



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
COLEGIADO DO CURSO DE ENGENHARIA DE CONTROLE
E AUTOMAÇÃO - CECAU**



SÍLVIA GOMES DE MELO

**AS TECNOLOGIAS FACILITADORAS DO PROCESSO DE
CONTROLE DE QUALIDADE NAS INDÚSTRIAS NO CONTEXTO DE
INDÚSTRIA 4.0: UM ESTUDO BIBLIOMÉTRICO**

**MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE CONTROLE E
AUTOMAÇÃO**

Ouro Preto, 2021

SÍLVIA GOMES DE MELO

**AS TECNOLOGIAS FACILITADORAS DO PROCESSO DE
CONTROLE DE QUALIDADE NAS INDÚSTRIAS NO CONTEXTO DE
INDÚSTRIA 4.0: UM ESTUDO BIBLIOMÉTRICO**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheiro de Controle e Automação.

Orientador: Prof. Agnaldo Jose Da Rocha Reis

Coorientador: Prof. Irce Fernandes Gomes Guimarães

**Ouro Preto
Escola de Minas – UFOP
2021**

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

M528t Melo, Silvia Gomes De .

As tecnologias facilitadoras do processo de controle de qualidade nas indústrias no contexto de indústria 4.0 [manuscrito]: um estudo bibliométrico. / Silvia Gomes De Melo. - 2021.

61 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Me. Agnaldo Jose Da Rocha Reis.

Coorientadora: Profa. Ma. Irce Fernandes Gomes Guimarães.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia de Controle e Automação .

1. Indústria - Qualidade. 2. Controle de processo - Métodos estatísticos . 3. Indústria 4.0. 4. Tecnologias. I. Guimarães, Irce Fernandes Gomes. II. Reis, Agnaldo Jose Da Rocha. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 681.5

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



FOLHA DE APROVAÇÃO

Sílvia Gomes de Melo

As Tecnologias Facilitadoras do Processo de Controle de Qualidade nas Indústrias no Contexto de Indústria 4.0: Um Estudo Bibliométrico

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro de Controle e Automação

Aprovada em 30 de abril de 2021

Membros da banca

Doutor - Agnaldo José da Rocha Reis – Orientador - UFOP
Doutora - Irce Fernandes Gomes Guimarães – Coorientadora - UFOP
Doutora - Sílvia Grasiella Moreira Almeida – IFMG/OP
Doutor - André Monteiro Klen – IFMG/OP

Agnaldo José da Rocha Reis, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 05/05/2021.



Documento assinado eletronicamente por **Agnaldo Jose da Rocha Reis, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 05/05/2021, às 11:24, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0167404** e o código CRC **415FD3D0**.

Monografia intitulada AS TECNOLOGIAS FACILITADORAS DO PROCESSO DE CONTROLE DE QUALIDADE NAS INDÚSTRIAS NO CONTEXTO DE INDÚSTRIA 4.0: UM ESTUDO BIBLIOMÉTRICO defendida e aprovada em de de 2021, pela comissão avaliadora constituída pelos professores:

Prof. Agnaldo Jose Da Rocha Reis
Orientador

Prof. Irce Fernandes Gomes Guimarães
Coorientador

Prof. André Monteiro Klen
Convidado

Prof. Sílvia Grasiella Moreira Almeida
Convidado

Ouro Preto, 2021

Dedico este trabalho aos meus colegas de curso que, assim como eu, também buscam pelo seu espaço e lugar no mundo, contribuindo para a comunidade científica de alguma forma.

AGRADECIMENTOS

Antes de tudo, agradeço esta conquista aos meus pais. Ao meu pai que hoje não está mais entre nós mas que foi o maior e melhor torcedor do meu sucesso, e que sempre apostou todas suas fichas em mim, espero ser fonte de orgulho. À minha mãe, minha base de amor e segurança, e que sempre me fez acreditar ser capaz de vencer todas as adversidades. Agradeço também a todo o corpo docente da Universidade Federal de Ouro Preto por serem inspiração e me capacitarem para a vida profissional, em especial, aos meus orientadores, Prof. Agnaldo e Prof^a Irce, por todo apoio e suporte na realização deste trabalho e conclusão de um sonho.

RESUMO

Atualmente é impensável uma indústria ou empresa que não se preocupe em entregar produtos e serviços de qualidade, afinal a concorrência globalizada exige que seja feito isso. No entanto, nem sempre foi assim, a qualidade e seu processo de controle foram moldados de acordo com as ordens produtivas ao longo dos anos. Com a Segunda Guerra Mundial, a urgência em garantir qualidade aos produtos estimulou o surgimento do estudo do Controle Estatístico da Qualidade (CEQ) por meio de técnicas importantes, como os gráficos de controle. Nesse estudo, a Qualidade é amplamente abordada, primeiramente apresentando os conceitos que ela pode assumir, sua evolução histórica ao longo dos anos e os principais estudiosos do tema. Entender como funcionam os processos industriais foi primordial para desenvolver métodos para otimizá-los e aumentar sua produtividade. No entanto, ainda hoje os departamentos de qualidade encontram dificuldades técnicas devido principalmente ao fato de muitas indústrias ainda utilizarem sistemas rudimentares e manuais. Sendo assim, este estudo busca investigar quais são as tecnologias atuais do contexto da Indústria 4.0 e como esses recursos podem tornar os processos industriais ainda mais eficientes e facilitar o controle da qualidade, mais especificamente, o CEQ. A metodologia aplicada para tal objetivo foi um estudo bibliométrico, no qual foi feita uma busca sistemática de artigos científicos em bases de dados importantes. Aliada ao estudo bibliométrico usou-se uma adaptação de uma das técnicas da qualidade, popularmente conhecida como Casa da Qualidade, que faz a relação entre os tópicos da qualidade e as tecnologias da Indústria 4.0 e quais delas são mais importantes para o CEQ. Dentre os resultados encontrados, observou-se que atualmente há pouco estudo sobre essas tecnologias auxiliando especificamente o CEQ e, por esse motivo, o estudo bibliométrico aborda essa relação com outros temas da qualidade, como a inspeção e o controle da qualidade de uma forma geral. Foi possível avaliar nesta pesquisa que os ambientes industriais estão cada vez mais digitalizados devido aos sensores modernos, e a análise da quantidade enorme de dados que eles geram juntamente com a necessidade de tomada de decisões importantes são fatores motores para que tecnologias como a metrologia, *Big Data* e aprendizado de máquina ou *machine learning* auxiliem nas técnicas do CEQ que anteriormente eram executadas de uma forma manual e trabalhosa, e demandando grande conhecimento estatístico.

Palavras-chaves: Qualidade; Controle Estatístico da Qualidade; Indústria 4.0; Tecnologias

ABSTRACT

Currently, an industry or company that does not worry about delivering quality products and services is unthinkable, after all, globalized competition requires it. However, it was not always like this, the quality control were shaped according to the productive orders over the years. With the Second World War, the urgency to guarantee product quality led to the study of Statistical Quality Control (SQC) through its main techniques, such as control charts. In this study, quality is widely approached, first presenting the concepts that it can assume as well as its historical evolution and the main theorists of the theme. Understanding how industrial processes works has become essential to develop methods to optimize them and increase productivity. However, even today, quality departments encounter technical difficulties mainly due to the fact that many industries still use rudimentary and manual systems. Therefore, this study seeks to investigate what are the current technologies in the context of Industry 4.0 and how they can make industrial processes even more efficient and facilitate quality control, more specifically, SQC. The methodology applied for this purpose was a bibliometric study, in which a systematic search of scientific articles was made in important databases. Allied to the bibliometric study, an adaptation of one of the quality techniques, popularly known as the House of Quality, was used, which investigates the relation between the topics of quality and the technologies of Industry 4.0 and which of them are most important for SQC. Among other results found, it was observed that there is not much study on these technologies specifically assisting SQC and, for this reason, the bibliometric study shows the relations with other quality issues, such as inspection and quality control in a general. It was possible to evaluate in this research that industrial environments are increasingly digitalized due to modern sensors, and the analysis of the enormous amount of data that they generate together with the need for important decision making are driving factors for technologies such as metrology, Big Data and machine learning to assist in SQC techniques that were previously performed in a manual and laborious way, and requiring great statistical knowledge.

Key-words: Quality; Statistical quality control; Industry 4.0; technologies

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – O Ciclo PDCA	23
Figura 2 – Trilogia da Qualidade de Juran	24
Figura 3 – Demonstração de um processo de manufatura	26
Figura 4 – Flutuação na quantidade de bobinas montadas por um operador	28
Figura 5 – Distribuição de probabilidade normal	29
Figura 6 – Exemplo de gráfico de controle	30
Figura 7 – Evolução do uso de técnicas da engenharia da qualidade	34
Figura 8 – As fases da Revolução Industrial	35
Figura 9 – Processo de filtragem de artigos	40
Figura 10 – A Casa da Qualidade	42
Figura 11 – Legendas Casa da Qualidade	44
Figura 12 – Artigos selecionados	46
Figura 13 – Continuação - artigos selecionados	47
Figura 14 – Divisão dos artigos baseada nas base de dados em que foram encontrados	48
Figura 15 – Contagem de artigos por ano de publicação	48
Figura 16 – Contagem de artigos por países	49
Figura 17 – Investimentos em pesquisa e desenvolvimento por regiões	49
Figura 18 – Os temas da Qualidade encontrados nos artigos	50
Figura 19 – Os temas da Qualidade encontrados nos artigos	51
Figura 20 – As tecnologias pilares da Indústria 4.0 encontradas nos artigos	52
Figura 21 – Distribuição dos artigos segundo os temas da Indústria 4.0	53
Figura 22 – Casa da Qualidade	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Os 14 pontos de Deming	22
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AQIA	Análise da Qualidade por Inspeção e Amostragem
ASQC	American Society for Quality Control
CCQs	Circuitos de Controle de Qualidade
CEP	Controle Estatístico de Processos
CEQ	Controle Estatístico da Qualidade
CPS	Cyber Physical Systems
CWQC	Company Wide Quality Control
GQT	Gerenciamento da Qualidade Total
IA	Inteligência Artificial
IIoT	Industrial Internet of Things
IoT	Internet of Things
ISO	International Organization for Standardization
JUSE	Japanese Union of Scientists and Engineers
LIC	Limite Inferior de Controle
LSC	Limite Superior de Controle
PDCA	Plan, Do, Check, Act
TQC	Total Quality Control

LISTA DE SÍMBOLOS

\bar{x} Média amostral

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Objetivos gerais e específicos	15
1.2	Relevância do estudo	15
1.3	Estrutura do trabalho	16
2	REVISÃO DA LITERATURA	17
2.1	Definindo Qualidade	17
2.2	As eras da qualidade	18
2.3	Breve histórico dos Gurus da Qualidade e seus estudos pioneiros	20
2.3.1	<i>Walter A. Shewhart</i>	20
2.3.2	<i>William Edwards Deming</i>	20
2.3.3	<i>Joseph M. Juran</i>	23
2.3.4	<i>Armand Feigenbaum e Kaoru Ishikawa</i>	25
2.4	Controle Estatístico da Qualidade	25
2.4.1	<i>Controle Estatístico de Processo - CEP</i>	26
2.4.2	<i>A estatística aplicada à qualidade</i>	28
2.4.3	<i>Gráfico de controle</i>	29
2.4.4	<i>Capacidade de processo</i>	31
2.4.5	<i>Experimentos planejados</i>	32
2.4.6	<i>Avaliação da Qualidade por Inspeção e Amostragem</i>	32
2.5	Indústria 4.0 e seu papel no controle da qualidade	34
3	DESENVOLVIMENTO	39
3.1	Metodologia	39
3.1.1	<i>Escolha das bases de dados</i>	39
3.1.2	<i>Seleção das palavras-chaves</i>	39
3.1.3	<i>Filtros de pesquisa</i>	40
3.1.4	<i>Filtragem de artigos encontrados</i>	40
3.1.5	<i>Quality Function Deployment (QFD)</i>	41
4	RESULTADOS	45
4.1	Os artigos selecionados	45
4.2	Temas da Qualidade abordados nos artigos	50
4.3	Temas da Indústria 4.0 abordados nos artigos	51
4.4	Casa da Qualidade - QFD	53
5	CONCLUSÃO	58

REFERÊNCIAS **59**

1 INTRODUÇÃO

Há muitas décadas atrás a ordem produtiva era baseada na adequação do produto às necessidades do cliente e, portanto, a qualidade era medida por esse parâmetro. Contudo, com a aceleração do ritmo de produção trazida pela Segunda Revolução Industrial (1850-1870), as tarefas repetitivas foram gradualmente substituídas por sistemas automatizados e a nova ordem produtiva baseada na padronização e produção em larga escala. A consequência desse processo de industrialização aliada ao aprimoramento do sistema de transporte e logístico foi a existência de um mercado globalizado, que permitiu ao consumidor adquirir produtos e serviços de qualidade em qualquer lugar do mundo (PALADINI, 2012).

Esse panorama mundial aumentou muito a concorrência entre as empresas e, por isso, entregar produtos com a qualidade requerida pelo cliente final tornou-se um fator imprescindível para a sobrevivência de todos os centros produtivos. Para se ter produtos de qualidade e processos produtivos mais eficientes tornou-se necessário a implantação de uma filosofia da qualidade nas empresas (BASSAN, 2018).

Com o passar dos anos o controle da qualidade passou a ser um foco de estudo muito valorizado no mundo industrial e corporativo e passou a contar com o auxílio de ferramentas de estatística, sistemas de medidas e de normas específicas de padronização. Vários modelos e programas de Gestão da Qualidade foram desenvolvidos e implantados em diferentes partes do mundo, lidando com diferentes realidades produtivas (PALADINI, 2012).

A qualidade passou, então, por uma evolução ao longo dos anos e gradualmente ocupou as localidades fabris, o que foi garantido principalmente pelo auxílio de métodos estatísticos. O controle estatístico da qualidade passou a ter maior importância com a Segunda Guerra Mundial (1939-1945), período em que a confiabilidade dos artigos de guerra precisava ser garantida pelas técnicas de inspeção por amostragem. Segundo Montgomery (2016), o Controle Estatístico da Qualidade (CEQ) abrange técnicas como os gráficos de controle que são amplamente utilizados até hoje, técnicas de inspeção por amostragem e experimentos planejados.

Schwab (2019) aponta que a Terceira Revolução Industrial trouxe com ela o desenvolvimento de alta tecnologia nas indústrias a partir principalmente da informática, telecomunicações, eletrônica e robótica, aumentando a produtividade e os lucros e diminuindo os custos com mão de obra. Alguns estudiosos ainda falam sobre a Quarta Revolução Industrial que está atualmente em curso, que abrange novidades tecnológicas como Inteligência Artificial (IA), internet das coisas (*IoT* na sigla em inglês), *Big Data*, veículos autônomos, nanotecnologia, dentre outros.

Essas tecnologias atuais são de grande importância para o controle da qualidade nas indústrias, e o que se observa hoje é uma transição gradual do trabalho manual e repetitivo para processos automatizados, diminuindo o tempo de resposta nos resultados e na correção dos

eventuais problemas de qualidade.

Neste estudo realiza-se uma apresentação teórica que envolve os principais conceitos da qualidade, sua evolução histórica e os principais estudos da qualidade e suas ferramentas de aplicação nos setores industriais. Como foco da base teórica, o Controle Estatístico da Qualidade (CEQ) é abordado com suas principais técnicas, como os gráficos de controle, as técnicas de inspeção por amostragem e experimentos planejados. Além disso, são apresentadas as principais tecnologias existentes no contexto da Indústria 4.0 e como elas auxiliam na melhoria e controle da qualidade nos ambientes produtivos.

Tendo em vista todo esse embasamento teórico, foi realizado um estudo bibliométrico em três bases de dados com o objetivo de conhecer quais são as tendências nos ambientes industriais e produtivos, fazendo a relação entre as tecnologias pilares da Indústria 4.0 e como elas podem ser facilitadoras do controle e melhoria da qualidade.

1.1 Objetivos gerais e específicos

Objetiva-se com este trabalho desenvolver um estudo bibliométrico que avalie a tendência que existe nas publicações científicas acerca das tecnologias mais utilizadas para controle de qualidade nas indústrias no contexto de indústria 4.0. Este estudo tem como objetivos específicos:

- a) apresentar os principais conceitos da qualidade em um contexto fabril
- b) apresentar um histórico da evolução do estudo da qualidade e seus principais estudos
- c) descrever as principais técnicas estatísticas utilizadas no controle da qualidade
- d) apresentar as principais tecnologias encontradas hoje nas indústrias, no contexto da indústria 4.0

1.2 Relevância do estudo

Ainda hoje, a realidade de muitas indústrias é possuir um departamento de controle de qualidade com sistemas rudimentares, utilizando o controle por meio de papeis e ordens manuais, ou parcialmente automatizados, o que gera muitas falhas operacionais e perdas de qualidade. Sendo assim, este estudo busca abordar as tecnologias existentes hoje no contexto da Indústria 4.0, relacioná-las com o controle da qualidade, expondo as vantagens de otimização e automatização desse processo. Conhecer quais dessas tecnologias tem maior influência no controle da qualidade traz mais subsídios para justificar a importância de se ter pesquisas nesta área.

