao público-alvo, na etapa **Distribuição**, pode-se disponibilizar o modelo para uso de interessados. Os primeiros usuários podem ser os colaboradores da estruturação e validação do modelo. Dependendo do escopo de aplicação do modelo, a seleção de um determinado público, abrangendo por exemplo um setor industrial, uma região, faixa de faturamento, número de empregados, entre outros, pode auxiliar na empregabilidade do modelo. Por fim, a identificação de organizações que podem se beneficiar de sua utilização, e a habilidade de aplicá-lo a múltiplas organizações também podem contribuir para a padronização e aceitação global do modelo.

A etapa **Manter** trata da manutenção do modelo, e é impactada diretamente pela necessidade de recursos necessários para a sua utilização ao longo do tempo. Estes recursos, como por exemplo um repositório de dados, são necessários para suportar a aplicação do modelo. Os recursos devem ser determinados na definição do escopo do modelo, como por exemplo se pretendido que o modelo esteja disponível na internet, em aplicativos móveis, os

recursos devem ser planejados e requeridos, bem como a atualizações necessárias ao longo do tempo.

4.2. Elaboração, validação e teste do modelo

A construção do modelo proposto está detalhada abaixo, e para confecção deste seguiu-se a metodologia proposta por De Bruim *et al.* (2005), onde foram realizadas as quatro primeiras etapas, de um total de seis apresentadas pelo autor.

Etapa 1 – Definição do Escopo do modelo

O domínio de conhecimento do modelo é específico, pois trata da avaliação da maturidade na utilização de conceitos e tecnologias da Indústria 4.0 na área industrial de empresas do setor sucroenergético. O público-alvo são o acadêmico, que pode utilizar o modelo para a realização de pesquisas científicas, comparar resultados, gerar conclusões, e o público empresarial, que pode utilizar o modelo para avaliar a maturidade de uma empresa, monitorar a evolução da implantação e desenvolver estratégias para tal.

Etapa 2 – Projeto do modelo

Na etapa 2, foram definidos o público-alvo, consistindo no público acadêmico de professores, pesquisadores e alunos. Para o público empresarial, gestores, gerentes e técnicos. Os escolhidos para a atividade de avaliação são os gestores que possuem conhecimentos suficientes para avaliarem as questões estratégicas, os gerentes que possuem conhecimentos sobre as áreas táticas, e gestores de áreas com conhecimentos técnicos e operacionais das dimensões avaliadas. O método escolhido foi a avaliação de terceira parte, onde os respondentes, das empresas analisadas, respondem a um questionário.

Etapa 3 – Composição do modelo

Com o objetivo de fundamentar o desenvolvimento de um modelo de avaliação de maturidade, foi importante a análise comparativa dos modelos existentes na literatura, a fim de identificar os pontos convergentes e divergentes entre ambos. Desta forma, foi possível extrair as melhores práticas de cada um, e propor um modelo mais ajustado e otimizado para a área de aplicação do modelo proposto.

O modelo proposto é composto de quatro elementos, (i) as dimensões, (ii) os itens de avaliação, (iii) os níveis de maturidade e (iv) as questões de avaliação. Os itens (i) e (ii) são denominados na metodologia de De Bruim *et al.* (2005), como componentes e subcomponentes,

e neste trabalho foram denominados por dimensão e itens de avaliação. Os elementos integrantes do modelo são detalhados na sequência.

4.2.1. Dimensões

As dimensões são multidisciplinares, e são fatores de agrupamento dos itens de avaliação. Tem a função de gerar um agrupamento dos principais aspectos que envolvem o conceito da Indústria 4.0, contemplando estratégia empresarial, processos, pessoas, produtos e aspectos tecnológicos. Não possuem hierarquia, sendo todas importantes para o alcance do objetivo do trabalho, medir o nível de maturidade.

Para a construção do modelo foram utilizadas as dimensões categorizadas nos modelos estudados, com apenas uma alteração, as dimensões Digitalização e Rede/infraestrutura, observadas na análise dos modelos, foram agrupadas no item Integração Vertical, ficando assim o modelo proposto com cinco itens de avaliação, sendo:

- 1. Estratégia;**
- 2. Gestão de dados;**
- 3. Equipes de trabalho;**
- 4. Integração Vertical;**
- 5. Integração Horizontal.**

A dimensão Estratégia contempla questões relacionadas a responsabilidade da alta administração, e incorpora questões relacionadas a gestão estratégica, investimentos financeiros, estrutura organizacional, roteiro de implementação e coordenação da implementação, que são importantes para o direcionamento estratégico da empresa na implantação da Indústria 4.0.

Na dimensão Gestão de dados contempla questões importantes da Indústria 4.0, como a coleta, armazenamento, proteção, análise de dados, e a transformação dos dados em inteligência empresarial, que são fatores estratégicos e que podem gerar novas receitas aos negócios.

As transformações digitais e o uso intensivo de tecnologias não são possíveis sem a devida qualificação e constante atualização das habilidades técnicas e de gestão das equipes de trabalho. As equipes, incluindo operacional e liderança, necessitam estar abertas as inovações tecnológicas, e devem possuir flexibilidade e autonomia para rápidas mudanças no contexto empresarial.

As empresas, através da implementação da Indústria 4.0, possuirão sensores e atuadores inteligentes, instalações e equipamentos com sistemas de tecnologia da informação, que permitirão a comunicação em tempo real entre equipamentos e sistemas, e para isso deverão possuir uma infraestrutura de comunicação eficaz e bem protegida. Esta integração deve ser responsável por canalizar dados e informações desde a área fabril até a gestão do negócio.

A integração entre sistemas e dados, constroem uma base de coleta e análise de dados, permitindo a comunicação em tempo real com clientes e parceiros, e demais atores da cadeia de valor. Através desta integração horizontal é possível o desenvolvimento de novos serviços, para a empresa e para os clientes, e poderão contribuir com as receitas das empresas.

4.2.2. Itens de avaliação

Os itens de avaliação são a base do processo de transformação para a Indústria 4.0, e podem ser entendidas como as áreas de interesse a serem trabalhadas pela empresa, através de ações a serem executadas para o alcance dos objetivos estratégicos da Indústria 4.0. São de fato os itens que receberão a classificação mensurável de maturidade, e os princípios que norteiam o sucesso da implementação dos conceitos e tecnologias da Indústria 4.0. Os itens de avaliação propostos estão apresentados no quadro 4.1, abaixo.

Quadro 4.1: Itens de avaliação do modelo de maturidade

Dimensão	Itens de Avaliação
Estratégia	Grau de implementação da estratégia
	Definição de indicadores
	Investimentos
Gestão de dados	Coleta de dados
	Armazenamento e proteção de dados
	Análise de dados
Equipes de Trabalho	Liderança
	Competências
	Treinamento
	Cultura
Integração Vertical	Equipamentos
	Rede de dados
	Automação
	Integração
Integração Horizontal	Integração Horizontal

Fonte: elaborado pelo autor.

Na dimensão Estratégia será avaliado se a empresa tem conhecimentos suficientes para analisar as vantagens da Indústria 4.0 para a empresa, se existe uma estratégia definida e um

modelo de acompanhamento das atividades da implantação, e se a empresa pretende fazer ou se já está fazendo investimentos nesta área. Bem como se a empresa tem conhecimento do seu estado atual e qual o estágio ideal para a Indústria 4.0.

Será considerado, na dimensão Gestão de Dados, se a empresa possui uma padronização e normatização dos seus dados produtivos, e se tem conhecimento de quais dados são mais importantes para tornar o processo produtivo mais eficiente. Bem como, se tem feito uso de tecnologias para coletar estes dados, se estes estão protegidos contra acessos não autorizados, se tem feito uso de serviços de nuvem para armazenar e/ou processar dados dos processos produtivos e se os colaboradores tem autonomia para acessar e manipular tais dados. Também, será ponderado se a empresa possui uma infraestrutura capaz de analisar os dados dos processos produtivos e qual o nível de análise realizada, descritiva, diagnóstica, preditiva ou prescritiva. Nesta dimensão será examinado a utilização das tecnologias habilitadoras, como a internet das coisas, sistemas cyber-físicos, integração horizontal, segurança digital, big data e análise de dados e nuvem.

Já na dimensão Equipes de Trabalho será avaliado se a empresa tem preparado suas lideranças para conduzir o processo de implementação da Indústria 4.0 e estas lideranças estão alinhadas a estratégia de implantação da empresa. Ainda, se a liderança tem incentivado e permitido que colaboradores participem dos processos de implantação. Também, será observado se os colaboradores da empresa possuem competências técnicas para gerenciar seus processos baseados em dados, e se possuem as habilidades e atitudes necessárias para participar do processo de implementação da Indústria 4.0. Ainda, se a empresa tem investido em programas de treinamentos, referentes a competências para a Indústria 4.0 e se tem proporcionado uma cultura de inovação na empresa, como reconhecimento financeiro quanto a participação dos colaboradores.

Para a dimensão Integração Vertical será pesquisado se a empresa possui uma infraestrutura de equipamentos que podem ser controlados de forma automatizada ou se podem ser atualizados para que se comuniquem e se interajam. Ainda, se a empresa possui uma rede de integração entre os equipamentos e setores produtivos, se esta está atualizada e protegida. Também, será considerado se a empresa possui sistemas automatizados para controle de ativos físicos, se os processos se integram e geram inteligência empresarial e se os processos se utilizam de sistemas de informação e se estes estão integrados. Nesta dimensão será observado a utilização das tecnologias habilitadoras, como a segurança digital, sistemas cyber-físicos, integração vertical e *big data*.

Finalmente na dimensão Integração Horizontal será ponderado se a empresa mantém integração com seus clientes e parceiros, com troca de informações, se esta integração permite criar indicadores que monitorem os trabalhos na cadeia de valor e se a integração possui um escopo definido e protegido contra ataques cibernéticos. Ainda, se a empresa tem incentivando seus clientes e fornecedores a desenvolverem ferramentas de integração de dados entre as empresas. Nesta dimensão será avaliado a utilização das tecnologias habilitadoras, como segurança digital, integração horizontal, sistemas cyber-físicos e *big data*.

4.2.3. Níveis de Maturidade

Para calcular o nível de maturidade do modelo proposto será utilizado a sistemática de pontuação utilizada no PNQ – Prêmio Nacional da qualidade, desenvolvido pela Fundação Nacional da Qualidade, que será apresentado com mais detalhes nesta seção.

4.2.3.1. Modelo de Excelência do Plano Nacional da Qualidade

O Modelo de Excelência do PNQ pode ser utilizado para a autoavaliação em qualquer tipo de organização, visto que a linguagem utilizada é flexível e de fácil entendimento, além de não prescrever ferramentas e práticas de gestão específicas. No Modelo do PNQ, os Fundamentos da Excelência são expressos em características tangíveis, mensuráveis quantitativa ou qualitativamente, por meio de requisitos presentes em questões formuladas e em solicitações de informações específicas. Essas, por sua vez, são agrupadas em itens em cada um dos oito critérios do modelo. Os objetivos dessa distribuição é facilitar o entendimento de conteúdos afins considerados no modelo e reproduzir, de forma lógica, a condução de temas essenciais de uma organização. Os critérios de avaliação são representados pela figura 4.2 mostrada abaixo, sugerindo uma visão sistêmica da gestão organizacional.

Figura 4.2: Modelo de Excelência do PNQ - Prêmio Nacional da Qualidade



Fonte: Fundação Nacional da Qualidade (2014)

A figura representativa dos Critérios de Avaliação simboliza a organização, considerada como um sistema orgânico e adaptável ao ambiente externo. O modelo é estruturado em oito critérios específicos, i) Liderança; ii) Estratégias e Planos; iii) Clientes; iv) Sociedade; v) Informações e Conhecimento; vi) Pessoas; vii) Processos; e viii) Resultados.

Os oito critérios de excelência estão subdivididos em vinte e três itens de avaliação, cada um deles com requisitos específicos e uma pontuação máxima. Destes, dezessete são Itens relativos a Processos Gerenciais e seis a Resultados Organizacionais. Em cada item existem notas que têm o propósito de esclarecer, apontar as inter-relações existentes nos itens, definir a abrangência e a orientar as respostas. Elas não se constituem em requisitos adicionais para os processos gerenciais solicitados nas questões (FNQ, 2011). O Quadro 4.2 apresenta os critérios de avaliação, os itens e as pontuações máximas do modelo.

Quadro 4.2: Critério e Pontuação do PNQ - Prêmio Nacional da Qualidade

Critérios e Itens	Pontuação Máxima
1. Liderança	55
1.1. Cultura Organizacional e desenvolvimento da gestão	15
1.2. Governança	10
1.3. Levantamento de interesses e exercício da liderança	15
1.4. Análise do desempenho da organização	15
2. Estratégia e Planos	35
2.1. Formulação das estratégias	15
2.2. Implementação das estratégias	20
3. Clientes	40
3.1. Análise e desenvolvimento de mercado	20
3.2. Relacionamento com clientes	20
4. Sociedade	30
4.1. Responsabilidade socioambiental	15
4.2. Desenvolvimento social	15
5. Informações e Conhecimento	25
5.1. Informações da organização	15
5.2. Conhecimento da organização	10
6. Pessoas	45
6.1. Sistemas de trabalho	15
6.2. Capacitação e desenvolvimento	15
6.3. Qualidade de vida	15
7. Processos	50
7.1. Processos da cadeia de valor	20
7.2. Processos relativos a fornecedores	10
7.3. Processos econômico-financeiros	20
Subtotal Processos Gerenciais	280
8. Resultados	
8.1. Econômico-financeiros	50
8.2. Sociais e ambientais	35
8.3. Relativos aos clientes e ao mercado	50
8.4. Relativos às pessoas	35
8.5. Relativos aos processos	50
Subtotal Resultados Organizacionais	220
Total Geral	500

Fonte: Fundação Nacional da Qualidade (2014)

Os Critérios de 1 a 7, relativos aos Processos Gerenciais, são compostos por questões que investigam “como” a organização realiza determinadas atividades gerenciais de forma sistemática, expressas nessas questões, por meio de ações e seus complementos, isto é, quais são e como funcionam as práticas de gestão que a organização adota para atender aos processos gerenciais requeridos e seus complementos.

Em uma avaliação utilizando esses critérios, são solicitadas informações complementares, para buscar a excelência em algumas práticas de gestão, chamadas “Complementos para a Excelência”. As evidências requeridas ao lado de algumas questões definem informações, que servem para demonstrar a existência do processo gerencial e devem ser apresentadas no caso de uma avaliação.

O método de determinação da pontuação de um critério se constitui de duas etapas: uma de determinação dos percentuais para os quatro fatores de um critério, e outra, de cálculo da pontuação final do critério, usando a média dos percentuais de cada fator.

A primeira etapa é a determinação do percentual dos fatores de um critério. Nesta etapa cada fator possui uma afirmação básica a ele associada para escolher uma faixa preliminar e, em seguida, escolher o percentual do fator, que melhor julgue a afirmação. Esse percentual estabelece o limite possível do percentual final para o critério. Para avaliar a afirmação básica, devem ser consideradas as lacunas detectadas na análise dos processos gerenciais ou dos resultados organizacionais do critério. Segundo a FNQ (2014) os conceitos associados aos percentuais podem ser equivalentes aos apresentados no quadro 4.3.

