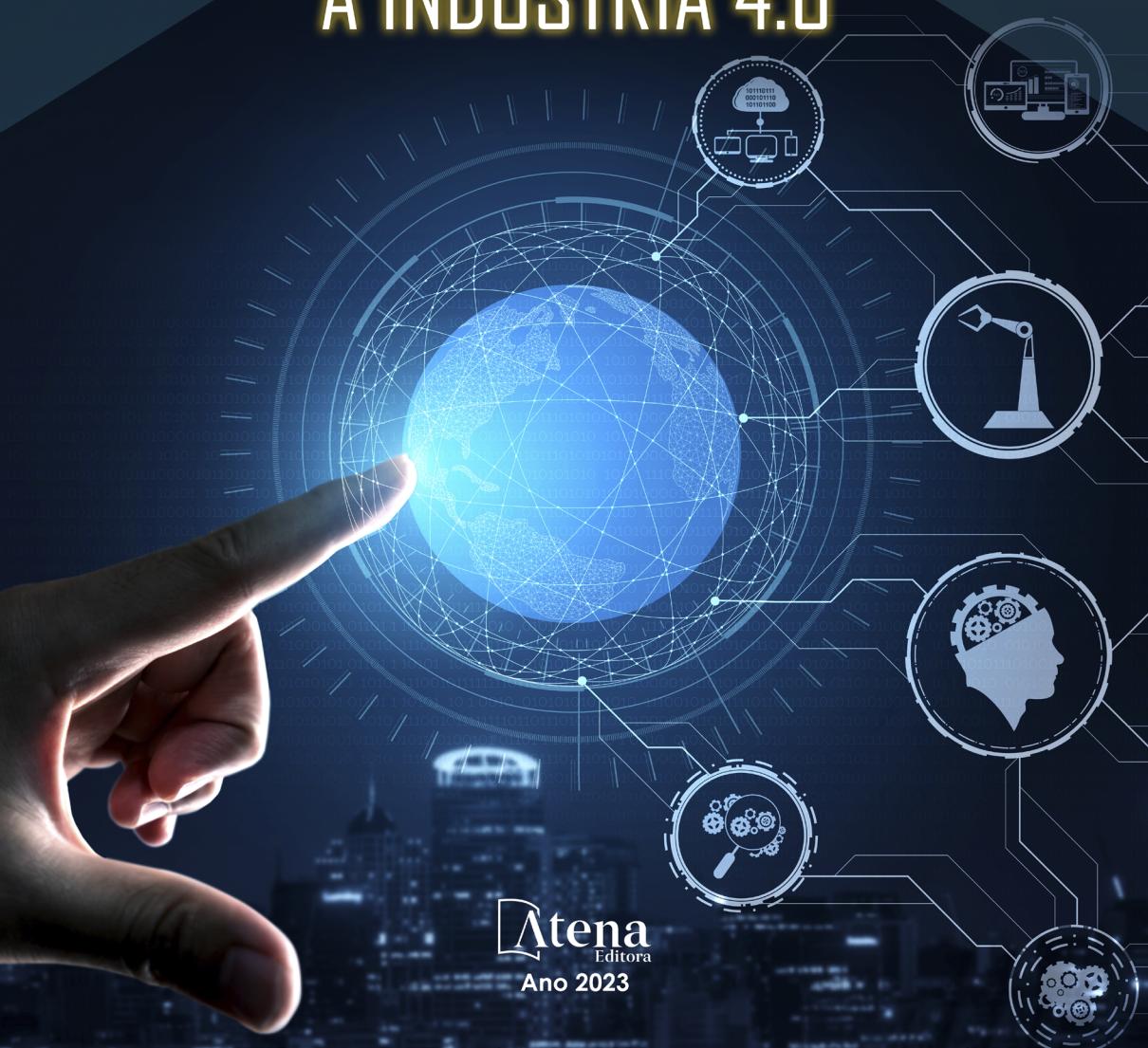


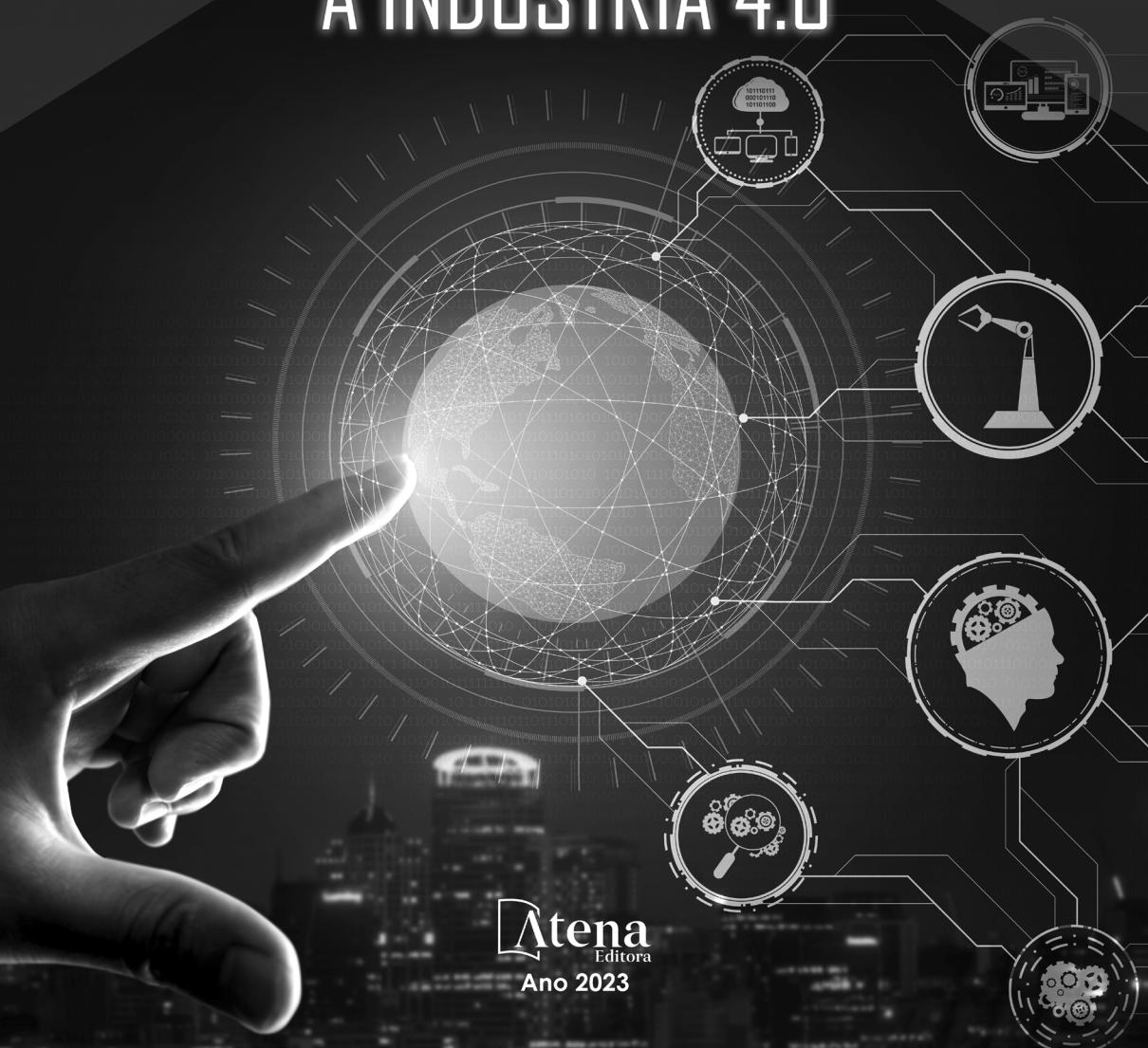
ARTHUR PAIVA AGUIAR | GLAYDSON KELLER DE ALMEIDA FERREIRA
THIAGO GOMES CARDOSO | THIAGO FERREIRA QUERINO

ESTUDO DAS ALTERAÇÕES DO SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES E POSSÍVEIS IMPACTOS RELACIONADOS À INDÚSTRIA 4.0



ARTHUR PAIVA AGUIAR | GLAYDSON KELLER DE ALMEIDA FERREIRA
THIAGO GOMES CARDOSO | THIAGO FERREIRA QUERINO

ESTUDO DAS ALTERAÇÕES DO SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES E POSSÍVEIS IMPACTOS RELACIONADOS À INDÚSTRIA 4.0



Editora chefe	
Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira	
Editora executiva	
Natalia Oliveira	
Assistente editorial	
Flávia Roberta Barão	
Bibliotecária	
Janaina Ramos	2023 by Atena Editora
Projeto gráfico	Copyright © Atena Editora
Bruno Oliveira	Copyright do texto © 2023 Os autores
Camila Alves de Cremo	Copyright da edição © 2023 Atena
Luiza Alves Batista	Editora
Imagens da capa	Direitos para esta edição cedidos à
iStock	Atena Editora pelos autores.
Edição de arte	Open access publication by Atena
Luiza Alves Batista	Editora



Todo o conteúdo deste livro está licenciado sob uma Licença de Atribuição Creative Commons. Atribuição-Não-Comercial-NãoDerivativos 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0).

O conteúdo do texto e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores, inclusive não representam necessariamente a posição oficial da Atena Editora. Permitido o download da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

Todos os manuscritos foram previamente submetidos à avaliação cega pelos pares, membros do Conselho Editorial desta Editora, tendo sido aprovados para a publicação com base em critérios de neutralidade e imparcialidade acadêmica.

A Atena Editora é comprometida em garantir a integridade editorial em todas as etapas do processo de publicação, evitando plágio, dados ou resultados fraudulentos e impedindo que interesses financeiros comprometam os padrões éticos da publicação. Situações suspeitas de má conduta científica serão investigadas sob o mais alto padrão de rigor acadêmico e ético.

Conselho Editorial

Ciências Exatas e da Terra e Engenharias

Prof. Dr. Adélio Alcino Sampaio Castro Machado – Universidade do Porto

Profª Drª Alana Maria Cerqueira de Oliveira – Instituto Federal do Acre

Profª Drª Ana Grasielle Dionísio Corrêa – Universidade Presbiteriana Mackenzie

Profª Drª Ana Paula Florêncio Aires – Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro

Prof. Dr. Carlos Eduardo Sanches de Andrade – Universidade Federal de Goiás

Profª Drª Carmen Lúcia Voigt – Universidade Norte do Paraná

Prof. Dr. Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

Prof. Dr. Douglas Gonçalves da Silva – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia
Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Profº Drª Érica de Melo Azevedo – Instituto Federal do Rio de Janeiro
Prof. Dr. Fabricio Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará
Profº Drª Glécilla Colombelli de Souza Nunes – Universidade Estadual de Maringá
Profº Drª Iara Margolis Ribeiro – Universidade Federal de Pernambuco
Profº Dra. Jéssica Verger Nardeli – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho
Prof. Dr. Juliano Bitencourt Campos – Universidade do Extremo Sul Catarinense
Prof. Dr. Juliano Carlo Rufino de Freitas – Universidade Federal de Campina Grande
Profº Drª Luciana do Nascimento Mendes – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte
Prof. Dr. Marcelo Marques – Universidade Estadual de Maringá
Prof. Dr. Marco Aurélio Kistemann Junior – Universidade Federal de Juiz de Fora
Profº Drª Maria José de Holanda Leite – Universidade Federal de Alagoas
Prof. Dr. Miguel Adriano Inácio – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Prof. Dr. Milson dos Santos Barbosa – Universidade Tiradentes
Profº Drª Natíeli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte
Profº Drª Neiva Maria de Almeida – Universidade Federal da Paraíba
Prof. Dr. Nilzo Ivo Ladwig – Universidade do Extremo Sul Catarinense
Profº Drª Priscila Tessmer Scaglioni – Universidade Federal de Pelotas
Profº Dr Ramiro Picoli Nippes – Universidade Estadual de Maringá
Profº Drª Regina Célia da Silva Barros Allil – Universidade Federal do Rio de Janeiro
Prof. Dr. Sidney Gonçalo de Lima – Universidade Federal do Piauí
Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista

Estudo das alterações do sistema internacional de unidades e possíveis impactos relacionados à indústria 4.0

Diagramação: Letícia Alves Vitral
Correção: Maiara Ferreira
Indexação: Amanda Kelly da Costa Veiga
Revisão: Os autores
Autores: Artur Paiva
Glaydson Keller de Almeida Ferreira
Thiago Gomes Cardoso
Thiago Ferreira Querino

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)	
E82	Estudo das alterações do sistema internacional de unidades e possíveis impactos relacionados à indústria 4.0 / Artur Paiva, Glaydson Keller de Almeida Ferreira, Thiago Gomes Cardoso, et al. - Ponta Grossa - PR, 2023. Outro autor Thiago Ferreira Querino Formato: PDF Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader Modo de acesso: World Wide Web Inclui bibliografia ISBN 978-65-258-0790-4 DOI: https://doi.org/10.22533/at.ed.904220601 1. Indústria. 2. Metrologia. I. Paiva, Artur. II. Ferreira, Glaydson Keller de Almeida. III. Cardoso, Thiago Gomes. IV. Título.
CDD 670	
Elaborado por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166	

DECLARAÇÃO DOS AUTORES

Os autores desta obra: 1. Atestam não possuir qualquer interesse comercial que constitua um conflito de interesses em relação ao conteúdo publicado; 2. Declararam que participaram ativamente da construção dos respectivos manuscritos, preferencialmente na: a) Concepção do estudo, e/ou aquisição de dados, e/ou análise e interpretação de dados; b) Elaboração do artigo ou revisão com vistas a tornar o material intelectualmente relevante; c) Aprovação final do manuscrito para submissão.; 3. Certificam que o texto publicado está completamente isento de dados e/ou resultados fraudulentos; 4. Confirmam a citação e a referência correta de todos os dados e de interpretações de dados de outras pesquisas; 5. Reconhecem terem informado todas as fontes de financiamento recebidas para a consecução da pesquisa; 6. Autorizam a edição da obra, que incluem os registros de ficha catalográfica, ISBN, DOI e demais indexadores, projeto visual e criação de capa, diagramação de miolo, assim como lançamento e divulgação da mesma conforme critérios da Atena Editora.

DECLARAÇÃO DA EDITORA

A Atena Editora declara, para os devidos fins de direito, que: 1. A presente publicação constitui apenas transferência temporária dos direitos autorais, direito sobre a publicação, inclusive não constitui responsabilidade solidária na criação dos manuscritos publicados, nos termos previstos na Lei sobre direitos autorais (Lei 9610/98), no art. 184 do Código Penal e no art. 927 do Código Civil; 2. Autoriza e incentiva os autores a assinarem contratos com repositórios institucionais, com fins exclusivos de divulgação da obra, desde que com o devido reconhecimento de autoria e edição e sem qualquer finalidade comercial; 3. Todos os e-book são *open access*, desta forma não os comercializa em seu site, sites parceiros, plataformas de e-commerce, ou qualquer outro meio virtual ou físico, portanto, está isenta de repasses de direitos autorais aos autores; 4. Todos os membros do conselho editorial são doutores e vinculados a instituições de ensino superior públicas, conforme recomendação da CAPES para obtenção do Qualis livro; 5. Não cede, comercializa ou autoriza a utilização dos nomes e e-mails dos autores, bem como nenhum outro dado dos mesmos, para qualquer finalidade que não o escopo da divulgação desta obra.

Trabalho de Iniciação Científica apresentado ao curso Técnico em Mecânica Industrial do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, a fim de se concluir os requisitos necessários para finalização do projeto.

Orientador: Professor Me. Thiago Gomes Cardoso.

Coorientador: Professor Me. Thiago Ferreira Querino e Professor Me. Gladson Keller de Almeida Ferreira

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela oportunidade e todas as bênçãos que me permitiram continuar esse trabalho apesar das dificuldades.

Agradeço aos meus pais e minha irmã pela compreensão e suporte fornecido ao longo deste projeto.

Ao CEFET como instituição por fornecer a oportunidade de iniciar tal trabalho e me ensinar os meios para conclui-lo.

Ao meu Orientador e Professor Me. Thiago Gomes Cardoso, pela compreensão e orientação que me permitiu desenvolver o trabalho. Agradeço também ao Professor Me. Thiago Ferreira Querino e Professor Me. Glaydson Keller de Almeida Ferreira, pela orientação baseado em suas experiências e conhecimento em áreas como a Indústria 4.0.

Aos professores e demais profissionais em toda a minha carreira educacional que me deram as habilidades necessárias para desenvolver tal pesquisa e a perseverança para continuar até sua conclusão.