1.3 Estrutura do trabalho

O trabalho é organizado da seguinte forma: no capítulo 2 é feita a revisão de literatura que apresenta o contexto necessário para o melhor entendimento da pesquisa. No capítulo 3 é explicada a metodologia baseada na investigação por bibliometria e casa da qualidade. No capítulo 4 discute-os resultados encontrados e no capítulo 5 é feita a conclusão.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Definindo Qualidade

A palavra qualidade no dicionário é descrita como "característica particular de um objeto ou indivíduo" ou "natureza ou condição de". Esse conceito, no entanto, é demasiado simplista para definir um tema tão amplo. No contexto industrial e empresarial, a qualidade é relacionada a características e atribuições que um determinado produto ou serviço deve possuir para atender às necessidades do consumidor, seja ele quem for. [Juran \(1995\)](#) definiu qualidade pura e simplesmente como "Qualidade é adequação ao uso".

Atualmente tem-se direcionado esforços para a criação de uma cultura da qualidade e, por isso, a necessidade de definição correta para o termo. Para [Paladini \(2012\)](#), a ideia é centrar a qualidade no consumidor, atentando-se na multiplicidade de preferências e em observar o comportamento do cliente no que tange às suas necessidades.

Segundo [Garvin \(1987\)](#), são oito as dimensões da qualidade que um produto ou serviço deve apresentar. O **desempenho** refere-se às características operacionais primárias e avalia se o produto realiza as funções pretendidas. Os **recursos** são características que um produto possui que vão além do seu desempenho primário, como um diferencial. A **confiabilidade** mede a probabilidade de um produto apresentar falhas de funcionamento em um determinado período de tempo. A **conformidade** determina se as características funcionais e de design estão de acordo com as especificações estabelecidas para tais. A **durabilidade** mensura a vida útil do produto e, conseqüentemente, está ligada a confiabilidade do mesmo. Outra dimensão bastante valorizada é a **facilidade para manutenção**, o que engloba a disponibilidade e a rapidez em que o serviço é prestado. A **estética** é muitas vezes levada em conta na hora de escolha de um produto. E por fim, avalia-se a **qualidade percebida**, ou seja, a reputação da empresa ou do produto.

Adicionalmente aos parâmetros de qualidade de um produto, as empresas prestadoras de serviços também precisam se atentar a outras três dimensões: o profissionalismo, a disponibilidade para fornecer o serviço e a atenção dedicada aos clientes ([MONTGOMERY, 2016](#)).

[Montgomery \(2016\)](#) oferece outra definição interessante para a qualidade, na qual se diz que a qualidade é inversamente proporcional à variabilidade. Portanto, a melhoria da qualidade é alcançada com a redução da variabilidade. A explicação para isso é simples: se determinada característica de um produto ou serviço oscila muito entre os limites de especificações, significa que haverá custos de reparos e retrabalho e, conseqüentemente, mais desperdício de tempo e dinheiro. A engenharia da qualidade se baseia nos esforços de uma empresa para garantir que seus produtos e serviços estejam dentro dos limites de especificações e que apresentem um mínimo possível de variabilidade.

2.2 As eras da qualidade

Garvin (2002) desenvolveu uma classificação para os períodos da qualidade em que é feita uma divisão por eras, sendo elas a era da inspeção, a do controle estatístico da qualidade, a da garantia da qualidade e a da gestão estratégica da qualidade.

A **era da Inspeção** refere-se ao período que inicia nos primórdios da era industrial e vai até o final do século XIX, época em que a qualidade de um produto era controlada pelos artesãos e significava fabricar um produto seguindo as necessidades particulares do cliente. Os artesãos controlavam todo o processo produtivo, fabricavam as peças, faziam a montagem e os testes, bem como a venda do produto, caracterizando uma ordem produtiva baseada na customização (PALADINI, 2012).

A Segunda Revolução Industrial, no entanto, trouxe uma mudança na ordem produtiva que passou a ser baseada na padronização e produção em larga escala, o que acabou por motivar a melhoria da qualidade dos produtos manufaturados. Frederick W. Taylor foi quem inaugurou o Gerenciamento Científico com o princípio de racionalização do trabalho que dividia os trabalhadores pelas suas funções e tarefas. Tal princípio fez com que o trabalhador não tivesse controle das etapas de planejamento, apenas das operacionais, como analisa Paladini (2012).

Ainda segundo Paladini (2012), Henry Ford contribuiu muito para o tema ao mostrar ao mundo o conceito das linhas de montagem da indústria automobilística, método focado em produtividade e qualidade. Ford priorizava um sistema que padronizasse as medidas das peças para montar um automóvel e, portanto, houve a necessidade de criar áreas como a metrologia e sistemas de medidas e especificações, tão importantes para a garantia da qualidade nos dias de hoje.

De acordo com Marshall et al. (2012), foi a partir da produção em massa e de larga escala que a inspeção formal passou a ser necessária e direcionada a profissionais especializados. A inspeção era realizada em todo o lote de produção e consistia basicamente em separar os produtos "bons" dos "ruins" sem nenhuma metodologia específica e sem procurar encontrar soluções para os problemas encontrados.

Já na década de 1920 houve uma mudança de paradigma e a solução dos problemas passou a ser responsabilidade da qualidade. A empresa de telefonia Bell Telephone Laboratories teve uma importante contribuição nesse aspecto, com a criação de um departamento focado na inspeção, testes e qualidade. A realidade produtiva dessa empresa serviria para Walter A. Shewhart desenvolver em 1924 o conceito estatístico de gráficos de controle, o que ficaria marcado como o início da **era do Controle Estatístico da Qualidade** (MONTGOMERY, 2016).

Shewhart analisou como a variabilidade deveria trabalhar em níveis aceitáveis, uma vez que ela é inevitável, através de métodos de estatística e probabilidade. Os gráficos de controle eram uma maneira muito simples de mapear todas as etapas produtivas do processo,

perceber oportunidades de melhoria, identificar as variações e, assim, implementar as mudanças necessárias para o aprimoramento da qualidade (MARSHALL et al., 2012).

No final dessa década, foi desenvolvida por Harold F. Dodge e Harry G. Roming a amostragem de aceitação com base estatística como uma alternativa ao processo de inspeção de todo o lote de produção, que gerava elevados custos. Nessa época, várias sociedades da qualidade foram criadas, à medida que os cursos de treinamento de CEQ eram criados e divulgados nas indústrias. Posteriormente algumas dessas sociedades se fundiram, formando a American Society for Quality Control (ASQC) em 1946 nos Estados Unidos, e a Japanese Union of Scientists and Engineers (JUSE) no Japão (MONTGOMERY, 2016).

No final da Segunda Guerra Mundial a qualidade já era um preceito reconhecido no ambiente organizacional, uma vez que os profissionais especializados surgiam e as técnicas tiveram sua eficácia comprovada. Foi então que iniciou a **era da Garantia da Qualidade**, na qual começou a ser feita uma abordagem sistêmica da qualidade, com análise de custos e a criação do Sistema de Qualidade Total (TQC - Total Quality Control).

Juran (1998) apresenta o tema do custo da qualidade que abrange tanto os investimentos necessários em cada etapa do processo produtivo para se ter qualidade, quanto os custos resultantes da falta desse tipo de análise e controle. Em uma de suas pesquisas, Juran estimou que um terço do trabalho feito nas indústrias dos Estados Unidos na época consistia em repetir o que já havia sido feito, corrigindo falhas.

Segundo Marshall et al. (2012), o princípio do controle total da qualidade surgiu da necessidade do empenho de todas as áreas e departamentos de uma organização no sucesso do produto ou serviço. Para Armand Feigenbaum, quem mais salientava o assunto, um empreendimento verdadeiramente eficaz seria aquele que controlaria a qualidade desde a concepção do produto até sua venda bem sucedida.

Foi também nessa era da qualidade que surgiram os esforços da engenharia da confiabilidade que, por meio de métodos estatísticos, estimava a vida útil de determinados componentes desempenhando sua função, dando certa segurança operacional. Houve também o movimento do Zero Defeito, que englobava mudanças gerenciais e fazia com que os profissionais da qualidade focassem no desenvolvimento de programas e padrões, e auxiliassem os outros departamentos da organização (MARSHALL et al., 2012).

Nesse período, o modelo japonês era desenvolvido com forte influência de W. Edwards Deming e Joseph M. Juran, especialistas em estatística e qualidade. O Company Wide Quality Control (CWQC) foi o modelo japonês que contribuiu muito para o aprimoramento da Gestão da Qualidade do modelo ocidental (TQC). O modelo impulsionou a qualidade dos produtos japoneses e superou a dos produtos norte americanos na década de 1970. Ambos os modelos foram amplamente implementados nas organizações nas décadas seguintes (PALADINI, 2012).

E então, nas últimas décadas do século XX veio a **era da Gestão Estratégica da**

Qualidade, quando o princípio da qualidade já era presente nas empresas, e as que não seguiam a tendência começavam a ser penalizadas. Em 1987 a ISO (International Organization for Standardization) publica a primeira forma normativa e de padronização voltada para a gestão da qualidade, a família 9000. A ISO 9000 se difundiu rapidamente como critério para escolha de fornecedores e cadeias produtivas, com a ampliação das atividades de certificação para as indústrias que seguiam seus padrões (MONTGOMERY, 2016).

A Gestão da Qualidade contemporânea tem como programa mais recente o Seis Sigma, da empresa norte americana Motorola, que foi amplamente difundido no mundo empresarial. Segundo Paladini (2012), o programa tem como base a aplicação sistemática dos métodos estatísticos alinhados com o planejamento estratégico.

2.3 Breve histórico dos Gurus da Qualidade e seus estudos pioneiros

2.3.1 *Walter A. Shewhart*

Walter A. Shewhart foi um engenheiro e doutor em física nascido nos Estados Unidos em 1891 e contribuiu para a temática da qualidade enquanto trabalhava como engenheiro nas empresas Western Electric e posteriormente Bell Telephone Laboratories (PALADINI, 2012).

Os gráficos de controle desenvolvidos por ele são as ferramentas estatísticas que mais se popularizaram e ainda são utilizadas pela maioria das empresas e, por isso, vão ser detalhadamente explicadas nas próximas sessões. Shewhart (1926) relata que é impossível que todas as unidades de um produto sejam idênticas uma a outra, no entanto essas variações podem acontecer por razões aleatórias que são comuns ao processo ou por alguma causa identificável que possa ser investigada. Sendo assim, com o auxílio de ferramentas estatísticas, o processo deve identificar essas causas "especiais" para que seu controle resulte numa melhoria de qualidade.

Segundo Paladini (2012), Shewhart juntamente com William Deming, foram os responsáveis por propor o ciclo PDCA (Plan, Do, Check, Act), uma ferramenta usada para a melhoria contínua da qualidade.

2.3.2 *William Edwards Deming*

De acordo com Best e Neuhauser (2005), William Edwards Deming nasceu também nos Estados Unidos em 1900, formou-se em engenharia elétrica e concluiu mestrado e doutorado em matemática e física. Em 1925 ele também trabalhou na empresa Western Electric e teve Shewhart como seu mentor nos estudos sobre controle estatístico de processos.

Durante o período da Segunda Guerra Mundial, Deming ministrou cursos para diversas empresas acerca dos conhecimentos de controle estatístico de processos e do ciclo PDCA elaborado com Shewhart. E foi no pós guerra, nas tentativas de reconstrução do Japão, que ele foi enviado ao país para ensinar as técnicas de amostragem e dar consultoria para a JUSE. Com o aconselhamento de Deming, os produtos japoneses foram aprimorados e se tornaram os líderes

mundiais em qualidade de fabricação. Em razão disso, os japoneses deram seu nome ao prêmio de qualidade japonês, o chamado *Deming Prizes*. Nesse período a produtividade das empresas norte americanas iam perdendo espaço para as japonesas e foi só então que o trabalho de Deming passou a ser valorizado nos Estados Unidos.

Segundo [Best e Neuhauser \(2005\)](#), Deming instruiu que para atingir um estado de qualidade sem variabilidade, a empresa deveria ter uma liderança eficaz, constância do propósito de alcançá-la e um clima de trabalho alegre. No trabalho que desenvolveu nas empresas, Deming insistia no papel da gerência de resolver os problemas sistemáticos de suas organizações que resultavam em uma baixa qualidade. Por defender um maior desempenho e mais alegria no trabalho, e fazer duras críticas ao desemprego e subemprego, ele foi considerado um herói da qualidade, tirando do operariado a culpa dos insucessos do sistema.

Deming descreveu em um de seus livros *Out of the crisis* em 1990, uma lista de 14 pontos, visualizados na Tabela 1, que uma empresa deveria seguir para garantir a melhoria da qualidade, devidamente caracterizada na Tabela 1. Ele enfatizava uma mudança organizacional com a participação central da gerência e, assim, identificou sete erros comuns adotados na maioria das empresas, o que ele chamava de sete doenças mortais do gerenciamento ([MONTGOMERY, 2016](#)):

- falta de constância de objetivo de melhoria da qualidade
- ênfase em lucros de curto prazo - aumentar o lucro da empresa através da diminuição do investimento em pesquisa e desenvolvimento não é interessante
- avaliação de desempenho e classificação por mérito - prática que provoca rivalidade, medo e prejudica o trabalho em equipe
- mobilidade da gerência superior - a prática de mudança constante de função é uma barreira à constância de objetivo
- gerenciamento de uma empresa baseada em números - não leva em conta os fatores realmente importantes para o crescimento
- custos médicos elevados destinados à recuperação da saúde dos trabalhadores
- excessivas indenizações legais por danos

A relação com as empresas japonesas permitiu que Deming usasse seus conhecimentos estatísticos aliados ao **ciclo PDCA** desenvolvido com Shewhart como princípios para guiar a melhoria contínua, metodologia batizada como *Kaizen* pelos japoneses.

O Ciclo PDCA tem como objetivo ajudar a organizar o pensamento analítico e facilitar o planejamento, execução e verificação dos resultados de uma ação.

Tabela 1 – Os 14 pontos de Deming

Ponto 1	Crie constância no propósito de aprimoramento da qualidade do produto ou serviço, afim de estimular sua competitividade, permanência no negócio e geração de empregos
Ponto 2	Adote uma nova filosofia, estamos em uma nova era econômica. A gerência ocidental precisa aceitar o desafio, aprender quais são suas responsabilidades e liderar o processo de mudança
Ponto 3	Acabe com a confiança no método de inspeção em massa para alcançar qualidade. Elimine a sua necessidade, construindo a qualidade do produto em primeiro lugar
Ponto 4	Elimine a prática de priorizar negócios com fornecedores com base no preço. No lugar disso, minimize o custo total escolhendo um único fornecedor para um item, em uma relação de longo prazo baseado na lealdade e confiança
Ponto 5	Busque melhorar constantemente o sistema de produção e de serviços, aprimorando a qualidade e a produtividade, diminuindo os custos
Ponto 6	Estabeleça o treinamento no trabalho
Ponto 7	Estabeleça uma liderança eficaz. O objetivo da supervisão deve ser o de ajudar pessoas e máquinas a fazerem um trabalho melhor, e não meramente fiscalizar
Ponto 8	Elimine o medo que muitos empregados tem de relatar problemas e fazer perguntas, para que todos possam trabalhar com eficácia para a empresa
Ponto 9	Quebre as barreiras entre os departamentos. Pessoas da pesquisa, design, vendas e produção devem trabalhar como uma equipe, para prever problemas na produção e no uso do produto ou serviço
Ponto 10	Elimine os slogans, metas numéricas para a força de trabalho, como a propaganda de "zero defeito". Tais alvos apenas criam um ambiente de adversidade, pois as causas da baixa qualidade e produtividade pertencem ao sistema, indo além do poder da força de trabalho
Ponto 11	Elimine as quotas numéricas de trabalho no chão-de-fábrica e gerenciamentos por objetivos, metas numéricas. Substitua por um gerenciamento efetivo focado na melhoria do processo
Ponto 12	Remova barreiras que impedem os trabalhadores e engenheiros de sentirem orgulho de seu trabalho. Sugestões, reclamações e comentários devem ser bem vindos
Ponto 13	Institua um vigoroso programa de educação e automelhoria
Ponto 14	Incentive todo mundo da empresa a alcançar a transformação

Fonte: Adaptado de (AGUAYO, 1990).