Quadro 4.3: Percentuais de atendimento aos requisitos do PNQ

Todos	= 100% de atendimento a afirmação
Praticamente todos	>= 90% e < 100% de atendimento a afirmação
Quase todos	>= 70% e < 90% de atendimento a afirmação
A maioria	>= 50% e < 70% de atendimento a afirmação
Muitos	>= 30% e < 50% de atendimento a afirmação
Mais de um	> 1 atendimento a afirmação
Pelo menos um	= 1 atendimento a afirmação
Nenhum	= 0 atendimento a afirmação

Fonte: FNQ (2014)

Durante a avaliação podem surgir restrições a implementação dos itens, estas são identificadas por meio de afirmações complementares dos respondentes. Nesse caso, escolhe-se uma faixa restritiva potencial. Para avaliar as afirmações complementares, devem ser consideradas as lacunas detectadas na análise dos processos gerenciais ou dos resultados organizacionais dos critérios

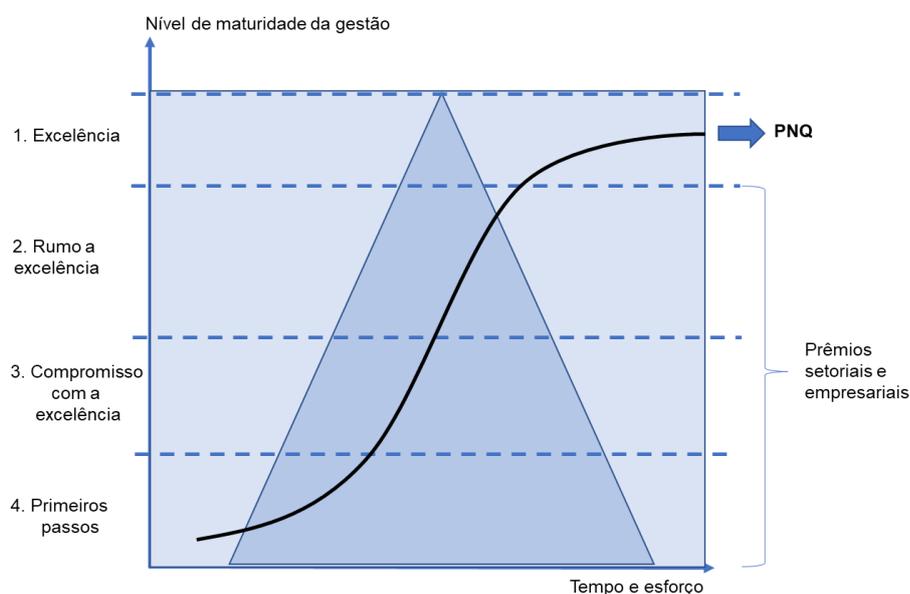
Na fase final desta etapa, verifica-se se há alguma faixa restritiva, se não houver, escolhe-se o percentual preliminar final do fator, e se houver escolhe-se o percentual maior da faixa restritiva mais baixa que a faixa preliminar, como percentual final do fator.

Na segunda etapa é feito o cálculo do percentual final de cum critério, o qual é a média aritmética entre os percentuais finais dos fatores do critério. A pontuação final de um critério é o resultado do seu percentual médio final, multiplicado pela pontuação do critério, com arredondamento para número inteiro.

Finalmente a empresa é classificada no seu respectivo nível de maturidade, conforme apresentado na figura 4.3 (FNQ, 2014), sendo:

1. Critérios de Excelência: aplicáveis as organizações que tem um sistema de gestão bastante evoluído, já demonstram excelência em alguns resultados, competitividade na maioria e pleno atendimento as expectativas de partes interessadas em quase todos eles;
2. Critérios Rumo à Excelência: aplicáveis as organizações cujo sistema de gestão está em franca evolução e já demonstram competitividade e atendimento as expectativas de partes interessadas em vários resultados;
3. Critérios Compromisso com a Excelência: aplicáveis as organizações que estão em estágios iniciais de evolução do seu sistema de gestão e começando a medir e perceber melhorias nos seus resultados;
4. Primeiros Passos: aplicáveis as organizações que iniciam um programa de melhoria da gestão.

Figura 4.3: Evolução e estágios de maturidade da gestão do PNQ



Fonte: adaptado da FNQ (2014)

4.2.3.2. Instrumento de avaliação do modelo proposto

Considerando os objetivos deste trabalho, a adoção de um instrumento simplificado capaz de permitir a avaliação do grau em que se encontra a organização em relação a implementação dos conceitos e tecnologias da Indústria 4.0 é de extrema relevância. Neste sentido, a elaboração do instrumento avaliatório tem como referencial teórico, a publicação “Critérios Rumo a Excelência Avaliação Diagnóstica da Gestão Organizacional” da Fundação para o Prêmio Nacional da Qualidade (2014). A sistemática de avaliação simplificada dos critérios de excelência foi adaptada para os itens de avaliação da Indústria 4.0. Nesta adaptação foram considerados os seguintes aspectos:

- **dimensões e fatores de avaliação:** o instrumento de avaliação sugerido avaliará as dimensões definidas nesse trabalho, Estratégia, Gestão de Dados, Equipes de Trabalho, Integração Vertical e Integração Horizontal e seus subitens;
- **sistemática de pontuação:** o instrumento de avaliação proposto compartilha da mesma sistemática de pontuação estabelecida no PNQ. Entretanto, os valores percentuais, bem como a pontuação máxima obtida, foram adaptados para avaliação dos requisitos da Indústria 4.0 levando em consideração os requisitos pontuais, aplicáveis as dimensões específicas.

Com o instrumento de avaliação adaptado para a avaliação da Indústria 4.0 no Setor Sucroenergético, que é uma empresa industrial, mas opera de forma diferente do que trata os modelos avaliados, passou-se o mesmo para avaliação de uma empresa que desenvolve *softwares* para virtualização de processos e análises de dados para empresas do setor sucroenergético, pesquisadores que desenvolvem trabalhos sobre a Indústria 4.0 e sobre a eficiência de processos do setor sucroenergético, profissionais de empresas de automação industrial e professores de instituições de ensino que possuem cursos com relação aos temas da Indústria 4.0.

A partir da revisão da literatura e da troca de experiência com os especialistas percebeu-se que nem todos os itens tinham a mesma importância para o Setor Sucroenergético. Como por exemplo a Integração Vertical e a Análise da Dados tem uma contribuição diferente para a maturidade no setor sucroenergético, do que a Integração Horizontal. Desta forma, foram definidos a importância de cada item para o novo modelo, e a pontuação para cada item de avaliação.

Desta forma, na sistemática de pontuação do instrumento de avaliação, as cinco dimensões foram desdobradas em itens de avaliação e definidos a pontuação máxima para cada

item, conforme informações dos especialistas. No quadro 4.4 é apresentada as dimensões, os itens de avaliação e as pontuações máximas estabelecidas para os itens de avaliação.

Quadro 4.4: Dimensões, itens de avaliação e pontuação máxima

Dimensão e Itens de Avaliação	Pontuação Máxima
1. Estratégia	150
1.1. Grau de implementação da estratégia	50
1.2. Definição de indicadores	50
1.3. Investimentos	50
2. Gestão de Dados	320
2.1. Coleta de dados	110
2.2. Armazenamento e proteção de dados	100
2.3. Análise de dados	110
3. Equipes de Trabalho	160
3.1. Liderança	40
3.2. Competências	40
3.3. Treinamento	40
3.4. Cultura	40
4. Integração Vertical	292
4.1. Equipamentos	73
4.2. Rede de dados	73
4.3. Automação	73
4.4. Integração	73
5. Integração Horizontal	78
5.1. Integração horizontal	78
Total Geral de Pontos	1000

Fonte: elaborado pelo autor.

O pesquisador juntamente com o entrevistado deve identificar o percentual que melhor representa a situação atual da organização em relação aos critérios de avaliação, de acordo com as evidências objetivas apresentadas pelo entrevistado. A identificação do percentual para cada item de avaliação é feita com base em uma escala de alternativas que representa o grau de implementação da Indústria 4.0 na referida dimensão. O quadro 4.5 apresenta a escala de alternativas do instrumento de avaliação proposto.

Quadro 4.5: Escalas de alternativas

0%	Nenhuma prática apresentada
25%	Algumas práticas apresentadas e evidenciadas
50%	Muitas práticas apresentadas e evidenciadas
75%	Quase todas as práticas apresentadas e evidenciadas
100%	Todas as práticas apresentadas e evidenciadas

Fonte: elaborado pelo autor.

A alternativa escolhida pelo respondente deve ser justificada com base em evidências objetivas que indica a utilização do item de avaliação. Estas informações devem ser registradas na folha de avaliação. A justificativa tem como objetivo apresentar as práticas adotadas pela organização, informações relevantes, permitindo assim, o esclarecimento quanto ao percentual atribuído aos aspectos de avaliação.

Cada um dos itens de avaliação deve ser pontuado de acordo com a escala de pontuação pertinente. Para obter o percentual total de uma dimensão deve-se calcular a média aritmética dos percentuais de cada item de avaliação. A multiplicação do percentual total de cada item pela pontuação máxima resulta na pontuação obtida para cada dimensão avaliada.

Com base na pontuação global obtida, pode-se identificar o estágio atual de maturidade de implementação dos conceitos e tecnologias da Indústria 4.0 da empresa avaliada. Se a pontuação da organização atingir 1000 pontos significa que está adequada aos conceitos da Indústria 4.0. O Quadro 4.6 apresenta as faixas de pontuação correspondentes aos estágios de maturidade que a organização se encontra quanto a Indústria 4.0, bem como o nível de maturidade que será utilizado no modelo proposto.

Quadro 4.6: Níveis de Maturidade

Maturidade	Faixa		Estágio da Organização
	Posição	Pontuação	
5 - Especialista	Média	951 – 1000	Total atendimento aos itens de avaliação.
	Baixa	901 – 950	
4 - Experiente	Alta	851 – 900	Muitas evidências de atendimento aos itens de avaliação.
	Média	751 – 850	
	Baixa	701 – 750	
3 - Intermediário	Alta	651 - 700	Existem algumas lacunas importantes no atendimento aos itens de avaliação.
	Média	551 - 650	
	Baixa	501 - 550	
2 – Iniciante	Alta	451 - 500	Existem muitas lacunas no atendimento aos itens de avaliação.
	Média	351 - 450	
	Baixa	301 - 350	
1 – Leigo	Alta	201 - 300	Poucas evidências de atendimento aos itens de avaliação.
	Média	101 - 200	
	Baixa	0 - 100	

Fonte: elaborado pelo autor.

5. MÉTODO E PROCEDIMENTOS DE PESQUISA

Toda pesquisa é constituída de procedimentos sistemáticos, cujo objetivo é dar soluções para problemas propostos. Para o seu desenvolvimento se faz necessário o uso cauteloso de métodos, processos e técnicas de modo a gerar a confiabilidade necessário aos resultados obtidos.

Esta seção tem como objetivo explicar os procedimentos metodológicos adotados para realização desta dissertação, apresentar os elementos metodológicos, o tipo de pesquisa, o método, a base de pesquisa e o instrumento de coleta de dados a ser utilizado.

5.1. Abordagem de pesquisa

Quanto à abordagem, uma pesquisa pode ser classificada em qualitativa e/ou quantitativa (MARTINS, 2012). De acordo com Bryman (1989), a abordagem quantitativa tem como características a mensurabilidade, causalidade, generalização e replicação. Quanto à abordagem qualitativa, esse autor aponta que possui como características a ênfase na perspectiva do indivíduo que está sendo estudado e por isso tem uma subjetividade de interpretação dos indivíduos. Para Martins (2012), a abordagem qualitativa possui uma abordagem não estruturada e com múltiplas fontes de evidência para captar perspectivas e interpretações do contexto investigado.

Para Cooper e Schindler (2003), a pesquisa qualitativa é um conjunto de técnicas de caráter interpretativo, que busca descrever, decodificar e traduzir fenômenos, além de apreender significados.

Quanto a natureza, esta pesquisa pode ser caracterizada predominantemente como qualitativa, pois tem como objetivo captar perspectivas e interpretações do contexto observado, e para tal serão utilizadas fontes de evidências, para captar o que ocorre no meio ambiente analisado.

5.2. Método de pesquisa

Existem diversos procedimentos para realização de uma pesquisa, onde cada qual busca uma maneira de realizar os procedimentos de coleta e análise de dados, de acordo com a abordagem e o método definido pelo pesquisador.

Os métodos de pesquisa empregados em estudos voltados à gestão da produção e operações incluem levantamentos do tipo *survey*, estudos de caso, modelagem, simulação,

estudos de campo, pesquisa-ação, experimento e estudos teóricos ou conceituais (BRYMAN, 1989; NAKANO, 2012).

Segundo Martins (2012), um dos métodos mais apropriados para conduzir uma pesquisa qualitativa, na engenharia de produção, é o estudo de caso. Onde o pesquisador interage com o entrevistado em visitas, desenvolve as entrevistas, as observações e consulta documentos.

Para Yin (2001), estudo de caso é uma investigação empírica que investiga um fenômeno contemporâneo dentro do seu contexto de vida real, especialmente quando limites entre o fenômeno e o contexto não estão claramente definidos. Para Gil (2002) estudos de casos podem ser constituídos tanto de um único caso, quando de múltiplos casos. Para o autor a utilização de múltiplos casos é a situação mais frequente, pois proporciona evidências em diferentes contextos, auxiliando na elaboração de uma pesquisa de melhor qualidade.

Para Yin (2001), uma das premissas do estudo de caso é a tentativa de solução de um problema real e atual, dentro de determinado contexto, em que há pouco controle sobre o evento. Em geral, são propostas narrativas mais informais, desenvolvidas com citações, comentários, entrevistas e ilustrações, com o objetivo de analisar os dados coletados. Em relação ao escopo do estudo de caso, pode-se dizer que é uma investigação empírica que estuda um fenômeno contemporâneo em profundidade e em contexto de vida real, especialmente quando os limites entre o fenômeno e o contexto não são claramente evidentes (YIN, 2001).

O estudo de caso, segundo Yin (2001), “contribui de forma inigualável para a compreensão que temos dos fenômenos individuais, organizacionais, sociais e políticos”. Permite que os pesquisadores obtenham características holísticas e significativas de eventos da vida real, como, por exemplo, processos organizacionais e administrativos.

As definições de Yin (2001), ajudam a apoiar a escolha do método de pesquisa para este estudo. De fato, após a identificação através da revisão da literatura que muitas fábricas pelo mundo estarem utilizando a Indústria 4.0 para melhoria de gerenciamento e controle de seus processos, verifica-se a necessidade de se investigar com mais profundidade unidades produtoras do setor Sucroenergético, um processo contemporâneo relevante para muitas regiões do país, exatamente em seus processos fabris, onde ocorre uma grande quantidade de processos químicos e biológicos e entende-se que a Indústria 4.0 pode contribuir para a melhoria dos processos e aumentar o rendimento produtivo das unidades.

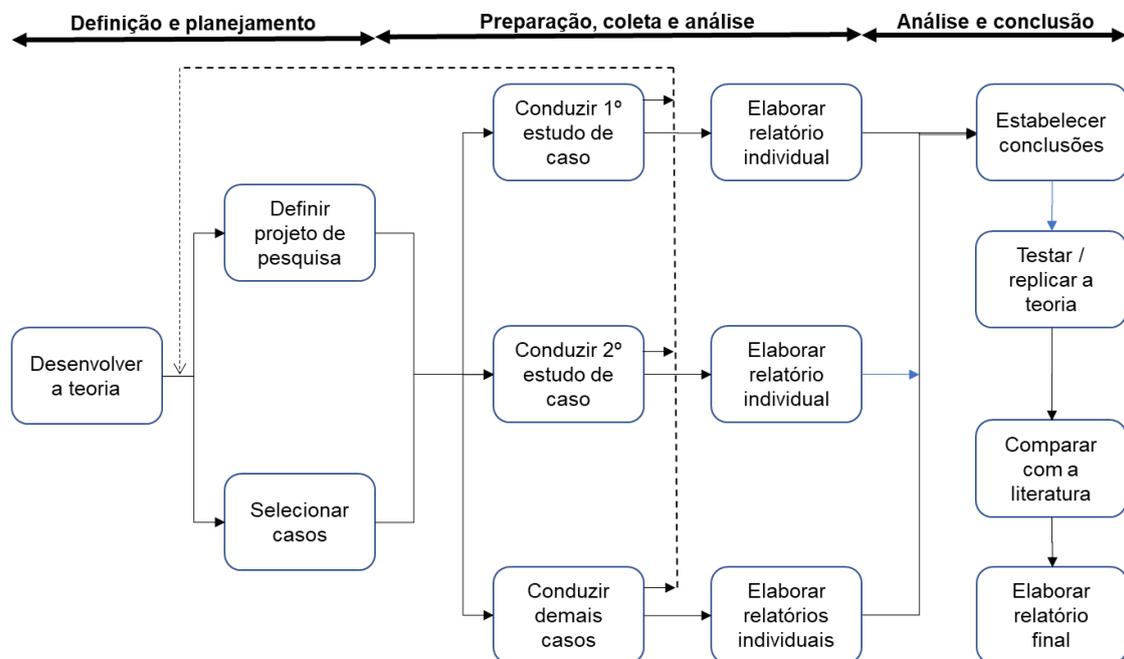
Yin (2001) afirma que há três tipos de estudo de caso, o **exploratório**, utilizado quando existe pouco ou nenhum conhecimento sobre determinado fenômeno, sendo que após a sua conclusão haverá perguntas que serão modificadas, instrumentos refinados ou hipóteses reformuladas, o **descritivo**, descreve o comportamento das variáveis envolvidas na pesquisa,

em que não são propostas relações de causa e efeito, embora os resultados possam ser utilizados posteriormente para formulação de hipóteses de causa e efeito e o **explanatório**, que pode ser considerado o mais ambicioso, já que não tem o objetivo somente de descrever, mas também explicar relações de causa e efeito.