RESUMO

O projeto foi iniciado com o objetivo de analisar e caracterizar as mudanças no Sistema Internacional de unidades e estabelecer seu impacto dentro do contexto da indústria 4.0 e suas inovações, dando destaque a como esses impactos afetam, mais especificamente, a área da metrologia dentro da quarta revolução industrial. Uma análise da história das unidades de medição e do Sistema Internacional (SI) permitiu ao projeto obter o contexto em que a nova alteração do sistema se encontra. A alteração em si foi caracterizada e os motivos por trás do estabelecimento de constantes universais como base para as unidades básicas do sistema de medição foram explicados. Para melhor entendimento do que uma unidade com uma constante universal em sua definição significa, constantes universais e suas características principais foram esclarecidas, mencionando cada constante a unidade que ela ajuda a definir e sua relação com a grandeza que a unidade em questão expressa. Iniciando pela natureza do segundo e passando por todas as unidades até finalizar com o Kelvin. O “*mises en pratique*” fornecido pelo BIPM permitiu a análise de como são realizadas as unidades do sistema, desde os possíveis métodos até as operações matemáticas envolvidas. Em seguida, a pesquisa se voltou à Indústria 4.0, como a chamada quarta revolução industrial surgiu, como ela se relaciona as revoluções anteriores e quais as características dessa nova fase no cenário industrial global. As tecnologias marcantes dessa revolução foram mencionadas e explicadas, desde a Internet das Coisas até a Robótica. A metrologia dentro da Indústria 4.0 também apresenta certas características e certas técnicas que são marcantes dessa nova revolução industrial, a metrologia não intrusiva e a autocalibração são duas contribuições marcantes da metrologia para a indústria 4.0. Contudo, também existem desafios que essa área precisa enfrentar para acompanhar os incessantes desenvolvimentos e inovações dessa revolução. Por fim, foi analisado como a alteração do SI afetou a metrologia na quarta revolução, quais novas tecnologias foram desenvolvidas, mencionando-se quais dos desafios previamente mencionados foram amenizados ou até mesmo resolvidos pelo uso de unidades baseadas em constantes universais.

Palavras-chave: *SI; Metrologia; Indústria 4.0; Quarta Revolução Industrial.*

ABSTRACT

The project was initiated with the objective of analyzing and characterizing the changes in the International System of Units and establishing their impact within the context of Industry 4.0 and its innovations, highlighting how these impacts more specifically affect the area of metrology within the fourth industrial revolution. An analysis of the history of the measurement units and the International System of Units (SI) allowed the project to obtain the context in which the new alteration of the system finds itself. The change itself was characterized and the reasons behind the establishment of universal constants as a basis for the basic units of the measurement system were explained. For a better understanding of what a unit with a universal constant in its definition means, universal constants and their main characteristics have been clarified, each constant mentioning the unit it helps to define and its relation to the magnitude that the unit in question expresses. Starting with the nature of the second and going through all units until ending with Kelvin. The “mises in practice” provided by the BIPM allowed the analysis of how the units of the system are performed, from the possible methods to the mathematical operations involved. Then, the research turned to Industry 4.0, how the so-called fourth industrial revolution emerged, how it relates to previous revolutions and what are the characteristics of this new phase in the global industrial scenario. The outstanding technologies of this revolution were mentioned and explained, from the Internet of Things to Robotics. Metrology within Industry 4.0 also presents certain characteristics and certain techniques that are hallmarks of this new industrial revolution, non-intrusive metrology and self-calibration being two outstanding contributions of metrology to Industry 4.0. However, there are also challenges that this area needs to face in order to keep up with the incessant developments and innovations of this revolution. Finally, it was analyzed how the SI change affected metrology in the fourth revolution, which new technologies were developed, mentioning which of the previously mentioned challenges were mitigated or even solved by the use of units based on universal constants.

Keywords: *SI, Metrology, Industry 4.0*

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - MODELO ANTIGO DO METRO.....	19
FIGURA 2 - PANTEÃO DE PARIS QUE FOI USADO DE ARMAZÉM PARA ANTIGOS SISTEMAS DE MEDAÇÃO.....	20
FIGURA 3 - A ESTRUTURA DA SIM.....	23
FIGURA 4 - AS UNIDADES BÁSICAS DO S.I.....	24
FIGURA 5 - ESQUEMA DO EXPERIMENTO DE GOTAS DE ÓLEO REALIZADO POR MILLIKAN E FLETCHER.....	37
FIGURA 6 - RADIAÇÃO ENTRANDO EM UMA CAVIDADE POR UM PEQUENO ORIFÍCIO (COMPARADO COM A RADIAÇÃO DE UM CORPO NEGRO).....	39
FIGURA 7 - IMAGEM DA BALANÇA DE KIBBLE NIST-4	50
FIGURA 8 - BALANÇA DE KIBBLE BWM II CONSTRUÍDO PELA METAS.....	50
FIGURA 9 - ESQUEMA DE UMA BALANÇA DE KIBBLE NO MODO DE PESAR.....	51
FIGURA 10 - ESQUEMA DE UMA BALANÇA DE KIBBLE NO MODO DE MOVER.....	52
FIGURA 11 - REVOLUÇÕES INDUSTRIALIS.....	57
FIGURA 12 - TECNOLOGIAS HABILITADORAS DA INDÚSTRIA 4.0.....	64
FIGURA 13 - ANÁLISE DE DEFORMAÇÕES EM ESTRUTURA 3D (CAE).....	68
FIGURA 14 - ESQUEMA DO PROCESSO DE MANUFATURA ADITIVA.....	72
FIGURA 15 - ESQUEMA DO PROCESSO DE MANUFATURA SUBTRATIVA.....	72
FIGURA 16 - O USO DE REALIDADE AUMENTADA PARA AUXÍLIO NA MANUTENÇÃO DO EQUIPAMENTO.....	73
FIGURA 17 - LABORATÓRIO DE PROTÓTIPO VIRTUAL DA VOLKSWAGEN.....	74
FIGURA 18 - LINHA DE FABRICAÇÃO UTILIZANDO DE SISTEMAS DE METROLOGIA EM LINHA.....	80
FIGURA 19 - ESQUEMA DO FUNCIONAMENTO DA TECNOLOGIA MV EM UMA LINHA DE PRODUÇÃO.....	82

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 20 - EXEMPLOS DE ROBÔS SENDO DESENVOLVIDOS PARA A INSPEÇÃO DE UMA INDÚSTRIA PETROLÍFERA.....	83
FIGURA 21 - UMA ESTRUTURA CONSTRUÍDA PELA NIST QUE REALIZA MEDIÇÕES DE PRESSÃO.....	91
FIGURA 22 - UM CSAC JUNTAMENTE COM O FÍSICO JOHN KITCHING RESPONSÁVEL PORSUACRIAÇÃO.....	92
FIGURA 23 - PROTÓTIPO DE CHIP DA NIST COM O OBJETIVO DE MEDIR COMPRIMENTO.....	94

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - OS PREFIXOS (MÚLTIPLOS) UTILIZADOS NO SI.....	25
TABELA 2 - OS PREFIXOS (SUBMÚLTIPLOS) UTILIZADOS NO SI.....	26
TABELA 3 - UNIDADES DAS CONSTANTES UNIVERSAIS.....	32

LISTA DE ABBREVIATURAS E SIGLAS

AFRIMET	<i>Intra-Africa Metrology System</i>
APMP	<i>Asia Pacific Metrology Programme</i>
AR	<i>Augmented Reality</i>
Ar(X)	Massa relativa atômica ou molecular de X
ASCII	<i>American Standard Code for Information Exchange</i>
Δt	Variação de Tempo
B	Densidade do Fluxo do Campo Magnético
BAAS	<i>British Association for the Advance of Science</i>
BI	<i>Business Intelligence</i>
BIPM	<i>Bureau International des Poids et Mesures</i>
c	Velocidade da luz no vácuo
CAE	<i>Computer Aided Engineering</i>
CAM	<i>Computer Aided Manufacturing</i>
CCE	Comitê Consultivo de Energia Elétrica
CDCC	Centro de Divulgação Científica e Cultural
CGPM	Conferência Geral de Pesos e Medidas
CGS	<i>Centimetre–gram–second system of units</i>
CIPM	Comitê Internacional de Pesos e Medidas
CLPs	Controladores Lógicos Programáveis
CNC	Comando Numérico Computadorizado
CNT	Ciências da Natureza e suas Tecnologias
COOMET	<i>Euro-Asian Cooperation of National Metrological Institutions</i>
CPS	<i>Cyber-Physical Systems</i>
CRM	<i>Customer Relationship Management</i>
CSAC	<i>Chip-Scale Atomic Clock</i>
DW	<i>Data Warehouses</i>
e	Carga elementar
EFB	<i>Eletrostatic Force Balance</i>
ERP	<i>Enterprise Resource Planning</i>
ESR	<i>Electrical-Substitution Radiometer</i>
EURAMET	<i>European Association of National Metrology Institutes</i>
g	Gravidade no planeta Terra
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GSICS	<i>Global Space-Based Inter-Calibration System</i>
I	Corrente Elétrica
IA	Inteligência Artificial
IMS	<i>Interated Management Systems</i>
IIOT	<i>Industrial Internet of Things</i>
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia
IOT	<i>Internet of Things</i>

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

IT	<i>Information Technology</i>
IUPAP	<i>International Union of Pure and Applied Physics</i>
k	Constante de Boltzmann
l	Percorso geométrico
m	Massa das partículas elementares
mx	Massa desconhecida de um artefato X
METAS	Instituto Federal de Metrologia da Suíça
MFIF	<i>Multi-Functions Integrated Factory</i>
MKS	<i>Meter, kilogram, and second system of units</i>
MKSA	<i>Meter, kilogram, second and ampere system of units</i>
Mu	Massa molar constante
MVS	<i>Machine Vision Systems</i>
N	Número de moléculas
N _A	Constante de Avogadro
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NIST	<i>National Institute of Standards and Technology</i>
NMIs	<i>National Metrology Institutions</i>
NOAC	<i>Nist On A Chip</i>
OT	<i>Operation Technology</i>
p	Pressão
PQED	<i>Predictable Quantum Efficient Detector</i>
QA	<i>Quality Assurance</i>
RMOs	<i>Regional Metrology Organizations</i>
SBM	Sociedade Brasileira de Metrologia
SCM	<i>Supply Chain Management</i>
SMEs	<i>Small and medium-sized enterprises</i>
VR	<i>Virtual Reality</i>
XRCRD	<i>X-ray Crystal Density Method</i>

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO	1
-------------------------	----------

CAPÍTULO 2

O SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES	4
--	----------

2.1 – HISTÓRIA DAS UNIDADES DE MEDAÇÃO	4
--	---

2.2 – ORIGENS E FUNCIONAMENTO DO SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES.....	7
---	---

2.3 – ALTERAÇÕES NAS DEFINIÇÕES DAS UNIDADES DE BASE	13
--	----

2.4 – NATUREZA FÍSICA DAS CONSTANTES DEFINIDORAS	16
--	----

2.4.1 - Natureza física do segundo	18
--	----

2.4.2 - Natureza física do metro.....	19
---------------------------------------	----

2.4.3 - Natureza física da candela	21
--	----

2.4.4 - Natureza física do ampere	21
---	----

2.4.5 - Natureza física do mol.....	22
-------------------------------------	----

2.4.6 - Natureza física do kilograma	23
--	----

2.4.7 - Natureza física do kelvin	25
---	----

2.5 - REALIZAÇÃO PRÁTICA DA DEFINIÇÃO DAS UNIDADES BÁSICAS (MISES EN PRATIQUE)	26
--	----

2.5.1 - Realização prática da definição do segundo.....	26
---	----

2.5.2 - Realização prática da definição do metro	27
--	----

2.5.3 - Realização prática da definição da candela.....	28
---	----

2.5.4 - Realização prática da definição do ampere.....	29
--	----

2.5.5 - Realização prática da definição do mol	30
--	----

2.5.6 - Realização prática da definição do kilograma.....	31
---	----

2.5.7 - Realização prática da definição do kelvin.....	36
--	----

CAPÍTULO 3

INDÚSTRIA 4.0.....	37
---------------------------	-----------

3.1 – ORIGEM E EVOLUÇÃO HISTÓRICA.....	37
3.1.1 - Primeira Revolução Industrial	38
3.1.2 - Segunda Revolução Industrial.....	39
3.1.3 - Terceira Revolução Industrial.....	41
3.1.4 - Quarta Revolução Industrial.....	42
3.2 – POPULARIZAÇÃO DO TERMO 4.0	43
3.3 – TECNOLOGIAS HABILITADORAS.....	43
3.3.1 - Big Data e Analytics	44
3.3.2 - Segurança Cibernética	45
3.3.3 - Robôs Autônomos e a Inteligência Artificial (I.A.).....	45
3.3.4 – Simulação	46
3.3.5 - Integração de Sistemas (Vertical e Horizontal).....	47
3.3.6 - Internet das Coisas	48
3.3.7 - Computação em Nuvem	49
3.3.8 - Manufatura Aditiva	49
3.3.9 - Realidade Aumentada e Realidade Virtual	51
3.4 – IMPACTOS NA SOCIEDADE E ECONOMIA	52

CAPÍTULO 4

METROLOGIA NO CONTEXTO DA INDÚSTRIA 4.0.....	55
4.1 – FUNÇÃO DA METROLOGIA NA INDÚSTRIA 4.0	55
4.2 – METROLOGIA NAS TECNOLOGIAS DA QUARTA REVOLUÇÃO	57
4.2.1 - Inline Metrology.....	57
4.2.2 – Non-contact Metrology.....	58
4.2.3 – Robôs especializados em inspeção	59
4.2.4 – Calibração por amostragem (Sensores)	60
4.2.5 - Autocalibração	60
4.2.6 – Metrologia na manufatura aditiva	61

SUMÁRIO

4.3 – Desafios da metrologia na Indústria 4.0	62
CAPÍTULO 5	
IMPACTOS DAS ALTERAÇÕES DO S.I. NA INDÚSTRIA 4.0 65	
5.1 – AUTOCALIBRAÇÃO.....	65
5.1.1 Áreas beneficiadas pelo NOAC	66
5.1.2 NOAC para Tempo e Frequência.....	67
5.1.3 NOAC para Campos Elétricos e Magnéticos	68
5.1.4 NOAC para Termodinâmica	68
5.1.5 NOAC para Metrologia Dimensional	68
5.1.6 NOAC para Massa, Força e Aceleração.....	69
5.1.7 NOAC para outras Grandezas	70
5.2 - COMO A ALTERAÇÃO DO SI SOLUCIONOU DESAFIOS DA METROLOGIA	70
CAPÍTULO 6	
CONCLUSÃO 71	
CAPÍTULO 7	
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 73	
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 74	

INTRODUÇÃO

É natural que um dos primeiros desenvolvimentos científicos foi a criação de unidades de medida, pois estas são permitiram o surgimento de atividades como a descrição de fatos por meio de números e a habilidade de contar (ALBERTAZZI, 2013).

Segundo (BRANDI, 2018), as bases que definiam os valores das unidades de medidas foram variando com o passar dos séculos. A exemplo, eram muito utilizadas as medidas corporais de figuras importantes da época. Infelizmente, as bases para essas unidades criavam certos problemas, as figuras usadas como base não viveriam para sempre, resultando em uma unidade cujo valor base era inconstante.

Outra base para unidades muito famosa, era a materialização de uma unidade em um objeto físico, ajudando assim a manter a unidade constante por mais tempo. Contudo, mesma essa solução não eliminou o problema, com o passar do tempo esses objetos se desgastariam e ocorreria inconsistências na medição (ALBERTAZZI, 2013).

Segundo (HEINZ, 2015) atual sistema de medição tem suas origens na Revolução Francesa. Foi durante esse período que vários padrões foram estabelecidos para facilitar o trabalho, resultando no surgimento do metro. Marcando uma das maiores mudanças no mundo da metrologia. Tal fato é corroborado por (ALBERTAZZI, 2013) que ressalta que várias instituições metrológicas importantes podem ter suas raízes rastreadas a este período, a exemplo do famoso Sistema Internacional de Unidades (SI).

Pode-se afirmar que algumas das características do SI se deve a essas raízes. Segundo (FANTON, 2019) a ideia de um sistema padronizado e universal pode ter surgido pela luta por igualdade nessa época. Contudo, também é ressaltada a função do sistema como base para a atual economia globalizada.

Desde a sua formação, o SI enfrentou várias mudanças. Com o passar dos anos novas unidades foram adicionadas de acordo com a necessidade do ambiente acadêmico da época, sendo esses um dos objetivos do SI, o de sempre manter atualizado para acompanhar os desenvolvimentos atuais. Um marco muito importante foi a convenção do metro em 1875 que marcou a criação do BIPM (*Bureau International des Poids et Mesures*) e do CGPM (Conferência Geral de Pesos e Medidas) e iniciando o sistema MKS (BIPM, 2019).

Foi somente em 1971, durante a 14 CGPM, que a última unidade básica foi adicionada, o mol, completando assim um sistema com 7 unidades (metro, segundo, kilograma, kelvin, candela, ampere e mol). Regras como o uso de prefixos e unidades derivadas forma estabelecidas previamente na 11 CGPM (BIPM, 2019).

Recentemente ocorreu uma mudança nas definições das unidades de base do SI. Ficou definido que todas as unidades passassem a serem baseadas em constantes físicas, com o objetivo de eliminar prévios problemas como inconsistências nas medições como resultado da passagem do tempo (BIPM, 2019).

Para melhor entendimento dos efeitos dessa mudança é primeiro necessário conhecer o que é uma constante física. Uma constante universal é uma grandeza física geral na natureza e constante no tempo, ou seja, ela pode ser obtida por qualquer um com o equipamento necessário em qualquer lugar ou período de tempo. Elas são muitas vezes comparadas a constantes matemáticas por causa de sua semelhança como valores inalteráveis (MARTIN-DELGADO, 2020).

As constantes universais usadas como base para as unidades do SI, agora chamadas de constantes definidoras por causa da sua presença na definição de tais unidades, são as seguintes: a velocidade da luz é a constante definidora do metro, a duração de períodos de radiação correspondentes à transição entre níveis hiperfinais do átomo de Césio 133, a intensidade de uma fonte de luz que emite 540×10^{12} hertz em radiação monocromática é a constante definidora da candela, as cargas elementares são as constantes definidoras do ampere, a constante de Avogadro é a constante do mol, a constante de Planck é a constante definidora do kilograma e a constante de Boltzmann é a constante definidora do Kelvin (BIPM, 2018).