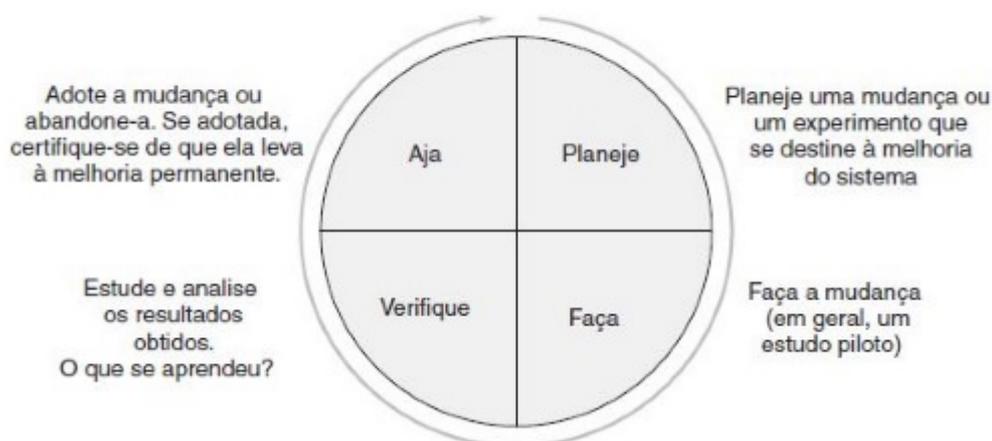


Figura 1 – O Ciclo PDCA

Fonte: (MONTGOMERY, 2016)

P: Plan (Planejamento)

D: Do (Execução)

C: Check (Verificação, Controle)

A: Act (Ação corretiva, preventiva e de melhoria)

Na etapa de *planejamento* é feita a proposta de mudança buscando a melhoria. Dentro da etapa de planejamento há mais quatro etapas: a identificação do problema, análise do problema, análise do processo e elaboração dos planos de ação. Na *execução* essa mudança é concretizada. Na *verificação*, são feitos testes, inspeções, simulações, tudo que for preciso para averiguar se tal mudança foi efetiva e teve bons resultados. Na etapa de *ação* decide-se em adotar ou não a mudança. Caso ela não tenha apresentado os resultados esperados é necessário voltar à fase de planejamento, movimento esse que pode se repetir por muitos ciclos para a solução de um problema complexo (BASSAN, 2018).

2.3.3 Joseph M. Juran

Joseph M. Juran nasceu na Romênia em 1904 e graduou-se nos Estados Unidos em engenharia e direito. Em semelhança aos nomes anteriores, Juran trabalhou na Western Electric e, assim como Deming, foi convidado para atuar no Japão no pós guerra. Com a vivência nas empresas japonesas, ele insistia no papel da alta gerência e de todos os trabalhadores na Gestão da Qualidade (PALADINI, 2012).

Juran foi pioneiro na abordagem de custos da qualidade, mostrando a necessidade de se estabelecer uma visão para a empresa com metas estabelecidas. Para cumprir as metas, Juran (1998) propõe estratégias gerenciais para obtenção da qualidade, no método chamado **Trilogia**

da Qualidade de Juran, que engloba o planejamento, o controle e a melhoria da qualidade.

No *planejamento* é necessário definir quem são os clientes e quais são suas necessidades, desenvolver projetos de produtos e processos para atendê-las e, por fim, entregar os resultados para as forças operacionais. No *controle* é avaliado o real desempenho de qualidade, que por sua vez é comparado com a meta de desempenho, para então tomar medidas baseadas nessa diferença. Já a *melhoria* busca elevar o desempenho da qualidade a outros níveis, estabelecendo a infraestrutura necessária, os projetos de melhoria e, para cada projeto, uma equipe alinhada com suas responsabilidades de executá-lo. Na melhoria também é necessário oferecer os recursos, motivação e treinamentos necessários.

A Trilogia da Qualidade é representada por um diagrama onde o eixo horizontal é o tempo e o eixo vertical é o custo da baixa qualidade. Um exemplo do diagrama é representado na Figura 2.

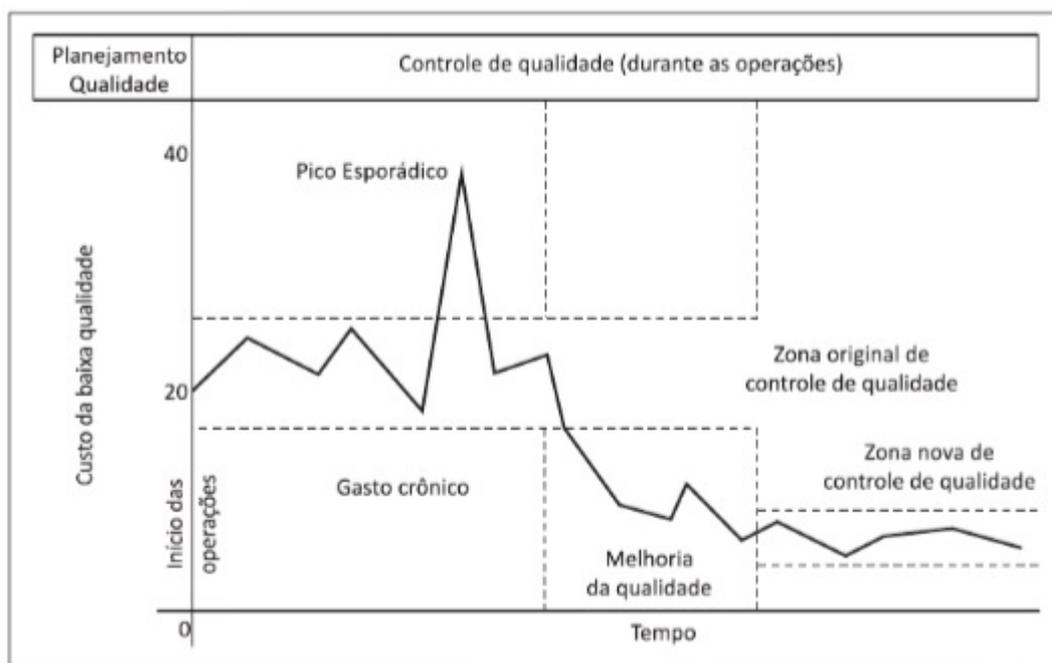


Figura 2 – Trilogia da Qualidade de Juran

Fonte: (PALADINI, 2012)

É possível observar que à medida que as tarefas operacionais se iniciam, 20 % da produção é acometida por erros devido a baixa qualidade e, por isso, haverá a necessidade de retrabalho causando um grande desperdício de tempo e dinheiro. Esse gasto é considerado *crônico*, pois acompanha todo o processo e existe desde o seu planejamento. O controle da qualidade vai agir tentando fazer com que a situação não piore.

O diagrama também mostra um pico esporádico que eleva o nível de erro a 40 %, ele demonstra que houve um evento inesperado. Quando isso acontece, as forças operacionais tentam

reverter a situação com uma ação corretiva. A existência do gasto crônico exigiu novas medidas do processo, que foram garantidas pela melhoria da qualidade que abaixou o nível do gasto, criando uma nova zona de controle.

2.3.4 *Armand Feigenbaum e Kaoru Ishikawa*

Armand Feigenbaum foi um engenheiro e doutor em ciências nascido em 1922, e ficou famoso por apresentar o conceito de Controle Total da Qualidade (TQC - Total Quality Control). Já Kaoru Ishikawa nasceu no Japão em 1922 e propôs o modelo CWQC, Controle da Qualidade por toda a Empresa (Company Wide Quality Control) [Paladini \(2012\)](#). O modelo japonês embora sofresse influência do modelo TQC, distinguia em alguns aspectos.

Segundo [Marshall et al. \(2012\)](#), o TQC é baseado na ideia de que a qualidade não é assunto de interesse apenas das áreas de produção e engenharia, mas sim de todas as áreas da organização, devendo englobar marketing, projeto, produção e manutenção de produtos e serviços, sempre buscando atender às expectativas do cliente.

Feigenbaum relata que a melhoria da qualidade poderia ser atingida seguindo três passos: liderança da qualidade, tecnologia da qualidade, englobando métodos estatísticos e comprometimento organizacional, especialmente da alta gerência.

Kaoru Ishikawa também ficou conhecido por discutir as 7 ferramentas da qualidade (*análise de Pareto, diagrama de causa-efeito, histograma, folhas de controle, diagramas de escada, gráficos de controle e fluxos de controle*) e foram utilizadas nos Círculos de Controles de Qualidade (CCQs), grupos de melhoria da qualidade em diversas empresas.

2.4 Controle Estatístico da Qualidade

Uma vez compreendidos os conceitos genéricos da qualidade, bem como sua evolução ao longo de muitos anos de estudos até então pouco explorados nas indústrias, é importante trazer o foco da discussão para o controle da qualidade. Esse controle é um sistema que mantém a qualidade em um nível desejado com auxílio de técnicas estatísticas.

Para entender o que significa o controle estatístico da qualidade, [Western Electric Co. \(1956\)](#) desmembra a expressão em suas palavras. Qualidade como visto anteriormente pode ser dita como características de um item ou de um processo, Estatística significa tirar conclusões por meio de dados numéricos e controle é acompanhar, checar e mudar atividades fora do planejado para fazer com que algo se comporte como pré estabelecido. Dessa forma, o CEQ pode ser entendido como uma forma de estudar a qualidade com auxílio de dados numéricos de modo a fazer com que o parâmetro se comporte de uma determinada maneira.

Sendo assim, serão apresentados a seguir alguns conceitos importantes e uma noção da estatística básica para o melhor entendimento das principais ferramentas utilizadas no CEQ,

dentre elas os gráficos de controle no Controle Estatístico de Processo (CEP), a inspeção por amostragem e os experimentos planejados.

2.4.1 Controle Estatístico de Processo - CEP

Antes de detalhar o tema, é importante entender o conceito de "processo", uma vez que o CEQ monitora e age sobre o processo. Chama-se processo qualquer conjunto de condições ou causas que trabalham para produção de determinado resultado. No âmbito do CEQ, um processo pode ser uma máquina, uma pessoa, um grupo de pessoas, um método de medição ou montagem, habilidades humanas, dentre outros. No entanto, nesse estudo tem-se como foco os processos produtivos industriais.

Segundo [Montgomery \(2016\)](#), um processo de manufatura pode ser representado como um sistema com um conjunto de entradas x_1, x_2, \dots, x_p que são variáveis do processo e são controláveis, como temperatura, pressão, etc. Já as entradas z_1, z_2, \dots, z_q são não controláveis, como fatores ambientais.

Esse sistema, tal como é mostrado na Figura 3, transforma a matéria prima e as entradas em um produto final que possui várias características da qualidade, e uma delas é mostrada como a saída y . Essa representação também é cabível para um exemplo de processo de não manufatura, ou de serviços.

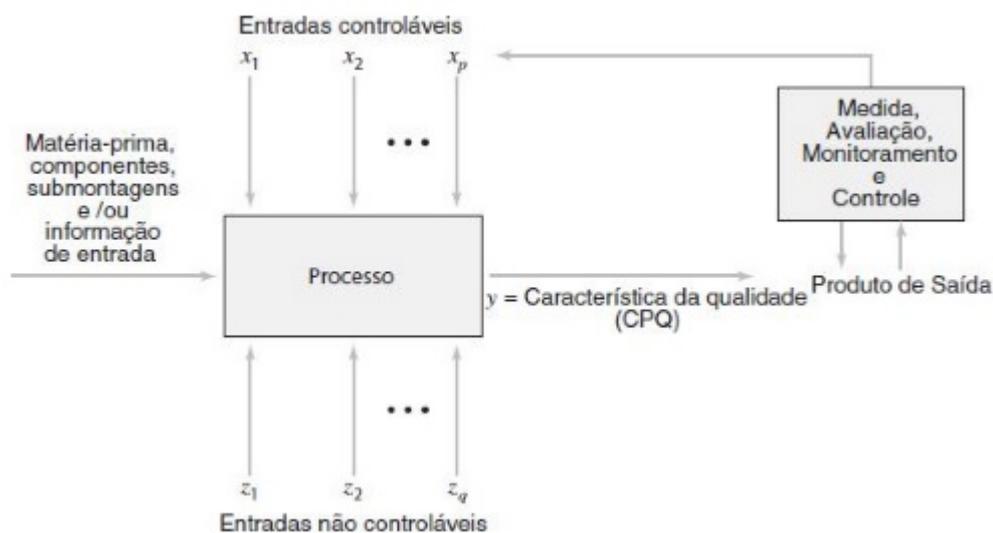


Figura 3 – Demonstração de um processo de manufatura

Fonte: ([MONTGOMERY, 2016](#))

Alguns termos são de grande relevância para o controle de processos industriais, tais como a *variável de processo* que é a condição que se deseja controlar, como por exemplo,

temperatura, pressão, etc. O *setpoint* é o valor que se deseja alcançar e manter para a variável de processo e a *variável manipulada* é aquela que deve ser alterada para tal. Já o erro, ou *offset* é a diferença de valor entre a variável de processo e o *setpoint*.

No CEP busca-se que as variações inerentes ao processo, devido às causas não atribuíveis, não cause alterações nos parâmetros de distribuição de uma variável (como a média ou desvio-padrão por exemplo). Sendo assim, a qualidade de um processo é dada por uma ou mais variáveis quantitativas, e o controle de qualidade é feito pelo monitoramento e controle dessas variáveis (LOUZADA et al., 2013).

O controle estatístico do processo (CEP) constitui um conjunto de importantes ferramentas úteis na redução da variabilidade e na obtenção de maior estabilidade do processo. Aliada ao ambiente favorável da organização, em que todos buscam a melhoria da qualidade e produtividade, a aplicação prática dessas ferramentas se torna rotineira e o caminho para alcançar esses objetivos fica mais fácil. Além da redução da variabilidade, o CEP busca o aumento de eficiência e produtividade, bem como mais segurança no processo.

São sete as ferramentas do CEP:

1. Histograma ou Diagrama de ramo e folhas
2. Folha de Controle (ou Folha de Verificação)
3. Gráfico de Pareto
4. Diagrama de causa e efeito
5. Fluxograma
6. Diagrama de dispersão
7. Gráfico de controle

Como citado anteriormente, [Shewhart \(1926\)](#) explica a diferença entre a variabilidade do processo provocada por causas aleatórias, ou como ele chama, causas não atribuíveis e a provocada por causas atribuíveis, identificáveis.

As causas não atribuíveis, também chamadas de causas naturais e até mesmo inevitáveis, estão presentes em qualquer processo e elas são um conjunto de pequenas variações, tais como as condições ambientais, as condições físicas e mentais do trabalhador a cada dia, dentre outros. Um exemplo dessa flutuação natural está contida na Figura 4, onde pode-se observar a porcentagem de montagem de bobinas por um operador dia após dias. Flutuações semelhantes foram observadas em vários outros processos, sendo então uma característica inerente ao processo e, por isso pode-se dizer que se um processo está sofrendo influências apenas dessas causas de flutuação, ele está em equilíbrio, sob controle estatístico.

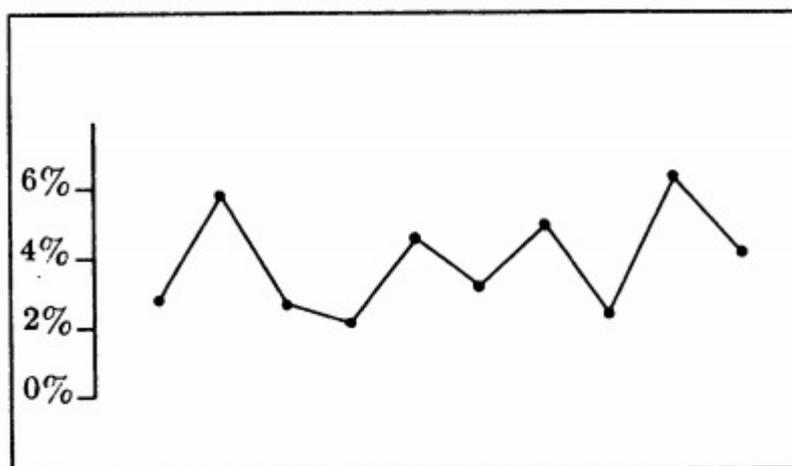


Figura 4 – Flutuação na quantidade de bobinas montadas por um operador

Fonte: ([Western Electric Co., 1956](#))

Já as causas atribuíveis provocam uma variabilidade geralmente muito maior que o nível aceitável, prejudicando o desempenho do processo e fazendo com que ele fique fora de controle estatístico.

2.4.2 A estatística aplicada à qualidade

[Montgomery \(2016\)](#) explica que a estatística é muito importante no estudo da qualidade pois permite a análise de um número muito grande de dados e a tomada de decisões mais acertada, análise essa que é feita por meio de amostragem, ou seja, é possível tirar conclusões acerca de uma população enorme de dados por meio da análise de um subgrupo bem menor dessa população, essa técnica é conhecida como inferência estatística.