Dessa forma, entende-se que este trabalho tem caráter exploratório, visto que a pesquisa tem como propósito explorar a utilização dos conceitos e tecnologias da Indústria 4.0 nas unidades produtoras do Setor Sucroenergético.

Os passos para o desenvolvimento deste estudo de caso são propostos por Yin (2001), ilustrado na figura 5.1.

Figura 5.1: Método de Estudo de Caso



Fonte: adaptado de Yin (2001)

5.3. Definição e projeto de pesquisa

De acordo com Eisenhardt (1989) a importância da especificação da questão de pesquisa e dos constructos, representa um ponto de partida para direcionar corretamente a pesquisa. Esta pesquisa visa responder a seguinte questão de pesquisa: como o setor sucroenergético está planejando e implementando os avanços tecnológicos proporcionados pela Indústria 4.0 em seus processos industriais e como pode ser avaliada a maturidade destes avanços considerando os gargalos tecnológicos, gerenciais e estratégicos.

De acordo com a figura 5.1 acima, o desenvolvimento da teoria deve anteceder os demais procedimentos operacionais da pesquisa e seleção dos casos. O objetivo da pesquisa

bibliográfica é permitir que o pesquisador faça um mapeamento e uma análise de aporte teórico existente sobre determinado tema. Segundo Mello *et al.* (2012) na pesquisa, a “fundamentação teórica identifica as lacunas onde possam existir problemas a serem solucionados, em comunhão com um contexto organizacional que promova a pesquisa participativa entre pesquisadores e profissionais”.

Na pesquisa bibliográfica deste trabalho buscou-se explicitar, primeiramente, o aporte teórico existente para fundamentar o objeto de estudo da pesquisa, uma abordagem que visa analisar o nível de maturidade no nível produtivo de uma usina de açúcar e álcool. Optou-se por apresentar o levantamento de dados sobre o setor Sucroenergético, seus processos produtivos, variáveis e ferramentas de controle dos processos produtivos. Este constituiu o primeiro pilar do presente estudo.

Para construir o segundo pilar do trabalho foram feitas buscas sobre a Indústria 4.0 com a intenção de melhor entender este fenômeno, a evolução da indústria durante a história, como surgiu o tema e quais seus conceitos e tecnologias habilitadoras. Foram utilizadas principalmente referências de artigos científicos e materiais de entidades internacionais que pesquisam o tema.

Para embasar a pergunta de pesquisa, foram feitas buscas com a intenção de levantar modelos de maturidades específicos para a Indústria 4.0 e verificar a existência de modelo específico para o setor Sucroenergético. As áreas que mais apareceram foram para fábricas de produtos seriados, o que revelou uma oportunidade de investigação, que deu origem ao tema desta dissertação. Para continuidade do trabalho foram selecionados sete modelos de maturidade para estudo.

Para esta fase de revisão da literatura, inicialmente foram escolhidas duas das principais bases de dados, *Scopus e Web of Science*, considerando a relevância dos artigos indexados. Nos procedimentos de busca, para o setor Sucroenergético foram utilizados termos como “*sugar cane industry, sugar cane processing industry, process control in the sugarcane industry e Sugar Manufacturing Process*”. Para indústria 4.0 foram utilizados termos como “*Industrial revolutions, industry 4.0, advanced manufacturing, fourth industrial Revolution e enabling Technologies*”. E para modelos de maturidade foram utilizados termos como “*maturity levels, industry maturity level 4.0, maturity model industrie 4.0 e industrie 4.0 maturity index*”.

5.4. Seleção dos casos e unidades de análise

Para Gil (2002), estudos de casos podem ser constituídos tanto de um único caso, quanto de múltiplos casos. A utilização de múltiplos casos é a situação mais frequente, pois

proporciona evidências em diferentes contextos, auxiliando na elaboração de uma pesquisa de melhor qualidade. O projeto de caso único é justificável sob condições em que o mesmo representa um teste crucial da teoria, no qual o caso é um evento raro, exclusivo, ou serve como um propósito revelador (YIN, 2001).

Para Martins *et al.* (2013), ao considerar múltiplos casos como se fossem experimentos múltiplos, considera-se a lógica da replicação, ou seja, os casos podem ser escolhidos para prever resultados semelhantes, replicações literais, ou produzir resultados contrastantes por razões previsíveis, replicações teóricas ou amostragem teórica.

O número de casos depende do nível de certeza que se deseja obter ou da influência de condições externas nas diferenças dos resultados a serem obtidos, de maneira a obter replicações literais e teóricas suficientes (MARTINS *et al.*, 2013).

De acordo com as declarações dos autores, entende-se que para esse trabalho o estudo de caso múltiplo se mostra mais adequado, por ser possível realizar comparações entre os casos, analisar o uso dos conceitos e tecnologias em cada unidade e as práticas de implantação e estratégias de cada unidade pesquisada.

Dessa forma, a seleção dos casos está relacionada a possibilidade de replicação teórica, pois o interesse maior é compreender a implementação dos conceitos da Indústria 4.0 nos processos produtivos e assim apresentar o nível de maturidade de cada unidade, baseado no modelo proposto neste trabalho. Sendo assim, os critérios para seleção de empresas para pesquisa envolvem:

- a) Empresas do Setor Sucroenergético, pois o foco principal do trabalho é desenvolver um modelo de maturidade para a área industrial deste setor;
- b) Empresas do Setor Sucroenergético que possuam em sua estrutura de automação os chamados Centros de Operações Integradas – COI;
- c) Empresas do Setor Sucroenergético que produzam etanol, açúcar e cogeração energia elétrica. Unidades que produzem estes produtos receberam maiores investimentos em tecnologias de controles de processos e estão mais propícias a utilização de conceitos da Indústria 4.0.

Nesta pesquisa, para validar o modelo e proporcionar comparações, testar teorias, entre os casos definiu-se que serão visitadas duas unidades produtoras do Setor Sucroenergético. Com o objetivo de assegurar uma boa qualidade de dados coletados, os entrevistados dentro das unidades deverão possuir conhecimentos técnicos e experiência profissional nas dimensões desenvolvidas nesta pesquisa. Dessa forma, será solicitado as empresas que indiquem os

profissionais conhecedores dos itens avaliados dentro de cada dimensão, para responder as questões e apresentar as evidências referentes as suas respostas. Gil (2002), afirma que a amostragem consiste em selecionar um subgrupo da população que, com base nas informações disponíveis, possa ser considerada representativo de toda a população.

Para permitir a realização da pesquisa nas empresas, realizou-se contato informal com gestores, para verificar a possibilidade da realização da pesquisa. Tendo-se o aval do gestor, fez-se a formalização dessa aprovação mediante apresentação de documentos.

5.5. Instrumento de coleta de dados

Neste item é apresentado o instrumento de coleta de dados utilizado no estudo de caso. Segundo Yin (2001), existem seis fontes principais de evidências de informações no estudo de caso, documentação, registros em arquivos, entrevistas, observação direta, observação participante e artefatos físicos. Neste trabalho, se utilizou de uma fonte principal de evidência, a entrevista, pois com o problema da pandemia do COVID-19, não foi possível as observações diretas nos ambientes

A entrevista é uma forma de interação social, em que o pesquisador se apresenta frente ao pesquisado e lhe formula perguntas, com o objetivo de obtenção dos dados que lhe interessam na pesquisa (GIL, 2002). Para um estudo de caso, a entrevista é uma das fontes mais importantes de informação. São conversas guiadas, não se caracterizando como investigações estruturadas (YIN, 2001).

Neste trabalho, a abordagem utilizada foi a entrevista espontânea, onde os respondentes foram entrevistados por um período, aproximadamente trinta minutos, seguindo o conjunto de perguntas definidas e validadas, e solicitando aos respondentes que apresentasse suas próprias interpretações sobre a implementação de conceitos da Indústria 4.0. Vale ressaltar que as entrevistas foram gravadas com o objetivo de garantir a reprodução e análises mais fidedignas.

O quadro 4.7 é apresentado o modelo do Instrumento de Coleta de dados que será utilizado nas entrevistas. No anexo I é apresentado o questionário completo utilizado na pesquisa.

Quadro 4.7: Instrumento de Coleta de Dados

Dimensão: X						
Itens de Avaliação		0%	25%	50%	75%	100%
1	Questão 1					
Justificativa:						

Fonte: desenvolvido pelo autor

O questionário foi desenvolvido com base nos modelos pesquisados, e foram adaptados ao setor sucroenergético com base na revisão de literatura e validados com profissionais de empresas que atuam neste setor, com pesquisadores que desenvolvem trabalhos de pesquisa sobre a Indústria 4.0 e com professores de instituições de ensino que possuem cursos com relação com a área da indústria 4.0.

A partir da revisão da literatura e da troca de experiência com os especialistas percebeu-se que nem todos os itens têm a mesma importância para o Setor Sucroenergético. Como por exemplo a Integração Vertical e a Análise da Dados tem uma contribuição diferente para a maturidade nestes modelos de negócio. Desta forma, de acordo com a revisão bibliográfica e com a experiência de especialistas foram definidas a importância de cada item para o novo modelo.

Foram preparadas questões para as dimensões definidas nesse estudo, com os seus itens de avaliação. Para cada questão os respondentes deverão assinalar a porcentagem de implantação do item, e justificar sua resposta no item justificativa.

As observações diretas servem como fonte de evidências e ocorrem no ambiente natural do caso. Alguns comportamentos relevantes ou condições ambientais estão disponíveis para observação, e podem ser formais ou informais (YIN, 2001). Neste trabalho, a observação direta foi desenvolvida, não de forma formal, mas observações do comportamento dos entrevistados, das colocações, dos ambientes e das pessoas. De maneira informal, tem-se a oportunidade de observar evidências citadas pelos entrevistados e de confrontar informações coletadas nas entrevistas.

5.6. Procedimentos de organização e análise de dados

Segundo Yin (2001) a análise dos dados consiste no exame, na categorização, na tabulação e nas evidências, para poder tirar conclusões empíricas. Em pesquisas qualitativas, o processo analítico se inicia a partir dos primeiros dados coletados (CORBIN; STRAUSS, 1990).

Os dados coletados nas entrevistas foram organizados com a utilização de planilhas eletrônicas, Microsoft Excel. Conforme apresentado no item 4.2.3.2, para cada uma das dimensões serão calculadas a média aritmética das porcentagens apontadas e justificadas pelos entrevistados, e multiplicado pela pontuação máxima de cada item avaliado. A pontuação total de cada unidade será comparada com as faixas de pontuação do nível de maturidade e assim classificada no seu nível de maturidade atual em relação a implementação dos conceitos da Indústria 4.0.

As observações diretas, juntamente com as entrevistas serão convertidas em relatórios dos casos individuais, e as gravações serão transcritos os aspectos importantes para corroborar com uma melhor análise dos casos estudados.

Essa interpretação qualitativa proporcionou inferências importantes para a pesquisa, e que puderam confrontar as fontes de evidencia proposta para o estudo, conforme proposto por Yin (2001).

6. RESULTADOS E ANÁLISES

Esta sessão apresenta a aplicação do modelo em empresas do setor sucroenergético. São apresentados os perfis das empresas visitadas e os resultados obtidos da aplicação do modelo de avaliação da maturidade proposto. Por fim, é apresentado uma análise global dos resultados obtidos.

6.1. Apresentação das empresas

As empresas avaliadas foram selecionadas levando em consideração os objetivos estabelecidos neste estudo, ou seja, pertencerem ao setor sucroenergético, possuírem em sua área produtiva uma fábrica de açúcar e etanol e produzem energia elétrica através da biomassa da cana-de-açúcar.

Para efeito de preservação da confidencialidade das informações pertinentes, as empresas avaliadas não serão identificadas. Além disso, ao contatar as empresas, e no corpo do texto do questionário, o pesquisador assumiu um compromisso de resguardar as informações coletadas e preservar a identificação dessas organizações. Deste modo, tais organizações serão reconhecidas doravante por empresas “A” e “B”.

A empresa “A” está localizada no interior do estado de São Paulo. Pertence a um grupo multinacional, que possui capital aberto desde 2013, faz parte de um segmento de mercado denominado “Novo Mercado” de governança corporativa B3 – Brasil, ligado a Bolsa de Valores de São Paulo.

O grupo conta oito unidades produtoras, destas cinco estão localizadas no interior do estado de São Paulo, tem capacidade de processamento de 32,2 milhões de toneladas de cana-de-açúcar, produz 2,5 milhões de toneladas de açúcar, 1,6 milhão de metros cúbicos de etanol e gera 850GWh/ano de energia renovável excedente, que é a diferença entre a quantidade produzida (1.346 GWh) e a quantidade consumida pelas unidades.

A unidade avaliada tem capacidade de moagem de 5.1 milhões de toneladas de cana-de-açúcar, produz 250.000 metros cúbicos de etanol, 350.000 toneladas de açúcar por ano e geração de 145.000 MWh/ano.

Tem implementado em seu processo industrial uma serie de ferramentas de automação e gerenciamento de processos, que auxilia os gestores no planejamento da produção, na gestão dos processos e na melhora do rendimento produtivo. Na unidade foi implementado um local para promover encontros técnicos do grupo, objetivando o desenvolvimento de colaboradores e fomento de inovação.

Possui diversas certificações nacionais e internacionais, como a Bonsucro *EU Production Standard*, certificação de etanol (anidro, hidratado, neutro) e açúcar (líquido, líquido invertido e VHP); CARB - *California Air Resources Board*, para exportação ao estado da Califórnia (EUA); Produz etanol combustível registrado no Programa RFS2 - *Renewable Fuel Standard 2* - Padrão de Combustível Renovável, pela Agência Americana de Proteção Ambiental (EPA), para a comercialização nos EUA; FSSC 22000, atesta que a unidade possui as melhores práticas de gestão de segurança de alimentos - açúcar líquido e líquido invertido; Kosher que atende aos critérios da comunidade judaica; ISO 9001:2008, para a produção e venda de álcool; Selo Energia Verde (UNICA), integram o grupo de usinas brasileiras que fazem parte do Programa de Certificação da Bioeletricidade, da União da Indústria da Cana-de-Açúcar (UNICA).

Na área agrícola o grupo implementou uma central de inteligência, com o objetivo de acompanhar indicadores de desempenhos das unidades, em tempo real, com monitoramento da produtividade no campo e geração relatório horários, com informações aos gestores das unidades e os grupos corporativos.

A empresa “**B**” também está localizada no interior do estado de São Paulo, possui capital aberto desde 2007, no segmento de mercado denominado “Novo Mercado” de governança corporativa B3 – Brasil, ligado a Bolsa de Valores de São Paulo.

Pertence a um Grupo nacional, que conta com quatro unidades produtoras, sendo três no interior do estado de São Paulo. Possui capacidade de processamento de 24,5 milhões de toneladas de cana-de-açúcar por safra, produz 992 mil toneladas de açúcar, 1.097 mil metros cúbicos de etanol e gera 829 MW/h de energia através da queima do bagaço da cana-de-açúcar. O Grupo emprega aproximadamente 12.000 colaboradores diretos.

A unidade avaliada tem capacidade de moagem de 10 milhões de toneladas de cana-de-açúcar/safra, produz 280.000 metros cúbicos de etanol, 800.000 toneladas de açúcar por ano e geração de 331.000 MW/h.

A empresa tem desenvolvido projetos de melhoria contínua, baseado no Lean, e a expectativa é de obter ganhos e economias entre R\$ 2,00 e R\$ 3,00 por tonelada de cana após a implementação dos projetos.

Alinhado com o setor industrial, o qual possui a Central de Operações Industriais – COI, na área agrícola a empresa implementou a Central de Operações Agrícolas – COA, que integrará as tecnologias de automação do campo e proporciona melhor acompanhamento das atividades e dos equipamentos de campo.

Em parceria com um centro de pesquisas, e com base nos requisitos operacionais das usinas de cana-de-açúcar, o Grupo está em fase final de implantação de uma rede de banda larga 4G, privada, na área agrícola. Baseada na tecnologia LTE – *Long Term Evolution*, uma rede de dados mais rápida e mais estável, e adaptada para operar em áreas rurais e remotas.

Possui um Sistema de Gestão Integrado, com destaques para as normas ISO 9.001, Gestão da Qualidade e ISO 14.001, Gestão ambiental. Possui certificação específica para o setor sucroenergético, como a Bonsucro, que é uma certificação voltada exclusivamente para a produção e cadeia de custódia da cana-de-açúcar e seus produtos e atende tanto o mercado nacional (Bonsucro) quanto o mercado europeu (Bonsucro EU). Possui certificação para a comunidade Judaica, *Kosher*, e certificação *Halal*, certificação própria para mercados muçulmanos. Para os Estados Unidos, a Companhia é autorizada a fazer comercialização de produtos por atender aos critérios LCFS - *Low Carbon Fuel Standard*, vinculados à agência ambiental do Estado (CARB).