A mudança em questão pode ser facilmente analisada na realização de tais unidades. Realizar uma unidade significa estabelecer o valor e incerteza associada de uma quantidade de uma grandeza consistente com a definição da unidade em questão. Com as novas definições das unidades básicas isso significa que, ao se realizar as unidades, as constantes universais serão utilizadas para se obter o valor da unidade a ser realizada, comprovando assim a definição da unidade, (BIPM, 2019).

Também é necessário entender o atual cenário mundial e como isso influência tais mudanças. Atualmente, as indústrias vêm se adaptando a um novo estilo de produção como resultado da chegada da Quarta Revolução Industrial. Também chamada de Indústria 4.0, tal revolução se baseia no desenvolvimento da internet e outros sistemas de processamento de informação para proporcionar um aumento na eficiência industrial (RIGOTTI, 2020).

A metrologia apresenta uma função importante nessa nova revolução. A segurança de qualidade, a qual depende da metrologia, ganhou espaço e importância nas indústrias dessa nova fase. Consequentemente, o papel da metrologia também foi alterado (LANGNAU, 2021).

Sendo assim, os objetivos desse trabalho são: estabelecer a história do Sistema

International, definir a natureza das constantes definidoras e de suas unidades de base e estabelecer qual exatamente foi a mudança do SI para, por fim, discutir como os impactos dessa mudança poderão afetar a indústria 4.0, dando especial destaque a área de metrologia.

Um maior foco foi reservado a como essa mudança solucionou desafios da integração da metrologia na indústria 4.0 e a autocalibração de equipamentos. O projeto da NIST (National Institute of Standards and Technology) se destacou nessas áreas, ao utilizar de chips para criar tecnologias que permitiria ao maquinário se manter sempre calibrado, eliminando empecilhos que restringiam o avanço do controle de qualidade no processo de produção (NIST, 2020).

Por meio da análise de tais objetivos e dos pontos que se destacaram nesses, foi atingida a conclusão que a nova alteração do SI levantou diversos benefícios a nova fase industrial. Projetos que utilizam dessas alterações forneceram novas oportunidades para a superação de antigos empecilhos em certas áreas da produção industrial.

O SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES

O SI, também conhecido como Sistema Internacional de Unidades, é o sistema prático de unidades de medida recomendado pelo BIPM. A instituição define o sistema com base em 7 unidades básicas e unidades derivadas formadas pelas suas combinações. As unidades foram escolhidas por razões históricas e eram, por convenção, consideradas independentes dimensionalmente. Atualmente o sistema passou a ser definido com base em constantes universais e sua independência dimensional ainda permanece (BIPM, 2019). Esta mudança e seus impactos serão o principal tema desta seção.

2.1 – HISTÓRIA DAS UNIDADES DE MEDAÇÃO

Nos dias atuais é muito fácil pensar nas diferentes unidades de medida, nos padrões uniformes utilizados para realizar as medições, porém é importante lembrar que durante grande parte da história estes padrões eram novidade e sofriam constantes alterações. A história das unidades de medição é complexa, no entanto, conhecê-la é extremamente necessário para compreender as mudanças no atual sistema (HEINZ, 2015).

A história das unidades de medição é a história da metrologia. Esta é definida como a “Ciência da Medição” pelo VIM (*International Vocabulary of Basic and General Terms in Metrology*) e como “campo de conhecimento relacionado a medição” pelo VLM (*Vocabulary of Legal Metrology*). Metrologia inclui tópicos como quantidades, unidades de medida, erros e incertezas de medição, métodos de medição, instrumentos de medição e como calibrá-los, padrões metrológicos e rastreabilidade (MILLEA; MUNTEANU; MARCUS, 2003).

Antes de entender a história das medições é necessário entender o porquê medir e o que pode ser realizado pelas medições. Os três principais objetivos nos quais se empregam as medições são para monitorar, controlar e investigar fenômenos físicos. Monitorar consiste na observação passiva do valor de uma grandeza. O controle é uma operaçãoativa em que se mantém grandezas dentro de limites predeterminados e investigação é um processo proativo que envolve a descoberta e compreensão de novos fenômenos naturais (ALBERTAZZI, 2013).

A capacidade de contar, descrever fatos por meio de números é essencial para o convívio em sociedade. Já nas primeiras sociedades esta capacidade estava presente e, com o passar do tempo, o aprimoramento dos sistemas numéricos tornou a vida social mais sofisticada. A descrição apenas pelo uso de números rapidamente se tornou insuficiente, era necessário acrescentar mais um fator para padronizar e descrever de forma mais clara estas quantias (ALBERTAZZI, 2013).

Surgiram as primeiras medições rudimentares. Os números de passos, número de cestos e de garrafas eram exemplos de padrões utilizados nesta época. O desenvolvimento de comércio entre comunidades exigiu um processo mais elaborado, levando ao aperfeiçoamento do sistema de medidas (ALBERTAZZI, 2013).

Este modelo era baseado no comércio daquele tempo: o escambo¹. Pela falta de um sistema monetário bem desenvolvido, a população se baseava na troca de produtos para sobreviver. Foi esse contexto histórico, que levou ao desenvolvimento de um sistema de medição baseado em garrafas, barris e outros. Um exemplo seria um pescador querendo comprar garrafas de vinho. No sistema do escambo este pescador trocaria seus produtos com o produtor deste vinho para obter o que desejasse. Para isto ele precisaria saber qual o valor da conversão de barris de peixes por garrafas de vinho, levando assim a construção de um sistema de medidas. Com o escambo e o comércio se desenvolvendo, surgiram novas necessidades e a maneira de medir evoluiu para acompanhar a mudança (HEINZ, 2015).

Num primeiro momento, usou-se o corpo humano como medida. Porém, por causa da existência de variações no tamanho do corpo das pessoas, os preços dos produtos eram inconstantes (ALBERTAZZI, 2013).

Assim, num segundo momento, usou-se como base de suas unidades as medidas corporais de alguma autoridade da época, resolvendo assim o problema da variação de valores entre diferentes pessoas. Infelizmente, esta solução se mostrou imprecisa porque as pessoas não viveriam para sempre, resultando em um sistema onde sua base mudava com o passar do tempo. Outra questão era a incapacidade da figura em questão de estar presente em todos os lugares onde aconteciam medições. Com o tempo, tal método foi substituído (BRANDI, 2018).

Assim, uma nova solução surgiu. Um objeto, normalmente metálico e resistente à corrosão, era forjado nas medidas desejadas e usado como padrão para o sistema. Este processo tinha como vantagem o fato de permitir a criação de réplicas deste padrão, permitindo a todos terem uma cópia disponível para usar como referência. No entanto, nem todos os problemas foram resolvidos. Com o passar das décadas até mesmo objetos metálicos vão se desgastando aos poucos, levando à variação nas medições no decorrer do tempo. Foi durante esse período que várias instituições metrológicas importantes surgiram, a exemplo do contemporâneo Sistema Internacional de Unidades (ALBERTAZZI, 2013).

As origens do atual sistema de unidades podem ser rastreadas até a Revolução Francesa. Essa revolução foi um período marcado por uma das maiores mudanças no

¹ De acordo com a maioria dos dicionários da língua portuguesa, a palavra escambo se refere a qualquer tipo de troca material que não inclui transação financeira ou monetária (CONDE; MAFRA; CAPPELLE, 2014).

mundo da metrologia. Houve o estabelecimento de padrões que facilitaram o trabalho. Foi durante esse momento que a primeira definição do metro surgiu, sendo baseado, na época, na divisão do meridiano terrestre posicionado entre o polo norte e o equador. Todos os padrões utilizados para medições antes desse momento são chamados de medidas pré-métricas, apesar de algumas vezes serem erroneamente também chamadas de metro (HEINZ, 2015).

Deste ponto em diante, após o surgimento de várias instituições metrológicas, a área da metrologia avançou imensamente. Essas instituições tentaram estabelecer um sistema unificado para todos. Apesar de sua popularidade e a adoção de vários países, ainda existiam alguns lugares utilizando unidades diferentes (BIPM, 2019).

Iniciando nesta época a metrologia começou a focar mais e mais na definição de suas unidades. Utilizar como base para o padrão algo mais constante e estável se tornou uma necessidade. Até hoje as unidades sofrem alterações de tempos em tempos para garantir sua relevância e permitir que sua base sempre seja o mais constante possível (BIPM, 2019).

Mesmo depois de substituir as definições das unidades de base, os antigos padrões materializados de unidades ainda existem. Atualmente a maior parte deles se encontra em museus, como uma representação da história do desenvolvimento da metrologia. A exemplo o modelo do metro ilustrado na FIG. 1 (HEINZ, 2015).



Figura 1 - Modelo antigo do metro. Fonte: GSICS – Global Space-Based Inter-Calibration System².

² Disponível em: <https://www.star.nesdis.noaa.gov/smcd/GCC/qa-standards_bestPractices.php>. Acesso em Junho de 2021.

2.2 – ORIGENS E FUNCIONAMENTO DO SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES

Antes de entender o funcionamento do Sistema Internacional de Unidades (SI) é necessário compreender suas origens. As instituições que o precederam e as organizações que o constituem tem histórias profundas que influenciam o funcionamento do sistema de várias maneiras. O SI tem suas origens na Revolução Francesa com a criação do sistema métrico decimal e com o estabelecimento de dois modelos de platina como os representantes dos padrões para o metro e kilograma em junho de 1799. A intervenção francesa na área da metrologia veio como resultado dos desejos dos revolucionários de alterar fundamentalmente a sociedade pela substituição de hábitos e tradições antigas, tendo assim propósitos sociais e éticos (FANTON, 2019; MARTIN-DELGADO, 2020).

A revolução foi um tempo conturbado, cheio de rápidas mudanças e altas expectativas para o futuro. A criação do sistema métrico representa isso, modelos e esquemas de antigos sistemas de medição vindos de toda a França foram enviados para o Panteão de Paris, representado na FIG. 2 para serem armazenados em antecipação de sua substituição por um novo sistema (RAMANI, 2018).



Figura 2 - Panteão de Paris que foi usado de armazém para antigos sistemas de medição. Fonte: RAMANI, Madhvi, 2018. BBC article “How France created the metric system”³.

Um dos fatores marcantes da revolução e consequente criação de um novo sistema de unidades foi a grande influência que isso teve no dia a dia da população. O sistema métrico demorou a ser aceito pelo povo por causa das grandes mudanças que provocou. Anos se passaram antes de integração total deste sistema ao cotidiano popular. Entretanto, quando isso aconteceu, aspectos positivos, como a maior facilidade do comércio resultante do uso de simplificações e do sistema decimal, levaram o sistema a ser rapidamente

³ Disponível em: < <https://www.bbc.com/travel/article/20180923-how-france-created-the-metric-system> >. Acesso em Junho de 2021.

adoptado por países vizinhos (RAMANI, 2018).

Pode-se afirmar que algumas das características marcantes da Revolução Francesa foram essenciais para o estabelecimento do SI tal como conhecemos. A ideia de um sistema de medidas padronizado e universal pode ter surgido como resultado de uma necessidade social e ética, mas atualmente, é fruto de um mundo onde precisão e interação entre diferentes indústrias é a base da economia global. Um sistema universal se tornou indispensável para a produção industrial (FANTON, 2019).

Em 1832, o matemático Johann Carl Friedrich Gauss promoveu a aplicação do sistema métrico, juntamente com a definição do segundo baseada na astronomia, para formar um sistema coerente de unidades para as ciências físicas. Gauss foi o primeiro a utilizar destas unidades para medir o campo magnético da terra quanto as grandezas de comprimento, massa e tempo. Anos depois, com a ajuda de Weber, Gauss estendeu essas medidas para incluir fenômenos elétricos (BIPM, 2019).

As aplicações nos campos de magnetismo e eletricidade continuaram a ser desenvolvidas na década de 1860 pela *British Association for the Advance of Science* (BAAS). Essa associação protagonizou o estabelecimento dos requerimentos para um sistema coerente utilizando de unidades básicas e unidades derivadas. Em 1874 foi introduzido o CGS. Um sistema tridimensional e coerente baseado nas unidades de centímetro, grama e segundo, que utilizava de prefixos para expressar múltiplos e submúltiplos. Esse avanço impulsionou o desenvolvimento subsequentemente da física (BIPM, 2019).

O tamanho das unidades do sistema CGS se provou inconveniente nos campos do magnetismo e da eletricidade. Como resultado, no Congresso Elétrico Internacional, foi estabelecido um conjunto de unidades práticas levando a criação do Ampere, Ohm e Volt (BIPM, 2019).

A assinatura da convenção do metro em 1875 foi a responsável pela criação da BIPM e pelo estabelecimento do CGPM (Conferência Geral de Pesos e Medidas) e CIPM (Comitê Internacional de Pesos e Medidas). Após a assinatura dessa iniciou-se o processo de criação de novos protótipos internacionais para o kilograma e o metro. Essas unidades vieram a estabelecer um sistema semelhante ao CGS chamado MKS, que utiliza como base o metro, o kilograma e o segundo (BIPM, 2019).

Em 1901, Giorgi mostrou que é possível combinar as unidades do sistema MKS com as unidades elétricas práticas para formar um novo sistema. Giorgi realizou tal feito ao adicionar uma quarta unidade básica de natureza elétrica, como o ampere (A) ou o ohm (Ω), e também reescrever as equações que ocorrem no eletromagnetismo na chamada forma racionalizada (BIPM, 2019).

Após a revisão da Convenção do Metro, pela 6^a CGPM (1921), que aumentou as responsabilidades do BIPM a outras áreas da Física, e a posterior criação do Comitê Consultivo de Energia Elétrica (CCE), pela 7^a CGPM (1927), a proposta de Giorgi foi amplamente discutida pela União Internacional de Física Pura e Aplicada (IUPAP) e por outras organizações internacionais. Isso levou o CCE a propor, em 1939, a adoção de um sistema baseado no metro, kilograma, segundo e ampere, o sistema MKSA (BIPM, 2019; ALBERTAZZI, 2013).

A 10^a CGPM aprovou a introdução do Kelvin e da Candela, como unidades básicas de temperatura e intensidade luminosa, respectivamente. A denominação Sistema Internacional de Unidades, com a abreviatura SI, foi dada ao sistema pela 11^a CGPM em 1960. Foram estabelecidas regras para prefixos, unidades derivadas e as antigas unidades suplementares, fornecendo assim uma especificação abrangente para todas as unidades de medida (BIPM, 2019).

Na 14^a CGPM uma nova unidade base, o mol, foi adotada para a quantidade de substância. Isso elevou o número de unidades básicas do SI para sete (BIPM, 2019).

A metrologia atual é resultado da cooperação entre diversas organizações internacionais, todas elas com um objetivo similar e fortes laços entre si. Essas organizações são: “Conférence Générale des Poids et Mesures” (CGPM), “Comité International des Poids et Mesures” (CIPM) e o “Bureau International des Poids et Mesures” (BIPM). Todas elas apresentam autoridade sobre os assuntos relacionados à metrologia desde os acordos assinados na convenção do metro (FANTON, 2019).

Também existem instituições que funcionam em escalas menores, como à exemplo das Instituições Nacionais de Metrologia (NMIs), que geralmente têm autoridade somente sobre as normas de um país específico, e as RMOs (*Regional Metrology Organizations*), que funcionam em um nível regional. Conforme, por exemplo, a EURAMET que possui autoridade na Europa, a AFRIMET na África, a COOMET na Eurásia, a APMP na parte asiática do pacífico e o SIM nas Américas (FANTON, 2019).

Desde então, avanços foram feitos para relacionar as unidades básicas a constantes universais por causa das vantagens que unidades verdadeiramente constantes e invariáveis apresentariam para o sistema. Como resultado, a 24^a CGPM adotou os princípios para uma nova definição do SI baseado em 7 constantes universais. Somente na 26^a CGPM, em 2018, que esta definição foi realmente alcançada e adotada, estando presente até os dias atuais (BIPM, 2019).

Depois de entender a história do sistema internacional alguns detalhes de seu funcionamento ficam mais claros. De acordo com (FANTON, 2019), o SI trabalha como uma

organização global encarregada de manter o sistema de unidades atualizado e funcional, mas isso não significa que esta instituição trabalhe sozinha. Existem várias outras organizações que trabalham em um nível mais regional que auxiliam o funcionamento do sistema. Um bom exemplo, seriam as organizações de nível nacional que trabalham em união com o estado, ou as organizações responsáveis por administrar continentes inteiros como a EURAMET, AFRIMET, COOMET, SIM (Sistema Interamericano de Metrologia) e outras. Mesmo dentro de organizações regionais ainda existem outras organizações encarregadas de funções ainda mais específicas, como pode ser visto na FIG. 3 que mostra o funcionamento por trás da SIM.

Novas organizações são fundadas para facilitar a comunicação entre diferentes áreas. Podem ter caráter regional ou podem ser criadas dentro de uma outra instituição com o objetivo de aumentar a eficiência do trabalho ao separar funções específicas para diferentes organizações.

Na organização do próprio Sistema Internacional existem padrões e regras a serem seguidas. Para realizar alguma alteração no sistema é necessário um longo processo que inclui propor esta mudança até a realização de uma conferência e de votação que pode terminar na proposta sendo aceita ou rejeitada. Mesmo aceita é comum levar anos até a adoção das mudanças propostas (BIPM, 2019).