A compreensão das medidas numéricas de tendência central e de dispersão de dados é essencial para o uso das técnicas estatísticas. A **média amostral** é a medida de tendência central mais usual, que nada mais é que a média numérica de n observações da amostra, como mostra a equação (2.1), onde x_1, x_2, \dots, x_n são as observações da amostra.

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (2.1)$$

Já a variabilidade dos dados é medida pela **variância amostral** que é a soma dos quadrados dos desvios de cada observação em relação à média amostral dividida pelo tamanho da amostra menos um, conforme é calculada na equação (2.2),

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1} \quad (2.2)$$

No entanto para facilitar o uso da unidade de medida, a variabilidade de um sistema de dados é dada pela raiz quadrada da variância amostral, o **desvio-padrão amostral**, dado pela equação (2.3).

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (2.3)$$

Outro conceito importante é o de **distribuição de probabilidade** que relaciona o valor da variável analisada da amostra com a probabilidade de ocorrência desse valor na população como um todo. A distribuição normal é a mais comum de acontecer em vários processos, tendo a maior quantidade de amostras em torno do valor médio amostral e menores quantidades em valores que se afastam da média. Na Figura 5 é mostrado um exemplo dessa distribuição, onde a área sob o gráfico entre os limites a e b é a probabilidade da variável estar entre esses valores na população.

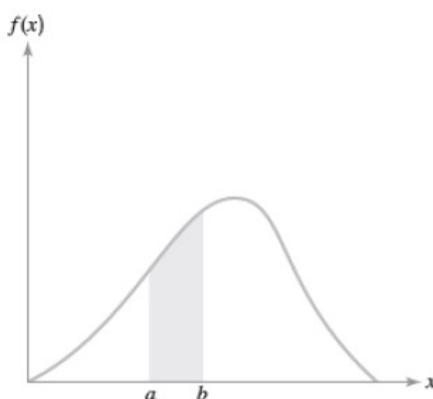


Figura 5 – Distribuição de probabilidade normal

Fonte: ([Western Electric Co., 1956](#))

2.4.3 Gráfico de controle

Dentre as ferramentas que auxiliam o CEP, o **gráfico de controle** é o mais usado, e é considerado uma ferramenta de monitoramento *on-line* e tem vital importância na redução da variabilidade do processo. Ele também é usado para determinar a capacidade do processo, a partir da estimação dos seus parâmetros e processo de melhoria, e para fazer análises dos sistemas de medição.

Um gráfico de controle mostra em seu eixo vertical o valor da característica da qualidade a ser analisada em uma amostra e no eixo horizontal o número da amostra (que pode ser um subgrupo de amostras) ou tempo. Ele possui três linhas de controle, a linha central sinalizando o valor médio dessa característica. As outras duas linhas indicam os limites superior de controle (LSC) e inferior de controle (LIC) aos quais o valor pode chegar. Conforme exposto na Figura 6,

um processo que tenha valores que oscilam de forma aleatória entre os LSC e LIC é um processo controlado.

No entanto, se algum valor viola as regras sensibilizantes, é um sinal de que algo está errado e demandará alguma ação corretiva, caracterizando um processo fora de controle. Outro sinal que indica que o processo está fora de controle ocorre quando os valores estão dentro das faixas limítrofes porém sua ocorrência não é aleatória e sim sistemática, como por exemplo a maioria dos valores estar abaixo da linha central (MONTGOMERY, 2016).

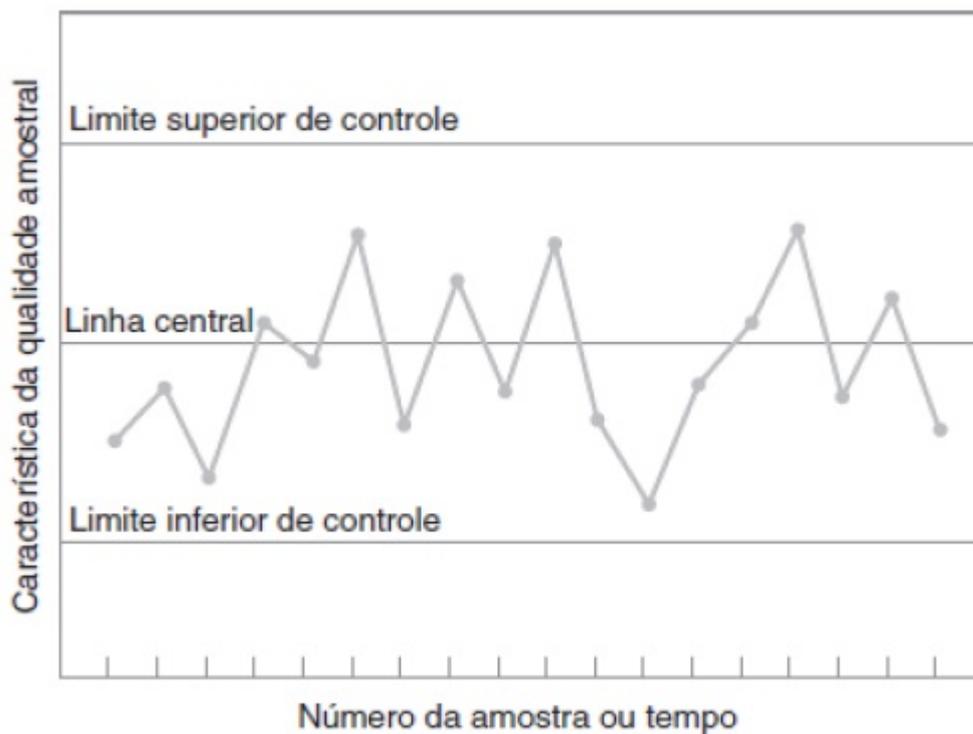


Figura 6 – Exemplo de gráfico de controle

Fonte: (MONTGOMERY, 2016)

Segundo Samohyl (2009), os limites de controle são usualmente definidos a uma distância de três desvios-padrão ("três sigma") da linha central, um valor arbitrariamente escolhido pelo seu idealizador Shewhart baseado em suas experiências. No entanto é possível estabelecer um modelo para se calcular os LSC e LIC:

$$LSC = \mu_{\omega} + L\sigma_{\omega} \quad (2.4)$$

$$LC = \mu_{\omega} \quad (2.5)$$

$$LIC = \mu_{\omega} - L\sigma_{\omega} \quad (2.6)$$

Onde ω é o número da amostra, μ_ω é sua média amostral e o σ_ω é o seu desvio-padrão. L é a "distância" entre os limites e a linha central, o que na maioria dos casos é considerado o valor de três desvio-padrão.

Com o uso correto do gráfico de controle é possível fazer o monitoramento *on-line* do processo e, assim, identificar quando ele sofre influências por causas atribuíveis. Detectando essa causa, é função da gerência traçar um plano para eliminá-la ou diminuir o seu dano. É uma ferramenta que teve uma enorme popularidade nas empresas devido aos objetivos muito claros que ela possui, como a melhoria de produtividade, fornecimento de informações da capacidade do processo e prevenção de defeitos (MONTGOMERY, 2016).

2.4.4 Capacidade de processo

A técnica abordada nos gráficos de controle fornece uma análise quantitativa da qualidade e permite que as empresas tenham um maior controle sobre ela, uma vez que tenham conhecimento das especificações que tal parâmetro de qualidade possa assumir. No entanto, há situações em que essas especificações não são preestabelecidas e faz-se necessário estimar os limites de variações do processo para se ter um intervalo de confiança que o valor da variável de interesse possa assumir (LOUZADA et al., 2013).

Segundo Montgomery (2016), as ferramentas estatísticas não são usadas somente para monitoramento do processo, mas também nas etapas anteriores à fabricação. É muito importante quantificar a variabilidade do processo antes mesmo de ele ser executado para que a diminuição ou eliminação da variabilidade seja possível. Essa variabilidade, como já foi dito antes, pode acontecer por causas naturais (e/ou inerentes ao processo) ou causas atribuíveis ou não naturais. Se esse estudo não for feito antes da fabricação, a variação por causas não naturais tende a ser muito maior.

O estudo da capacidade do processo envolve a observação dessas causas que provocam a variação, bem como a análise e ação para eliminar as que não são naturais ao processo. Em um correto estudo da capacidade do processo há monitoramento e controle da coleta de dados do processo em sequência temporal para, assim, ser possível fazer inferências sobre sua estabilidade, desde que ele esteja sob controle estatístico.

Os dados resultantes de um estudo de capacidade do processo são usados para vários objetivos como auxiliar os encarregados do planejamento do produto na seleção do processo, determinar exigências de desempenho, reduzir a variabilidade do processo, entre outros. Em resumo, é uma técnica que tem aplicação em todo o ciclo do produto, desde o seu planejamento até a sua fabricação.

Os gráficos de controle são muito utilizados para realizar essa análise de capacidade, mas além deles também é comum o uso de histogramas (ou gráficos de probabilidade). Nesse caso, estima-se a capacidade de processo através de uma distribuição de probabilidade com

média e desvio-padrão especificados, sem a necessidade de se conhecer as especificações da característica de qualidade observada. Outra técnica comum para esse estudo é feita com os experimentos planejados, que serão explicados na próxima sessão.

No entanto, Louzada et al. (2013) também disserta sobre os índices de capacidade que fornecem uma análise mais objetiva e permitem que a partir de uma amostra aleatória se estime o nível de capacidade que o processo tem para atender às especificações dos produtos. Os índices de capacidade conseguem resumir em um valor a condição do processo inteiro, possibilitando uma tomada de decisões mais acertada, baseada em resultados estatísticos.

Alguns índices são usados para os cálculos da capacidade de processo, os índices mais comuns são o C_p e C_{pk}

2.4.5 Experimentos planejados

Segundo Montgomery (2016), os experimentos planejados são ferramentas *off-line* de controle da qualidade de grande utilidade pois são usados para descobrir as variáveis controláveis que influenciam em determinada característica de qualidade do processo. Estatisticamente, esses experimentos planejados reduzem a variabilidade e melhoram o desempenho do processo e são usadas principalmente nos estágios iniciais de planejamento e desenvolvimento do processo, trazendo maior capacidade de fabricação do produto, melhor desempenho e confiabilidade do processo e redução de custos.

Com o auxílio de técnicas de modelagem obtém-se uma relação entre essas variáveis observadas e a características de qualidade encontradas na saída do processo. Depois disso o monitoramento do processo é feito com técnicas *on-line*, como é o caso dos gráficos de controle.

Nesses experimentos é feita uma série de testes de manipulações propositalmente nas variáveis de entrada afim de se conhecer o efeito que elas provocam na saída. Assim, com os experimentos busca-se observar quais variáveis são mais influentes na saída para, assim, ser possível o controle da característica da qualidade observada.

Em algumas situações os experimentos planejados são mais interessantes que as próprias técnicas do CEP, pois essas dependem que alguma variação fora do esperado aconteça para que haja uma medida corretiva. Nesse caso, se o processo está sob controle estatístico é mais difícil a melhoria da qualidade do processo. Já os experimentos planejados são técnicas mais ativas, onde mudanças reais são feitas nas entradas do processo, então obtém-se mais informações úteis na saída para buscar a melhoria do processo.

2.4.6 Avaliação da Qualidade por Inspeção e Amostragem

Paladini (2012) descreve a inspeção da qualidade como um conjunto de dispositivos que visa checar se um produto ou lote de produtos atende às especificações. Os resultados dessa inspeção servem de base para a tomada de decisão posterior, como por exemplo uma ação

corretiva em alguma etapa do processo ou a rejeição do produto. A atividade de inspeção esteve presente no processo produtivo desde os primórdios da industrialização. No entanto, ela era feita peça por peça em todo o lote produtivo, o que acabou por gerar enormes desperdícios de tempo e dinheiro.

Nesse sentido, os procedimentos de amostragem auxiliaram muito pois por esse método avalia-se a qualidade de uma amostra tirada de um lote maior e dela tira-se conclusões sobre a qualidade do lote. Essa amostra não é simplesmente uma parte do lote, pois ela é selecionada seguindo alguns critérios que sirvam para avaliar a qualidade. Depois da inspeção da amostra, se o produto ou peça estiver fora dos padrões estabelecidos, o lote inteiro pode ser descartado, reciclado ou retrabalhados.

A técnica de aceitação de amostragem, então, fornece benefícios claros de redução de custos do processo de inspeção, bem como diminui os erros comuns nele. No entanto, por ser uma técnica que meramente aceita ou descarta lotes, não é uma forma direta de controle de qualidade pois é gerada pouca informação sobre o produto ou processo. Além disso, há o risco de aceitar lotes ruins e descartar lotes bons, uma vez que somente uma amostra está sendo avaliada (MONTGOMERY, 2016).

Os métodos estatísticos que auxiliam na inspeção se dão pelos chamados planos de amostragem, que relacionam o nível desejado de qualidade, os riscos de erros na decisão de aceitação ou descarte de lotes, o tamanho das amostras e os critérios de aceitação ou descarte. Isso é feito por meio de tabelas prontas e padronizadas.

Montgomery (2016) compara o percentual de aplicação das principais técnicas da engenharia da qualidade nas empresas mostrando a evolução de seu uso conforme a empresa se torna mais madura, como mostra a Figura 7. Quando uma empresa ainda não atingiu certa maturidade, os problemas da qualidade ainda não são conhecidos e, por isso, a inspeção por amostragem é a única técnica empregada até que entende-se que a qualidade não pode ser testada. Então a empresa começa a focar na melhoria da qualidade investindo no controle estatístico de processo e nos experimentos planejados que fornecem maior impacto no desempenho do processo e na melhoria da qualidade.

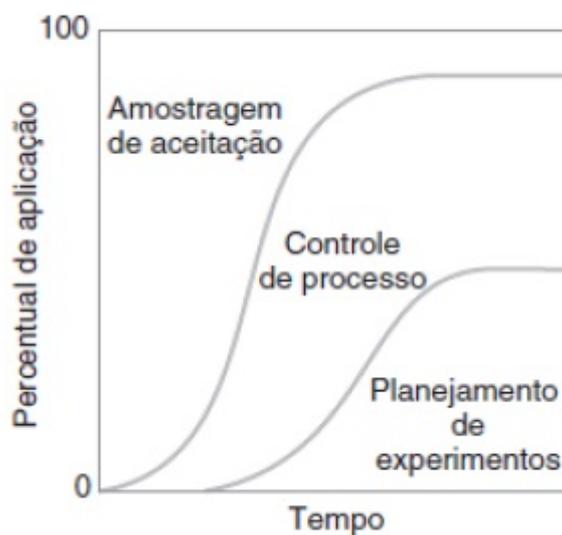


Figura 7 – Evolução do uso de técnicas da engenharia da qualidade

Fonte: (MONTGOMERY, 2016)

2.5 Indústria 4.0 e seu papel no controle da qualidade

O setor industrial, ao longo de seu desenvolvimento, foi marcado por transformações e fases definidas. A Primeira Revolução Industrial no final do século XVIII consistiu na transição do trabalho manual para o trabalho mecanizado, com as máquinas movidas a vapor. No final do século XIX e começo do século XX, a eletricidade foi inserida nos processos produtivos e iniciou-se o conceito de produção em massa com as linhas de montagem, marcando a Segunda Revolução Industrial. Já na década de 1970 tem-se a Terceira Revolução Industrial que ainda está em curso nos dias de hoje, também chamada de revolução digital, marcada pelo desenvolvimento da computação e da internet, com o avanço da eletrônica e informática (SANTOS et al., 2018).

Segundo Schwab (2019), está em curso hoje em dia a Quarta Revolução Industrial, que engloba transformações nos modelos de negócio e de produção, na economia, na sociedade, no consumo e nos transportes, e conta com o aprimoramento das tecnologias advindas da era anterior.