6.2. Resultados da avaliação

Este tópico descreve a aplicação do modelo nas empresas e os resultados desta aplicação. Os resultados foram extraídos de entrevistas com colaboradores das empresas e incluem uma síntese da pontuação obtida através da aplicação do modelo proposto neste trabalho.

6.2.1. Empresa “A”

A avaliação na empresa “A” foi realizada no mês de junho de 2020 e durou aproximadamente 1,5 horas. Participaram das entrevistas, o coordenador corporativo de processos, o especialista em processos, o gerente industrial e analista de dados.

Devido a pandemia do Covid-19 não foi permitida visita a unidade, e desta forma as entrevistas foram realizadas de forma virtual, utilizando-se da ferramenta SKYPE.

O Quadro 6.1 apresenta a síntese da pontuação obtida pela empresa “A”.

Quadro 6.1: Síntese da pontuação obtida pela empresa “A”

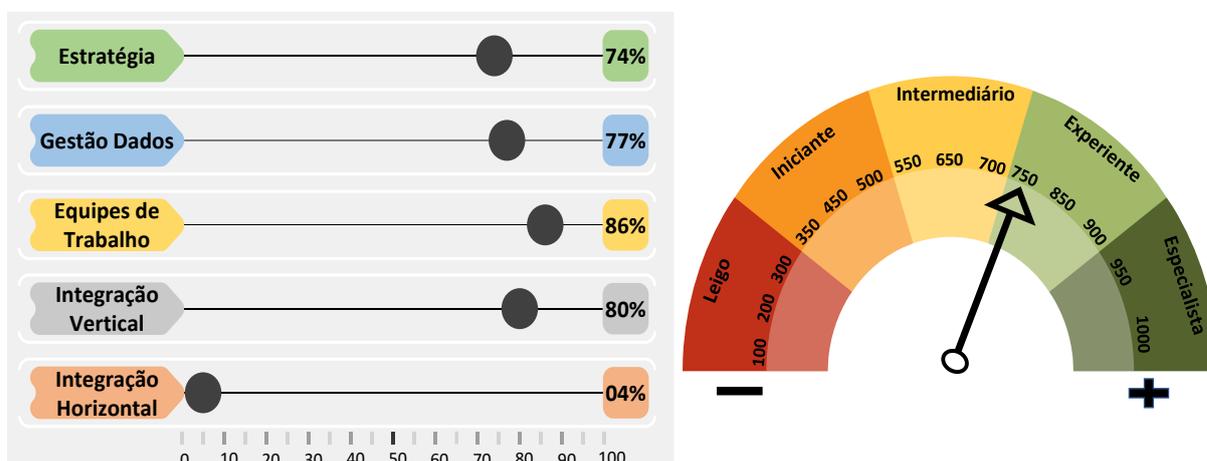
Dimensão e Itens de Avaliação	Pontuação	% Obtido	Pontuação obtida
1. Estratégia	150		111
1.1. Grau de implementação da estratégia	50	75%	37
1.2. Definição de indicadores	50	75%	37
1.3. Investimentos	50	75%	37

Dimensão e Itens de Avaliação	Pontuação	% Obtido	Pontuação obtida
2. Gestão de Dados	320		245
2.1. Coleta de dados	110	87%	95
2.2. Armazenamento e proteção de dados	100	62%	62
2.3. Análise de dados	110	80%	88
3. Equipes de Trabalho	160		137
3.1. Liderança	40	87%	34
3.2. Competências	40	58%	23
3.3. Treinamento	40	100%	40
3.4. Cultura	40	100%	40
4. Integração Vertical	292		235
4.1. Equipamentos	73	100%	73
4.2. Rede de dados	73	75%	54
4.3. Automação	73	75%	54
4.4. Integração	73	75%	54
5. Integração Horizontal	78		3
5.1. Integração Horizontal	78	5%	3
Total Geral de Pontos	1000		731

Fonte: confeccionado pelo autor

A figura 6.1 apresenta as porcentagens da pontuação obtidas pela empresa “A” nas dimensões abordadas na avaliação, bem como sua classificação de maturidade no modelo proposto.

Figura 6.1: Pontuação obtida pela empresa A



Fonte: confeccionado pelo autor

- **Dimensão Estratégia**

O Grupo na qual a unidade pertence, possui uma equipe corporativa de gestão de processos empresariais, que tem a função de definir as melhores práticas e ferramentas de gestão de processos e melhorar a performance produtiva. Esta equipe definiu uma série de indicadores de performance de produção, que devem ser acompanhados diariamente por todas

as áreas produtivas, bem como serem disponibilizados a todos os envolvidos, desde líderes de turnos a gerentes e diretores, de forma eletrônica e online.

Para gerar e monitorar estes indicadores, foram realizados investimentos em ferramentas tecnológicas, como software conhecido internamente como simulador, capaz de simular e acompanhar a produção de forma online, softwares de acompanhamento de manutenção dos equipamentos online, novas tecnologias de automação de processos, como controle avançado de processos utilizando a Lógica Fuzzy, entre outras ferramentas. São feitos estudos e planejamentos de melhorias, com alocação de investimentos financeiros, e elaborado um plano estratégico plurianual, que contempla todas as unidades do grupo. A diretoria da empresa participa ativamente do acompanhamento das metas e dos resultados dos investimentos.

- **Dimensão Gestão de Dados**

Como a equipe corporativa já tem definido os principais indicadores de desempenho da produção a serem monitorados e acompanhados, como rendimentos e perdas de processos, estes são acompanhados diariamente, e possuem uma padronização das informações, também desenvolvida pela equipe corporativa. A empresa está implementando em todas as áreas a Gestão de Rotina, onde foram definidos indicadores padrões e que devem ser gerados e monitorados diariamente, e devem ser replicados a direção da unidade.

O simulador, como é conhecido internamente, faz a integração dos dados dos processos, desde a entrada da matéria prima na unidade (controle da qualidade), bem como os dados dos demais laboratórios de monitoramento de processo de produção e ainda integra os dados monitorados por sensores instalados na planta, controlados através de sistemas SCADA - *Supervisory Control and Data Acquisition*, chamados de supervisórios.

Através da integração dos dados, o simulador realiza análises em tempo real, e gera indicadores de processos, com alarmes/avisos aos operadores em casos de distorções, indicando a necessidade de tomada de ação. Estes indicadores são acompanhados tanto pela operação, como pelo gerente industrial, pela equipe corporativa e pela direção da unidade.

As análises dos dados já estão na fase preditiva, ou seja, fazem comparativos entre os indicadores de desempenho, como por exemplo comparar a temperatura, pressão do vapor com a umidade do bagaço da cana-de-açúcar, para prever problemas de processo e acompanhar a curva de tendência dos indicadores. Caso haja intervenção no processo os dados ficam registrados no sistema.

O software de simulação e planejamento está sendo implementado por etapas, e está no segundo ano de uso efetivo, de forma que o primeiro foi de adaptação e nos próximos anos a

empresa deseja incrementar novas ferramentas de análise de dados para sustentar o planejamento das safras seguintes.

O software está instalado em um servidor na área industrial, onde os dados são armazenados de forma online. Este servidor funciona em paralelo com outro servidor, sincronizando os dados entre ambos, de forma que caso haja problema em um dos servidores o outro assume e mantém o serviço funcionando. A empresa possui um equipamento chamado historiador, que mantém o histórico dos dados dos processos armazenados e protegidos.

Para garantir a segurança dos dados foram implementados requisitos de segurança de acesso aos dados do servidor, de forma que somente pessoas autorizadas acessem os dados. A área de tecnologia da informação da empresa implementou ferramentas de bloqueio a acessos remotos, bem como ferramentas de backup. A empresa não faz uso da nuvem para armazenamento e processamento de dados.

Os operadores possuem autonomia para tomar decisões referentes aos processos e atuar em caso de variações nos indicadores de processos. Mas, em ferramentas de proteção dos equipamentos ou manobras mais complexas necessita-se da aprovação e acompanhamento do Gerente Industrial.

- **Dimensão Integração Vertical**

A unidade possui uma infraestrutura de equipamentos produtivos monitorada e controlada de forma automatizada, através de sensores e atuadores, e se comunica através de uma rede industrial que integra as áreas produtivas. Cada setor produtivo possui um sistema supervisório (SCADA), que monitora e gerencia sensores, atuadores, e outros aplicativos de controle e monitoramento de processos. Estes supervisórios se integram ao software de simulação e gestão da produção, que gera os indicadores de processos da planta. Estas informações, do simulador integrado aos demais supervisórios, estão disponíveis para os setores de gestão de processos, para a equipe corporativa e para a diretoria da unidade.

Na unidade, os supervisórios foram instalados em um local único, que recebe o nome de COI – Centro de Operações Integradas, de forma a facilitar a integração entre as áreas produtivas, a operação e a tomada de decisões.

Quando há alguma intercorrência ou variações dos indicadores de processo, ocorre a indicação pelo supervisório, e as ações são tomadas pelos operadores. A unidade desenvolveu uma integração entre diversos indicadores, de áreas distintas, o que torna as ações mais rápidas e mais eficazes.

Esta infraestrutura de automação e gestão não toma decisões de forma autônoma, as ações de intervenção nos processos são realizadas pelos operadores.

A planta possui em torno de 85% de automação dos processos, e os equipamentos que não estão interligados a rede de automação, alguns possuem condições de serem automatizados e assim integrarem a rede e outros não possui esta condição. A infraestrutura de rede de automação está passando por atualizações, devido as novas ferramentas de automação que a empresa tem utilizado.

A empresa faz uso do sistema de gestão SAP, o qual estão disponíveis para a área produtiva os módulos de suprimentos, almoxarifado e comercial. Estas informações são armazenadas no servidor corporativo da unidade, que se integra as demais informações da empresa. Este sistema de gestão, SAP, gerencia todas as unidades do grupo, de forma que é possível realizar comparativos entre as unidades.

- **Dimensão Integração Horizontal**

A empresa não mantém integração com parceiros no ambiente produtivo, bem como não tem incentivado esta prática.

Quanto aos fornecedores de cana-de-açúcar, a empresa mantém um portal onde são apresentadas as informações de qualidade e peso da matéria prima, pois através destas informações os fornecedores podem controlar o valor financeiro a receber pela venda do produto.

A unidade contratou empresas prestadoras de serviços que desenvolvem trabalhos para melhora dos indicadores produtivos, e estes também não têm acesso online dos dados, somente recebem informações impressas sobre o andamento dos trabalhos.

Quanto aos clientes, envia informações da qualidade dos produtos expedidos.

- **Dimensão Equipes de trabalho**

Quanto as lideranças, estão sendo treinadas para adquirirem conhecimentos em relação as novas tecnologias, bem como ao monitoramento integral dos dados. O grupo corporativo desenvolve treinamentos, de forma digital, para os líderes e para os operadores, e oferece reforço técnico para 100% dos operadores na entressafra e mantém um programa de incentivo a novas ideias.

A unidade confeccionou materiais padrão para qualificar seus colaboradores, internamente, e disponibilizam locais na empresa para acesso a treinamentos online, de forma que é possível acessar o treinamento a qualquer momento.

O time corporativo de processos tem promovido um aumento da quantidade de treinamentos técnicos para operadores e lideranças, de forma que a cada safra são feitas atualizações das informações aos colaboradores, para que acompanhem as novas tecnologias implementadas nos processos produtivos.

Com a quantidade de treinamentos, a grande maioria dos colaboradores já tem condições de identificar problemas e tomar ações, mas há casos de operadores que tem mais dificuldades, e estes passam por treinamentos mais frequentes, de forma a construir uma base técnica mais sólida.

Muitos operadores têm procurado, além dos materiais internos, outros materiais técnicos para se desenvolver, bem como um contato maior com o corporativo para desenvolvimento de projetos de melhorias. A empresa disponibilizou um local onde o colaborador pode depositar sua proposta de melhoria de processos, o qual será avaliado pelos gestores, corporativo e diretoria. Sendo aprovado, será transformado em projeto de melhoria, e o resultado da proposta será acompanhado e monitorado, podendo o colaborador receber um valor financeiro pela melhoria do processo ou redução de custos.

6.2.2. Empresa “B”

A avaliação na empresa “B” foi realizada no mês de julho de 2020 e durou aproximadamente 2,0 horas. Participaram das entrevistas, o Gerente de Melhoria Contínua, o Consultor de Tecnologia da Informação e o Gerente Industrial.

Devido a pandemia do COVID-19 não foi permitida visita a unidade, e desta forma as entrevistas foram realizadas de forma virtual, utilizando-se da ferramenta TEAMS.

O Quadro 6.2 apresenta a síntese da pontuação obtida pela empresa “B”.

Quadro 6.2: Síntese da pontuação obtida pela empresa “B”

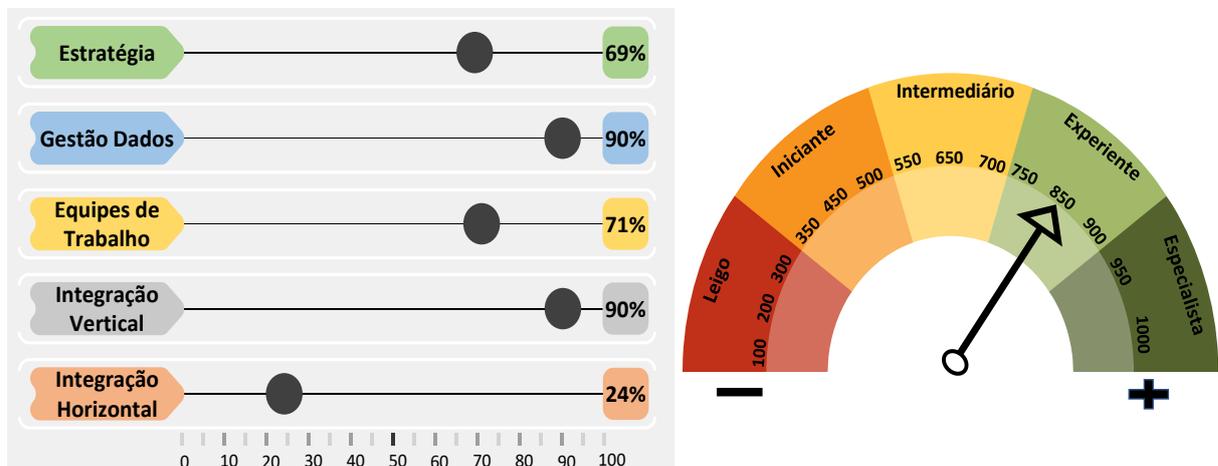
Dimensão e Itens de Avaliação	Pontuação	% Obtido	Pontuação obtida
1. Estratégia	150		103
1.1. Grau de implementação da estratégia	50	58%	29
1.2. Definição de indicadores	50	75%	37
1.3. Investimentos	50	75%	37
2. Gestão de Dados	320		288
2.1. Coleta de dados	110	87%	95
2.2. Armazenamento e proteção de dados	100	100%	100
2.4. Análise de dados	110	85%	93

Dimensão e Itens de Avaliação	Pontuação	% Obtido	Pontuação obtida
3. Equipes de Trabalho	160		114
3.1. Liderança	40	87%	34
3.2. Competências	40	50%	20
3.3. Treinamento	40	75%	30
3.4. Cultura	40	75%	30
4. Integração Vertical	292		264
4.1. Equipamentos	73	62%	45
4.2. Rede de dados	73	100%	73
4.3. Automação	73	100%	73
4.4. Integração	73	100%	73
5. Integração Horizontal	78		19
5.1. Integração Horizontal	78	25%	19
Total Geral de Pontos	1000		788

Fonte: confeccionado pelo autor

A figura 6.2 apresenta as porcentagens da pontuação obtidas pela empresa “B” nas dimensões abordadas na avaliação, bem como sua classificação de maturidade no modelo proposto.

Figura 6.2: Pontuação obtida pela empresa B



Fonte: confeccionado pelo autor

- **Dimensão Estratégia**

A empresa B tem realizado estudos sobre ferramentas de tecnologias que podem melhorar o gerenciamento dos seus padrões técnicos de processos, melhor acompanhamento das variáveis de processos produtivos, e estes têm influenciado as decisões de investimentos na área produtiva.

O Grupo, na qual a empresa B faz parte, possui em seu modelo de governança três comitês de assessoria que dão suporte aos Conselho de Administração. Um destes é o Comitê de Inovações Tecnológicas, que avalia tecnologias e alternativas estratégicas de crescimento, incluindo revisões de produtos/serviços agregando mais valor a companhia.