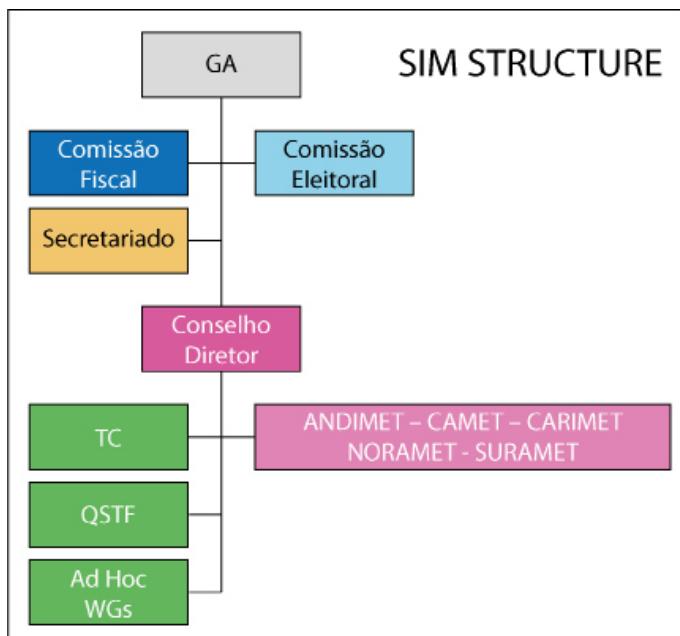


Figura 3 - A estrutura da SIM. Fonte: SIM – Organisation, 2021⁴.

A organização de grandezas no sistema internacional é bem simples. As unidades são separadas em duas principais categorias. As unidades básicas, aquelas unidades que não se baseiam em outras para existir, atualmente definidas por constantes universais. E, as unidades derivadas, as quais surgem da interação entre duas ou mais unidades básicas. Então, seria correto afirmar que as unidades básicas servem como a fundação do sistema inteiro (FIG. 4) (BIPM, 2019).



Figura 4 - As unidades básicas do S.I. Fonte: Johansson, Jan. RISE Research Institute of Sweden⁵.

Cada prefixo tem um símbolo que o representa. Muitas vezes unidades associadas a um prefixo são utilizadas sem o devido conhecimento de como tal prefixo altera a expressão do valor da unidade em questão, isto se deve a facilidade de utilização e pronúncia dessas unidades. Um aumento ou diminuição da unidade básica por uma potência de 10 já torna muito mais o seu uso no cotidiano (TANNUS; PEREIRA, 2019).

Na TAB. 1 e TAB. 2 pode-se observar todos os prefixos utilizados atualmente. Contudo, nem sempre todos eles eram utilizados. Antes do desenvolvimento de campos que estudam partículas minúsculas ou fenômenos cósmicos gigantescos não havia a necessidade de se utilizar prefixos que alteram a unidade básica de uma forma tão extrema. Originalmente só prefixos próximos ao valor básico das unidades existiam como o “mili”, “centi” entre outros, porém com o desenvolvimento científico foi necessário expandir para ser possível analisar outras áreas (TANNUS; PEREIRA, 2019).

⁵ Disponível em: <<https://www.ri.se/en/nationellt-metrolgiskt-institut/si-system-the-meter-convention-and-international-cooperation>>. Acesso em Junho de 2021

Esses prefixos têm funções semelhantes ao uso de potências de 10. Até mesmo seus valores são semelhantes. A vantagem que eles apresentam em relação ao uso de notação científica é sua fácil pronúncia. Essa facilidade de pronúncia e escrita destes prefixos tornou-os mais acessíveis, o que resultou em sua alta popularidade (TANNUS; PEREIRA, 2019).

A TAB. 1 apresenta mais especificamente os prefixos múltiplos, ou seja, são aqueles prefixos que ajudam a expressar um valor mais alto dessa unidade. Tais prefixos são essenciais para a medição de fenômenos gigantescos, como muitos são na astrofísica e outras áreas relacionadas ao cosmos.

NOME	SÍMBOLO	MULTIPLICADOR
Yotta	Y	10^{24}
Zetta	Z	10^{21}
Exa	E	10^{18}
Peta	P	10^{15}
Tera	T	10^{12}
Giga	G	10^9
Mega	M	10^6
Kilo	k	10^3
Heco	h	10^2
Deca	da	10^1

Tabela 1 - Os prefixos (múltiplos) utilizados no SI. Fonte: Alterado de (BIPM, 2019).

A TAB. 2 tem a função oposta. Nela estão presentes os submúltiplos, ou seja, prefixos que ajudem a expressar valores mais baixos com essa unidade. Esses prefixos são perfeitos para a medição de partículas atômicas e outros processos que ocorrem em escalas extremamente pequenas. Submúltiplos também tem papel essencial na obtenção de medições com maior exatidão (a exemplo, medir uma peça em milímetros ao invés de metros proporciona valores mais precisos).

NOME	SÍMBOLO	MULTIPLICADOR
Deci	d	10^{-1}
Centi	c	10^{-2}
Mili	m	10^{-3}
Micro	μ	10^{-6}
Nano	n	10^{-9}
Pico	p	10^{-12}
Femto	f	10^{-15}
Atto	a	10^{-18}
Zepto	z	10^{-21}
Yocto	y	10^{-24}

Tabela 2 - Os prefixos (submúltiplos) utilizados no SI. Fonte: Alterado de (BIPM, 2019).

2.3 – ALTERAÇÕES NAS DEFINIÇÕES DAS UNIDADES DE BASE

Primeiro, antes de considerarmos as alterações nas unidades básicas, é necessário saber quais são essas unidades e quais são as suas definições atualmente (BIPM, 2019):

- Metro: desde as revisões da 26^a CGPM é definido como a unidade da grandeza correspondente à distância percorrida, no vácuo, pela luz em $1/299\ 792\ 458$ de segundo;
- Kilograma: é definido pelo SI como a unidade da grandeza cujo valor derivado da constante de Planck, ou seja, $6,62607015 \times 10^{-34}$ J.s;
- Segundo: é definido como sendo a duração de 9 192 631 770 períodos da radiação correspondente à transição entre os dois níveis hiperfinais do estado fundamental do átomo de césio 133;
- Ampere: é a unidade de corrente elétrica a que foi estabelecida em termos de carga elementar, que tem o valor de $1,602\ 176\ 634 \times 10^{-19}$ C;
- Kelvin: é utilizado como unidade de temperatura termodinâmica sendo esta fixada em termos da constante de Boltzmann, cujo valor é $1,380\ 649 \times 10^{-23}$ J.K⁻¹;
- Mol: é a unidade da grandeza relativa a quantidade de matéria expressa em termos da constante de Avogadro, também chamado de número de Avogadro, com seu valor de $6,022\ 140\ 760 \times 10^{23}$ mol⁻¹;
- Candela: atualmente é definida como uma intensidade luminosa em uma determinada direção, de uma fonte que emite radiação monocromática em uma frequência de 540×10^{12} hertz, que em termos da eficácia luminosa, tem o valor de 683 lm.W⁻¹;

O SI, por ser um sistema relativamente antigo, sofreu inúmeras alterações e revisões durante a sua história. Isso se deve à sua existência como um sistema feito especialmente para facilitar o desenvolvimento tecnológico, havendo sempre um esforço em mantê-lo

atualizado e atendendo aos requisitos do mundo moderno (BIPM, 2019).

A alteração que será detalhada nesta seção é a mudança na definição das unidades de base votada em 16 de novembro de 2018 durante a 26^a CGPM e posta em prática em 20 de maio de 2019 (BIPM, 2019).

Antes desta mudança o que era utilizado como base para as unidades do sistema variavam. Algumas unidades tinham fenômenos naturais como sua base enquanto outras ainda mantinham seu padrão preservado na forma de um objeto especialmente construído para este propósito. A partir desta revisão todas as unidades agora são baseadas em constantes universais ou são o resultado do produto entre unidades baseadas em constantes, como no caso das unidades derivadas (BIPM, 2019).

Antes de 1960, a unidade de tempo, o segundo, era baseada em um fenômeno astronômico, especificamente, a fração 1 / 86400 do dia solar médio. No entanto, irregularidades presentes na rotação da Terra tornaram esta definição insatisfatória. Para resolver o problema, a 13^a CGPM optou por uma nova definição baseada na duração de períodos de radiação na transição entre dois níveis hiperfinos do átomo de Césio-133 no estado fundamental (BIPM, 2019).

A definição do metro de 1889 era baseada no comprimento do protótipo internacional de platina- irídio. Este foi substituído pela 11^a CGPM por uma definição baseada no comprimento de onda da radiação correspondente a uma transição particular no criptônio 86. A definição do metro foi novamente substituída em 1983 pela 17^a CGPM por uma definição baseada na distância viajada pela luz no vácuo em um intervalo de tempo especificado. O protótipo original de 1889 ainda é mantido no BIPM nas condições especificadas em 1889. Finalmente, a atual definição foi estabelecida pela Resolução 1 da 26^a CGPM (2018) para deixar clara sua dependência do valor numérico fixo da velocidade da luz (BIPM, 2019; ALBERTAZZI, 2013).

A definição de 1889 do kilograma era a massa do protótipo internacional do kilograma, também chamado de IPK, feito de platina-irídio. Este foi, e ainda é mantido no BIPM nas condições especificadas em 1889. Quarenta protótipos semelhantes foram feitos e atribuídos individualmente aos Estados-Membros e ao BIPM. Em 1946, verificou-se que, em média, as massas desses protótipos divergiam da massa do protótipo internacional. Isso foi confirmado por uma verificação realizada em 1989, sendo a diferença mediana cerca de 25 microgramas. A fim de assegurar a estabilidade a longo prazo da unidade de massa e para tirar o máximo proveito dos padrões elétricos quânticos, uma nova definição para o kilograma baseada no valor de uma constante fundamental, neste caso a constante de Planck (\hbar), foi adotada (BIPM, 2019; ALBERTAZZI, 2013).

A definição do ampere (A), a unidade de corrente elétrica, foi escolhida pelo CIPM e referia-se à força entre fios paralelos transportando corrente elétrica. Tinha o efeito de fixar o valor numérico da permeabilidade magnética do vácuo μ_0 . Como resultado da nova definição do metro de 1983 o valor numérico da permissividade elétrica do vácuo ϵ_0 tornou-se fixo (BIPM, 2019; ALBERTAZZI, 2013).

No entanto, a definição de 1948 do ampere provou ser difícil de realizar e os padrões quânticos práticos (baseados nos efeitos Josephson e quantum-Hall), que ligam o volt e o ohm a combinações particulares da constante de Planck (h) e carga elementar (e), tornaram-se quase universalmente usado como uma realização prática do ampere por meio da lei de Ohm. Como consequência, tornou-se natural fixar o valor numérico de h para redefinir o kilograma e o valor numérico de e para redefinir o ampere, a fim de trazer os padrões elétricos quânticos práticos em concordância exata com o SI. A presente definição é baseada em um valor numérico fixo para o encargo elementar e foi adotada na Resolução 1 da 26^a CGPM (BIPM, 2019).

A 10^a CGPM (1954) estabeleceu a definição da unidade de temperatura termodinâmica, selecionando o ponto triplo da água como ponto fixo fundamental e atribuiu-lhe a temperatura de 273,16 K, definindo assim o Kelvin. No entanto, as dificuldades práticas em realizar esta definição, que exige uma amostra de água pura de composição isotópica bem definida e o desenvolvimento de novos métodos primários de termometria, levaram à adoção de uma nova definição do Kelvin com base na constante de Boltzmann (k). Tal definição, que removeu essas restrições, foi adotada na Resolução 1 da 26^a CGPM (BIPM, 2019).

A quantidade de substância, símbolo (n), é definida para ser proporcional ao número de entidades elementares especificadas N em uma amostra, a constante de proporcionalidade sendo uma constante universal. A constante de proporcionalidade é o recíproco da constante de Avogadro NA , de modo que $n = N / NA$. A unidade de quantidade de substância é chamada de mol. O CIPM desenvolveu uma definição de mol em 1967 e a confirmou em 1969, especificando que a massa molar do carbono 12 deveria ser exatamente 0,012 kg/mol. Assim, foi estabelecido que a quantidade de substância de uma amostra pura é determinada diretamente pela massa dessa amostra e pela massa molar do elemento que ela constitui (BIPM, 2019).

O valor numérico da constante de Avogadro definida desta forma era igual ao número de átomos em 12 gramas de carbono 12. No entanto, devido aos avanços tecnológicos recentes se tornou possível especificar exatamente o número de entidades em um mol de qualquer substância, fixando assim o valor numérico da constante de Avogadro. A presente definição do mol com base em um valor numérico fixo para a constante de Avogadro foi

adotada na Resolução 1 da 26^a CGPM (BIPM, 2019).

Antes de 1948 as unidades de intensidade luminosa eram baseadas em padrões de chama ou filamento incandescente em uso em vários países. Com o passar do tempo foram inicialmente substituídas pela "nova vela" baseada na luminância de um radiador de Planck à temperatura de congelamento da platina. Esta modificação foi promulgada pelo CIPM em 1946. Foi então ratificada em 1948 pela 9^a CGPM, que adotou um novo nome internacional para esta unidade, a candela. Em 1954, a 10^a CGPM estabeleceu a candela como unidade base (BIPM, 2019).

Em 1979, devido às dificuldades de realização de um radiador Planck em altas temperaturas e às novas possibilidades oferecidas pela radiometria, foi adotada uma nova definição de candela. A presente definição de candela utiliza um valor numérico fixo para a eficácia luminosa da radiação monocromática de frequência 540×10^{12} Hz que foi adotada na Resolução 1 da 26^a CGPM (BIPM, 2019).

Levando-se todas essas informações em consideração, é possível afirmar que antes da mudança as unidades básicas não eram realmente independentes uma das outras. Ao utilizar das constantes universais nas definições das unidades de base, promoveu-se a independência dessas unidades. Isso não significa que suas relações sumiram, simplesmente que as unidades não precisam delas pra se definir (FANTON, 2019).

Esta não foi a primeira mudança na definição das unidades e provavelmente não será a última. Ao passar dos anos houve múltiplas mudanças em todo o sistema, resultado do constante trabalho do sistema internacional para manter as suas unidades as mais relevantes e atualizadas possíveis (MILLS et. al, 2011).

Apesar dessas mudanças terem grande importante no campo metrológico e científico como um todo, a maior parte da população que usa das unidades do sistema internacional no seu cotidiano, não perceberá as alterações. O uso de constantes como base das unidades tem diversas ramificações para os campos técnicos voltados as ciências, mas como muitas técnicas de medição e calibração permanecem as mesmas, a maior parte da população não notará as mudanças (BRANDI, 2018).

2.4 – NATUREZA FÍSICA DAS CONSTANTES DEFINIDORAS

Para melhor entendimento dos efeitos que a inclusão das constantes universais nas definições das unidades básicas terá sobre a metrologia, é primeiro necessário entender a definição de constante universal e quais suas características (MARTIN-DELGADO, 2020).

Uma constante física é uma grandeza física que se acredita ser tanto geral na natureza quanto constante no tempo. Pode ser comparada com uma constante matemática, que é

um valor numérico fixo, inalterável não importa o quanto tempo se passe ou a distância que se atravesse (MARTIN-DELGADO, 2020).

As constantes universais também podem ser definidas como valores universais da física observável, podendo ser usados para descrever a realidade. Quando as constantes universais foram descobertas elas foram interpretadas como limites fundamentais da realidade, mas atualmente pesquisas nos mostram que elas são mais que isso. Apesar disso, a sua função como limite universal responsável por estruturar o universo é a mais importante para a metrologia, pois as estabelece como inalteráveis. Foi por essa característica que as constantes foram incluídas nas definições das unidades básicas. Embora essas características não serem o foco deste relatório, ainda é importante lembrar que, além de sua função como limites da realidade, existem uma grande variedade de interpretações que podem ser aplicadas as constantes (COHEN-TANNOUDJI, 2009).

Constantes universais servem à outras funções além de bases para as unidades básicas dentro da ciência. O estudo destas permite compreender mais sobre nosso universo e, por serem imutáveis, servem de fundação para a criação de equações estabelecendo relações entre diversos fenômenos naturais. Não seria incorreto afirmar que a existência dessas constantes é um pilar que serve de apoio para grande parte da física moderna (TANNUS; PEREIRA, 2019).

Constantes universais e constantes naturais não são sinônimos. A duração de períodos de radiação na transição entre dois níveis hiperfinos do átomo de Césio-133 no estado fundamental é a constante natural em que a unidade de tempo se baseia, mas não se classifica como uma constante universal. Por outro lado, a constante definidora da luminosidade é puramente convencional (MARTIN-DELGADO, 2020).

Apesar de ser importante manter essas informações em mente ao falar destas constantes, em prática na metrologia essas constantes e suas características não afetam o bastante a unidade em que se baseiam para ser necessário diferenciá-las (MARTIN-DELGADO, 2020).

Da mesma forma, três das constantes universais são associadas aos princípios simétricos, mas estas características têm efeito negligível se considerado o propósito dessas (MARTIN-DELGADO, 2020).

De acordo com (Lévy-Leblond; Jean-Marc, 2019), para entendermos as constantes universais é necessário compreender a relação entre diferentes constantes e a diferença de status entre as constantes clássicas, as primeiras constantes universais a serem descobertas, e as constantes modernas que ainda estão sendo estudadas. Também é mencionado a necessidade de entender a ciência físicas como um processo histórico

resultante de anos de pesquisa para conseguirmos caracterizar estas constantes e entendermos por que elas são definidas da tal maneira na ciência moderna.