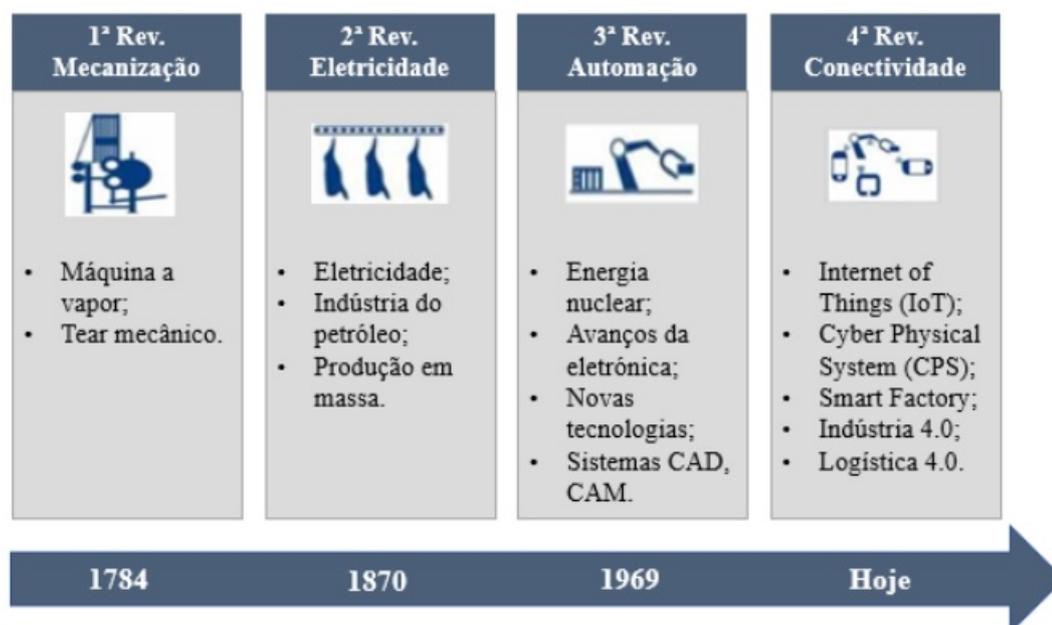


Figura 8 – As fases da Revolução Industrial

Fonte: (SANTOS et al., 2018)

Nesse contexto, o termo *Indústria 4.0* vem se disseminando a partir da estratégia adotada pelo governo alemão, que abrange a alta tecnologia ligada à internet com o objetivo de flexibilizar os sistemas de produção. Tal estratégia possibilita a existência de verdadeiras "fábricas inteligentes", nas quais o chão de fábrica tem plena integração com o ambiente virtual de fabricação, favorecendo a criação de modelos operacionais mais eficientes e a maior personalização de produtos.

Tendo em vista esse contexto atual, Schwab (2019) ainda ressalta que a personalização de produtos é muito importante e, por isso, indústrias precisam garantir flexibilidade, eficiência nos processos e baixo consumo de energia e custos. A gerência deve conseguir tomar decisões de forma mais rápida e acertada tendo acesso a informações do nível da produção em tempo real, aumentando a qualidade dos produtos e serviços.

Hoje as principais tecnologias pilares da 4ª Revolução Industrial são possíveis graças ao constante progresso da capacidade de processamento e da tecnologia de informação. Exemplos físicos dessas tecnologias são a robótica avançada, os veículos autônomos, a manufatura aditiva com impressão 3D, dentre outras.

A internet das coisas (IoT), primordial para esse ambiente, é caracterizada pelas tecnologias e plataformas que interligam coisas (produtos, serviços, lugares, etc) às pessoas, relação que é gradativamente aprimorada devido aos sensores mais inteligentes e mais baratos. Isso revoluciona completamente a organização das cadeias de produção e fornecimento, pois torna-se possível rastrear e monitorar todas as etapas de forma remota e em tempo real. No ambiente industrial,

a *IoT* teve o nome de *Industrial Internet of Things (IIoT)*, onde equipamentos industriais são capazes de usar sensores e câmeras para capturar dados e imagens para serem processados de maneira segura e depois compartilhados entre outros setores para facilitar a tomada de decisões eficiente (LIU et al., 2019).

A robótica avançada é um dos pilares dessa revolução, sendo caracterizada pela crescente colaboração entre humanos e máquinas. Os robôs vem desempenhando um papel de maiores flexibilidade e adaptabilidade, pois passaram a ser inspirados em comportamentos biológicos da natureza. Sendo auxiliados por sensores mais sofisticados, os robôs apresentam melhor resposta ao ambiente que estão inseridos e desempenham papéis muito variados (SCHWAB, 2019).

No contexto da Indústria 4.0, os sistemas produtivos monitoram os processos físicos com o auxílio da comunicação em tempo real e da colaboração entre humanos, máquinas e sensores. Dessa forma é possível criar um ambiente de simulação do mundo real no ambiente virtual para possibilitar a produção customizada sem aumento de custo e otimizando com esses recursos a capacidade produtiva e o uso da infraestrutura (ZHONG et al., 2017).

Segundo Santos et al. (2018), as fábricas inteligentes englobam os chamados *Cyber Physical Systems (CPS)*, que mesclam o mundo físico com o virtual através da implementação de sensores em todo ambiente de produção. Esses sistemas se comunicam uns com os outros por meio da internet e são capazes de fornecer informações sobre localização, status, histórico e rota. Tais dados são usados para se conhecer o processo e saber quais etapas de fabricação devem ser realizadas em determinado momento, e também são usados para prevenir falhas e controlar a qualidade.

O volume de dados gerado nesses sistemas é tão grande que não é possível armazená-los e analisá-los por meio de ferramentas tradicionais. De acordo com Witkowski (2017), a *Big Data* é uma ferramenta que permite usar esse enorme banco de dados com rapidez e eficiência, facilitando a tomada de decisões mais acertada. É utilizada para prever e gerenciar riscos na cadeia de suprimentos sem que haja interrupção de produção. A *Cloud Computing*, intimamente relacionada, também é uma ferramenta de vital importância para o correto e seguro armazenamento desses dados, permitindo o acesso simultâneo de informações entre pessoas de uma empresa.

No ambiente industrial, o aprendizado de máquina (*machine learning*) é aplicado em inúmeras atividades industriais e processos. Através da programação de computadores e uso de algoritmos complexos, esse recurso é capaz de otimizar processos usando a enorme gama de dados como exemplo ou de experiências passadas, extraindo conhecimento delas. Os modelos de aprendizado de máquinas podem ser preditivos, fazendo previsões do futuro, e/ou descritivos para ter conhecimento do processo (ALPAYDIN, 2020). Dentro desse contexto, a Inteligência Artificial busca simular a capacidade cognitiva humana utilizando mecanismos e dispositivos inteligentes, e envolve pesquisas nas áreas de processamento de imagens, processamento de linguagem natural, robótica, aprendizado de máquina, etc. A integração do aprendizado de

máquina com as outras tecnologias citadas anteriormente possibilita um ambiente industrial mais flexível e eficiente, com os sistemas produtivos aprendendo com a própria experiência, prevenindo e solucionando problemas e otimizando a produção.

Outra tecnologia muito importante nesse processo são os Sistemas de Visão de Máquina, que normalmente fazem uso de uma câmera para capturar imagens e extrair um grande número de dados a partir delas. Esses sistemas tem uma ampla variedade de aplicações, desde a simples leitura de código de produto como na verificação de montagem com orientação robótica e modelos 3D. Uma aplicação muito usada no controle da qualidade em indústria é o processamento de imagens de peças tridimensionais, o que caracteriza os sistemas de inspeção óptica que detectam erros de montagem em peças e também dados que podem ser usados na otimização de processos. Além disso, as câmeras e sensores podem realizar a comunicação entre máquinas, facilitando a tomada de decisões (ALONSO et al., 2019).

A metrologia 3D também vem entrando como aliada no controle de qualidade em indústrias. A principal diferença para métodos de medições tradicionais é que em vez de fornecer medidas geométricas de tal peça ou produto, a metrologia 3D fornece posições de coordenadas de superfícies e, assim, é possível obter um grande volume de dados sobre a superfície de determinado objeto, possibilitando a detecção de falhas e defeitos de forma mais rápida e assertiva (WOLFA; ROLLERB; SCHAËFERB, 2000).

Muito se fala do fenômeno da realidade aumentada e como vem contribuindo para vários processos industriais, sendo definida como uma visão em tempo real do mundo físico com adição de informações virtuais geradas por computador, ou seja, combinando objetos reais e virtuais. Essa tecnologia é muito vantajosa no chão de fábrica pois permite que uma realidade que está fora do alcance físico seja facilmente acessada, permitindo a simulação de situações através dos dados obtidos em tempo real que são usados para espelhar o mundo real no mundo virtual (FURHT, 2011).

Com a maior necessidade de customização e individualização da produção para se adequar às necessidades do cliente, a manufatura aditiva também exerce importante papel. Com esse recurso é possível aumentar a rapidez e diminuir o custo de produção de peças com design complexo através da criação de objetos físicos por meio de modelos digitais. A manufatura aditiva foi popularmente conhecida como impressora 3D (VAIDYAA; AMBADB; BHOSLE, 2018).

A manufatura inteligente pode ser considerada, então, a aplicação dos conceitos e tecnologias da Indústria 4.0 nas indústrias de transformação que acabou por revolucionar a maneira como as decisões são tomadas no chão de fábrica. As tecnologias melhoram a capacidade de gerar, armazenar e compartilhar dados, aumentando a produtividade, qualidade e segurança no ambiente industrial.

A convergência dessas tecnologias resultam, dentre outras coisas, num maior controle

de qualidade dos processos e produtos no ambiente industrial, o que acabou por gerar o termo Qualidade 4.0, que diz respeito ao futuro de excelência organizacional que as indústrias esperam hoje. Segundo a American Society of Quality ([ASQ \(2018\)](#)), a digitalização otimiza os processos, diminui o tempo de resposta e permite ações de correção automáticas e mais rápidas. Além das tecnologias, a Qualidade 4.0 requer profissionais que saibam aplicá-las para alcançar a excelência e, por isso, eles precisam conseguir analisar bem a enorme quantidade de dados gerados.

3 DESENVOLVIMENTO

Neste estudo busca-se fazer uma investigação nas publicações científicas atuais afim de descobrir como o tema de controle da qualidade está sendo abordado no contexto da Indústria 4.0, e como seus pilares tecnológicos são agentes facilitadores desse processo de controle.

3.1 Metodologia

A metodologia aplicada para realizar essa investigação foi a de um estudo bibliométrico. Segundo [Muhuri, Shukla e Abraham \(2019\)](#), a análise bibliométrica ou análise cienciométrica é uma área de pesquisa que ajuda a definir quais são as tendências na comunidade científica sobre determinado ramo e seus resultados fornecem motivações para pesquisas futuras.

A bibliometria é uma ferramenta utilizada para avaliar a qualidade e a produtividade acadêmica das publicações científicas, e exerce importantes funções no progresso da ciência, à medida que pode identificar quais são as fontes mais confiáveis, estabelecer a base para avaliação de pesquisas futuras, avaliar quais são os países, instituições ou autores mais influentes em determinado assunto ([COBO et al., 2015](#))

Neste estudo, é feito um estudo bibliométrico com o objetivo de avaliar qual é a tendência existente nas publicações científicas das tecnologias típicas da Indústria 4.0 que são utilizadas especificamente no controle de qualidade nas indústrias. A seguir serão detalhados os passos desse processo.

3.1.1 Escolha das bases de dados

Foram usadas três bases de dados de publicações científicas, escolhidas segundo dois critérios: elas deveriam ser bases de amplo alcance e influência, possuir número expressivo de publicações na área e possuir o mecanismo de busca avançada que possibilite a combinação de mais de duas palavras-chaves. Nesse sentido, foram escolhidas as bases de dados Science Direct, Mendeley e Scopus.

3.1.2 Seleção das palavras-chaves

A busca pelas publicações científicas foi sistemática e, por isso, a escolha das palavras-chaves corretas foi um dos pontos mais importantes para encontrar materiais científicos condizentes com a pesquisa. Elas foram escolhidas de forma que os resultados abordassem os principais tópicos discutidos na Sessão 2 deste trabalho: o controle da qualidade (ou mais especificamente, o controle estatístico da qualidade) e as tecnologias da indústria 4.0.

As palavras-chaves foram testadas afim de se chegar às combinações que resultassem no maior número possível de publicações. Três conjuntos foram formados com três palavras-chaves combinadas com o operador booleano AND, sendo

- o primeiro formado pelas expressões "technologies", "statistical quality control" e "industry 4.0",
- o segundo formado pelas expressões "technologies", "quality control" e "industry 4.0",
- e o terceiro formado pelas expressões "automation", "quality control" e "industry 4.0"

3.1.3 Filtros de pesquisa

Como filtros de pesquisa, os resultados foram limitados ao período de 2017 a 2020 e como tipo de documentos optou-se por mostrar apenas artigos científicos publicados em jornais. Outro filtro aplicado foi que as expressões usadas nas palavras chaves deveriam aparecer no título, no resumo ou nas palavras-chaves do artigo.

3.1.4 Filtragem de artigos encontrados

Feito esse levantamento de resultados, foi feita uma filtragem estratégica deles, primeiramente fazendo a leitura de todos os resumos e excluindo parte deles. Os artigos foram excluídos seguindo dois critérios, (a) não alinhamento do conteúdo do resumo com os principais tópicos abordados neste estudo, e (b) indisponibilidade do artigo na íntegra. Tal processo é melhor explicado no fluxograma da Figura 9.

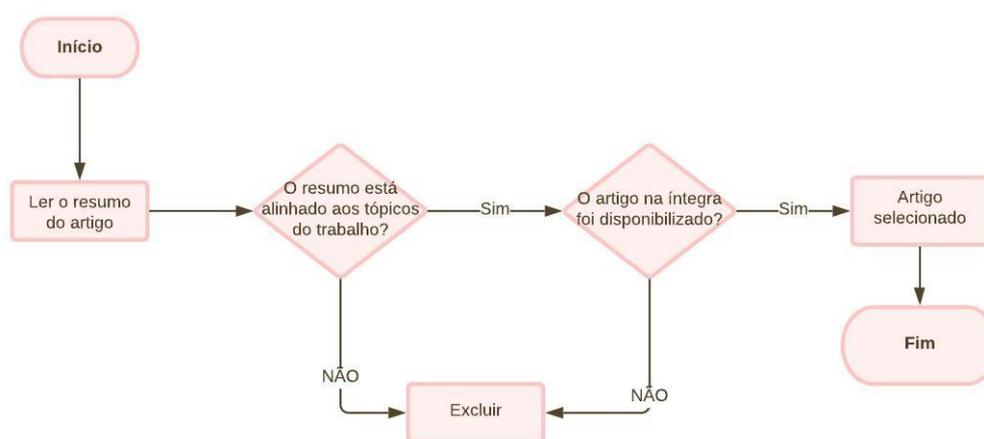


Figura 9 – Processo de filtragem de artigos

Fonte: Autoria própria (2021)

Após essa primeira filtragem obteve-se a lista dos artigos que serão utilizados para a análise e discussão deste estudo. Foi feita a leitura mais detalhada dos artigos selecionados e nessa etapa mais alguns foram excluídos por não tratar do tema com a profundidade necessária.

3.1.5 *Quality Function Deployment (QFD)*

O Desenvolvimento da Função Qualidade ou *Quality Function Deployment (QFD)* é uma ferramenta de planejamento da qualidade que transforma as necessidades do cliente em especificações técnicas de produtos e processos (NAGUMO, 2005).

Segundo Volpato et al. (2010), o Desenvolvimento da Função Qualidade ou *Quality Function Deployment (QFD)* é uma das ferramentas da qualidade utilizadas para seu planejamento, levando em conta a satisfação do cliente e características necessárias que o produto ou serviço deve ter. Ela foi desenvolvida por Yoji Akao e Shiguero Mizuno no Japão, num momento de grande crescimento da indústria japonesa. Segundo Patutti (2018) é preciso seguir alguns processos para aplicar a QFD:

- identificar os requisitos exigidos pelo cliente
- classificar os critérios de qualidade em graus de importância, atribuindo valores de 1 a 5, sendo 1 - nenhuma importância, 2 - pouca importância, 3 - alguma importância, 4 - importante e 5 - muito importante
- estabelecer as características dos requisitos exigidos pelo cliente que são importantes para os profissionais
- definir quais são as características dos requisitos mais significativas, através de uma escala em que Forte = 9, Médio = 3, Fraco = 1 e Inexistente = 0. Esses valores são multiplicados pelo grau de importância dado pelo cliente
- a qualidade projetada é definida pela ordem de importância das características
- a qualidade planejada é dada pelo profissional que avalia a importância de cada aspecto da qualidade, podendo variar entre Neutro = 1, Importante = 1,2 e Muito importante = 1,5. Além disso, o profissional deve atribuir valores de 1 a 5 aos aspectos de qualidade de acordo com seu grau de importância no serviço.
- no telhado da QFD fazer a correlação das características dos requisitos, declarando-as como fortemente positivas (++) , positivas (+), negativas (-) ou fortemente negativas (-).
- a escolha dos aspectos mais importantes para o produto baseiam-se nos requisitos do cliente com maior grau de importância e nas características dos requisitos com maior peso.

Segundo Nagumo (2005), os benefícios trazidos pela QFD são redução do tempo de desenvolvimento, redução de custos e reclamações do cliente, maior comunicação entre departamentos. A ferramenta pode ser utilizada no desenvolvimento de novos produtos ou na melhoria de produtos existentes.