A empresa tem implementado formalmente seu Plano Diretor de Automação Industrial, que norteia todas as decisões de investimentos na implementação de infraestrutura tecnológica na área industrial. Tem feito investimentos em tecnologias de acompanhamento de variáveis de processos, para melhor acompanhamento dos parâmetros técnicos de processo e do controle estatístico das variáveis. Investiu em uma ferramenta digital que acompanha as distorções dos parâmetros dos processos, através de análises estatísticas de variáveis, em tempo real, o que auxiliado a unidade na tomada de decisões de processos e no planejamento das próximas safras.

- **Dimensão Gestão de Dados**

Na dimensão Gestão de Dados, a empresa tem definido quais são os dados principais e mais importantes dos processos produtivos e estes estão padronizados entre as unidades e nos seus sistemas de gestão informatizados. Estes dados são coletados pelos sistemas de automação implementados na planta industrial.

A empresa possui um servidor de dados específico para armazenamento dos dados dos processos industriais, com ferramentas físicas e virtuais de proteção aos dados. Como proteção física, os acessos são controlados por perfis, ou seja, o acesso a informação será realizado de acordo com o perfil do operador, e como proteções virtuais as ferramentas de proteção contra acessos não autorizados como *firewalls*, que bloqueiam os acessos externos a organização.

Utiliza serviços de nuvem, terceirizada, para armazenamento de dados, tanto da área industrial como da área agrícola. Os dados também são armazenados em historiadores, que armazenam o histórico dos processos produtivos, o que auxilia na análise do comportamento das variáveis e no planejamento das safras futuras.

Os colaboradores podem acessar os dados dos processos que estão controlando, para tomar as decisões referentes as especificações do processo que gerencia, sempre baseados no perfil definido pelos gestores das áreas produtivas.

Para análise dos dados dos processos, utiliza um software, que recebe informações dos processos produtivos, dos supervisórios, dos laboratórios produtivos, e realiza integração e análise destes dados. Estas análises são realizadas em tempo real, o que permite aos gestores dos processos interpretar o comportamento das variáveis, analisar as distorções, baseados no padrão técnico de processo, e tomar as melhores decisões. Esta base de dados, permite aos

gestores industriais interpretar o comportamento atual da planta, fazer comparativos com outros períodos e planejar operações futuras. Os dados da indústria estão sendo cruzados com os dados da área agrícola de forma a promover uma melhor programação de safra na unidade produtora.

- **Dimensão Integração Vertical**

Em relação a Dimensão Integração Vertical, a unidade possui uma infraestrutura de equipamentos produtivos com ferramentas de automação industrial, com capacidade de monitoramento dos processos e controles remotos. Bem como, possui equipamentos mais antigos que não possuem condições de atualização tecnológica e integrar a rede digital da empresa.

Possui uma rede de dados industrial, separada da rede de dados da área administrativa, que monitora e controla os equipamentos industriais produtivos, e que está integrada através dos supervisórios, que foram alocados em um único local, constituindo assim o COI - Centro de Operações Integrados, e este integrado ao sistema de gerenciamento de dados de processos.

A empresa fornecedora do sistema de gerenciamento de dados, desenvolveu gêmeos digitais para o processo da unidade e com estes realiza as simulações necessárias para ajustes e programações dos processos, e para as safras futuras. A empresa tem um setor específico para manter a rede industrial funcionando e a mantém atualizada.

Os processos da planta são controlados e monitorados através dos sistemas de tecnologia da informação e de automação, que já tomam decisões programadas através dos equipamentos que compõem as redes, e decisões mais apuradas são tomadas pelos operadores dos processos, ou seja, os processos da unidade não funcionam de forma autônoma.

Com a implantação do software de gestão de dados, a unidade integra as informações das etapas do processo produtivo (moagem, tratamento, fábrica) em uma base dados, que geram inteligência empresarial e desta forma é possível integrar as informações e analisá-las. Através de ferramentas da tecnologia da informação, como webservices, que são componentes que permitem as aplicações enviar e receber dados através do formato XML, a unidade tem integrado os dados dos processos produtivos com o ERP da empresa. A área produtiva utiliza o ERP, da empresa SAP, para gerenciamento dos processos, como por exemplo de compras e de suprimentos.

- **Dimensão Integração Horizontal**

Na Dimensão Integração Horizontal, a empresa não tem realizado processos de integração de dados com seus clientes e parceiros.

Na área de suprimentos a empresa trabalha com o formato de leilão, onde é mantido um portal onde a unidade apresenta suas necessidades de compra e os fornecedores oferecem propostas de fornecimento. Para ter acesso ao portal os fornecedores necessitam ser cadastrados e aprovados.

Dada a natureza do negócio, os produtores de cana-de-açúcar são estratégicos, desta forma a empresa tem trabalhado para capacitar os produtores rurais, realizando ações nas propriedades ou encontros técnicos. Devido a certificação da unidade na Política Nacional de Biocombustíveis – RenovaBio, a unidade tem buscado fortalecer a adesão de seus fornecedores as diretrizes ambientais estipuladora para o setor sucroenergético. Uma equipe técnica realiza visitas regularmente, indicando oportunidades de melhoria e monitoramento da qualidade do produto.

Para a troca de informações com os fornecedores de matéria prima, a unidade mantém um portal onde são apresentadas as informações financeiras, de produção e de qualidade de matéria prima dos fornecedores da unidade.

- **Dimensão Equipes de Trabalho**

Na Dimensão Equipes de Trabalho, a empresa B possui uma liderança alinhada ao desenvolvimento da empresa, principalmente na implantação de ferramentas que apoiam o aprimoramento do modelo de negócio. As lideranças participam ativamente dos planos de melhorias, e indicam ferramentas de apoio a gestão. A empresa mantém uma política de atração, seleção e desenvolvimento de líderes, a qual garante a empresa gestores engajados quanto aos valores e a cultura da empresa, além de minimizar os riscos quanto a sucessão de posições chaves. A empresa tem desenvolvido programas internos de incentivo a cultura de melhorias de processos e ao desenvolvimento de inovações.

A unidade tem buscado o desenvolvimento das competências de seus colaboradores, e para tal tem utilizado de diversas técnicas, como programas de treinee, realizado em parcerias com instituições especializadas, programas de retenção e desenvolvimento de talentos, programas de formação, para desenvolvimento em áreas específicas e programas de desenvolvimento comportamental. A empresa tem ofertado aos colaboradores um programa de bolsa de estudos, que abrange graduação e pós-graduação

A empresa tem incentivado uma cultura de melhorias e inovação nos negócios e nos processos, inclusive com desenvolvimento de projetos entre as equipes de trabalho, e entre equipes, como por exemplo entre a equipe agrícola e a equipe da indústria. Mas não existem recompensas financeiras oferecidas pela empresa.

6.3. Resultados Globais

A pontuação obtida pelas organizações “A” e “B” revela o grau de implementação dos conceitos e das tecnologias da indústria 4.0 em seus processos produtivos. Desta forma, com base nas faixas de pontuação definidas no modelo proposto, no quadro 6.3 é apresentado o nível de maturidade de cada organização.

Quadro 6.3: Níveis de Maturidade das empresas avaliadas

Faixa			Empresas	
Maturidade	Posição	Pontuação	A	B
5 - Especialista	Alta	951 – 1000		
	Média	901 – 950		
4 - Experiente	Alta	851 – 900		
	Média	751 – 850		788
	Baixa	701 – 750	731	
3 - Intermediário	Alta	651 - 700		
	Média	551 - 650		
	Baixa	501 - 550		
2 – Iniciante	Alta	451 - 500		
	Média	351 - 450		
	Baixa	301 - 350		
1 – Leigo	Alta	201 - 300		
	Média	101 - 200		
	Baixa	0 - 100		

Fonte: confeccionado pelo autor

Com 731 pontos obtidos, a empresa “A” está classificada como Experiente – Baixo, já a empresa “B” com 788 pontos está classificada como Experiente Médio. No item Estratégia, apesar de ambas as empresas possuírem uma estratégia bem definida, a empresa “A” obteve uma maior porcentagem de pontos em relação a empresa “B”, em relação ao monitoramento da implementação das estratégias, conforme pode ser visto na figura 6.3.

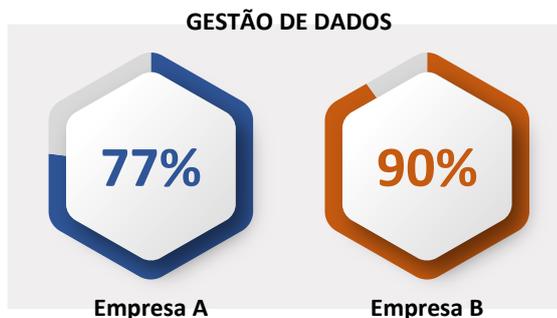
Figura 6.3: Porcentagem de pontos referentes a dimensão Estratégia



Fonte: confeccionado pelo autor

Já no item Gestão de Dados, a empresa “B” possui uma certa vantagem em relação a empresa “A”, pois a primeira já tem feito investimentos em nuvem e está trabalhando mais a análise de dados em relação a segunda, conforme pode ser visto na figura 6.4.

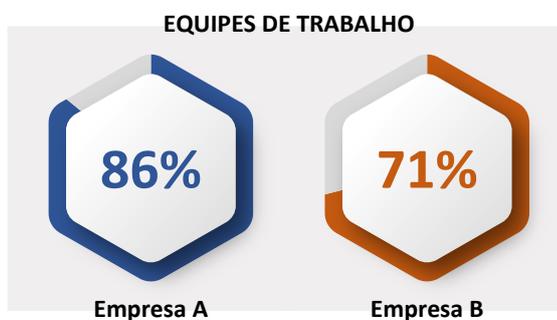
Figura 6.4: Porcentagem de pontos referentes a dimensão Gestão de Dados



Fonte: confeccionado pelo autor

Na dimensão Equipes de Trabalho a empresa “A” tem realizado mais investimentos no desenvolvimento de competências dos colaboradores e desenvolvido mais treinamentos internos em comparação a empresa “B”, conforme apresentado na figura 6.5.

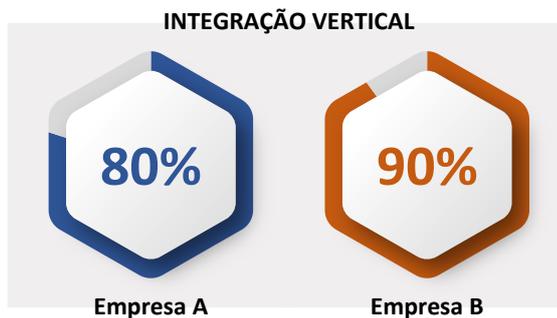
Figura 6.5: Porcentagem de pontos referentes a dimensão Equipes de Trabalho



Fonte: confeccionado pelo autor

No quesito Integração Vertical a empresa “B” tem obtido melhores resultados que a empresa “A”, pois tem realizado melhor integração dos dados dos processos produtivos com os demais sistemas da empresa, conforme pode ser visto na figura 6.6.

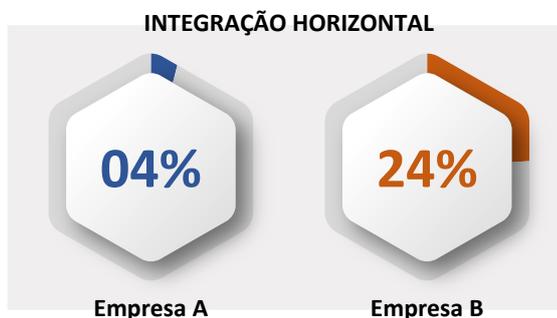
Figura 6.6: Porcentagem de pontos referentes a dimensão Integração Vertical



Fonte: confeccionado pelo autor

Na dimensão Integração Horizontal, é possível notar que ambas as companhias não têm praticado este tipo de integração com seus clientes e parceiros de negócios. A empresa “B”, tem obtido uma pequena vantagem pois tem incentivado seus parceiros nesta prática e tem buscado quebrar as barreiras internamente. A figura 6.7 apresenta a porcentagem da pontuação das empresas neste quesito.

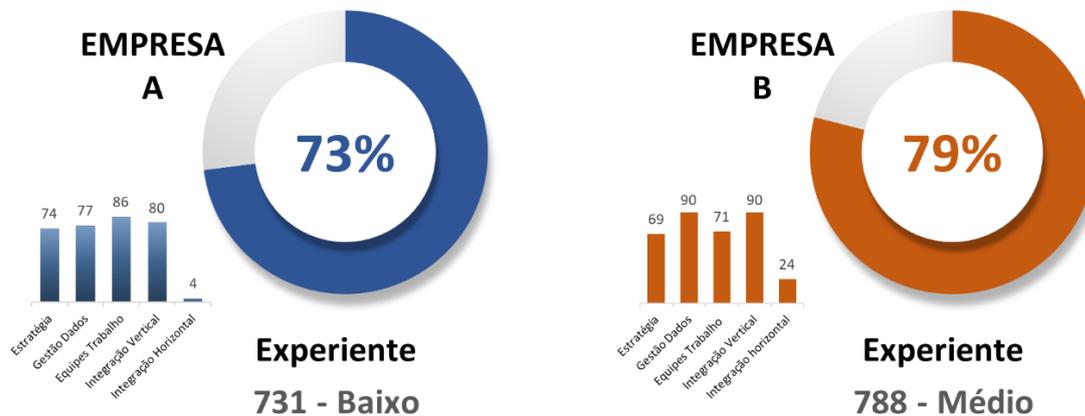
Figura 6.7: Porcentagem de pontos referentes a dimensão Integração Horizontal



Fonte: confeccionado pelo autor

Na figura 6.8 apresenta-se o resumo geral das porcentagens de pontuação de ambas as empresas avaliadas, de forma que é possível verificar que a empresa “A” obteve 73% dos pontos possíveis, ou seja, 731 pontos de 1.000, foi classificada como uma empresa Experiente. Já a empresa “B” obteve 79% dos pontos, 788 dos 1.000 possíveis e também foi classificada como uma empresa Experiente.

Figura 6.8: Percentagens totais obtidas pelas empresas avaliadas



Fonte: confeccionado pelo autor

Com base nos resultados da avaliação das empresas “A” e “B”, os principais obstáculos para alcançar um nível de maturidade maior na Dimensão Estratégia são a falta de uma estratégia abrangente para promover a implementação de tecnologias, a falta de maturidade ou falta de conhecimento por parte dos gestores e a falta de recursos financeiros para investimento em tecnologias e em outras necessidades da empresa.

Já na Dimensão Gestão de Dados os principais obstáculos são a capacidade de investimento em equipamentos de coleta de dados, de segurança da informação e de processamento e análise dos dados. Ainda, os níveis de conhecimentos e de maturidade dos times de trabalho e o planejamento da melhor forma de investir e implementar as atividades de coleta, segurança e análise dos dados.

Na dimensão Integração Vertical os obstáculos são as necessidades de investimentos em infraestrutura técnica, a infraestrutura de equipamentos da empresa, que muitas vezes são antigos, a priorização e a padronização dos trabalhos.

Para a Integração Horizontal os obstáculos são a confiança nos parceiros, a segurança dos dados e a necessidade de investimentos constantes na atualização dos sistemas de proteção da informação.

E quanto a Dimensão Equipes de Trabalho os principais obstáculos são as barreiras para qualificação de colaboradores, a mudança da cultura, a quebra de paradigmas e os investimentos em qualificações constantes.

6.4. Análises e Discussões

Os conceitos e tecnologias da Indústria 4.0, bem como as mudanças abordados pela quarta revolução industrial são de grande relevância para o setor produtivo, bem como para

outras áreas de negócios. E podem, a médio e longo prazo, alterar significativamente a forma das empresas atenderem seus mercados, criar mais valor aos seus clientes e melhorar o relacionamento com seus fornecedores e parceiros. Novos modelos de negócios, novos tipos de clientes, novas profissões podem surgir devido aos avanços de pesquisas em hardwares, softwares, equipamentos, e os impactos destes, e de outros, na cadeia de valor empresarial são enormes, gerando profundas mudanças nos ambientes de negócios.

As tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0, como os sistemas cyber-físicos, internet das coisas, nuvem, big data, integração vertical e horizontal, segurança da informação, e suas aplicações estão amadurecendo e já suportam diversas aplicações empresariais e industriais. Além da maturidade das tecnologias, também há a evolução de novos conceitos empresariais, como digitalização de processos, conectividade entre equipamentos, e descentralização de decisões apoiadas por sistemas autônomos, como a inteligência artificial e capacidade analítica de dados em tempo real.