Cada constante utilizada como base para as unidades básicas, passaram por um processo desde seu descobrimento até descobrirem seu valor, esse é o processo histórico por trás das constantes. Por outro lado, cada uma delas apresenta características próprias relacionadas a sua natureza, sendo essa a sua natureza física. A seguir apresenta o processo histórico por trás dessas unidades de acordo com, e a relação da natureza dessas constantes de acordo com (BIPM, 2019).

A TAB. 3 apresentada a seguir estabelece uma relação entre diferentes unidades e as suas grandezas. As unidades das constantes definidoras podem ser expressas como o produto das potências das unidades de base. As colunas na tabela apresentam se uma unidade aparece em quais das determinadas constantes (DAVIS, 2018).

A exemplo, a constante de Planck pode ser definida como o produto de 3 unidades, chamadas de unidades ajudantes. Do segundo elevado a -1, do metro elevado ao 2 e do kilograma elevado a 1. Pode-se então afirmar que a constante de Planck pode ser expressa por $\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$.

	s	m	kg	A	K	mol	cd
Transição de níveis hiperfinos (v_{cs})	-1	0	0	0	0	0	0
Velocidade da luz (c)	-1	1	0	0	0	0	0
Constante de Planck (h)	-1	2	1	0	0	0	0
Carga Elementar (e)	1	0	0	1	0	0	0
Constante de Boltzmann (k)	-2	2	1	0	-1	0	0
Constante de Avogadro (N_A)	0	0	0	0	0	-1	0
Kcd	3	-2	-1	0	0	0	1

Tabela 3 - Unidades das constantes universais.

Fonte: (DAVIS, 2018)

2.4.1 - Natureza física do segundo

A constante física usada como base para o segundo é a duração de 9 192 631 770 períodos da radiação correspondente à transição entre os dois níveis hiperfinos do estado fundamental do átomo de Césio 133.

Quando um átomo de um elemento está em seu estado fundamental e recebem energia, ele pode passar para outros estados. Estes estados mais energéticos são chamados de excitados. Ao realizar a transição de um estado excitado de volta a seu estado fundamental há a liberação de um excesso de energia que pode estar em forma de ondas eletromagnéticas (CESAR, 2019).

Entre as razões para a escolha do elemento do césio especificamente como base da unidade se pode mencionar: sua frequência de transição pode ser facilmente detectada por uma variedade de equipamentos, apresenta semelhanças ao hidrogênio quanto ao número de elétrons na camada de valência, na temperatura ideal para o trabalho os átomos de césio se encontram no estado fundamental, possui em seu estado padrão dois níveis de estados hiperfinos e o decaimento entre estados é longo o bastante para sua utilização (CESAR, 2019).

É importante notar que a constante natural usada como base para a unidade de tempo é diferente de outras constantes como a constante de Planck ou Boltzmann. Apesar de ser uma constante natural, ela não é uma constante universal (MARTIN-DELGADO, 2020).

De acordo com (DAVIS, 2018) e a TAB. 3, essa constante é fundamental para definir a unidade de segundo, quadrado azul, e não contém nenhuma unidade ajudante, quadrados amarelos.

2.4.2 - Natureza física do metro

A constante física usada como base pelo metro é a velocidade da luz (c). A luz e sua velocidade geraram inúmeras questões durante a história do mundo e, de acordo com (AZEVEDO; MONTEIRO JÚNIOR, 2020), os primeiros a discutir essas perguntas foram os antigos gregos. Aristóteles acreditava na instantaneidade da luz ou velocidade infinita da luz, uma teoria que foi defendida por vários outros filósofos posteriores como o francês René Descartes.

Empédocles de Agrigento, outro filósofo grego, por sua vez apresentava uma concepção rara em sua época. Este filósofo acreditava que a luz apresenta uma velocidade finita. Este posicionamento não era muito aceito na época e foi compartilhado por um pequeno número de filósofos na antiguidade como o físico árabe Alhazen ou Al-Haytham e o alemão Johannes Kepler (AZEVEDO; MONTEIRO JÚNIOR, 2020).

Porém foi somente com Galileu Galilei que foi realizado um experimento com o objetivo de calcular exatamente qual era a velocidade da luz. Ele utilizou uma lanterna e medi o tempo que a luz desta demorou para atravessar 2 quilômetros. Infelizmente, os resultados mostraram que o tempo que a luz demorou para percorrer esta distância era muito pequeno para a tecnologia da época quantificar corretamente (HELERBROCK, 2018).

De acordo com (AZEVEDO; MONTEIRO JÚNIOR, 2020), o primeiro a obter um valor aproximado da velocidade de propagação da luz foi o astrônomo dinamarquês Röemer,

em 1675. Ele as obteve a partir das observações dos atrasos nos eclipses de Júpiter. Infelizmente, a descoberta de Röemer não foi reconhecida na época, uma vez que, neste período, a concepção aristotélica da infinitude da luz predominava o meio científico.

Medidas mais exatas e aceitas só vieram em 1819, quando Armand Hippolyte Fizeau realizou um experimento e obteve a velocidade, apesar de hoje sabermos que a medida obtida por ele apresentava uma taxa de erro de 10 %. Desde então outros avanços aconteceram, com a vinda do eletromagnetismo que estabelecem a luz como uma onda eletromagnética e a vinda de pesquisadores como Maxwell que usaram de outras constantes universais para obter o valor da velocidade da luz no vácuo (HELERBROCK, 2018).

A luz, como explicado pelo efeito fotoelétrico, apresenta características peculiares, pois além de ser uma onda eletromagnética também apresenta características semelhantes a partículas. Este modelo partícula-onda que representa a dualidade da luz é de extrema importância porque permite a compreensão do comportamento da luz em diferentes cenários (AZEVEDO; MONTEIRO JÚNIOR, 2020).

Antes da descoberta e aceitação desta dualidade da luz o espaço científico tinha se separado em dois campos, um campo seguia a teoria “corpuscular” de Newton que estabelecia a luz como um chuveiro de partículas e outro campo seguia a teoria de Huygens que estabelecia a luz como ondas. Huygens, com base na sua teoria, estabeleceu que a velocidade da luz é inversa a seu índice de refração. Outros físicos que concordavam com Huygens, concluíram que aa teoria corpuscular de Newton não poderia estar certa, pois se a luz fosse uma série de partículas elas seriam atraídas ao entrarem em um meio mais denso e a velocidade da luz aumentaria ao invés de diminuir (ROYCHOUDHURI; TIRFESSA, 2017).

Apesar deste fato validar a teoria da luz, ambas teorias apresentavam falhas e estão incompletas, isto é o resultado de analisar a luz como somente onda ou partícula. A velocidade da luz ser afetada pelo índice de refração do meio onde está presente, como mencionado anteriormente, é o motivo pelo qual a constante da velocidade da luz é sempre medida no vácuo, onde a luz consegue atingir sua máxima velocidade (ROYCHOUDHURI; TIRFESSA, 2017).

A teoria atual sobre a dualidade partícula-onda da luz é baseada na hipótese proposta por Einstein que, ao ser inspirado por Planck, estabeleceu que feixes de luz consistem em quanta formada de energia eletromagnética. Apesar desta hipótese ser a mais bem-sucedida, ainda apresenta pequenos problemas que colocam sua validade em dúvida (ROYCHOUDHURI; TIRFESSA, 2017).

De acordo com (DAVIS, 2018) e a TAB. 3, a velocidade da luz é a constante fundamental para a unidade de metro e usa de uma unidade ajudante, o segundo.

2.4.3 - Natureza física da candela

A constante física usada como base para a candela é uma intensidade luminosa em uma determinada direção, de uma fonte que emite radiação monocromática em uma frequência de 540×10^{12} hertz que em termos da eficácia luminosa tem o valor de $683 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$.

Similar a constante usada como base da unidade de tempo, a constante usada como base para a unidade de luminosidade também não classifica como uma constante universal. Essa constante é puramente convencional e não apresenta muitas das características presentes em outras constantes como a de Planck ou Boltzmann. Apesar disso ela ainda tem a característica marcante de uma constante, a sua universalidade, permitindo assim seu uso como base de uma unidade (MARTIN-DELGADO, 2020).

De acordo com (DAVIS, 2018) e a TAB. 3, essa constante é fundamental para a definição da candela e tem como unidades ajudantes o segundo, metro e kilograma.

2.4.4 - Natureza física do ampere

A constante física usada como base para o ampere é baseada no valor das cargas elementares (e).

A carga elementar (e) é uma das constantes com maior importância na natureza. A carga elementar é o valor absoluto de carga elétrica presente em um único elétron ou próton. A carga elementar é quantizada, ou seja, é limitada nos valores que pode assumir. A carga elétrica não pode assumir nenhum valor fracionário, pois todos os possíveis valores da carga elétrica em uma partícula têm que ser múltiplos de $1e$ (WALKER, 2009).

O átomo teve sua definição revisada e alterada por toda a sua história, desde a era dos filósofos gregos que imaginavam um átomo maciço e indivisível até a descoberta do elétron, próton e por fim o nêutron (TABER, 2003).

De acordo com (PERRY, 2007), a carga do elétron só foi propriamente quantificada por Robert Millikan e Harvey Fletcher quando realizaram o experimento da “gota de óleo”. Este experimento, cujo esquema pode ser visto na FIG. 5 apresentada abaixo, se baseia na suspensão de gotas de óleo carregadas no meio de dois eletrodos de metal a fim de gerar um equilíbrio entre o campo elétrico e a gravidade, resultando em uma força nula como na Eq. 1, onde (q) é a carga na gota de óleo, (E) é o campo elétrico entre as placas, (g) a constante gravitacional e (M) é a massa.

$$M \times g = q \times E \quad (1)$$

Ao aplicar a fórmula do volume de uma esfera se obtém a Eq. 2, onde (r) é o raio da esfera.

$$(4\pi r^3/3) \times p \times g = q \times E$$

(2)

Como resultado, ao repetirem o experimento diversas vezes todas as cargas obtidas eram sempre múltiplas de um mesmo valor fundamental sendo este a carga elementar conhecida por nós hoje.

De acordo com (DAVIS, 2018) e a TAB. 3, essa constante é fundamental para a definição da ampere e tem como unidades ajudantes o segundo.

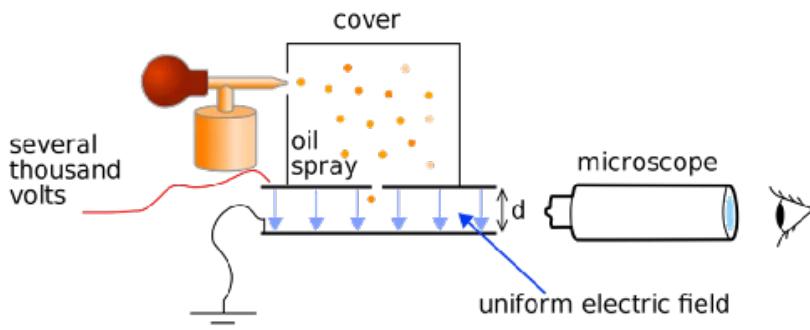


Figura 5 - Esquema do Experimento de Gotas de Óleo realizado por Millikan e Fletcher. Fonte: Alterado de (KNOTT, 2019).

2.4.5 - Natureza física do mol

A constante física usada como base para o mol é a constante de Avogadro (N_A).

De acordo com a Sociedade Brasileira de Química (SBQ, [s.d.]). essa constante foi proposta em 1909 por Jean Perrin. Ele estabeleceu que “a molécula-gramma de qualquer gás apresenta sempre o mesmo número de molécula”. Essa constante foi denominada de “Constante de Avogadro” em homenagem ao italiano Amedeo Avogadro e estabelece relações entre ela e outras constantes físicas.

Amedeo Avogadro foi um físico italiano que estabeleceu relações entre variáveis que futuramente permitiriam a descoberta da constante de Avogadro e, com a ajuda do trabalho de Joseph Gay-Lussac, um outro físico da época, conseguiu diferenciar os conceitos de átomo e molécula. Infelizmente, seu trabalho caiu em obscuridade e só depois de sua morte ele foi reconhecido. Anos após sua morte os conceitos de átomo e de molécula estabelecidos por ele foram consagrados em uma conferência internacional, o que permitiu unificar a Química (LIMA, 2013).

Por meio da proposição de Perrin ele unifica duas teorias distintas, a teoria atômica proposta por Dalton e a teoria cinética dos gases proposta pelos físicos, através do uso de uma grandeza (molécula grama) que pode ser avaliada com grande exatidão utilizando dos recursos disponíveis na época (SBQ, [s.d.]).

Apesar de ter sido o cientista responsável pela introdução da constante de Avogadro para a população científica mundial ele não foi o primeiro a identificar o seu valor. Em 1865 o cientista Johann Josef Loschmidt determinou a densidade numérica de partículas existentes em uma determinada amostra de gás baseado na teoria cinética dos gases, por causa de Loschmidt a constante de Avogadro é algumas vezes representada por L (FERNANDES, 2015).

A principal função da constante de Avogadro é realizar a transição do microscópio para o macroscópio. Isto se deve ao fato de ao conhecer a massa de uma substância e a massa molar é possível utilizar a constante de Avogadro para determinar o número de entidade elementares presentes. Esta função tem uma grande importância porque o número de entidades elementares em uma pequena porção de substância é tão elevado que determinar o seu número seria um processo extremamente trabalhoso e demorado sem o auxílio dessa constante (FERNANDES, 2015).

O número de Avogadro é expresso em mol⁻¹, ou seja, o inverso de mol ou “por mol”. A unidade do numerador não é normalmente apresentada, porém é possível indicar qual a unidade envolvida em cada situação. Por exemplo, se a unidade elementar usada for uma molécula, podemos afirmar que o número de Avogadro é igual a $6,02 \times 10^{23}$ moléculas/mol (WALKER, 2009)

De acordo com (DAVIS, 2018) e a TAB 3, a constante de Avogadro é fundamental para a definição do mol e não tem unidades ajudantes.

2.4.6 - Natureza física do kilograma

A constante física usada como base para o kilograma é a constante de Planck (h).

Essa constante veio como resultado do físico Max Planck tentar resolver um grande dilema enfrentado pelos físicos desta época, a catástrofe do ultravioleta, se referindo a emissão de radiação de um corpo negro, os quais os resultados eram absurdos (PLANCK; ABREU, 2020).

O dilema da radiação dos corpos negros apresenta uma extrema importância para a física porque caracteriza o início da física quântica. Levando isto em consideração, a importância do Planck que nasceu como resultado da resolução deste dilema para este ramo da física também é imenso (CAVALCANTE; HAAG, 2005).

Corpos negros são aqueles cujas superfícies absorvem toda a radiação que incide sobre eles. Todos os corpos negros emitem radiação térmica com frequência distribuída sobre o mesmo espectro que varia de acordo com a temperatura do corpo em questão. Gustav Kirchhoff foi o primeiro a identificar essa característica e iniciou o dilema que foi

debatido por físicos durante décadas (POLYCARPO; BARROSO, [s.d.]).

É possível considerar a radiação de um corpo negro como a radiação dentro de uma cavidade com um pequeno orifício pelo qual a radiação é trocada com o exterior e paredes com temperatura T como representado na FIG. 6. Por causa disso, é possível usar argumentos aplicados nesta situação para descobrir as propriedades de um corpo negro (POLYCARPO; BARROSO, [s.d.]).

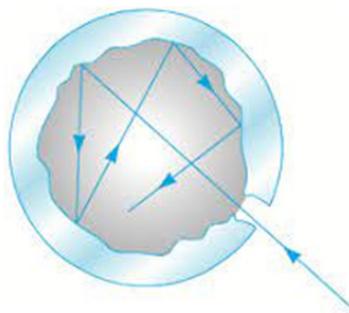


Figura 6 - Radiação entrando em uma cavidade por um pequeno orifício (comparado com a radiação de um corpo negro). Fonte: (IF-USP, [s.d.]).

Segundo (POLYCARPO; BARROSO, [s.d.]) Kirchoff usou deste processo para mostrar que a cavidade tem que ser isotrópica e homogênea para se conformar a 2^a lei da termodinâmica e Wilhelm Wien mostrou que a densidade de energia é representada pela Eq. 3, onde (ν) é o comprimento de onda, (ρT) é a densidade de energia, (g) é a constante gravitacional e (T) é a temperatura absoluta da superfície.

$$\rho T (\nu) = \nu^3 \cdot g(\nu/T) \quad (3)$$

Com base nesta equação foi possível encontrar uma relação, apresentada abaixo na Eq. 4, que ficou conhecida como Lei de Wien onde (ν_{max}) é o comprimento de onda máximo.

$$\nu_{\text{max}}/T = \text{constante} \quad (4)$$

Rayleigh e Jeans usaram da lei clássica da equipartição de energia para obter uma fórmula chamada de fórmula de Rayleigh-Jeans para a radiação de corpo negro apresentada na Eq. 5, onde (k) é a constante de planck e c é a velocidade da luz.

$$\rho T (\nu) d\nu = (8\pi\nu K T/c^3) d\nu \quad (5)$$

Max Planck conseguiu encontrar uma relação entre a Lei de Wien e a fórmula de Rayleigh-Jeans que resultou em Planck percebendo que, por algum motivo, os átomos das paredes da cavidade só emitem ou absorvem radiação em um valor específico " $n\nu h\nu$ "

(POLYCARPO; BARROSO, [s.d.]).

Como uma solução Planck propôs a quantificação da energia emitida por ondas eletromagnéticas. Planck assim determinou que a energia mínima liberada, o mesmo valor específico encontrado por ele anteriormente, por um corpo negro era $6,63 \times 10^{-34} \text{ m}^2 \cdot \text{kg/s}$ e que todas as energias emitidas por esses corpos têm que ser múltiplas deste mesmo valor. Essa mesma descoberta levou a criação do quantum que futuramente se desenvolveu na base para a física quântica conhecida atualmente (PLANCK; ABREU, 2020).