Trazendo para o âmbito deste estudo, a montagem da QFD obedeceu um passo a passo, tendo como referência (NAGUMO, 2005). Para isso realizou-se o preenchimento da planilha de Excel elaborada e disponibilizada por Campos (2020), que será detalhado a seguir:

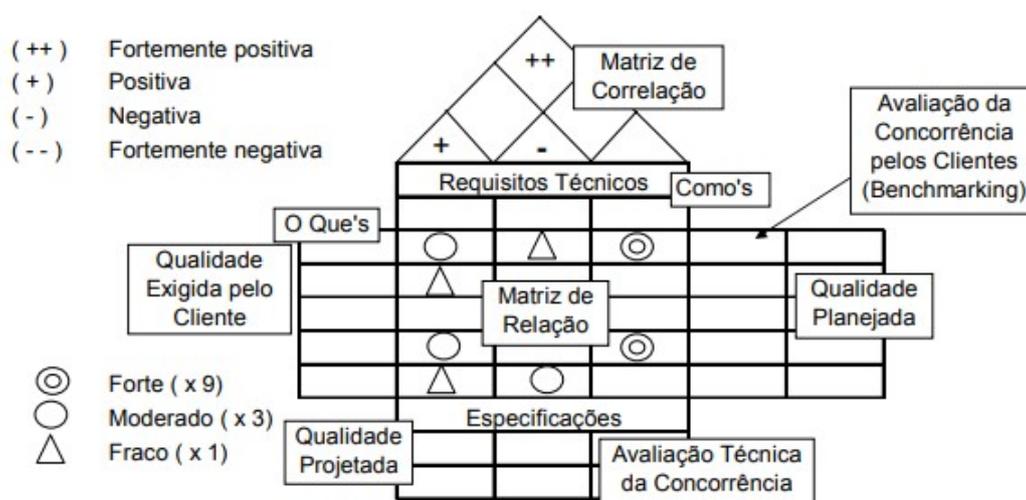


Figura 10 – A Casa da Qualidade

Fonte: (NAGUMO, 2005)

1. A primeira etapa consiste na compreensão das expectativas do cliente, ou seja, o que se espera encontrar nos artigos selecionados. Sendo assim, a expectativa é encontrar os principais tópicos abordados na revisão bibliográfica desse estudo. Esses tópicos são: o Controle Estatístico de Processo (CEP), incluindo gráficos de controle, inspeção por amostragem, experimentos planejados, capacidade de processo e noções básicas de estatística; controle de qualidade e suas ferramentas, e normatização ISO.
2. Na segunda etapa são estabelecidos os pesos das qualidades exigidas, ou seja, o grau de importância de cada um desses tópicos para a pesquisa. Esses números serão usados como multiplicadores e distribuídos de 1 a 5, sendo 1 - nenhuma importância, 2 - pouca importância, 3 - alguma importância, 4 - importante e 5 - muito importante. Como o foco desse estudo é o CEP, atribuiu-se máximo grau de importância a ele e os gráficos de controle, principal técnica do CEP. Ao controle de qualidade total (TQC), inspeção e capacidade de processo atribuiu-se grau de importância 4 e à normatização atribuiu-se grau 3.

3. A partir daí são determinados os requisitos do projeto (ou requisitos técnicos), que são os tópicos aos quais deseja-se relacionar com as expectativas do cliente, e também que deseja-se encontrar nos artigos selecionados. Sendo assim, os requisitos do projeto são as tecnologias pilares da Indústria 4.0: Realidade aumentada, *IoT*, *Big data*, *Cloud Computing*, metrologia 3D e inteligente, *machine learning*, inteligência artificial, *CPS*, processamento de imagens, manufatura aditiva e robótica avançada
4. Nessa fase são estabelecidas as prioridades baseadas na importância atribuída aos requisitos do projeto e a intensidade com a qual eles contribuem para a satisfação do cliente através do Modelo Kano (Mandatário, Esperado, Atrativo). Em outras palavras, os tópicos abordados na pesquisa serão classificados de acordo com a prioridade que possuem e, então, categorizados como mandatário, esperado ou atrativo para o objetivo geral da pesquisa. Novamente o CEP e os gráficos de controle se definem como Mandatários na pesquisa, já o (TQC), inspeção, capacidade de processo e experimentos planejados são Esperados e a normatização é um Atrativo
5. A Matriz da Qualidade é encontrada no centro da Casa da Qualidade e nela é feita a relação entre as qualidades exigidas e os requisitos técnicos através de símbolos de Relacionamento, como mostra a Figura 11. Neste estudo, os tópicos da qualidade são relacionados com os pilares da Indústria 4.0, e essa relação será melhor analisada na seção 4 dos resultados.
6. Na fase da Qualidade Planejada é feita a comparação e estudo da concorrência entre empresas do mesmo ramo, bem como uma avaliação técnica dos requisitos e uma projeção das melhorias. Neste estudo, essa comparação foi construída entre as três bases de dados escolhidas e a quantidade de artigos encontrados em cada uma é avaliada em uma escala de 0 a 5. Essa análise será detalhada na seção 4.
7. Na fase da Matriz de Correlação, ou telhado da Casa da Qualidade, são avaliadas as relações existentes entre os requisitos técnicos, que no âmbito da pesquisa significa relacionar os pilares da Indústria 4.0 entre si, através de símbolos de Correlação, como é possível visualizar na Figura 11. No telhado ainda é indicada a Direção de Melhoria, ou seja, onde há necessidade de mais esforços de pesquisa. Essa análise será detalhada na seção 4.



Figura 11 – Legendas Casa da Qualidade

Fonte: (CAMPOS, 2020)

4 RESULTADOS

4.1 Os artigos selecionados

Na seção 3.1.2, foi detalhado o processo de seleção das palavras-chaves usadas na busca pelos artigos. Contudo, o primeiro conjunto, formado pelas expressões "*technologies*", "*statistical quality control*" e "*industry 4.0*", não gerou resultados. Foi necessário então, utilizar os outros dois conjuntos de palavras-chaves em todas as bases de dados.

A partir do uso dessas palavras-chaves, foi feita uma busca sistemática de artigos científicos e análise minuciosa dos resultados encontrados, e em cada base de dados selecionou-se uma lista dos artigos que realmente se alinharam ao tema.

Na data em que foi realizada essa busca, em agosto de 2020, a base de dados Science Direct forneceu 13 artigos selecionados, a Mendeley 16 artigos selecionados, e na Scopus 11 artigos selecionados, resultando em 40 artigos.

No entanto, 10 desses artigos foram encontrados em mais de uma base de dados, resultando no total de 30 artigos, identificados nas Figuras 12 e 13 com os respectivos títulos, autores e ano de publicação. Cada artigo recebeu como referência uma letra do alfabeto.

	Título	Autores	Ano
A	A review of in-line and on-line measurement techniques to monitor industrial mixing processes	Bowler, A.L., Bakalis, S., Watson, N.J.	2019
B	A review on sensor based monitoring and control of friction stir welding process and a roadmap to Industry 4.0	D. Mishra et al.	2018
C	An assessment of two technologies for high performance composite machining; adaptive fixturing and in process tool profile monitoring	Abdellatif Bey-Temsamani et al.	2019
D	Cyber-Physical Manufacturing Metrology Model (CPM3) – Big Data Analytics Issue	Vidosav Majstorovic et al.	2018
E	Displaying Product Manufacturing Information in Augmented Reality for Inspection	Uroš Urbas et al.	2019
F	Industry 4.0 implications in machine vision metrology: an overview	Victor Alonso et al.	2019
G	Intelligent welding system technologies State-of-the-art review and perspectives	B. Wang, et al.	2020
H	Object Detection using Convolutional Neural Networks for Smart Manufacturing Vision Systems in the Medical Devices Sector	Kelly O'Brien et al.	2019
I	Prediction of the Product Quality of Turned Parts by Real-time Acoustic Emission Indicators	Albert Albers et al.	2017
J	Spatio-Temporal Adaptive Sampling for effective coverage measurement planning during quality inspection of free form surfaces using robotic 3D optical scanner	M. Babu, et al	2019
K	Towards Predicting System Disruption in Industry 4.0 - Machine Learning-Based Approach	Bouziane Brik et al.	2019
L	Utilization of a reinforcement learning algorithm for the accurate alignment of a robotic arm in a complete soft fabric shoe tongues automation process	Y.-T. Tsai, et al.	2020
M	Virtual Commissioning of Industrial Control Systems - a 3D Digital Model Approach	Matthias Schamp et al.	2019
N	A comprehensive survey of ubiquitous manufacturing research	X. Wang et al.	2017
O	A fog computing and cloudlet based augmented reality system for the industry 4.0 shipyard	T. Fernández-Caramés et al.	2018

Figura 12 – Artigos selecionados

Fonte: Elaborado pela Autora (2021)

	Título	Autores	Ano
P	A Framework of Production Planning and Control with Carbon Tax under Industry 4.0	Wen-Hsien Tsai, Yin-Hwa Lu	2018
Q	A smartphone integrated hand-held gap and flush measurement system for in line quality control of car body assembly	Elisa Minnetti et al.	2020
R	An Industry 4.0 Framework for the Quality Inspection in Gearboxes Production	Paolo Cicconi, Roberto Raffaeli	2020
S	Automated work cycle classification and performance measurement for manual work stations	K. Bouters et al.	2018
T	Deep learning for industrial computer vision quality control in the printing industry 4.0	Javier Villalba- Diez et al.	2019
U	Green production planning and control model with ABC under industry 4.0 for the paper industry	Wen-Hsien Tsai, Shang-Yu Lai	2018
V	Image processing applications on yarn characteristics and fault inspection	Elif GÜLTEKİN et al.	2019
W	Intelligent management in the age of industry 4.0 - an example of a polymer processing company	Katarzyna Łukasik, Tomasz Stachowiak	2020
X	Quality 4.0 in action Smart hybrid fault diagnosis system in plaster production	Javaneh Ramezani, Javad Jassbi	2020
Y	The Impact of IT Knowledge Capability and Big Data and Analytics on Firm's Industry 4.0 Capability	Kwanchanok Chumnumporn et al.	2020
Z	Toward Industry 4.0 With IoT - Optimizing Business Processes in an Evolving Manufacturing Factory	Belli et al.	2019
A1	Using Sensor-Based Quality Data in Automotive Supply Chains	Michael Teucke et al.	2018
A2	A machine vision algorithm for quality control inspection of gears	Desmond K. Moru, Diego Borro	2019
A3	Image Processing of Aluminum Alloy Weld Pool for Robotic VPPAW Based on Visual Sensing	Chun Jiang, Fubiao Zhang, Zhenmin Wang	2017
A4	Root-Cause Problem Solving in an industry 4.0 context	Brian Vo, Elif Kongar, Manuel F. Suarez- Barraza	2020

Figura 13 – Continuação - artigos selecionados

Fonte: Elaborada pela Autora (2021)

Na Figura 14 é detalhada a divisão dos artigos baseada na base de dados em que foram encontrados. Observa-se também os artigos que foram encontrados em mais de uma base.

BASE DE DADOS	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	A1	A2	A3	A4	Nº ARTIGOS	
SCIENCE DIRECT	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X																			13
MENDELEY	X											X		X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X					16
SCOPUS														X	X		X	X	X	X						X		X	X	X	11	
TOTAL																															40	

Figura 14 – Divisão dos artigos baseada nas base de dados em que foram encontrados

Fonte: Elaborado pela autora com base nos artigos selecionados (2021)

Os artigos também foram divididos de acordo com seu ano de publicação, como mostra o gráfico da Figura 15, evidenciando que o tema deste estudo é contemporâneo, com a porcentagem de 45% das publicações no ano de 2019 e 23% no ano de 2020, até a data em que foi realizada a busca por artigos nas bases de dados.

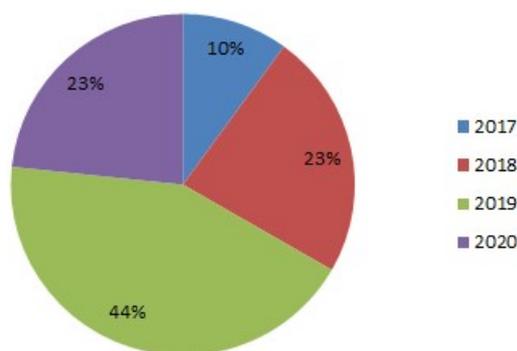


Figura 15 – Contagem de artigos por ano de publicação

Fonte: Elaborado pela autora com base nos artigos selecionados (2021)

A Figura 16, por sua vez, apresenta uma análise geográfica das publicações, divididas segundo os países em que foram realizados os estudos.

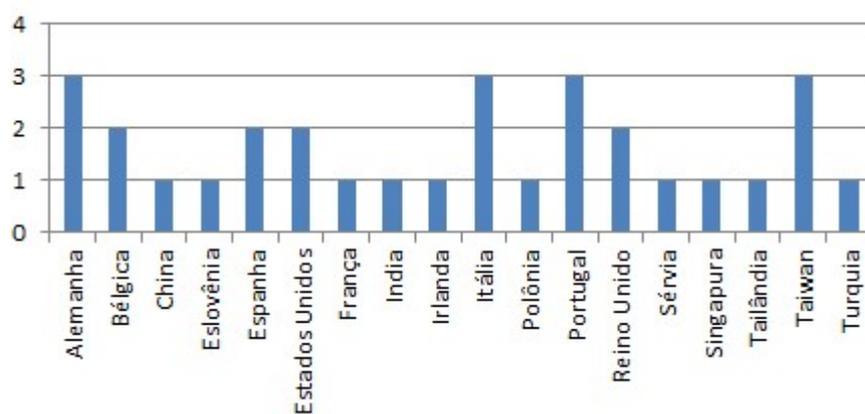


Figura 16 – Contagem de artigos por países

Fonte: Elaborado pela autora com base nos artigos selecionados (2021)

De acordo com o levantamento feito pela Unesco, exibido na Figura 17, as regiões que mais investem em Pesquisa e Desenvolvimento são América do Norte, Europa Ocidental e Ásia Oriental. É possível associar essas informações com a pesquisa e concluir que por esse motivo, os países que mais publicaram artigos do tema foram Alemanha, Portugal, Itália, Taiwan, Estados Unidos, Espanha, Bélgica e Reino Unido.

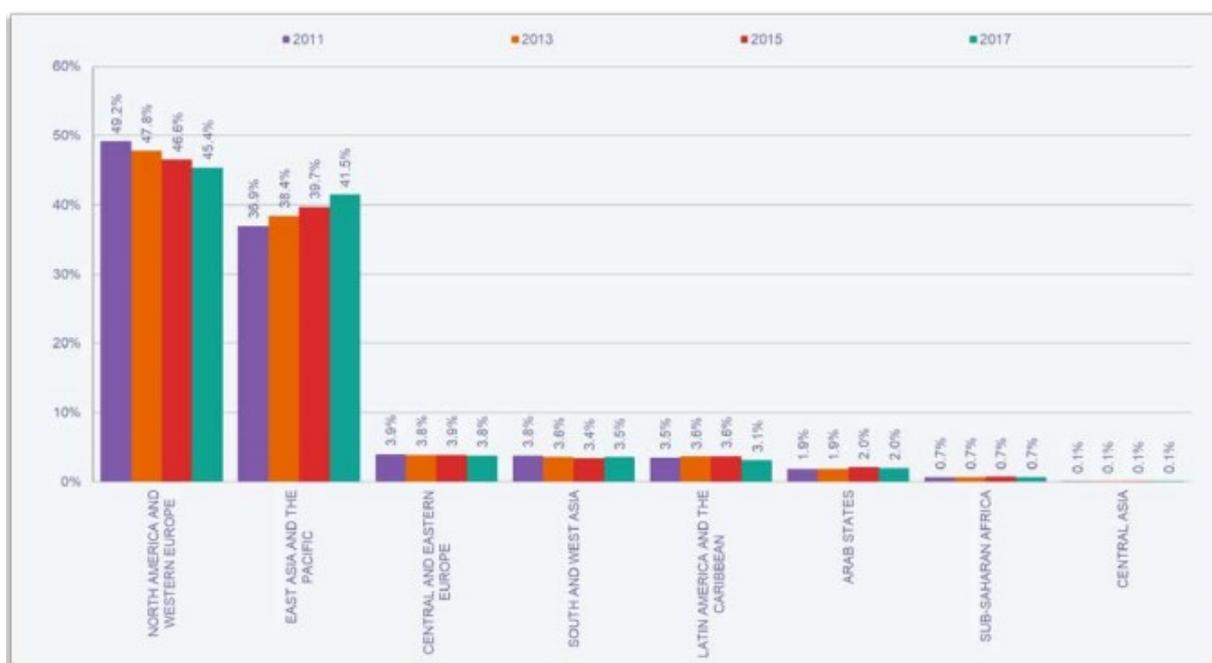


Figura 17 – Investimentos em pesquisa e desenvolvimento por regiões

Fonte: UNESCO (2020)

4.2 Temas da Qualidade abordados nos artigos

Por meio da pesquisa deste estudo, a expectativa foi encontrar tecnologias da Indústria 4.0 auxiliando especificamente nos processos de Controle Estatístico da Qualidade, no entanto esse objetivo não foi atingido.