Mas ainda existem muitos desafios associados ao desenvolvimento e absorção destas capacidades da indústria 4.0 para as empresas, como a adaptação dos processos produtivos a esta nova realidade, aumentar a capacidade analítica dos colaboradores, a reorganização dos ambientes, estruturação de equipes multidisciplinares, adaptação de equipamentos e sistemas, entre outros. Alguns desafios são amplificados, levando-se em conta a capacidade de investimentos das empresas, a definição de um plano estratégico, a forma de fazer negócios e a implementação de novos tipos de produtos e/ou serviços.

O setor sucroenergético tem características particulares e requer soluções específicas, como a integração das informações entre os diferentes elos da cadeia produtiva, que vão desde o campo até a planta industrial e a administração da empresa. Na integração do campo com a indústria, sistemas de rastreamento e monitoramento de frotas agrícolas e de transportes podem gerar bons ganhos operacionais e logísticos. No ambiente industrial, diferentes tecnologias como a automação e sensoriamento, monitoramento e gestão de variáveis de processos e manutenção preditiva tem trazido diversos benefícios e evoluções para as empresas e seus colaboradores.

Dois grandes avanços são percebidos no setor sucroenergético, a mecanização e o uso de dados de sistemas georreferenciados no campo, que melhoram as condições de trabalho, de produtividade e de proteção ao canavial, e a digitalização e o uso de dados coletados pelos sensores, redes de computadores e de automação, que levam ao desenvolvimento de sistemas preditivos e prescritivos.

Através da pesquisa foi possível perceber que as empresas do setor sucroenergético estão atentas a Indústria 4.0 e já estão utilizando algumas das tecnologias habilitadoras, e estão desenvolvendo investimentos na implementação de novos projetos. Também, foi possível perceber que não utilizam o termo Indústria 4.0 formalmente, mas estão se preocupando em confeccionar estratégias empresariais para implementar tecnologias nos processos produtivos e melhorar as eficiências operacionais, tanto na indústria quanto no campo.

A grande maioria da infraestrutura de equipamentos possui condições para operar com controles automatizados, operando com sensores e atuadores, e estão conectados a um sistema de gerenciamento central, conhecido como COI – Centro de Operações Integradas. Os sistemas de automação implementado no processo produtivo são capazes de controlar grande número de variáveis de processos, como pressão, vazão, temperatura, mas não são capazes de autogerir a produção e dependem de supervisão humana para a tomada de decisões.

Os processos produtivos estão compartilhando informações e desenvolvendo inteligência empresarial, inclusive a nível de gerência e diretoria. Pela grande quantidade de dados gerados nos processos produtivos, verifica-se a utilização de serviços de nuvem, para armazenamento e gestão destes, bem como integrá-los com as demais empresas pertencentes aos grupos empresariais. Os servidores de dados da área empresarial e da área administrativa são distintos, e os dados destas áreas são integrados através de ferramentas de tecnologia da informação.

Os dados dos processos produtivos estão sendo coletados, protegidos, e utilizados por ferramentas de software para gerar simulações de processos, programação e controle de produção e desenvolvimento e acompanhamento de indicadores de desempenho. Estes indicadores estão sendo acompanhados por operadores, gestores de processos e por gestores das unidades.

Os colaboradores ainda não possuem completamente as competências necessárias para atender aos requisitos da Indústria 4.0, mas as empresas estão investindo em qualificação e desenvolvimento dos colaboradores.

Através do levantamento bibliográfico foi possível perceber que as unidades produtoras estão desenvolvendo, através de parcerias, novos produtos, como bioplástico, biogás, entre outros, e que estes podem proporcionar novas receitas as empresas. Também, através de parcerias com empresas, estão desenvolvendo novas ferramentas de coleta e de gestão de dados, bem como novas ferramentas de tecnologia da informação, baseados nos modelos de negócio, estão sendo oferecido por empresas especializadas neste setor.

7. CONCLUSÕES

Nesta seção são apresentadas algumas conclusões acerca do desenvolvimento e da aplicação do modelo de avaliação do nível de maturidade, o qual foi desenvolvido a partir da revisão da literatura e sua aplicação prática, tendo como objetivo a avaliação de empresas do setor sucroenergético.

7.1. Atendimento aos objetivos

Considerando que o objetivo geral deste trabalho constitui a proposta de um modelo de avaliação de maturidade do grau de implementação dos conceitos e tecnologias da Indústria 4.0 para a área indústria do setor sucroenergético, baseado em modelos existentes na literatura, pode-se dizer que os resultados obtidos pelos estudos de casos foram capazes de comprovar que o modelo proposto foi concretizado. A partir dos resultados obtidos através da pesquisa empírica, foram feitas análises descritivas, que permitiram análises comparativas entre as empresas, e que é possível concluir a aplicação dos conceitos e tecnologias da Indústria 4.0 na área industrial de unidades do setor sucroenergético.

Como afirmam O'Donovan *et al.* (2016), existem muitos desafios associados ao desenvolvimento de capacidades analíticas industriais, incluindo o gerenciamento de tecnologias e plataformas heterogêneas, formação de equipes multidisciplinares, capacitações, entre outros. Alguns desafios são amplificados quando não existem métodos para medir o nível de capacidade atual, e identificar estrategicamente as áreas que necessitam de melhorias.

O modelo proposto mostra que a implantação da Indústria 4.0 em empresas do setor sucroenergético exige uma visão holística, incluindo orientação estratégica, o desenvolvimento de novas competências nos colaboradores, a adaptação do modelo de negócio pelo desenvolvimento de novas funcionalidades, além da implementação de novas ferramentas de tecnologia da produção, tecnologia de automação e tecnologia da informação.

Contudo, o objetivo geral do estudo emana de duas questões chaves: (i) como os processos industriais do setor sucroenergético estão planejando ou implementando os avanços tecnológicos proporcionados pela Indústria 4.0; (ii) como pode ser avaliada a maturidade da implementação das tecnologias da Indústria 4.0 nos processos industriais do setor sucroenergético, considerando os gargalos tecnológicos, gerenciais e estratégicos.

Respondendo as questões, de acordo com a pesquisa de campo foi possível perceber que as unidades do setor fazem uso de sensores e atuadores, implementados no controle dos processos produtivos, que estão instalados em seus equipamentos através de uma infraestrutura de automação industrial, e que são capazes de monitorar as variáveis de processos e realizar

operações de controles e proteção de processos e de equipamentos. Neste caso, pode-se concluir que faz uso da Internet Industrial das Coisas. Na área agrícola, que não foi objeto deste estudo, foi possível perceber a utilização de sensores em equipamentos agrícolas, que monitoram os processos de colheita e transporte da matéria-prima, e através destes é possível monitorar diversas variáveis referentes a esta área. Ainda, com as informações monitoradas no campo, será possível integrá-las com as informações da indústria e melhorar a forma gerenciamento da planta.

Os dados coletados pelos sensores são monitorados através dos Centros de Operação, comunicando-se através das redes industriais. Estes dados são compartilhados entre os setores produtivos e gerenciais, são integrados aos sistemas de gerenciamento da empresa, e são fontes de informações para gerenciamento da planta, configurando assim a Integração Vertical. Já a Integração Horizontal, está em amadurecimento no setor sucroenergético.

Para proteger os dados dos processos, bem como a rede industrial e manter a segurança da planta, as unidades implementaram servidores dedicados a área industrial, ferramentas de tecnologia da informação para proteção de acesso aos dados, sejam internamente ou remoto e equipamentos para armazenar e proteger tais dados. Configurando desta forma a utilização da Segurança Digital. Ainda, os dados são armazenados em ferramentas de nuvens, terceirizadas, para a proteção, comunicação entre unidades e para utilização destes para gerar inteligência empresarial. Conformando assim a utilização da Computação em Nuvem, utilizada para proteção dos dados e integração entre unidades dos grupos empresariais.

As unidades produtoras estão implementando, já a algum tempo, um modelo de *software* capaz de fazer o planejamento industrial, simulações de produção através da utilização de ferramentas de cópias digitais. Esta ferramenta integra as informações dos sistemas SCADA, e de outros sistemas, realiza o tratamento dos dados e gera indicadores de desempenho e acompanhamento da produção. Configurando a utilização de Sistemas Cyber-Físicos e Big Data e Análise de dados.

Através do modelo desenvolvido e validado foi possível perceber que as tecnologias já estão sendo utilizadas no setor sucroenergético. E segundo informações dos entrevistados, empresas fornecedoras de equipamentos de automação já estão desenvolvendo testes com ferramentas de Inteligência Artificial para a utilização neste setor. Bem como a utilização da Realidade Virtual no desenvolvimento dos supervisórios, que são softwares que acompanham em tempo integral a operações dos equipamentos.

Os gargalos percebidos durante a pesquisa são a qualidade da mão de obra, que ainda não possuem as qualificações necessárias para a realidade da Indústria 4.0, mas que estão sendo

preparadas continuamente. Outro fator, é a capacidade de investimento financeiro das empresas deste setor em ferramentas relacionadas a Indústria 4.0. Como são empresas de grande porte, os investimentos geralmente são altos e há a necessidade de preparo de colaboradores para operar tais ferramentas.

Com base no resultado obtido, o objetivo principal foi alcançado, visto que o trabalho de campo resultou em uma análise da aplicação das tecnologias habilitadoras nas unidades produtoras do setor sucroenergético, e através desta foi possível analisar o seu nível de maturidade. Através do modelo proposto foi possível coletar e analisar informações e propor uma pontuação pertinente ao seu nível de maturidade, para cada dimensão e para a empresa analisada.

Através do levantamento bibliográfico e da atividade de campo, foi possível perceber que a Indústria 4.0 produzirá grandes impactos, que irão muito além dos processos produtivos e transformará a forma de se fazer negócios. Para que estas mudanças aconteçam será necessário a criação de novos modelos de educação e treinamento, para que os trabalhadores adquiram novas competências, investimentos em tecnologias no ambiente produtivo, aperfeiçoamento da legislação empresarial, entre outros. Desta forma, será possível entender a necessidade de consumidores, atendê-lo de forma exclusiva, aumentar a produtividade, reduzir custos e acrescentar valor a cadeia produtiva.

7.2. Limitações e sugestões para pesquisas futuras

A pesquisa empírica limitou-se a uma pequena quantidade de empresas, e a uma área específica, o que reflete as percepções dos indivíduos envolvidos nas mesmas, e desta forma os resultados apresentados neste trabalho não tem a pretensão de generalização.

Sendo assim, novas pesquisas poderão colaborar com as informações desta pesquisa, como envolver um número maior de casos e de profissionais, incluir a área agrícola na pesquisa, visto que diversas tecnologias estão sendo desenvolvidas para esta área e analisar a integração entre elas.

Ainda, novos métodos de pesquisas poderão corroborar para o detalhamento dos resultados, como *survey* para captar a percepção de profissionais de uma quantidade maior de empresas, ou ainda a utilização de estudo de caso único, aprofundando-se no estudo de uma unidade produtiva, analisando com detalhes todas as áreas da empresa.

Baseando-se no aprendizado adquirido durante a realização do trabalho, torna-se possível indicar como sugestões a extensão do tema, que poderão ser futuramente explorados.

Como a área agrícola é parte fundamental para o bom andamento da área produtiva, uma sugestão é a análise das ferramentas tecnológicas utilizadas no campo, e a integração dos dados do campo com a área industrial, de forma que com a integração dos dados de ambas as áreas seja possível melhorar a performance produtiva.

Outra sugestão, analisar a contribuição das tecnologias implementadas nas áreas produtivas para os resultados operacionais das empresas. Como o controle das variáveis de processo, proporcionados pelas tecnologias, foi possível melhorar o rendimento produtivo, possibilitou um melhor controle de custos operacionais, e este fato tem refletido no fluxo de caixa das empresas.

Ainda, em relação a tecnologia, que tem proporcionado uma melhor compreensão das diversas variáveis de processo, pode-se analisar a possibilidade da implementação de ferramentas de inteligência artificial, para analisar os padrões dos dados e propor melhores combinações físico/química, e desta forma melhorar o rendimento produtivo e a qualidade dos produtos.

Assim, espera-se que este trabalho possa servir de guia para a realização de novos estudos e possa contribuir no direcionamento de investimentos localizados, contribuindo desta forma, para a melhor gestão de recursos e melhor rendimento dos processos produtivos do setor sucroenergético.

REFERÊNCIAS

ACATECH – National Academy of Science and Engineering, German National Academy of Sciences Leopoldina, Union of the German Academies of Sciences and Humanities; **Additive Manufacturing**, 2017.

ADOLPHS, P; EPPLE, U. **Reference Architecture Model Industrie 4.0 (RAMI4.0)**. VDI/VDE Society Measurement and Automatic Control, ZVEI Mirror Committee on Reference Architecture, Status Report, (2015).

ALAM, K. M.; EL SADDIK, A. **C2PS: A Digital Twin Architecture Reference Model for the Cloud-Based Cyber-Physical Systems**, Multimedia Computing Research Laboratory, University of Ottawa – Canada, 2017.

ALAYA, M. B.; BANOUAR, Y.; MONTEIL, T.; CHASSOT, C.; DRIRA, K. **OM2M: Extensible ETSI-compliant M2M service platform with self-configuration capability**. Procedia Computer Science 32, 1079 – 1086, 2014.

ALVES, L. C. M.; MOREIRA, J. **Gerenciamento da Política da Segurança da Informação**. T.I.S., São Carlos, v. 1, n. 2, p. 130-137, 2012.

ANP – Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **RenovaBio**. Disponível em <http://www.anp.gov.br/biocombustiveis/renovabio>, acesso em 15 ago. 2019.

BECHTHOLD, L.; FISCHER, V.; HAINZLMAIER, A.; HUGENROTH, D.; IVANOVA, L.; KROTH, K.; RÖMER, B.; SIKORSKA, E.; SITZMANN, V. **3D Printing - A Qualitative Assessment of Applications, Recent Trends and the Technology's Future Potential**, CDTM - Studien zum deutschen Innovations system, Nr. 17, 2015.

BECKER, J.; KNACKSTEDT, R.; POPPELBUB, J. **Developing Maturity Models for IT Management – A Procedure Model and its Application**, Business & Information Systems Engineering, 2009.

BIGATON, A.; MORAES, J. M. M.; SILVA, H. J. T.; ROSA, J. H. M. **Evolução de indicadores industriais e custos de produção do setor sucroenergético**. Revista iPecege 4(2):77-81, 2018.

BORGES, F. H.; DALCOL, P. R. T. **Indústrias de Processo: Comparações e Caracterizações**. XXII Encontro Nacional de Engenharia de Produção, Curitiba, 2002.

BRASIL. **LEI 13.576, DE 26.12.2017. Dispõe sobre a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio) e dá outras providências**. Poder Executivo, Brasília, DF, 26 dez. 2017.

BRASIL. **LEI 13.709, DE 14.08.2018. Dispõe sobre a Lei Geral de Proteção de Dados – LGPD**. Poder Executivo, Brasília, DF, 14 ago. 2018.

BRYMAN, A. **Research methods and organization studies**. London: Unwin Hyman, 1989.

BUAINAIN, A.M.; BATALHA, M.O. **Cadeia produtiva da agroenergia**. Série Agronegócios (vol.3). IICA e MAPA/SPA, 112p. 2007

CHASE, R. B.; JACOBS, F. R.; AQUILANO, N. J. **Administração da Produção para a Vantagem Competitiva**. 10ª edição, Porto Alegre: Bookman, 2006.

COHEN, J.; FILIPPIS, I.; WOODBRIDGE, M.; BAUER, D.; HONG, N. C.; JACKSON, M.; BUTCHER, S.; COLLING, D.; DARLINGTON, J.; FUCHS, B.; HARVEY, M. **Rapport: Running Scientific High-Performance Computing Applications on The Cloud**. Phil Trans R Soc A 371:20120073, 2013.

CONAB, **Acompanhamento da Safra Brasileira – Cana-de-Açúcar – V5 – Safra 2018/19 – Terceiro Levantamento – Dezembro/2018**, 2018.

CONAB, **Acompanhamento da Safra Brasileira – Cana-de-Açúcar – V7 – Safra 2020/21 – Primeiro Levantamento – Maio/2020**, 2020.

CONNER, B. P.; MANOGHARAN, G. P.; MARTOF, A. N.; RODOMSKY, L. M.; RODOMSKY, C. M.; JORDAN, D. C.; LIMPEROS, J. W. **Making sense of 3-D printing: Creating a map of additive manufacturing products and services**. Additive Manufacturing, 64–76, 2014.