O planck também foi utilizado por Einstein para a criação da teoria por trás do efeito fotoelétrico. Cada pacote de energia presente em um feixe de luz contém energia igual a sua frequência vezes Planck (ROYCHOUDHURI; TIRFESSA, 2017).

De acordo com (DAVIS, 2018) e a TAB. 3, a constante de Planck é fundamental para a definição do kilograma e tem como unidades ajudantes o metro e o segundo.

2.4.7 - Natureza física do kelvin

A constante física usada como base para o Kelvin é a constante de Boltzmann (k).

A constante de Boltzmann pode ser definida como o fator de proporcionalidade que conecta a energia cinética relativa média das partículas em um gás e a temperatura do mesmo gás. A lei dos gases ideais estabelece que o produto da pressão (p) e do volume (V) é proporcional ao número de moléculas (N) do gás vezes a temperatura absoluta (T) e a constante de Boltzmann (k), como é possível ver na Eq. 6 abaixo:

$$pV = NkT \quad (6)$$

A constante de Boltzmann é utilizada em diversas importantes formulas / equações como por exemplo na Lei de Planck da radiação de um corpo negro, na definição estatística de entropia e na equipartição de energia.

Boltzmann foi o primeiro a estabelecer uma relação entre a entropia e a probabilidade e foi dele que surgiu o nome da constante, porém esta só foi expressa com um valor preciso anos depois como resultado de Max Planck, mesmo criador da constante de planck, ao tentar descobrir a radiação de um corpo negro. Essa constante é um dos componentes da importante fórmula de entropia Boltzmann-Planck, a equação que permite calcular a entropia de um sistema específico apresentada na Eq. 7, onde S é a entropia e W a quantidade de um gás ideal (PITRE *et. al.*, 2019).

$$S = k \times \log W \quad (7)$$

Boltzmann foi um dos criadores da mecânica estatística, introduzindo os conceitos

de probabilidade como parte fundamental da descrição da natureza. Apesar da constante de Boltzmann levar seu nome, ela só foi introduzida mais tarde, Boltzmann durante sua vida identificou temperatura como energia cinética (DAHMEN, 2006).

De acordo com (DAVIS, 2018) e a TAB. 3, essa constante é fundamental para a definição do Kelvin e tem unidades ajudantes o segundo, metro e kilograma.

2.5 - REALIZAÇÃO PRÁTICA DA DEFINIÇÃO DAS UNIDADES BÁSICAS (MISES EN PRATIQUE)

De acordo com (BIPM, 2019), realizar uma unidade significa estabelecer o valor e incerteza associada de uma quantidade do mesmo tipo de unidade consistente com a definição da unidade a ser realizada.

Realizar a definição de uma grandeza é importante, pois permite a obtenção dessas unidades em laboratórios ao redor do mundo, comprovando assim a base por trás da criação dessa unidade. Experimentos que permitem obter uma unidade são essenciais para a popularização e comprovação da utilidade de uma unidade e por isso a BIPM libera um documento chamado “*mise en pratique*” de cada unidade, que inclui diversos experimentos que podem ser realizados para obter a realização da definição dessas unidades. De acordo com (BIPM, 2019) os métodos primários incluídos no *mise en pratique*, ou realização prática, da definição das constantes universais são:

2.5.1 - Realização prática da definição do segundo

Como vimos anteriormente o segundo é definido pelo sistema internacional como a duração de 9 192 631 770 períodos da radiação correspondente a transição de 2 níveis hiperfinos do átomo ^{133}Cs em seu estado mais estável.

Existem algumas maneiras diferentes de realizar praticamente a definição do segundo, entre elas estão o uso de relógios atómicos e a comparação entre diferentes relógios metrológicos.

Ao falarmos dos relógios atómicos, temos que levar em conta três principais fatores. Primeiro a construção de padrões de frequência que produzem oscilações elétricas em uma frequência com uma relação da frequência de transição do átomo de Césio 133 conhecida. Esses padrões são conhecidos como padrões de frequência primários.

Representações secundárias do segundo são os valores de frequência com incertezas conhecidas e padronizadas.

A comparação de relógios é extremamente importante para reduzir a incertezas. Os Sistemas do Satélite de Navegação Global (GNSS) e o sistema de posicionamento global (GPS) estão equipados com relógios atómicos que transmitem seus sinais. A recepção

desses sinais permite a calibração de relógios com uma incerteza mínima, tornando muito mais simples obter a definição de segundo.

2.5.2 - Realização prática da definição do metro

Como vimos anteriormente o metro é definido pelo Sistema Internacional como a unidade da grandeza correspondente à distância percorrida, no vácuo, pela luz em 1/299 792 458 de segundo.

A equação fundamental por trás da definição do metro estabelece uma relação entre a distância, tempo e a velocidade da luz presente na Eq. 8. No qual “ c ” é o valor fixo da velocidade da luz no vácuo, “ Δt ” é o tempo viajado pela luz em um percurso geométrico que é representado por “ l ”.

$$l = c \cdot \Delta t \quad (8)$$

É importante notar que apesar da definição do metro se referir a velocidade da luz viajando pelo vácuo, na maioria dos casos a realização desta unidade é realizada em pressão atmosférica. Por causa disso é importante levar em consideração o valor exato da influência do ar na velocidade da luz. A diferença é tão significante que a sua determinação é uma etapa importante para a realização da unidade em qualquer método primário.

A definição do metro pode ser realizada por 2 métodos diferentes. Sendo estes: por meio de medida direta do tempo percorrido pela luz e por medida indireta do tempo percorrido.

Ao utilizar o método direto de medida primeiramente é necessária alguma forma de modulação da luz para gerar as características fiduciais necessárias para a cronometragem. A modulação resultará em um pacote de ondas. A distância da propagação deste pacote pode ser determinada. Um pulso de luz é transmitido e se separa em duas partes, uma vai pelo caminho pequeno usado de referência e outro utiliza o caminho da medição. A luz é refletida e após passar pela localização onde foi dividida um detector será acionado marcando um ponto de referência no tempo, logo após a luz que percorreu o outro caminho retornara marcando outra referência.

O atraso entre o primeiro ponto de referência e o segundo permite a determinação da diferença de distância entre os dois caminhos. Sendo representado pela Eq. 9, onde “ Δz ” é a diferença do comprimento do caminho de referência e do caminho medido e “ C_g ” é a velocidade do grupo do pacote de onda, e, condições de vácuo “ C_g ” é igual a velocidade da luz.

$$l = \Delta z = \frac{1}{2} C_g \cdot \Delta t \quad (9)$$

A medição direta da distância percorrida pela luz é utilizada principalmente para medições de longa distâncias sob a influência da atmosfera, como da Terra até a Lua por exemplo. Este fato se deve a este método ser mais difícil de se aplicar em pequenas distâncias.

O segundo método, se referindo a medida indireta do tempo percorrido, é ideal para a realização envolvendo distâncias menores que alguns metros, mas também apresenta uma maior precisão.

O método indireto, também chamado de interferometria ótica, se baseia na interferência da luz. A luz é uma onda eletromagnética, o campo elétrico propagando por caminhos mesuráveis que podem ser calculados de acordo com a Eq. 10:

$$E(z,t) = A \cos[\phi] = A \cos[\omega \cdot t - k \cdot z + \delta] \quad (10)$$

Sendo "A" a amplitude, "φ" a fase, "ω" a frequência angular, "k" o número da onda e "z" a fase inicial.

A distância do caminho de referência é imutável, enquanto a distância do caminho da medida é variável. Podendo então ser usada a Eq. 11, onde l representa o comprimento de onda.

$$\Delta\phi = k \cdot 2\Delta z = (2\pi \frac{\Delta z}{l}) \quad (11)$$

Como resultado o detector varia periodicamente. A variação e a interferência da intensidade são relacionadas a fração de intensidades individuais. Consequentemente até intensidades extremas podem ser detectadas.

2.5.3 - Realização prática da definição da candela

Como visto anteriormente a candela é definida pelo Sistema Internacional como uma intensidade luminosa em uma determinada direção, de uma fonte que emite radiação monocromática em uma frequência de 540×10^{12} hertz que em termos da eficácia luminosa tem o valor de $683 \text{ lm} \cdot \text{W}^{-1}$.

Como a definição da Candela é baseada em Kcd, e como consequência nas unidades radiométricas, a realização prática da candela e as unidades derivadas delas são baseadas na realização de unidades radiométricas.

A realização de unidades radiométricas pode ser feita baseada em detectores ou em sua fonte. As realizações baseadas em detectores são divididas em:

- Substituição elétrica do radiômetro (ESR), em que o aquecimento da radia-

ção ótica é igualado com o mesmo resultante de um poder elétrico substituto medido. Este método é comumente aplicado por equipamentos esfriados até temperaturas criogênicas, reduzindo as fontes de incertezas;

- Eficiência quântica de fotodiodos previsíveis (PQED) o qual é baseado em um semicondutor com pouca perda e um modelo de conversão e detecção fóton para elétron dentro do dispositivo. Tudo isso com o objetivo de determinar a quantidade de radiação ótica incidental da photocorrente. Esse método ganhou significância pela aplicação de “detectores armadilha” que aumentam a eficiência geral.

Os métodos de realização que usam da rastreabilidade radiométrica da fonte são:

- Radiador de Planck que usa de uma cavidade com alta emissão, sendo possível prever o brilho espectral emitido da temperatura da cavidade pelo uso da lei da radiação de Planck. Neste caso o que é rastreado é a temperatura, ou seja, o Kelvin. A temperatura pode ser determinada pelo uso de um detector radiometricamente calibrado e filtrado ou, se a distribuição do brilho for constante em todas as direções, pelo uso de uma abertura em frente a um radiador de planck;
- Anel de armazenamento de elétrons produzindo radiação sincrotron, elétrons relativos em uma órbita circular emitem SR. Em certas condições, essa fonte pode ser considerada absoluta permitindo a previsão da intensidade do brilho do SR emitido baseado nas medidas dos parâmetros de anéis de armazenamento pelo uso da equação de Swinger. Neste caso o rastreamento é das unidades de comprimento e eletricidade;

Finalmente, a realização da candela é normalmente realizada usando 2 métodos:

- Primeiro método – Usando uma fonte policromática pequena provendo um campo de radiação isotrópica em uma direção da medida. A intensidade do brilho em uma direção específica é medida a uma distância suficiente usando de uma série de radiômetros filtro calibrados como uma irradiação conhecida no espectro visível como referência. A intensidade do brilho da fonte policromática é medida sobre o espectro de ondas visíveis inteiro;
- Segundo método – Usa de um radiômetro filtrado cuja responsividade é próxima a função da eficiência luminosa CIE, sendo geralmente calibrado pela referência de um radiômetro absoluto para dar uma responsividade luminosa. Podendo ser usado para calibrar uma lâmpada padrão.

2.5.4 - Realização prática da definição do ampere

Como visto anteriormente o ampere é estabelecido pelo sistema internacional em termos de carga elementar, que tem o valor de $1,602\ 176\ 634 \times 10^{-19}$ C.

O Ampere pode ser realizado de três principais formas:

- Pelo uso da lei de Ohm, a relação $A = V/\Omega$ e usando realizações práticas de

unidades derivadas como o Volt e o Ohm.

- Pelo uso do transporte de um único elétron (SET) ou dispositivo similar, a relação $A = C/s$, o valor de e dada na definição do ampere e a realização prática da unidade de segundo. É importante notar que, por enquanto, o uso de SET ainda tem limitações técnicas que resultam em incertezas maiores do que nas outras técnicas, porém foram incluídos por causa da abordagem única que proporciona e os avanços promissores que vem aos poucos aprimorando sua aplicação.
- Pelo uso da relação “ $I = C \cdot dU/dt$ ” e “ $A = F \cdot V/s$ ” e a realização prática das definições das unidades derivadas de Volt e Farad e a unidade básica de segundo.

2.5.5 - Realização prática da definição do mol

Como visto anteriormente, o mol é definido pelo Sistema Internacional como a unidade da grandeza correspondente a quantidade de matéria, sendo expressa em termos da constante de Avogadro, também chamado de número de Avogadro, com seu valor de $6,022\ 140\ 760 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$.

Para realizar a definição do mol é necessário manter em mente algumas equações, sendo elas a Eq. 12 e Eq. 13:

$$N=m/A_r(X)M_u \quad (12)$$

$$n=N/Na \quad (13)$$

Lembrando que n é a quantidade de substância em uma amostra X. N é o número de entidades elementares na amostra. m é a massa das partículas elementares N. $Ar(X)$ é a massa relativa atômica ou molecular de X. M_u é a massa molar constante.

Atualmente o método mais exato para a realização prática da definição do mol envolve a determinação do número de átomos ^{28}Si em um único cristal de Si enriquecido com ^{28}Si usando medidas interferométricas de raio-X e volume por meio da Eq. 14:

$$N=8Vs/(28Si)^3 \quad (14)$$

Os três principais métodos mais usados para realizar a definição do mol são, respectivamente, preparação gravimétrica, equação de estado para os gases e eletrólises.

O método da preparação gravimétrica se baseia na determinação do produto da fração da massa na amostra e a massa da amostra resultante como apresentado nas Eq. 15 e Eq. 16, onde $w(X)$ é fração de massa X.

$$N=w(X)m/(ma(X))= w(X)m/Ar(X)m_u \quad (15)$$

$$n=(w(X)m)/Ar(X)M_u \quad (16)$$

Este método é normalmente usado por causa da simplicidade e precisão com que permite medir uma amostra. Porém falha há incertezas nas frações de massa escolhidas. Sendo atingir uma incerteza aceitável em materiais puramente orgânicos ou inorgânicos extremamente difícil, este método muitas vezes falha ao analisá-los.

Outro método usado para a obtenção da realização prática do mol é a obtenção da quantidade de material de uma amostra de gás puro colocando na formula de estado do gás resulta na Eq. 17, onde p é a, V é o volume, T é a temperatura, R é a constante de gás molar e $B(T)$ é o segundo coeficiente viral.

$$pV=nRT[1+B(T)(n/V) + \dots] \quad (17)$$

Por fim, o último método é a Eletrólises, onde o número de entidades (N) que reagiram com um eletrodo é igual a carga (Q) que passou pelo sistema dividido pelo número de íons (z) multiplicado pela carga elétrica elementar (e), como pode-se ver nas Eq. 18 e Eq.19.

$$N=Q/ze \quad (18)$$

$$N=Q/zNAe=Q/zF \quad (19)$$

2.5.6 - Realização prática da definição do kilograma

Como vimos anteriormente o kilograma é definido pelo Sistema Internacional como a unidade da grandeza cujo valor derivado da constante de Planck, ou seja, $6,626\ 070\ 150 \times 10^{-34}$ J.s.

A unidade de massa não sugere nenhum método em particular seja usado para realizá-la. Os métodos primários atuais focam na realização e disseminação da unidade de massa no valor nominal de 1 kg.

Existem atualmente dois métodos primários capazes de realizar a definição de kilograma independentemente e com as menores incertezas possíveis.

O primeiro, também chamado de realização por comparação de energia elétrica à energia mecânica. Este método se apoia no uso de uma balança eletromecânica, também chamada de balança de Kibble ou balança de Watts, especialmente designada com o propósito de determinar a massa desconhecida.

Nos primeiros 25 anos depois da invenção desses tipos de balanças somente dois laboratórios seguiram essa ideia e construíram seus próprios modelos: o NPL (*National Physical Laboratory*) no Reino Unido e o NIST (*National Institute of Standards and Technology*) nos Estados Unidos. Com o sucesso destas instituições outros institutos começaram a investir em variações e isso desencadeou uma reação em cadeia provocando o refinamento da unidade de massa (SCHLAMMINGER; HADDAD, 2019).

Balanças de Kibble, apesar de serem todas designadas com o mesmo objetivo, podem apresentar estruturas completamente diferentes, vez que a configuração ideal não foi descoberta. Como resultado, toda balança Kibble é única, por terem sido feitas com o objetivo de testar novos modelos e aprimorá-los baseado nos experimentos passados (SCHLAMMINGER; HADDAD, 2019).

Como exemplo pode-se comparar as balanças presentes na FIG. 7 e na FIG. 8. Essas balanças foram feitas por organizações diferentes (Primeira balança construída pelo NIST e a segunda pelo Instituto Federal De Metrologia da Suíça) e representam bem o fato de cada balança ser única em seu modelo (SCHLAMMINGER; HADDAD, 2019).

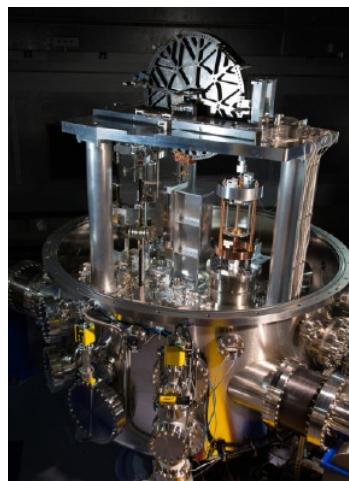


Figura 7 - Imagem da Balança de Kibble NIST-4. Fonte: (SCHLAMMINGER; HADDAD, 2019).



Figura 8 - Balança de Kibble BWM II construído pela METAS. Fonte: (METAS, 2019).