Em contrapartida, outros tópicos da Qualidade abordados neste estudo foram encontrados na busca dos artigos, o que mostra a Figura 18 com um gráfico de distribuição desses temas.

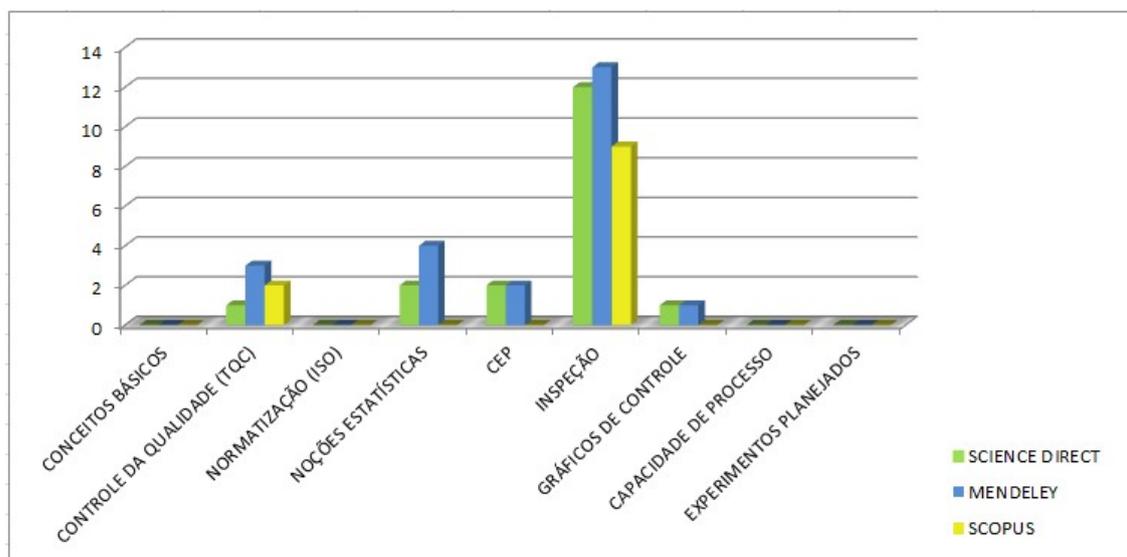


Figura 18 – Os temas da Qualidade encontrados nos artigos

Fonte: Elaborado pela autora com base nos artigos selecionados (2021)

Por sua vez, o CEP foi encontrado em apenas quatro artigos, nos quais mostra ser um conjunto de técnicas que auxilia na tomada de decisões por meio do reconhecimento de padrões e aprendizado de máquina.

Como exemplo, [Tsai e Lai \(2018\)](#) discutem sobre o CEP em um dos artigos selecionados neste estudo. Os autores mostram que as tecnologias da Indústria 4.0 auxiliam na tarefa de minimizar os custos com desperdício em uma linha de produção, ao garantirem um monitoramento eficaz dos parâmetros e previsão de possíveis falhas na produção. Eles discutem como os sensores modernos coletam uma quantidade enorme de dados e com auxílio da IoT e outras tecnologias esses dados são processados e analisados de modo a gerar melhores tomadas de decisão.

[Ramezani e Jassbi \(2020\)](#), em outro artigo também selecionado neste estudo, complementam que a chamada Qualidade 4.0 não substitui as técnicas tradicionais de gerenciamento e controle da qualidade, mas as aprimoram. Os autores discutem o CEP, mais especificamente os gráficos de controle, e apresentam um modelo baseado em inteligência artificial e aprendizado de máquina que auxilia na análise das variações de parâmetros nos gráficos de controle, tarefa que tradicionalmente requer conhecimento estatístico.

O controle da qualidade é um assunto que foi encontrado em 5 artigos, porém observou-se que a abordagem não foi aprofundada, se resumindo em mostrar que determinadas tecnologias foram adotadas nas linhas de produção, o que trouxe inúmeros benefícios, dentre eles o melhor controle da qualidade de seus produtos. No entanto, as ferramentas da qualidade e os métodos para tais resultados são pouco detalhados.

O tópico mais encontrado nos artigos foi a Inspeção, aparecendo em 25 das publicações selecionadas. No entanto a Inspeção encontrada nos artigos se difere do método de Inspeção por Amostragem abordado na revisão bibliográfica deste estudo, que se dá com auxílio de métodos estatísticos. A técnica de inspeção presente nas indústrias hoje se vale do uso associado com tecnologias mais sofisticadas da Indústria 4.0, como sensores inteligentes, sensores 3D, processamento de imagens e aprendizado de máquina, que possibilitam a checagem de determinado produto dentro das especificações permitidas para ele.

Foi possível observar que não encontra-se registro sobre pesquisas que relacionam as tecnologias da Indústria 4.0 às Normas ISO da Gestão da Qualidade nas bases de dados consideradas. Nenhum registro encontrado para estudos da capacidade de processo e para a técnica dos Experimentos Planejados, um dos ramos do CEP.

A Figura 19 traz a relação dos 30 artigos com a marcação de um 'X' mostrando quais temas da qualidade são abordados em cada um deles.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	A1	A2	A3	A4	
CONCEITOS BÁSICOS DA QUALIDADE																															
CONTROLE DA QUALIDADE (TQC)												X			X								X		X						X
NORMATIZAÇÃO (ISO)																															
NOÇÕES ESTATÍSTICAS							X		X								X			X					X			X			
CEP							X		X													X			X						
INSPEÇÃO	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
GRÁFICOS DE CONTROLE							X																	X							
CAPACIDADE DE PROCESSO																															
EXPERIMENTOS PLANEJADOS																															

Figura 19 – Os temas da Qualidade encontrados nos artigos

Fonte: Elaborado pela autora com base nos artigos selecionados (2021)

4.3 Temas da Indústria 4.0 abordados nos artigos

Os trinta artigos também foram agrupados de acordo com os temas e tecnologias pilares da Indústria 4.0, separadamente para cada base de dados, como mostra o gráfico de barras da Figura 20.

Nele é possível observar que a *IoT* foi um tema predominantemente abordado nas bases Mendeley e Scopus, e o *machine learning* na base Science Direct.

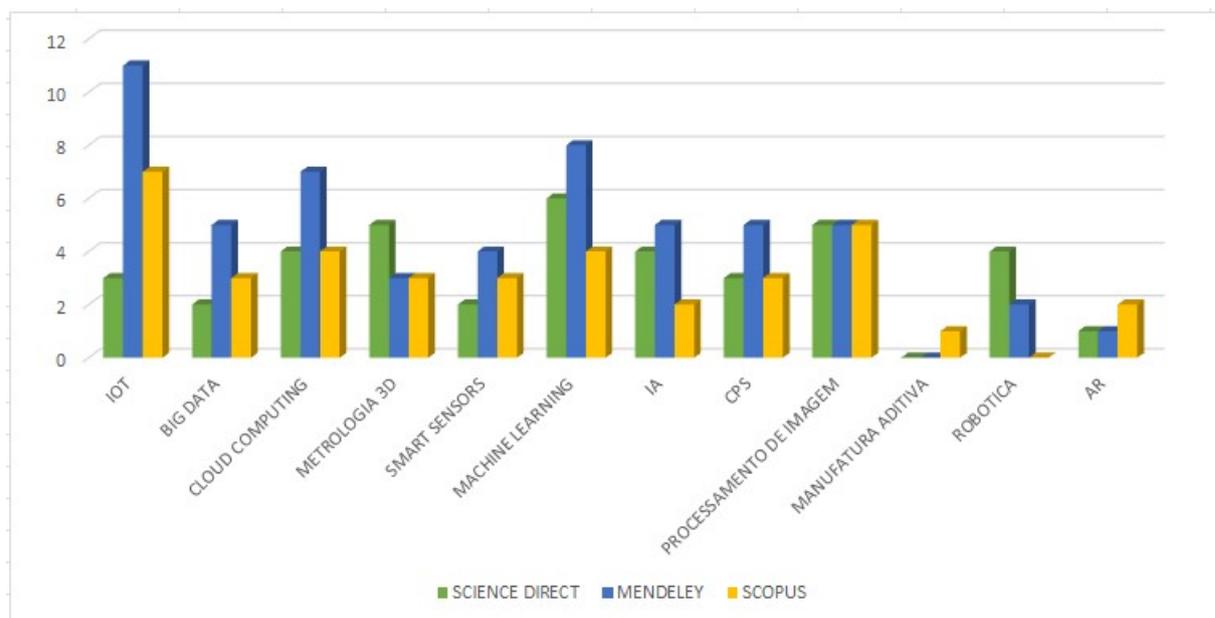


Figura 20 – As tecnologias pilares da Indústria 4.0 encontradas nos artigos

Fonte: Elaborado pela autora com base nos artigos selecionados (2021)

Nos artigos selecionados, a *IoT* muitas vezes aparece atrelada a outras tecnologias, como *Big Data* e *Cloud Computing*, sensores modernos e inteligentes. Tais tecnologias são essenciais para garantir o monitoramento em tempo real do processo e, conseqüentemente, facilitar a prevenção de falhas e controle da qualidade.

O processamento de imagens foi uma tecnologia muitas vezes associada ao uso de sensores inteligentes e/ou 3D, aprendizado de máquina e inteligência artificial, tecnologias primordiais para a inspeção de peças, tópico da qualidade recordista na pesquisa feita.

Já a robótica foi um tema abordado em cinco artigos fazendo associação com outras tecnologias, principalmente o *machine learning*, exercendo o papel de automatizar processos e linhas de produção. A análise descritiva e preditiva dos dados coletados numa linha de produção automatizada permite a elaboração de algoritmos eficientes para programação de um braço robótico, por exemplo, que ajuda a aperfeiçoar o controle do processo.

A realidade aumentada, por sua vez, é uma tecnologia bastante útil porém pouco explorada nos artigos, aparecendo em apenas três deles. Exerce um papel importante no processo de inspeção de produtos, tema recorrente nos artigos como técnica de controle da qualidade. [Urbas, Vrabič e Vukašinovića \(2019\)](#) propõem um modelo baseado em realidade aumentada para substituir o processo manual de inspeção antes feito com comparações de desenhos e preenchimento de formulários.

A manufatura aditiva foi o tema menos recorrente na pesquisa, aparecendo em apenas um dos artigos. [Vo, Kongar e Suarez-Barraza \(2020\)](#) demonstra como a manufatura aditiva pode

ser uma tecnologia bastante útil para o design de soluções de problemas, auxiliando engenheiros a ter ideias inovadoras, e imprimindo peças para correções de falhas por um custo mais acessível.

As tecnologias da indústria 4.0, de uma forma geral, se apresentam como alternativas para aumentar a eficiência e produtividade do processo de controle de qualidade. Segundo [Ramezani e Jassbi \(2020\)](#), elas cumprem esse papel por meio de técnicas de monitoramento inteligente e em tempo real, rastreamento automático de materiais e equipamentos, e apoio nas tomadas de decisões. O autor complementa que a digitalização, automação e comunicação da Indústria 4.0 permitem uma melhor interpretação dos produtos, serviços e processos industriais e conseqüentemente melhora o controle da qualidade e detecção de falhas do processo.

A Figura 21 traz a relação dos 30 artigos com a marcação de um 'X' mostrando quais tecnologias da Indústria 4.0 são abordados em cada um deles.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	Z	A1	A2	A3	A4		
IOT	X			X							X			X	X	X	X	X		X	X		X		X	X	X				X	
BIG DATA	X	X													X	X					X		X		X						X	
CLOUD COMPUTING	X			X						X	X			X	X	X					X				X	X	X					
METROLOGIA 3D	X	X			X					X							X	X										X				
SMART SENSORS	X							X													X	X		X				X			X	
MACHINE LEARNING	X				X	X	X			X	X					X		X		X		X		X			X	X				
IA	X				X	X					X						X	X		X		X		X			X	X				
CPS	X	X	X								X	X	X		X							X										
PROCESSAMENTO DE IMAGEM	X	X	X		X		X										X	X	X			X						X	X			
MANUFATURA ADITIVA																																X
ROBOTICA	X				X					X	X												X									
AR					X										X																	X

Figura 21 – Distribuição dos artigos segundo os temas da Indústria 4.0

Fonte: Elaborado pela autora com base nos artigos selecionados (2021)

4.4 Casa da Qualidade - QFD

A finalidade da Casa da Qualidade neste estudo é relacionar os tópicos da qualidade abordados na revisão bibliográfica com as principais tecnologias pilares da Indústria 4.0, levando em consideração os graus de importância de cada um dos tópicos, a quantidade de artigos que relacionam os temas, e o resultado mostrará qual ou quais dessas tecnologias oferece maior relevância no processo de controle da qualidade, bem como trará sugestões de caminhos pouco explorados para pesquisas futuras.

A Figura 22 mostra a Casa da Qualidade preenchida conforme o passo a passo detalhado na seção 3.

A Matriz da Qualidade, localizada no centro da QFD, foi realizada relacionando as necessidades do cliente (tópicos da qualidade) aos requisitos do projeto (tecnologias da Indústria 4.0). Essa relação foi classificada como forte, moderada ou fraca por meio dos símbolos mostrados na Figura 11. É importante ressaltar que essas relações não foram feitas tendo como base a relação encontrada nos artigos selecionados, mas sim na base teórica de cada um dos tópicos e como eles podem se relacionar

Para entender um pouco como foi feita essa análise, primeiramente o CEP foi avaliado pela ótica de cada uma das tecnologias citadas, ponderando qual delas poderia auxiliá-lo de alguma forma.

Avalia-se que a *IoT*, a metrologia inteligente, responsável por gerar uma quantidade enorme de dados, juntamente com o *Big Data* para analisá-los devidamente, são de grande importância para uma análise estatística, descritiva e preditiva de comportamentos de determinados parâmetros do processo, realizada pelo *machine learning*. É possível concluir que essas tecnologias estão fortemente relacionadas com o CEP, e conseqüentemente, com os gráficos de controle, uma vez que conseguem auxiliar em toda análise estatística que esses processos envolvem.

Por outro lado, o CEP e os gráficos de controle tem relação moderada com outras tecnologias como a realidade aumentada, manufatura aditiva, inteligência artificial, *CPS* e *cloud computing*. Já a robótica e o processamento de imagem apresentam uma relação fraca.

Baseado no embasamento teórico, somado aos resultados encontrados nessa pesquisa, é possível concluir que o controle de qualidade possui relação forte com várias tecnologias em comum com o CEP, e além delas destaca-se a manufatura aditiva, a realidade aumentada e o processamento de imagem, que são também primordiais para o processo de inspeção de peças no contexto de Indústria 4.0.