COOPER, D. R.; SCHINDLER, P. S. **Métodos de Pesquisa em Administração**. Trad. Luciana de Oliveira Rocha. 7 ed. Porto Alegre: Bookman, 2003

CORBIN, J. M.; STRAUSS, A. **Grounded theory research: Procedures, canons, and evaluative criteria**. Qualitative sociology, v. 13, n. 1, p. 3-21, 1990.

COSTA FILHO, M. V. A.; NORMEY-RICO, J. E. **Modeling, Control and Optimization of Ethanol Fermentation Process**. 18th World Congress the International Federation of Automatic Control - Milano (Italy), 2011.

COSTA, M. L. O. **Setor Sucroalcooleiro**. Editora Método. São Paulo, 2003.

DAL BEM, A. J.; KOIKE, G. H. A; PASSARINI, L. C. **MODELAGEM E SIMULAÇÃO PARA O PROCESSO INDUSTRIAL DE FABRICAÇÃO DE AÇÚCAR E ÁLCOOL**. Pesquisa e Tecnologia Minerva, 33-46. 2003.

DAMIANI, L.; DEMARTINI, M.; GUIZZI, G.; REVETRIA, R.; TONELLI, F. **Augmented and Virtual Reality Applications in Industrial Systems: A Qualitative Review Towards the Industry 4.0 Era**, IFAC Papers Online, 51-11, 624–630, 2018.

DE BRUIN, T.; ROSEMAN, M.; FREEZE, R.; KULKARNI, U. **Understanding the Main Phases of Developing a Maturity Assessment Model**. 16th Australasian Conference on Information Systems, 2005.

Dorow, C. **SAP Industry 4.0 & the Internet of Things Connected Manufacturing in Mill Products Industries**, 2015. Disponível em: < [https:// sap.lianacms.com](https://sap.lianacms.com) >. Acesso em 20.03.2019

DUARTE, A.; LEMOS, S. V.; SALGADO JUNIOR, A; SOUZA JUNIOR, M. A. DONEGÁ, R. **Proposal of stages by controlling the efficiency analysis in sugar and ethanol mills**. FOOD SCIENCE AND TECHNOLOGY, 38, 22 – 30, 2018.

DUARTE, A. C. M. **Proposta de Boas Práticas de Operação que Colaborem para a Eficiência Técnica das Usinas de Açúcar e Etanol**. 153 f. Tese (Doutorado em Administração de Organizações) – Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade de Ribeirão Preto da Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, 2017.

EBERENDU, A. C. **Unstructured Data: an overview of the data of Big Data**. International Journal of Computer Trends and Technology (IJCTT) – Volume 38, Number 1, 2016.

EISENHARDT, K. M. **Building theories from case study research**. Academy of management review, v. 14, n. 4, p. 532-550, 1989.

EVANS, D. **The Internet of Everything How More Relevant and Valuable Connections Will Change the World**, Cisco IBSG, 2012.

FRANSOO, J. C.; RUTTEN, W. G. M. M. **A Typology of Production Control Situations in Process Industries**. Int. J. Oper. Prod. Man., London, v. 14, n. 12, p. 47-57, 1994.

FUNDAÇÃO PARA O PRÊMIO NACIONAL DA QUALIDADE – FPNQ, (2011). **CRITÉRIOS DE EXCELENCIA – Avaliação e Diagnóstico da Gestão Organizacional** – São: FNPQ.

FUNDAÇÃO PARA O PRÊMIO NACIONAL DA QUALIDADE – FPNQ, (2014). **CRITÉRIOS RUMO À EXCELÊNCIA - Avaliação e Diagnóstico da Gestão Organizacional - 7ª EDIÇÃO** – São Paulo: FNPQ

GANDOMI, A.; HAIDER, M. **Beyond the Hype: Big Data Concepts, Methods, and Analytics**, International Journal of Information Management 35, 137–144, 2015.

GARCIA, E.; JIMENEZ, M. A.; SANTOS, P. G.; ARMADA, M. **The Evolution of Robotics Research - From Industrial Robotics to Field and Service Robotics**. IEEE Robotics & Automation Magazine, 2007.

GARCIA, J. R.; LIMA, D. A. L. L.; VIEIRA, A. C. P. **A nova configuração da estrutura produtiva do setor sucroenergético brasileiro: panorama e perspectivas**. Revista de Economia Contemporânea, 19, 162-184, 2015.

GARETTI, M.; FUMAGALLI, L.; NEGRI, E. **ROLE OF ONTOLOGIES FOR CPS IMPLEMENTATION IN MANUFACTURING**. Management and Production Engineering Review. Volume 6, Number 4, pp. 26–32, 2015.

GEISSBAUER, R.; VEDSO, J.; SCHRAUF, S. **Industry 4.0: Building the digital enterprise**. Global Industry 4.0 Survey. PWC, 2016.

GHOBAKHLOO, M. **The Future of Manufacturing Industry: a strategic roadmap toward Industry 4.0**. Journal of Manufacturing Technology Management, Vol. 29, Issue: 6, pp.910-936, 2018.

GIFFI, C. A.; RODRIGUEZ, M. D.; GANGULA, B.; MICHALIK, J.; DE LA RUBIA, T. D.; CARBECK, J.; COTTELEER, M. J. **Advanced Technologies Initiative - Manufacturing & Innovation**. Deloitte and Council on Competitiveness, 2015.

GIL, A. C. **Como Elaborar Projetos de Pesquisa**. 4ª edição, São Paulo: Atlas, 2002.

GOKALP, E.; ŞENER, U.; EREN, P. E. **Development of an Assessment Model for Industry 4.0: Industry 4.0-MM**. RESEARCHGATE Conference Paper, September 2017.

GOKSEN, Y.; CEVIK, E.; AVUNDUK, H. **A Case Analysis on the Focus on the Maturity Models and Information Technologies**. *Procedia Economics and Finance*, 19, 208–216, 2015

HIRSCH, K. H. **Digitization of industrial work: development paths and prospects**. Journal for Labour Market Research, n.49, 2016.

INTERNATIONAL FEDERATION OF ROBOTICS. **The Impact of Robots on Productivity, Employment and Jobs**. Positioning Paper, 2017.

INTERNATIONAL FEDERATION OF ROBOTICS., **Robots and the Workplace of the Future**, Positioning Paper, published by International Federation of Robotics Frankfurt, Germany, 2018.

ISACA. **Virtual Reality and Augmented Reality**. TECH BRIEF, 2017. Disponível em: <<https://www.isaca.org>>. Acesso em 24.05.2019

JANG-JACCARD, J.; NEPAL, S. **A survey of Emerging Threats in Cybersecurity**. Journal of Computer and System Sciences, 80, 973–993, 2014.

KAGERMANN, H.; WAHLSTER, W.; HELBIG, J. **Recommendations for Implementing the Strategic Initiative Industrie 4.0**. Securing the future of German manufacturing industry, 2013.

KARABEGOVIĆ, I.; HUSAK, E. **The Fourth Industrial Revolution and the Role of Industrial Robots: A with Focus on China**. Journal of Engineering and Architecture, Vol. 6, No. 1, pp. 67-75, 2018.

Karamouz, M.; Zahmatkesh, Z.; Saad. T. **Cloud Computing in Urban Flood Disaster Management**. World Environmental and Water Resources Congress: Showcasing the Future, ASCE, 2013.

KHAN, M. A.; UDDIN, M. F.; GUPTA, N. **Seven V's of Big Data - Understanding Big Data to Extract Value**. Conference of the American Society for Engineering Education (ASEE Zone 1), 2014

KIM, E.; YOUM, S. **Machine-to-Machine Platform Architecture for Horizontal Service Integration**. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 79, 2013.

LEE, J.; BAGHERI, B.; KAO, H. **A Cyber-Physical Systems Architecture for Industry 4.0-Based Manufacturing Systems**. Manufacturing Letters 3,18–23; 2015.

LEES, M. J.; CRAWFORD, M.; JANSEN, C. **Towards Industrial Cybersecurity Resilience of Multinational Corporations**. IFAC (International Federation of Automatic Control), Papers OnLine, 756–761, 2018.

LICHTBLAU, K.; STICH, V.; BERTENRATH, R.; BLUM, M., BLEIDER, M.; MILLACK, A.; SCHMITT, K.; SCHMITZ, E; SCHRÖTER, M. **INDUSTRIE 4.0 READINESS**. Aachen, Cologne: *VDMA's IMPULS-Foundation*.

LOPEZ, G.; MOURA, P.; MORENO, J. I.; CAMACHO, J. M. **Multi-Faceted Assessment of a Wireless Communications Infrastructure for the Green Neighborhoods of the Smart Grid**, *Energies*, 7, 3453-3483, 2014

MACEDO, I. C. **Situação Atual e Perspectivas do etanol**. *Estudos Avançados*, V. 21, n. 59, São Paulo, 2007.

MALÝ, I.; SEDLÁČEK, D.; LEITÃO, P. **Augmented Reality Experiments with Industrial Robot in Industry 4.0 Environment**, 14th International Conference on Industrial Informatics (INDIN), 2016

MAJSTOROVIĆ, V.; MAČUŽIĆ, J.; ŠIBALIJA, T.; ŽIVKOVIĆ, S. **Cyber-Physical Manufacturing Systems – Manufacturing Metrology Aspects**, *Proceedings in Manufacturing Systems*, Volume 10, Issue 1, 9–14, 2015

MARQUES, M.; AGOSTINHO, C.; ZACHAREWICZ, G.; GONCALVES, R. **Decentralized decision support for inteligente manufacturing in Industry**. *JAISE - Journal of Ambient Intelligence and Smart Environments*, IOS Press, pp.299-313, 2017.

MARTINS, R. A.; MELLO, C. H. P.; TURRIONI, J. B. **Guia para elaboração de monografia e TCC em Engenharia de Produção**. São Paulo: Atlas, 2013.

MARTINS, R. A. **Abordagens Quantitativa e Qualitativa**. In: Cauchick, P. M. (Org). **Metodologia de Pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações**. 2ª ed. Rio de Janeiro: Elsevier: ABEPRO, 2012

MCIVER, D.; LENGNICK-HALL, M. L.; LENGNICK-HALL. C. A. **A strategic approach to workforce analytics: Integrating science and agility**. Kelley School of Business, Indiana University, 2018.

MELL, P.; GRANCE, T. **The NIST Definition of Cloud Computing**, Recommendations of the National Institute of Standards and Technology, NIST Special Publication 800-145, 2011.

MELLO, C. H. P.; TURRIONI, J. B.; XAVIER, A. F.; CAMPOS, D. F. **Pesquisa-ação na engenharia de produção: proposta de estruturação para sua condução**. *Produção*, v. 22, n.1, p. 1-13, 2012

MCTIC - MINISTÉRIO DA CIENCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES. **PLANO DE AÇÃO DE CT&I PARA TECNOLOGIAS CONVERGENTES E HABILITADORAS – Volume II – Materiais Avançados**. 2019

MMA – MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Efeito Estufa e Aquecimento Global**. 2012. Disponível em: < <https://www.mma.gov.br>>. Acesso em 15.03.2020

MONTGOMERY, D. C. **Introdução ao Controle Estatístico da Qualidade - 7ª ed.** - Rio de Janeiro: LTC, 2016.

MUELLER, J. P.; MASSARON, L. **Algoritmos para leigos**. Rio de Janeiro: Alta Books, 2018.

NAKANO, D. **Métodos de pesquisa adotados na Engenharia de Produção e Gestão de Operações**. In: Cauchick, P. M. (Org.). **Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações**. 2ª ed. Rio de Janeiro: Elsevier: ABEPRO, 2012.

Nanterme, P; Daugherty, P., **Digital Business Era: Stretch Your Boundaries, Accenture Technology Vision 2015**, 2015. Disponível em: < <https://accenture.com>>. Acesso em 25.11.2018

O'DONOVAN, P.; LEAHY, K.; BRUTON, K; O'SULLIVAN, D. T. J. **Big data in manufacturing: a systematic mapping study**, *Journal of Big Data* 2:20, 2015.

O'DONOVAN, P. O., SULLIVAN, D. T. J. O., BRUTON, K. **IAMM: A Maturity Model for Measuring Industrial Analytics Capabilities in Large-scale Manufacturing Facilities**. *International Journal of Prognostics and Health Management*, 7(32), 1–11, 2016.

OVANESSOFF, A.; PLASTINO, E. **Como a inteligência artificial pode acelerar o crescimento da América do Sul**. 2017. Disponível em: < <https://www.accenture.com>>. Acesso em 31.10.2018.

PAIVA, R. P. O.; MORABITO, R. **Um modelo de otimização para o planejamento agregado da produção em usinas de açúcar e álcool**. *Gestão da. Produção*, v. 14, n. 1, p. 25-41, 2007.

PAVANI, D. A. B.; BATALHA, M. O. **Definição de Estratégias para Modelo de Indicadores de Desempenho para Gestão em Usinas de Cana-de-Açúcar**. Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção – ConBRepro, 2017.

PEREIRA, C. N.; SILVEIRA, J. M. F. J. **Análise exploratório da eficiência produtiva nas usinas de cana-de-açúcar na região centro-sul do Brasil**. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, vol.54, 2016.

PETRASSI, D. C.; ARROYO, F. N.; ALMEIDA, D. H.; CHRISTOFORO, A. L.; LAHR, F. A. R. **Development of Alternative Simulator for the Sugar Manufacturing Process**. *Science and Technology*, 54-60, 2017.

PETRASSI, D. C.; ARROYO, F. N.; ALMEIDA, D. H. CHRISTOFORO, A. L.; LAHR F. A. R. **Development of Alternative Simulator for the Sugar Manufacturing Process**. *Science and Technology*, 7, 54-60, 2017.

RIBEIRO, P. R. **A usina de açúcar e sua automação**. 2ª edição. SMAR – Divisão de Açúcar e Álcool, 2003.

ROCKWELL AUTOMATION; **The Connected Enterprise Maturity Model**, 2014. Disponível em: < [https:// http://www.rockwellautomation.com](https://http://www.rockwellautomation.com) >. Acesso em 30.05.2019

RODRIGUES, M. V. **Ações para a Qualidade**; 4ª edição; Rio de Janeiro: Elsevier, 2012

UDOP – União Nacional da Bioenergia – **A História da Cana-de-açúcar - Da Antiguidade aos Dias Atuais**, 2003. Disponível em: < <https://www.udopo.com.br>>. Acesso em 10.10.2020

RODRIGUES, L. D. **A cana-de-açúcar como matéria prima para a produção de biocombustíveis: impactos ambientais e o zoneamento agroecológico como ferramenta para mitigação.** 2010. 64 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Especialização em Análise Ambiental) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2010.

ROUSSELET, G. R. **Análise da Evolução do Sistema de Automação no Processo de Produção de Etanol – Estudo De Caso.** 133 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia em Química da Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2011.

RÜßMANN, M.; LORENZ, M.; GERBERT, P.; WALDNER, M.; JUSTUS, J.; ENGEL, P.; HARNISCH, M. **Industry 4.0: The future of productivity and growth in manufacturing industries.** Boston Consulting Group, 9, 2015.

Disponível em: < <https://www.bcg.com>>. Acesso em 26.09.2018.

SANTUCCI, G. **The Internet of Things: Between the Revolution of the Internet and the Metamorphosis of Objects**, IERC – European Research Cluster on The Internet of Things, 2010

SCHLAEPFER, R. C.; KOCH, M. **Industry 4.0 – Challenges and Solutions for the Digital Transformation and Use of Exponential Technologies.** Deloitte 2015.

Disponível em: <https://www2.deloitte.com>. Acesso em 30.09.2018

SCHUH, G.; ANDERL, R.; GAUSEMEIER, J.; HOMPEL, M. T.; WAHLSTER, W. **Industrie 4.0 Maturity Index - Managing the Digital Transformation of Companies.** ACATECH STUDY, 2017.

SCHUMACHER, A.; EROL, S.; SIHN, W. **A maturity model for assessing Industry 4.0 readiness and maturity of manufacturing enterprises.** Procedia CIRP 52, 161 – 166, 2016.

SCHUSTER, K.; GROß K.; VOSSEN, R.; RICHERT, A.; JESCHKE, S. **Preparing for industry 4.0: collaborative virtual learning environments in Engineering Education.** Automation, Communication and Cybernetics in Science and Engineering. Springer International Publishing, 2016.

SEBRAE - Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas. **Cadeia produtiva da indústria sucroalcooleira – Cenários econômicos e estudos setoriais**, 2008.

SEGARRA, J. I. T., AL JAMMAL, B.; CHAOUCHI, H. **New IoT proximity service based heterogeneous RFID readers collision control**, PSU Research Review, Vol. 1, Issue: 2, pp.127-149, (2017).