Apesar do modelo ideal ainda não ter sido descoberto, as balanças atuais que estão sendo construídas apresentam algumas similaridades que podem apontar quais

componentes são mais eficientes. A exemplo; o uso de um imã supercondutor no lugar de um imã eletromagnético comum que ajuda a aumentar a eficiência do equipamento. Desde a NIST desenvolver uma balança com um e deixar claros os benefícios, vários outros institutos resolveram adotar essa parte do modelo (SCHLAMMINGER; HADDAD, 2019).

Alguns princípios básicos são seguidos por todas as balanças de Kibble, o que permite a construção de esquemas detalhando a estrutura mais básica possível para uma balança de Kibble. Pode-se ver exemplos desses modelos na FIG. 9 e FIG. 10.

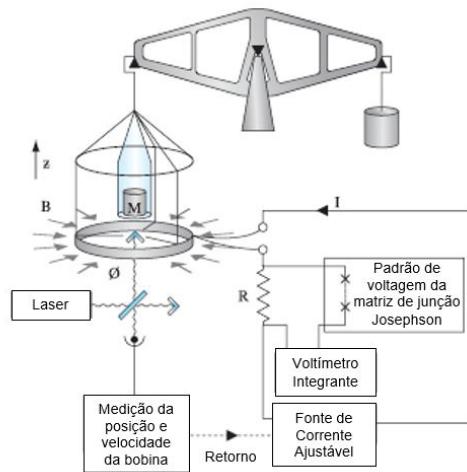


Figura 9 - Esquema de uma balança de Kibble no modo de pesar. Fonte: Alterado de (ROBINSON; SCHLAMMINGER, 2016).

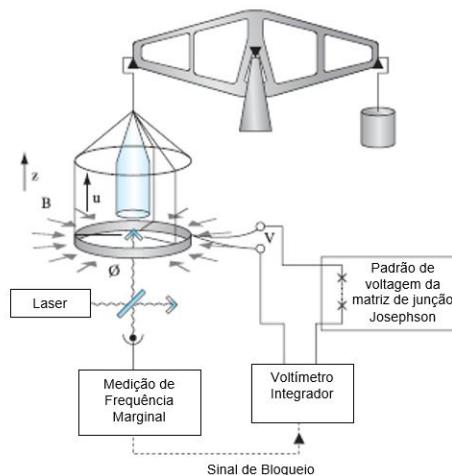


Figura 10 - Esquema de uma balança de Kibble no modo de mover. Fonte: Alterado de (ROBINSON; SCHLAMMINGER, 2016).

A determinação da massa desconhecida (mx) de um artefato x é feita por duas maneiras. No primeiro, o modo de pesar, o peso ($mx.g$) do artefato é balançado por um campo eletromagnético produzido, em um fio de comprimento (l) emerso em um campo magnético de densidade do fluxo (B) quando uma corrente (I_1) passa por ela. Podendo ser representado pela Eq. 20:

$$(20) mx.g = I_1 \cdot B \cdot l. \quad (20)$$

Kibble percebeu que, ao realizar outra medição que há necessidade de conhecer B ou l . Quando conectado em um motor mantendo a bobina em uma velocidade constante, pode se afirmar que a voltagem (U_2) que é induzida pelos terminais de um mesmo fio movendo com uma velocidade (v) pela mesma densidade de fluxo magnético, é medida pela Eq. 21:

$$U_2 = v \cdot B \cdot l. \quad (21)$$

Ao combinar as equações o resultado é a Eq. 22:

$$mx \cdot g \cdot v = I_1 \cdot U_2 \quad (22)$$

Após alcançar a equação anterior, mede-se a voltagem e a intensidade da corrente, utilizando o efeito Josephson e o efeito Hall. Para determinar a voltagem é utilizado de dois supercondutores separados por uma fina camada de material isolante. Ao aplicar determinada radiação de micro-ondas à essas junções, cria-se uma tensão conhecida através da Eq. 23, sendo " f " a frequência da radiação, " e " a carga de um elétron, "V" é a voltagem e "h" é a constante de Planck.

$$V = h \cdot c \cdot f / 2e \quad (23)$$

É possível obter qualquer voltagem desejada ao se utilizar da Eq. 24, por meio de ajustes a frequência da radiação e conectando junções Josephson, sendo "n" o número de junções.

$$V = n \cdot h \cdot c \cdot f / 2e \quad (24)$$

Para obter a intensidade, utiliza-se de um resistor por onde passará e será medida a voltagem da corrente nas ligações Josephson, ao obter tal voltagem se determina resistência " R ", e usa-se da Eq. 25, onde " I " é a corrente.

$$I = V / R \quad (25)$$

Ao substituir as equações a Eq. 26 é obtida.

$$V \times V / R = m \times g \times v \quad (26)$$

O efeito Hall é utilizado através da Eq. 27, onde P é uma fração qualquer

$$R = 1 / P \times h / e^2 \quad (27)$$

Relacionando as equações anteriores em função de Planck observamos que se obtém a constante de Planck (h) pela Eq. 28

$$h = 4 / (P^2) \times g \times v / F^2 \times m \quad (28)$$

Foi por meio de medições em balanças Kibble que um valor consensual para a constante de Planck (h) foi obtido. Esse valor é $6,62607015 \times 10^{-34}$ J.s. Ao utilizar da constante juntamente das equações anteriores é possível determinar a massa de um objeto em uma balança Kibble.

O segundo método, também chamado de método da realização pela densidade do cristal raio X, vem do conceito da representação da massa de uma substância pura pelo número de partículas elementares contidas. Esse número pode ser medido pelo método XRCD (*X-ray Crystal Density*). O volume macroscópico (V_s) de um cristal é igual ao volume microscópico por átomo na unidade celular multiplicado pelo número de átomos no cristal. O número de átomos pode ser dado pela Eq. 29, onde $a(^{28}Si)^3$ é o volume da célula unitária e N é o número de átomos.

$$N = 8 V_s / a(^{28}Si)^3 \quad (29)$$

Ao realizar a definição do kilograma primeiro é necessário expressar a massa da esfera em termos da massa de um único átomo, usando o método XRCD, como apresentado na Eq. 30.

$$m_s = N m(^{28}Si) \quad (30)$$

Desde que o valor experimental da constante física $h/m(^{28}Si)$ tem uma alta precisão a fórmula pode ser escrita como a Eq. 31

$$M_s = h N (m(^{28}Si) / h) \quad (31)$$

Portanto, com este experimento foi possível obter o valor de N e como o $m(^{28}Si)/h$ é uma constante da natureza com um valor conhecido, o valor numérico se h se torna fixo. Esse padrão deu origem a esfera que é o padrão de massa primário. Porém a presença de traços de dois isótopos de silício adicionais além do ^{28}Si leva a alterações nas equações apresentadas nesta seção.

2.5.7 - Realização prática da definição do kelvin

Como vimos anteriormente o kelvin é definido pelo sistema internacional como a unidade de temperatura termodinâmica sendo que esta é fixada em termos da constante de Boltzmann, cujo valor é $1,380\,649 \times 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$.

Antes de apresentar os métodos utilizados na realização da definição de Kelvin, primeiramente é necessário compreender a nomenclatura que separa e classifica esses métodos.

Termometria primária é realizada pelo uso de um termômetro baseado em um sistema físico bem entendido, no qual a equação descrevendo a relação entre a temperatura termodinâmica (T) e outras quantidades independentes, podem ser expressas sem constantes desconhecidas ou dependentes da temperatura.

Termometria primária absoluta permite medir temperatura termodinâmica diretamente em termos da definição da unidade base kelvin (K). Nenhuma referência é feita a pontos fixos na temperatura e todos os outros parâmetros são medidos ou determinados.

Termometria primária relativa permite medir valores termodinâmicos indiretamente usando equações onde um ou mais valores são pontos fixos de temperatura.

Escalas de temperatura definidas permitem atribuir valores de temperatura, determinados pela termometria primária, a uma série de estados naturais. Essas escalas são extremamente prescritivas e definem novas temperaturas providenciando aproximações da temperatura na unidade kelvin.

INDÚSTRIA 4.0

Indústria 4.0 é um termo que se refere a um conjunto de vários conceitos atuais que caracterizam a fase de industrialização em que o mundo se encontra, ou seja, a quarta revolução industrial. Ele foi utilizado pela primeira vez em 2011 em uma feira de Hannover, Alemanha (ENGENHARIA - PRESYS, 2019).

Os documentos desse projeto descreviam os termos Industria 4.0 e Logística 4.0 como as duas principais tendências que estão surgindo e afetando a produção e a logística das empresas. Eles também descrevem as possíveis oportunidades oferecidas por esse processo, ao analisar as mais importantes soluções nesta área e especulando possíveis desenvolvimentos (GLISTAU; COELLO MACHADO, 2018).

Nesse ano o governo da Alemanha inaugurou um projeto denominado Plataforma Indústria 4.0 durante a feira de Hannover. Essa plataforma tinha como objetivo desenvolver alta tecnologia para possibilitar a rápida troca de dados/informações entre os sistemas automatizados controlando os equipamentos industriais, outros maquinários envolvidos no processo de produção e os seres humanos. Tudo isso de forma a otimizar inteiramente o processo industrial (SACOMANO *et. al.*, 2018).

Até hoje a Alemanha é vista como o país pioneiro na construção e estabelecimento dos requerimentos da Indústria 4.0. O país teve um importante papel na fomentação dessa nova área da indústria. Pesquisa e Desenvolvimento envolvendo a quarta revolução industrial receberam 200 milhões de euros do governo alemão por meio de investimentos de órgãos públicos como o Ministério Alemão da Educação e Pesquisa e o Ministério Federal Alemão dos Assuntos Econômicos e de Energia (BALASINGHAM, 2016).

3.1 – Origem e evolução histórica

Durante sua existência, a civilização humana passou por vários importantes marcos em seu desenvolvimento. A indústria, como um setor importante da história humana, também tem seus marcos, como pode ser visto na FIG. 11. A seguir se encontra informação no período histórico e as tecnologias marcantes de cada revolução até a fase atual (POÓR; BASL, 2019).

Antes de compreender os impactos e as inovações resultantes da indústria 4.0 é preciso entender a origem desse termo. Existe uma ligação direta entre o uso desse termo e a evolução de áreas como a eletrônica e a comunicação (JÚNIOR, 2019).

A palavra revolução denota uma mudança radical de paradigma. Durante a história do homem houve várias revoluções, cada uma resultando em alterações profundas na

economia e estruturas sociais do período. Estas revoluções e subsequentes alterações foram desencadeadas pela emergência de novas tecnologias e formas de perceber o mundo. As revoluções industriais, como seu nome indica, referem-se a mudanças e inovações na área da produção industrial que marcaram épocas (SCHWAB, 2016).



Figura 11 - Revoluções Industriais. Fonte: (ENGENHARIA - PRESYS, 2019)¹

3.1.1 - Primeira Revolução Industrial

A Indústria 1.0, também chamada de Primeira Revolução Industrial, ocorreu aproximadamente no meio do século XVIII. Teve seu início na Inglaterra, o país mais tecnologicamente avançado naquele período. A invenção mais marcante dessa revolução foi o motor a vapor, vez que foi ele que teve um papel importante no desenvolvimento do maquinário industrial (POÓR; BASL, 2019).

Essa primeira fase foi marcada pelo êxodo rural, isto é, a vinda da população do campo para as cidades. Isso resultou em um acelerado crescimento populacional (SACOMANO *et. al.*, 2018).

Esse crescimento presente nas cidades promoveu a concentração da mão de obra, de recursos técnicos e dos mercados. Esses fatores criaram um ambiente onde a produção em volumes elevados era possível, contribuindo assim para o desenvolvimento industrial (SACOMANO *et. al.*, 2018).

A partir da primeira revolução industrial surgiram as primeiras indústrias, substituindo as manufaturas artesanais por maquinário. Com a introdução deste equipamento foi possível começar a produção em série de produtos resultando em uma grande mudança de paradigma no modelo econômico (JÚNIOR, 2019).

¹ Disponível em: <http://www.presys.com.br/blog/industria-4-0/>. Acesso em Agosto de 2021.

O equipamento que desencadeou todos esses desenvolvimentos foi o tear mecânico inventado em 1785, possibilitando a tecelagem por mão de obra não especializada. Esta invenção levou a um aumento na competitividade com os trabalhadores se agrupando e passando a trabalhar para os donos dos meios de produção. Surgiu assim a classe operária (SACOMANO *et. al*, 2018).

O surgimento desta nova classe, também chamada de proletariado, teve um grande impacto no contexto social. As empresas, ao tentar maximizar a produção e o lucro, reduziram os salários ao mínimo possível e aumentaram o período de trabalho até ele se tornar extremamente longo. Como resultado dessa situação a insatisfação dos operários aumentou como nunca, levando ao surgimento de pensadores como Karl Marx e, com o passar do tempo, de uniões de trabalhadores e partidos políticos representando os mesmos (MOHAJAN, 2019).

Outras importantes características da época foram o uso de carvão como principal fonte de combustível e o grande desenvolvimento de métodos de transporte de produtos (MOHAJAN, 2019).

A comunicação desse período era realizada por meio de telégrafos, inventados em 1837. Era realizada a transferência de informações por código *Morse*, ou seja, usando traços e pontos para representar letras e outros sinais (JÚNIOR, 2019).

3.1.2 - Segunda Revolução Industrial

A Indústria 2.0, também chamada de Segunda Revolução Industrial, veio em 1913 junto com a introdução das linhas de montagem por Henry Ford resultando no surgimento do Fordismo (JÚNIOR, 2000).

Henry Ford, um empreendedor americano e o responsável pelo desenvolvimento desta concepção teórica. Denominado Fordismo, este método de administração se baseou no desenvolvimento de novos conceitos como o produto único, com o objetivo de intensificar a economia em escala na linha de montagem, ou seja, aumentar a eficiência da produção, otimizando o tempo e reduzindo os custos. Ford também desenvolveu peças intercambiáveis de alta precisão que eliminavam a necessidade de ajustamento. Houve ainda a divisão do trabalho em que mecânicos semiqualificados se especializavam na montagem de pequenas partes. A produção se torna simples e contínua (JÚNIOR, 2019).

Seguindo essa lógica de mecanizar todas as tarefas possíveis e simplificar e dividir o restante, as fábricas conseguiram obter um formidável aumento da produtividade. Vale lembrar, no entanto, que esse aumento é o direto resultado da presença de trabalhadores que aceitassem realizar trabalho difícil, repetitivo e extenuante por um pequeno salário (SACOMANO *et. al*, 2018)

Surgem também, neste mesmo momento, outros métodos de gestão industrial. O método de administração científica criado por Frederick Taylor é um exemplo. Este método focava no tempo de produção e em como melhorar a eficiência produtiva por meio da supervisão do trabalho e distribuição de recompensas ou punições quando necessário. Vários princípios são aplicados ainda hoje (JÚNIOR, 2019).

No mundo todo esse novo processo de industrialização resultou em um desenvolvimento de novas relações de emprego no ambiente industrial. O foco se tornou produzir mais, otimizando o processo, tempo gasto e custos envolvidos (JÚNIOR, 2019).

A segunda revolução industrial ocorreu durante a segunda guerra mundial. Como resultado houve vários desenvolvimentos de tecnologias que proporcionam benefícios para guerras entre países. As indústrias química, elétrica, petroleira e de aço foram as mais afetadas. A produção em massa resultou em uma queda no preço dos produtos, tornando-os mais acessíveis à população (JÚNIOR, 2019).

Características marcantes dessa época foram: a invenção de motores à combustão interna e o uso de energia elétrica. Houve também um aumento marcante na produtividade como resultado de novas estratégias de gestão industrial como a divisão de trabalho (FLOUD, 1994).

Progresso significante foi feito no desenvolvimento de novas fontes de energia. O surgimento de energia elétrica vinda de turbinas hidráulicas e de motores à combustão interna revolucionaram a tecnologia da época. O campo da química também desfrutou de diversos avanços que beneficiam a química por meio da descoberta de novos materiais (POÓR; BASL, 2019).

A eletricidade teve um papel crucial nessa revolução. Com a criação dos primeiros eletrodomésticos e a chegada de energia elétrica para uso residencial, o mundo nunca mais seria o mesmo (JÚNIOR, 2019).

O espaço empresarial também mudou bastante com o surgimento de táticas que visavam manipular e monopolizar o mercado. Empresas maiores absorverem empresas menores para terem controle absoluto sobre um produto se tornou uma prática comum (POÓR; BASL, 2019).

Houve também desenvolvimentos no campo da telecomunicação. Em 1861 a primeira linha transcontinental é estabelecida pelo telégrafo. No mesmo ano houve a primeira transmissão de sons musicais por fios, abrindo a possibilidade de uma nova forma de comunicação (JÚNIOR, 2019).

Em 1865 é fundada a União Telegráfica Internacional que até hoje apresenta um importante papel no setor de telecomunicações mundial. Em 1875 houve a invenção do

telefone e em 1876 foi feita a primeira transmissão completa de uma mensagem pelo aparelho. Em 1896 foi criado o primeiro sistema de telegrafia sem fios (JÚNIOR, 2019).

A eletrônica também se desenvolveu paralelamente a essas inovações. Alguns momentos marcantes foram a invenção do computador eletromecânico, o primeiro computador a processar informações em tempo real, o primeiro modelo de computador para uso civil, o lançamento do primeiro satélite artificial terrestre, o desenvolvimento do primeiro chip e a inauguração da NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) (JÚNIOR, 2019).

3.1.3 - Terceira Revolução Industrial

A Indústria 3.0, ou terceira revolução industrial, se iniciou entre os anos 60 e 70. Essa revolução foi a primeira a não ocorrer primeiro na Europa, mas sim nos Estados Unidos (JÚNIOR, 2000).