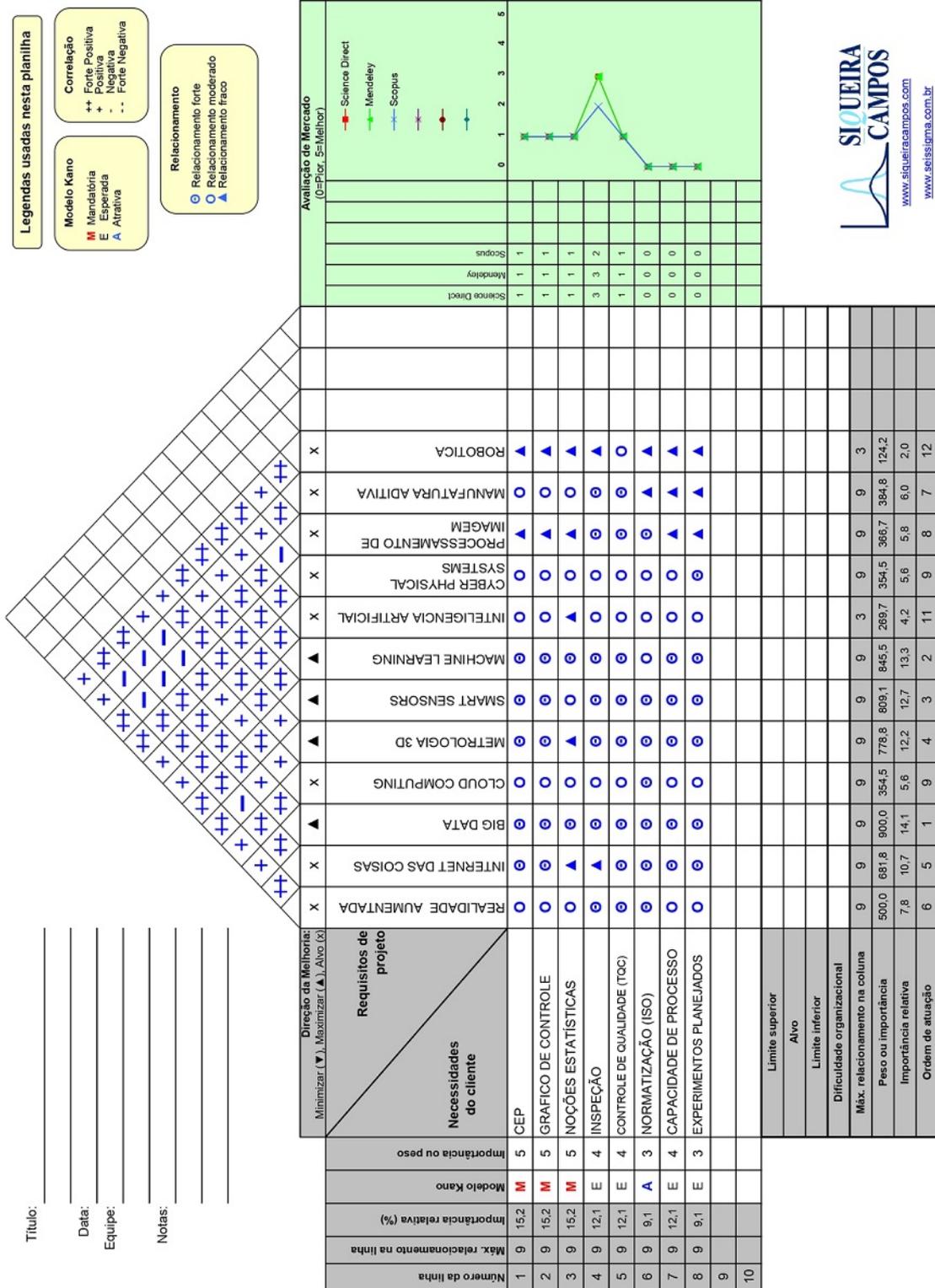


Figura 22 – Casa da Qualidade

Fonte: Adaptado de Campos (2020)

A avaliação da qualidade por inspeção e amostragem é uma das técnicas do CEP, conforme abordado na revisão bibliográfica desse estudo. Ela também tem relações fortes com a metrologia, *Big data* e machine learning. No entanto, a inspeção que foi encontrada nos artigos selecionados tem mais relação com uma checagem de peças e monitoramento de falhas e correções e, por isso, também possui forte relação com a metrologia 3D, processamento de imagem, manufatura aditiva e realidade aumentada, pois são tecnologias facilitadoras desse processo.

A normatização da qualidade, por sua vez, apesar de não ter sido encontrada nos artigos desse estudo, pode ser muito beneficiada por certas tecnologias como a realidade aumentada, metrologia e processamento de imagem, uma vez que esse processo de baseia em checagens e conferências se determinado produto ou processo está de acordo com as especificações.

Os experimentos planejados, outra ferramenta do CEP que também não foi encontrada nos artigos, é facilitada pelas tecnologias pois por se tratarem de uma técnica que utiliza manipulações propositais de parâmetros e simulações, um ambiente digitalizado por sensores inteligentes e mais eficientemente controlado garante respostas mais assertivas. O estudo da capacidade de um processo, que envolve observação de causas de variabilidade, estimações e monitoramento de parâmetros, também tem forte relação com essas tecnologias.

Na Qualidade Planejada, localizada do lado direito da QFD, é feita a avaliação de mercado, ou seja, no âmbito desse estudo, é feita a comparação entre as bases de dados escolhidas baseada na quantidade de artigos de cada tópico encontrada em cada uma delas. Essa avaliação recebe classificações de 0 a 5, sendo 0 a pior avaliação e 5 a melhor.

Para realizar essa análise, essa classificação foi dividida da seguinte forma: se determinado tópico apresentou

- 0 artigos = avaliação 0
- 1 a 5 artigos = avaliação 1
- 6 a 10 artigos = avaliação 2
- 11 a 16 artigos = avaliação 3
- 17 a 23 artigos = avaliação 4
- 24 a 30 artigos = avaliação 5

Dessa forma, a planilha gera gráficos para comparar a avaliação de cada base de dados. É possível observar que Science Direct e Mendeley apresentaram a mesma linha de gráfico, e Scopus diferiu na quantidade de artigos relacionados à inspeção, concluindo assim, que foi a base de dados com pior avaliação para o objetivo dessa pesquisa.

Na base do telhado da QFD encontra-se uma linha chamada Direção da Melhoria. Nesse campo marcam-se com um X as tecnologias alvo, ou seja, que seriam interessantes em pesquisas

futuras, com uma seta direcionada para cima marcam-se as tecnologias que deveriam ser mais exploradas e com uma seta direcionada para baixo, as tecnologias que podem ter seus estudos e pesquisas minimizados.

Conforme analisado anteriormente, as tecnologias mais importantes para aprimorar e facilitar o CEP, foco desse estudo, são metrologia, *Big Data* e machine learning e, por isso, foram marcadas com a seta para cima, sugerindo assim um caminho a ser explorado em pesquisas futuras. O restante das tecnologias foi marcado com um X pois ainda precisam ser melhor exploradas quando relacionadas ao CEP e ao controle de qualidade. Por ser um assunto relativamente novo e pouco abordado na comunidade científica, nenhuma tecnologia precisa ter seus estudos minimizados.

Por fim, com a planilha inteiramente preenchida, é gerada na parte inferior da QFD a Qualidade Projetada, onde observa-se como resultado principal a importância relativa de cada uma das tecnologias e uma possível ordem de atuação de pesquisas futuras. Nesse estudo, foi possível investigar que a tecnologia com maior importância para a pesquisa é o *Big Data*, seguido do machine learning e metrologia, sendo essa também a ordem de atuação para futuras pesquisas.

Nesta última etapa do preenchimento da QFD, observa-se na linha "PESO OU IMPORTÂNCIA" valores absolutos resultantes de operações matemáticas feitas nas etapas anteriores, que mostram quais tecnologias exercem maior relevância no processo de controle da qualidade. Na linha "IMPORTÂNCIA RELATIVA", observa-se esse valor em forma percentual, e na linha "ORDEM DE ATUAÇÃO" tem-se a ordem que indica caminhos futuros de estudos e pesquisas e em quais tecnologias deve-se investir mais esforços.

Sendo assim, constata-se que a Big Data (14,1%), seguida do *machine learning* (13,3%), dos sensores inteligentes (12,7%) e sensores 3D (12,2%) constituem o grupo de tecnologias que mais se relacionam e mais podem auxiliar o controle de qualidade nos processos produtivos. O restante, seguindo uma ordem decrescente de importância, a *IoT*, realidade aumentada, manufatura aditiva, processamento de imagens, *CPS*, inteligência artificial e robótica.

5 CONCLUSÃO

Buscou-se com este estudo abordar o controle da qualidade em ambientes produtivos sob a ótica da Indústria 4.0. Mais especificamente, objetivou-se com este estudo investigar como as tecnologias atuais podem auxiliar no chamado Controle Estatístico da Qualidade.

A metodologia aplicada permitiu, primeiramente com o estudo bibliométrico, fazer um levantamento do que está sendo encontrado hoje nas indústrias, quais das tecnologias pilares da Indústria 4.0 exercem de fato uma relação com as técnicas de controle da qualidade. O desenvolvimento da Casa da Qualidade (QFD) possibilitou relacionar o objetivo e as expectativas da pesquisa com os requisitos das tecnologias atuais.

Dessa forma, foi possível concluir quais tecnologias são melhor relacionadas com esse processo e, portanto, merecem maior foco para estudos posteriores. Conforme analisado anteriormente, a tendência é que existam ambientes produtivos cada vez mais digitalizados, com amplo uso de sensores modernos, inteligentes e robustos, que permitem uma enorme captação de dados e parâmetros do ambiente e do produto, desde o fornecedor da matéria prima até a entrega ao consumidor. Essa enorme quantidade de dados precisa ser devidamente tratada e analisada para ser capaz de gerar uma base sólida para tomadas de decisões, e é esse o papel do *Big Data*. O aprendizado de máquina permite que as máquinas e equipamentos consigam realmente aprender com esses dados e, conseqüentemente, tomarem decisões de forma autônoma, aprendendo com erros, evitando falhas de processo e paradas de produção. Por esse motivo, essas três tecnologias apresentaram maiores índices de importância relativa na pesquisa e, juntas, constituem o caminho mais indicado e propício para que mais pesquisas sejam aprofundadas.

No entanto, este estudo também gerou uma lacuna no que diz respeito ao controle estatístico de processo. Temas importantes do CEP como o estudo da capacidade de processo e os experimentos planejados sequer foram encontrados nos artigos. Os gráficos de controle e a base estatística envolvida foram superficialmente abordados, deixando assim uma dúvida de como essas técnicas podem ser utilizadas nas indústrias hoje e como as tecnologias podem auxiliá-las, sendo um possível e interessante caminho para pesquisas futuras.

Entre as outras tecnologias da Indústria 4.0, a realidade aumentada, manufatura aditiva e processamento de imagens tem enorme potencial para auxiliar na técnica de controle de qualidade que hoje é amplamente utilizada nas indústrias, a inspeção de peças. No entanto pouco foi encontrado nos artigos selecionados e, por isso, são também sugestões para aprofundamento em possíveis pesquisas.

Dada a importância do tema no contexto industrial atual, com a constante busca por excelência operacional, a entrega de produtos e serviços de qualidade ao consumidor é de grande interesse e, por isso, não devem ter recursos economizados para pesquisas nessa área.

REFERÊNCIAS

Western Electric Co. *Statistical quality control*. 1. ed. Pennsylvania: Mack Printing Company, 1956. Citado 3 vezes nas páginas 25, 28 e 29.

AGUAYO, R. *Dr. Deming: The American who Taught the Japanese about Quality*. 1. ed. New York: Simon Schuster, 1990. Citado na página 22.

ALONSO, V. et al. Industry 4.0 implications in machine vision metrology an overview. *Procedia Manufacturing*, 2019. v. 41, p. 359 – 366, 2019. Citado na página 37.

ALPAYDIN, E. *Introduction to Machine Learning*. 4. ed. Massachusetts: The MIT Press, 2020. Citado na página 36.

ASQ. *Learn about Quality 4.0*. 2018. Learn about Quality 4.0. Disponível em: <<https://asq.org/quality-resources/quality-4-0>>. Acesso em: 01 ago. 2020. Citado na página 38.

BASSAN, E. J. *Gestão da Qualidade - Ferramentas, Técnicas e Métodos*. 1. ed. Curitiba, PR: s.n., 2018. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 23.

BEST, M.; NEUHAUSER, D. W edwards deming: father of quality management, patient and composer. *Quality and Safety Health Care - BMJ Journal*, 2005. v. 14, n. 4, p. 310–312, 2005. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 21.

CAMPOS, S. *Planilha para QFD*. 2020. Planilha para QFD. Disponível em: <<http://www.siqueiracampos.com/downloads>>. Acesso em: 16 set. 2020. Citado 3 vezes nas páginas 42, 44 e 55.

COBO, M. et al. 25 years at knowledge-based systems: A bibliometric analysis. *Knowledge-Based Systems*, 2015. v. 80, p. 3–13, 2015. Citado na página 39.

FURHT, B. *Handbook of augmented reality*. Florida: Springer, 2011. Citado na página 37.

GARVIN, D. A. Competing in the eight dimensions of quality. *Harvard Business Review*, 1987. v. 6, 1987. Citado na página 17.

GARVIN, D. A. *Gerenciando a qualidade: a visão estratégica e competitiva*. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2002. Citado na página 18.

JURAN, J. M. *Planejando para a qualidade*. 3. ed. São Paulo: Pioneira, 1995. Citado na página 17.

JURAN, J. M. *Juran's Quality Handbook*. 5. ed. Nova York: McGraw Hill, 1998. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 23.

LIU, M. et al. Performance optimization for blockchain-enabled industrial internet of things (iiot) systems: A deep reinforcement learning approach. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2019. p. 3559 – 3570, 2019. Citado na página 36.

LOUZADA, F. et al. *Controle estatístico de processos - uma abordagem prática para cursos de engenharia e administração*. Rio de Janeiro: LTC, 2013. Citado 3 vezes nas páginas 27, 31 e 32.

- MARSHALL, I. et al. *Gestão da qualidade e processos*. Rio de Janeiro: Editora FGV, 2012. Citado 3 vezes nas páginas 18, 19 e 25.
- MONTGOMERY, D. C. *Introdução ao Controle Estatístico da Qualidade*. 7. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora, 2016. Citado 14 vezes nas páginas 14, 17, 18, 19, 20, 21, 23, 26, 28, 30, 31, 32, 33 e 34.
- MUHURI, P. K.; SHUKLA, A. K.; ABRAHAM, A. Industry 4.0: A bibliometric analysis and detailed overview. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2019. p. 218 – 235, 2019. Citado na página 39.
- NAGUMO, G. K. *Desdobramento da função qualidade (QFD) aplicado à produção de mudas de café*. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, 2005. Citado 2 vezes nas páginas 41 e 42.
- PALADINI, M. M. d. C. E. P. *Gestão da Qualidade - Teoria e Casos*. 2. ed. Rio de Janeiro, RJ: Elsevier Editora, 2012. Citado 9 vezes nas páginas 14, 17, 18, 19, 20, 23, 24, 25 e 32.
- PATUTTI, F. A. O. B. *Medidas analíticas e mitigadoras para o efeito chicote na cadeia de suprimentos do setor farmacêutico: Uma sugestão desenvolvida por meio de ferramentas do planejamento e controle da produção*. Monografia (Monografia) — Universidade Federal de Ouro Preto, 2018. Citado na página 41.
- RAMEZANI, J.; JASSBI, J. Quality 4.0 in action: Smart hybrid fault diagnosis system in plaster production. *Processes, MDPI*, 2020. v. 8, 2020. Citado 2 vezes nas páginas 50 e 53.
- SAMOHYL, R. W. *Controle Estatístico de Qualidade*. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2009. Citado na página 30.
- SANTOS, B. P. et al. Indústria 4.0: Desafios e oportunidades. *Revista Produção e Desenvolvimento*, 2018. v. 4, n. 1, p. 111–124, 2018. Citado 3 vezes nas páginas 34, 35 e 36.
- SCHWAB, K. *A Quarta Revolução Industrial*. São Paulo: Edipro, 2019. Citado 4 vezes nas páginas 14, 34, 35 e 36.
- SHEWHART, W. A. Quality control charts. *The Bell System Technical Journal*, 1926. v. 5, n. 4, p. 593 – 603, 1926. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 27.
- TSAI, W.-H.; LAI, S.-Y. Green production planning and control model with abc under industry 4.0 for the paper industry. *Sustainability, MDPI*, 2018. v. 10, 2018. Citado na página 50.
- UNESCO. *Global Investments in RD*. 2020. Disponível em: <<http://uis.unesco.org/sites/default/files/documents/fs59-global-investments-rd-2020-en.pdf>>. Acesso em: 03 maio 2021. Citado na página 49.
- URBAS, U.; VRABIČ, R.; VUKAŠINOVIĆA, N. Displaying product manufacturing information in augmented reality for inspection. *Procedia CIRP*, 2019. v. 81, p. 832–837, 2019. Citado na página 52.
- VAIDYAA, S.; AMBADB, P.; BHOSLE, S. Industry 4.0 – a glimpse. *Procedia Manufacturing*, 2018. v. 20, p. 233–238, 2018. Citado na página 37.
- VO, B.; KONGAR, E.; SUAREZ-BARRAZA, M. F. Root-cause problem solving in an industry 4.0 context. *IEEE Engineering Management Review*, 2020. v. 48, 2020. Citado na página 52.

VOLPATO, L. F. et al. Planejamento da qualidade nas unidades de saúde da família, utilizando o desdobramento da função qualidade (qfd). *Cad. Saúde Pública*, 2010. v. 26, p. 1561–1572, 2010. Citado na página [41](#).

WITKOWSKI, K. Internet of things, big data, industry 4.0 – innovative solutions in logistics and supply chains management. *Procedia Engineering*, 2017. p. 763–769, 2017. Citado na página [36](#).

WOLFA, K.; ROLLERB, D.; SCHAÈFERB, D. An approach to computer-aided quality control based on 3d coordinate metrology. *Journal of Materials Processing Technology*, 2000. v. 107, p. 96–110, 2000. Citado na página [37](#).

ZHONG, R. Y. et al. Intelligent manufacturing in the context of industry 4.0: A review. *Engineering*, 2017. p. 616–630, 2017. Citado na página [36](#).