SHAO, G.; SHIN, S.; JAIN, S. **Data Analytics Using Simulation for Smart Manufacturing**, Winter Simulation Conference, 2014.

SILVEIRA, J. L.; TUNA, C. E.; LAMAS, W. Q.; SILVA, M. E.; MARTINELLI, V. J. **Thermodynamic and economic analysis of hydrogen production integration in the Brazilian sugar and alcohol industry.** Renewable and Sustainable Energy Reviews 30, 869–876, 2014.

SCHROEDER, G. **Visualising the Digital Twin using Web Services and Augmented Reality**, 14th International Conference on Industrial Informatics (INDIN), 2016.

SOUZA, T. F.; GOMES, C. F. S. **Assessment of Maturity in Project Management: A Bibliometric Study of Main Models**. *Procedia Computer Science*, 55, 92 – 101, 2015.

STALLINGS, W. **Network Security Essentials: Applications and Standards**. Fourth Edition, PEARSON, 2011.

SUAREZ, L. A. P., GEORGIEVA, P.; AZEVEDO, S. F. (2011). **Model Predictive Control Strategies for Batch Sugar Crystallization Process - Advanced Model Predictive Control**, Dr. Tao ZHENG (Ed.), ISBN: 978-953-307-298-2, InTech, 2011.

TOLEDO, J. C.; FERRO, J. R.; TRUZZI, O. M. S. **Indústrias de Processo Contínuo: Novos Rumos para a Organização do Trabalho**. *Rev. Adm. Empres.*, São Paulo, v. 26, n. 1, p. 103-105, jan-mar, 1986.

TORQUATO JR, H.; CALLADO, N. H.; PEDROSA, V. A.; PIMENTEL, I. M. C.; MENEZES, A. C. V.; OMENA, S. P. F. **Demanda de água nos processos industriais de açúcar e álcool**. XIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, 2004.

UKKO, J; NASIRI, M.; SAUNILA, M.; RENTALA, T. **Sustainability strategy as a moderator in the relationship between digital business strategy and financial performance**. *Journal of Cleaner Production*, 236, 2019.

UNICA – União da Indústria de Cana-de-Açúcar. **Balço de Atividades – 2012/2013 a 2018/2019**, 2019.

VALINO, R.; SIMÕES, S. A.; TOMASINI, N. **Indústria 4.0: Digitização como vantagem competitiva no Brasil**. *Pesquisa Global indústria 4.0: Relatório Brasil*, 2016.

VERMESAN, O.; FRIESS, P. **Internet of Things: Converging Technologies for Smart Environments and Integrated Ecosystems**, RIVER PUBLISHERS SERIES IN COMMUNICATIONS, 2013.

WEBER, C.; KONIGSBERGER, J.; KASSNER, L.; MITSCHANG, B. **M2DDM – A Maturity Model for Data-Driven Manufacturing**. The 50th CIRP Conference on Manufacturing Systems. *Procedia CIRP*, 63, 173 – 178, 2017.

YAN, J.; MENG, Y.; LU, L.; GUO, C. **Big-data-driven Based Intelligent Prognostics Scheme in Industry 4.0 Environment**, *Prognostics and System Health Management Conference (PHM-Harbin)*, 2017.

YIN, R. K. **Estudo de Caso – Planejamento e Métodos**. 2ª edição, São Paulo: Bookmman, 2001.

YOU, P.; HUANG, Z. **Towards an Extensible and Secure Cloud Architecture Model for Sensor Information System**, *International Journal of Distributed Sensor Networks*, Volume 2013, Article ID 823418, 2013.

ZANCUL, E. **Análise sobre práticas de Indústria 4.0 em países selecionados**, ABDI -FIESP, 2ª reunião do Grupo de Trabalho para a Indústria 4.0, 2017.

ZHANG, Y.; KWOK, T. **Design and Interacion Interface Using Augmented Reality For Smart Manufacturing**. Procedia Manufacturing 26, 1278–1286, 2018.

ZHOU, K.; LIU, T.; ZHOU, L. **Industry 4.0: Towards Future Industrial Opportunities and Challenges**, 12th International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD), 2015.

ZILIS, S.; CHAM, J.; WANG, R.; SHARMA, A.; WILSON, H. J.; DAUGHERTY, P.; SHUKLA, P.; FRANKEL, S.; KNOESS, C.; HARBOUR, R.; SCEMAMA, S.; SCHRAGE, M. **The Next Analytics Age: Artificial Intelligence**. HARVARD BUSINESS SCHOOL - INSIGHT CENTER COLLECTION, 2016. Disponível em: < <https://hbr.org>>. Acesso em 31.10.2018

APENDICE – QUESTIONÁRIO DE AVALIAÇÃO

QUESTIONÁRIO MESTRADO 2020

Prezado(a):

Esta entrevista faz parte de uma pesquisa de Mestrado do Departamento de Engenharia de Produção da Universidade Federal de São Carlos – UFSCar, que visa desenvolver um **Modelo de Avaliação do Nível de Maturidade das Tecnologias e Conceitos da Indústria 4.0 para Aplicação na Área Industrial do Setor Sucreenergético**. Segundo Rüßmann *et al.* (2015), a Indústria 4.0 está fundamentada em nove tecnologias bases, denominadas tecnologias habilitadoras, i) Robôs Autônomos, ii) Simulação, iii) Integração Horizontal e Vertical, iv) Internet das Coisas (IoT), v) Cyber segurança, vi) Nuvem, vii) Manufatura Aditiva, viii) Realidade Aumentada e ix) *Big Data*.

O tempo estimado de preenchimento do questionário é de aproximadamente 25 minutos por respondente. Os resultados auxiliarão na compreensão de fatores que podem contribuir com a melhoria da gestão dos processos industriais e melhor aproveitar as tecnologias implementadas em tais processos.

Considerando que o tema desta pesquisa se encontra em fase de desenvolvimento, sua participação será de grande importância para a realização deste estudo. Para melhor análise dos dados obtidos, solicitamos que a entrevista seja gravada.

Para cada questão deve-se identificar o percentual que melhor representa a situação atual da empresa em relação a implementação da Indústria 4.0, descrito nos itens do questionário de cada dimensão, sendo:

- 0% - Nenhuma prática apresentada;
- 25% - Algumas práticas apresentadas e evidenciadas
- 50% - Muitas práticas apresentadas e evidenciadas
- 75% - Quase todas as práticas apresentadas e evidenciadas
- 100% - Todas as práticas apresentadas e evidenciadas

No campo justificativa, deve-se descrever o motivo de percentual atribuído na questão, evidenciando a alternativa escolhida, com informações que justifiquem a escolha

Todos os dados informados pela empresa serão tratados com total confidencialidade por mim e pela universidade, e os resultados serão apresentados de forma global, sem a possibilidade de identificação de informações específicas da empresa.

Mestrando: Clésio Aparecido Marinho – clesio.marinho@yahoo.com.br.

Orientador: Prof. Dr. Pedro Carlos Oprime - pedro@dep.ufscar.br.

1. Dados da empresa:

1.1. Nome fantasia: _____

1.2. Cidade onde está instalada: _____

1.3. Produtos desenvolvidos e capacidades:

1.3.1. Capacidade de moagem: _____ ton.

1.3.2. Etanol: _____ m3.

1.3.3. Açúcar: _____ ton. / sc ____ kg.

1.3.4. Geração de energia: _____ kwh.

2. Dados do respondente:

2.1. Nome: _____

2.2. Setor: _____

2.3. Cargo: _____

2.4. Contato: _____

3. A empresa possui alguma iniciativa ligada a Indústria 4.0?

() Sim () Não

Qual/quais:

4. Dimensão - Estratégia:

Dimensão: Estratégia						
Grau de Implementação da Estratégia		0%	25%	50%	75%	100%
1	A empresa tem realizado estudos sobre os conceitos e tecnologias da indústria 4.0 e já tem como avaliar as vantagens destes conceitos e tecnologias? Estes estudos têm influenciado a decisão de investimentos na implementação da Indústria 4.0 na empresa?					
Justificativa:						
Grau de Implementação da Estratégia		0%	25%	50%	75%	100%
2	A empresa já realizou análises do seu estado atual referente ao tema Indústria 4.0? Tem definido qual o estágio ideal de implementação dos conceitos e tecnologias da Indústria 4.0?					
Justificativa:						
3	A empresa possui uma estratégia definida para implementação da Indústria 4.0, desenvolvida com a colaboração dos diversos setores da empresa e com cronograma de implementação?					
Justificativa:						
Definição de Indicadores		0%	25%	50%	75%	100%
4	A empresa desenvolveu um sistema de indicadores integrados aos processos empresariais que realiza o acompanhamento da implantação dos conceitos da Indústria 4.0?					
Justificativa:						

Investimentos		0%	25%	50%	75%	100%
5	A empresa tem realizado investimentos para implementação dos conceitos e tecnologias da Indústria 4.0 nos setores produtivos e tem um plano de investimentos para os próximos anos?					
Justificativa:						

- **Quais os principais obstáculos quanto a incluir na estratégia da empresa a implementação da indústria 4.0?**

✓ _____

✓ _____

✓ _____

✓ _____

5. Dimensão – Gestão de Dados:

Dimensão: Gestão de Dados						
Coleta de Dados		0%	25%	50%	75%	100%
1	A empresa possui um levantamento de quais dados dos processos produtivos são importantes para tornar o processo produtivo mais eficiente? Estes dados possuem algum tipo de padrão, normalização entre os sistemas produtivos e/ou de gestão da empresa?					
Justificativa:						
Coleta de Dados		0%	25%	50%	75%	100%
2	A empresa tem coletado 100% dos dados dos processos produtivos de forma automatizada e em tempo real fazendo uso de sensores, atuadores e sistemas de informação?					
Justificativa:						
Armazenamento e Proteção de dados		0%	25%	50%	75%	100%
3	A empresa desenvolveu e mantém uma base de dados dos processos produtivos, segura, com a finalidade de integração desses dados para melhorar o controle e organização da produção?					
Justificativa:						
4	A empresa possui soluções de segurança completamente implementados para proteção dos dados dos processos produtivos?					
Justificativa:						
5	A empresa tem feito uso de serviços de nuvem (própria/terceirizada) para armazenamento e processamento de dados dos processos produtivos?					
Justificativa:						
6	Os colaboradores dos setores produtivos têm autonomia para acessar e manipular dados dos processos produtivos, utilizá-los para acionar protocolos (segurança, produção) e poderem tomar decisões baseados nestes dados?					
Justificativa:						
Análise de Dados		0%	25%	50%	75%	100%
7	A empresa possui uma infraestrutura madura capaz de analisar dados em tempo real, que processa análises mais simples e alimenta análises mais complexas, de forma a facilitar a tomada de decisões departamental, interdepartamental e gerencial?					
Justificativa:						

8	Qual o nível atual de análise dos dados dos processos produtivos:	0%	25%	50%	75%	100%
8.1	Descritiva: Os dados coletados dos sistemas produtivos são utilizados para descrever a situação atual dos processos e consultar informações importantes para os processos;					
Justificativa:						
8.2	Diagnóstica: Os dados são utilizados para entender os resultados dos processos e compreender os fatores que levaram aos resultados atuais e identificar pontos de melhorias;					
Justificativa:						
8.3	Preditiva: Os dados são utilizados para identificar comportamentos específicos e interpretar tendências em relação a estes comportamentos;					
Justificativa:						
8.4	Prescritiva: Os dados são utilizados para identificação de cenários futuros que poderão levar ao desempenho desejado pela organização.					
Justificativa:						

• **Quais as principais barreiras para implementação da Gestão de Dados?**

- ✓ _____
- ✓ _____
- ✓ _____

6. Dimensão – Integração Vertical:

Dimensão: Integração Vertical						
Equipamentos		0%	25%	50%	75%	100%
1	A empresa possui em sua infraestrutura equipamentos que podem ser controlados de forma automatizada?					
Justificativa:						
Equipamentos		0%	25%	50%	75%	100%
2	Os equipamentos mais antigos podem ser atualizados por tecnologia da informação e comunicação e se integrarem aos demais equipamentos?					
Justificativa:						
Rede de Dados		0%	25%	50%	75%	100%
3	A empresa possui uma rede de integração entre os equipamentos e os setores produtivos, que atende as operações produtivas, com autenticações de segurança, com hardware/software atualizados e responsáveis pelo gerenciamento desta rede?					
Justificativa:						
Automação		0%	25%	50%	75%	100%
4	A empresa possui processos automatizados (gêmeos digitais/ SCADA – Supervisórios) que controla os estados e funções de ativos físicos, integrados por uma infraestrutura de rede, que realiza o controle autônomo dos ativos de manufatura?					
Justificativa:						
Integração		0%	25%	50%	75%	100%
5	A empresa desenvolveu, através da tecnologia da informação e comunicação, a cooperação entre os setores produtivos para geração de uma inteligência empresarial?					
Justificativa:						

6	A empresa utiliza sistemas de informação na empresa (ERP, MRP, SCM, SCADA) e estes sistemas possuem interfaces de integração entre eles?				
Justificativa:					

• **Quais as principais barreiras para implementação da Integração Vertical?**

- ✓ _____
- ✓ _____
- ✓ _____
- ✓ _____
- ✓ _____

7. Dimensão – Integração Horizontal:

Dimensão: Integração Horizontal						
Integração Horizontal		0%	25%	50%	75%	100%
1	A empresa desenvolveu e mantém integração automatizada com clientes ou parceiros de negócios, onde ocorrem troca de informações, coordenação de atividades de entrega de produtos, transportes, manutenções, etc.?					
Justificativa:						
Integração Horizontal		0%	25%	50%	75%	100%
2	A integração com clientes e parceiros permite a criação de indicadores de desempenho, de fornecedores ou de atendimento aos clientes, a rastreabilidade de produtos, o consumo de matérias primas e gerenciamento da cadeia de suprimentos?					
Justificativa:						
3	A empresa tem incentivado seus clientes e fornecedores a desenvolverem ferramentas de integração de dados de forma a melhorar o relacionamento entre as partes e melhorar o desempenho operacional e produtivo?					
Justificativa:						
4	A empresa tem incentivado a cultura da troca de informações com clientes e parceiros de forma a gerenciar seus processos produtivos e compartilhar informações em tempo real?					
Justificativa:						
5	A integração com clientes e parceiros tem um escopo definido de integração e são protegidas contra ataques cibernéticos?					
Justificativa:						

• **Quais as principais barreiras para implementação da Integração Horizontal?**

- ✓ _____
- ✓ _____
- ✓ _____
- ✓ _____
- ✓ _____

8. Dimensão – Equipes de Trabalho:

Dimensão: Equipes de Trabalho						
Liderança		0%	25%	50%	75%	100%
1	A empresa possui em seu quadro de colaboradores uma liderança alinhada a estratégia de implementação dos conceitos da Indústria 4.0. Esta liderança tem consciência de sua responsabilidade por liderar os setores na implantação dos novos modelos de processos e da nova cultura empresarial?					
Justificativa:						
Liderança		0%	25%	50%	75%	100%
2	As lideranças da empresa têm incentivado os colaboradores a desenvolver inovações/melhorias e permitido que entendam os benefícios de participarem ativamente dos processos de mudança na organização?					
Justificativa:						
Competências		0%	25%	50%	75%	100%
3	Os colaboradores da empresa possuem competências técnicas para gerenciar seus processos baseados em dados/informações, identificar falhas, tomar decisões e aproveitar todo o potencial da infraestrutura de equipamentos dos sistemas produtivos?					
Justificativa:						
4	Os colaboradores da empresa possuem habilidades para trabalhar com dados/informações, como realizar análises e tomar decisões baseadas nos resultados destas análises de dados, e tem a consciência das importâncias da proteção desses dados para ele e para a empresa					
Justificativa:						
5	Os colaboradores possuem as atitudes necessárias para atender aos requisitos da Indústria 4.0 e participar do processo de implementação desses conceitos na empresa.					
Justificativa:						
Treinamento		0%	25%	50%	75%	100%
6	A empresa tem formulado e desenvolvido programas de treinamentos constantes aos colaboradores (TI, análise de dados) capazes de desenvolver novas competências para atender às novas necessidades da empresa?					
Justificativa:						
Cultura		0%	25%	50%	75%	100%
7	A empresa tem proporcionado abertura a inovação em seus processos empresariais e adaptar o comportamento dos colaboradores a participarem continuamente deste processo, inclusive com reconhecimentos financeiros?					
Justificativa:						

• **Quais as principais barreiras quanto a qualificação de colaboradores?**

- ✓ _____
- ✓ _____
- ✓ _____
- ✓ _____
- ✓ _____