A terceira revolução industrial é o primeiro momento em que a eletrônica apresenta um papel de protagonismo no desenvolvimento industrial. Por esse motivo é chamada de Era da Eletrônica, quando o uso de CLPs (Controladores Lógicos Programáveis) para o controle de máquinas se popularizou. A introdução da Tecnologia da Informação e do computador no processo de fabricação juntamente com os primeiros sistemas de comunicação (JÚNIOR, 2019).

A construção de máquinas especializadas em processar e controlar informações como os computadores foram desenvolvidos. Começaram a ser instalados CNC (Comando Numérico Computadorizado) em centros de usinagem, levando a um grande aumento em eficiência. Esse período então se trata da robotização e automação das indústrias. Nesta fase, operários começaram a ser substituídos por máquinas levando a um aumento no número de desemprego nas indústrias (ENGENHARIA - PRESYS, 2019).

No setor energético ocorre uma quebra de paradigma com o surgimento de reatores nucleares com altíssimas *performances*. O transporte também sofreu uma grande transformação, com as locomotivas sendo substituídas por modelos elétricos e motorizados. Todas as tecnologias desenvolvidas anteriormente foram refinadas em um processo contínuo de aprimoramento e desenvolvimento industrial e tecnológico (POÓR; BASL, 2019).

Alguns desenvolvimentos marcantes desta época são: o desenvolvimento do primeiro equipamento para produção em massa de transistores, criação do ASCII (*American Standard Code for Information Exchange*), primeiro satélite de comunicação é lançado pela NASA (JÚNIOR, 2019).

Em 1962, Joseph Carl Licklider, propôs uma rede global de compartilhamento de

informação. Fato que inspirou a criação da primeira rede de comunicação em longas distâncias. Outros desenvolvimentos como o surgimento do e-mail e da TV em cores são atribuídos a esse período (JÚNIOR, 2019).

Com o fim da segunda guerra, o Japão passou por um período em que era necessário aproveitar tudo dos poucos recursos disponíveis. Esta situação levou ao surgimento do Toyotismo, também chamado de “*Lean Manufacturing*”. Esse sistema de produção se baseia na ideia de redução do desperdício ao mínimo, eliminação de perdas e processos que não agreguem valor ao produto, preocupação constante com a qualidade e satisfação do cliente, redução de estoques, padronização e redução do ciclo de desenvolvimento de produtos (SACOMANO *et. al.*, 2018).

3.1.4 - Quarta Revolução Industrial

A Indústria 4.0, também chamada de Quarta Revolução Industrial, é a revolução industrial ocorrendo atualmente. Com o desenvolvimento da *internet* e outros sistemas de processamento de informação houve um gigantesco aumento na eficiência tanto nas indústrias quanto em diversos outros serviços (RIGOTTI, 2020).

A quarta revolução industrial, como resultado da vinda de “fábricas inteligentes” e outras tecnologias que visam aumentar a autonomia do ambiente industrial, cria uma rede global e flexível de sistemas físicos e virtuais de fabricação (SCHWAB, 2016).

Esses vários sistemas aplicados ao meio industrial, ao permitir a identificação de problemas na produção e a rápida notificação dos qualificados para resolvê-los, resultaram em um aumento na eficiência. O resultado do principal foco desta revolução, a troca de informações, é justamente esse aumento em sua eficiência. Esse processo permite uma melhor organização e automação do espaço industrial. O resultado da junção das tecnologias de informação com a produção, permitiram uma grande melhora na gestão e controle da produção (ROBLEK; MEŠKO; KRAPEŽ, 2016).

Essa revolução ainda está dando seus primeiros passos e muitos novos desenvolvimentos ainda estão por vir. Ao considerar as revoluções do passado é de se esperar que grandes mudanças impactem a relação do homem moderno e das inúmeras máquinas que ele tem que interagir diariamente (BLOEM *et. al.*, 2014).

As alterações resultantes dessa transformação são, em termos de tamanho, velocidade e escopo, históricas. Tão profunda são tais transformações que ainda não se conhece os seus desdobramentos, havendo uma grande incerteza quanto aos desenvolvimentos resultantes da aplicação destas tecnologias emergentes. Schwab (2016), afirma que a quarta revolução será tão poderosa, impactante e historicamente importante quanto as três anteriores.

Como resultado de todas estas mudanças seria correto dizer que a indústria entrou em uma nova era, uma era mais digitalizada e conectada, e os profissionais precisam se adaptar a esta nova realidade. É necessário pelo menos um básico conhecimento nas áreas da informática, análise de dados e robótica. Várias novas ocupações focadas em comunicação, informática e outras áreas relevantes surgiram como resultado deste novo foco industrial (ROBLEK; MEŠKO; KRAPEŽ, 2016).

De acordo com Schwab (2016), a quarta revolução industrial é incomparável às anteriores, vez que apresenta uma progressiva interdependência entre campos de estudo. Como resultado, há o surgimento de inovações tangíveis vindo desta harmonização e integração de disciplinas distintas.

Um exemplo seria a junção das áreas da Tecnologia da Informação (IT) e Tecnologia de Operação (OT). Ao unir os processos de automação empresarial e os processos de automação industrial, criaram-se várias oportunidades profissionais. A área da informática como responsável por possibilitar essa nova interação ganhou ainda mais importância (BLOEM *et. al.*, 2014).

3.2 – POPULARIZAÇÃO DO TERMO 4.0

O termo Indústria 4.0 se refere às indústrias que apresentam as características marcantes da Quarta Revolução Industrial. Porém, por causa da maior integração característica dessa revolução, outras áreas também desfrutam dos benefícios dessa revolução. Criou-se então uma necessidade de termos que representem o uso dessas inovações nesses outros campos.

A Quarta Revolução Industrial despertou tanto interesse que hoje se tornou comum denominar de 4.0 todos os assuntos relacionados a esta revolução e suas tecnologias. Como resultado, conceitos como Manufatura 4.0, Manutenção 4.0, Gestão 4.0, Logística 4.0, Serviços 4.0, Energia 4.0, Engenharia 4.0 e outros passaram a ser usados (JÚNIOR, 2019; SACOMANO *et. al.*, 2018).

Apesar de seu uso, nem todos esses termos foram estabelecidos ou apresentam validade para seu uso no campo acadêmico. Alguns ganharam validade ao serem usados e propriamente definidos por organizações importantes, como o uso do termo Manufatura 4.0 pelo governo alemão, porém muitas ainda permanecem somente como expressões populares para se referir a esse fenômeno (SACOMANO *et. al.*, 2018).

3.3 – TECNOLOGIAS HABILITADORAS

As tecnologias de informação sofreram um *boom* durante as últimas décadas com o surgimento da *internet* e o rápido desenvolvimento de áreas como: inteligência artificial,

a robótica e a computação. A aplicação destas disciplinas no campo industrial é um desenvolvimento inevitável desta nova revolução industrial (ROBLEK; MEŠKO; KRAPEŽ, 2016).

De acordo com (SCHWAB, 2019), a fusão de tecnologias de áreas distintas e a interação entre os domínios físicos, digitais e até mesmos biológicos são características que tornam a Quarta Revolução Industrial fundamentalmente diferente das prévias.

Estas tecnologias habilitadoras que caracterizam a Indústria 4.0, cujas principais estão presentes no esquema da FIG. 12, compartilham de uma característica em comum. Elas são inovações que utilizam da capacidade de disseminação da digitalização e da Tecnologia de Informação (SCHWAB, 2019).



Figura 12 - Tecnologias Habilitadoras da Indústria 4.0. Fonte: (RIGOTTI, 2020)².

Estas tecnologias habilitadoras apresentadas na FIG 12 são: Big data e Analytics, Robôs, Simulação, Integração de Sistemas, Internet Industrial das Coisas, Segurança Cibernética, Nuvem, Manufatura Aditiva e a Realidade Aumentada. A seguir, todas essas inovações serão conceituadas e analisadas e, logo após, haverá uma seção com o objetivo de analisar os impactos que a implementação dessas tecnologias ocasionará na sociedade.

3.3.1 - Big Data e Analytics

Big Data e Analytics são tecnologias que permitem o melhor manuseio de uma grande quantidade de informação, permitindo aprender sobre os processos realizados, a

² Disponível em: <https://www.abii.com.br/single-post/conhe%C3%A7a-as-tecnologias-habilitadoras-da-ind%C3%BAstria-4-0-e-algunas-aplica%C3%A7%C3%B5es>. Acesso em Agosto de 2021.

qualidade dos produtos e a satisfação do consumidor de forma rápida (RIGOTTI, 2020).

Tecnologias que usam da análise e gestão de grandes volumes de dados para otimização de processos industriais são parte essencial da Indústria 4.0. Desde um consumo de energia mais eficiente até uma melhora na qualidade do produto final, essas tecnologias contribuem em cada etapa do processo de produção. Por causa dessa grande importância, a segurança dos dados envolvidos na operação é fundamental, o que resulta na necessidade de um grande investimento em sua defesa (DE ALMEIDA, 2018).

Existe um rápido progresso em empresas utilizando de sistemas baseados nestas tecnologias como ERP (*Enterprise Resource Planning*), SCM (*Supply Chain Management*), CRM, (*Customer Relationship Management*), DW (*Data Warehouses*) e BI (*Business Intelligence*). Este fenômeno comprova que a IT e consequentemente, o uso de *Big Data* e *Analytics*, se tornou uma área estratégica que proporciona vantagens competitivas para organizações que utilizam de seus recursos corretamente (SACOMANO *et. al.*, 2018).

3.3.2 - Segurança Cibernética

Um sistema que adote conceitos da indústria 4.0 apresentará seus insumos, matéria-prima, máquinas e demais itens necessários para o processo de produção interligados por uma rede complexa de dados. Tais dados são de vital importância para a empresa e necessitam ser protegidos para evitar possíveis falhas e outros tipos de ameaças às indústrias. Tal proteção é chamada de segurança cibernética (DE ALMEIDA, 2018).

Por causa dos riscos que uma maior conectividade apresenta, as empresas necessitam de uma segurança eficiente para evitar e combater possíveis ataques. Exemplos de métodos utilizados pelo segurança cibernética são: criptografia, separação de sistemas e adoção de protocolos de segurança (RIGOTTI, 2020).

3.3.3 - Robôs Autônomos e a Inteligência Artificial (I.A.)

A padronização e controle dos movimentos realizados no ambiente industrial são fundamentais para toda a indústria. Porém, este se torna ainda mais importante na Indústria 4.0, onde robôs podem realizar os movimentos com extremo controle, ao mesmo tempo que permitem a obtenção de uma maior flexibilidade pela adequação de sua programação para refletir as tarefas envolvidas na fabricação de produtos customizados (DE ALMEIDA, 2018).

No passado, o uso de robôs estava restrito a tarefas rigidamente controladas em indústrias extremamente específicas. No entanto, a Indústria 4.0 utiliza da robótica em diversas tarefas e em todos os setores. Essa transformação é resultado do aumento da

adaptação e da flexibilidade dessa tecnologia. Avanços no desenvolvimento de sensores e no controle e armazenamento de dados permitiram aos robôs uma melhor resposta ao seu ambiente e a capacidade de acessar rapidamente informações pela rede. Tudo isso contribuiu para uma robótica mais dinâmica (SCHWAB, 2016).

O uso da robótica sempre acompanhada de outras tecnologias contribui para essa flexibilidade. A exemplo sua automatização por meio da implementação de I.A. Como consequência, seu uso permanece essencial para o funcionamento de uma indústria na quarta revolução industrial (RIGOTTI, 2020).

A inteligência artificial (IA) está transformando a sociedade. Impulsionada pelo aumento exponencial da capacidade de processamento e disponibilidade de significantes volumes de dados, essa tecnologia proporcionou grande progresso. O uso de inteligência artificial se tornou tão comum que está constantemente presente no cotidiano da população. Carros que pilotam sozinhos, *drones*, *softwares de tradução* e até mesmo as assistentes virtuais presentes na maioria dos celulares são todos exemplos de aplicações desta tecnologia (SCHWAB, 2016).

O processo de aprendizagem destes algoritmos constitui-se do uso de rastros de dados deixados no mundo digital pelos usuários. Isso possibilita o surgimento de ferramentas como o “aprendizado automático” (também chamado de “*Machine Learning*”), “detecção automatizada” e a autoprogramação de robôs e outros maquinários contendo esses algoritmos, tudo isso para encontrar a solução mais efetiva possível sem ser necessária a intervenção humana (SCHWAB, 2016).

3.3.4 – Simulação

Sistemas de simulação tem um papel importante na indústria. Ao permitirem a realização de testes por meio de computadores com modelos físicos bem desenvolvidos é possível reduzir os custos da inovação e implementação de novas tecnologias (RIGOTTI, 2020).

Essa tecnologia contribui a evitar prováveis erros ou até mesmo colisões entre o maquinário. Além desses parâmetros, a simulação permite obter uma ideia real dos custos envolvidos no processo, levando em conta desde a obtenção de matéria prima até o tempo de manufatura (DE ALMEIDA, 2018).

Ao utilizar softwares como o CAM (*Computer Aided Manufacturing*), é possível simular o trajeto de ferramentas de corte em máquinas como tornos, centros de usinagem e máquinas de eletroerosão a fio (DE ALMEIDA, 2018).

A simulação computacional garante a eficiência e qualidade no desenvolvimento

de produtos. Ferramentas como o CAE (*Computer Aided Engineering*), que pode ser visto na FIG.13, auxiliam nesta missão. Análises estatísticas, de fluidos, dinâmicas, térmicas, eletromagnéticas, acústicas e muitas outras podem ser realizadas por profissionais com o suporte do computador, proporcionando benefícios como redução dos custos e tempo do processo, aumento da produtividade e auxilio na identificação de soluções (DE ALMEIDA, 2018).

A Indústria 4.0 foca, principalmente, na utilização mais ampla dos dados, analisando a informação em tempo real e aproximando o mundo físico e virtual. Como resultado, com todo maquinário tendo uma cópia virtual, é possível testar e aperfeiçoar as configurações do equipamento antes de qualquer operação, otimizando o uso de recursos (DE ALMEIDA, 2018).

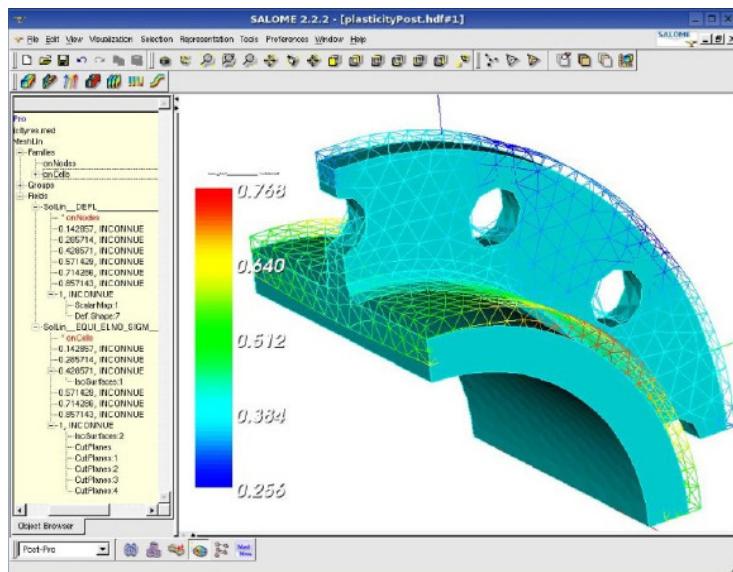


Figura 13 - Análise de deformações em estrutura 3D (CAE). Fonte: (CUGNONI, 2008)³.

3.3.5 - Integração de Sistemas (Vertical e Horizontal)

Na Indústria 4.0 todos os processos de fabricação são integrados com suas fases respectivas e também a operações transversais que impactam todas as etapas de fabricação. Esses sistemas integrados facilitam a disponibilização de uma plataforma única a todos os envolvidos internos e externos, aumentando a harmonia e garantindo a verdadeira automação do processo (DE ALMEIDA, 2018).

A Integração de Sistemas Vertical se trata de um modelo de conexões entre os

equipamentos de uma indústria que utiliza de uma hierarquia em que as informações vêm desde as máquinas mais básicas da empresa até os departamentos de gestão. Esse método permite a eliminação de contradições dentro do sistema (RIGOTTI, 2020).

A Integração Horizontal utiliza de vários sistemas, cada um com uma função específica que compartilham informações entre si. Permitindo que as informações fluam rapidamente entre departamentos (RIGOTTI, 2020).

3.3.6 - Internet das Coisas

A IOT (*Internet of Things*) representa a conexão entre diversos equipamentos e maquinários que previamente não estavam ligados. É um dos alicerces do crescimento digital e espera-se que o número de dispositivos conectados aumente, permitindo a comunicação e interação entre os dispositivos no campo (DE ALMEIDA, 2018).

A Internet das Coisas primeiramente surgiu como um sistema focado em auxiliar o cotidiano das pessoas, porém seu grande potencial levou este conceito a ser aplicado nas indústrias, levando a criação do IIOT (*Industrial Internet of Things*) (JÚNIOR, 2019).

Essa inovação alterou completamente o gerenciamento das cadeias de produção. Por meio de monitoramento se tornou possível otimizar as atividades envolvidas em cada etapa deste processo de forma granular (SCHWAB, 2016).

Fábrica Inteligente é um conceito vinculado a IIOT que se refere ao uso desta para uma maior autonomia das indústrias. Essa autonomia é obtida por meio da aplicação de uma inteligência descentralizada que, ao ajudar a criar novas redes de dispositivos inteligentes, permite o gerenciamento independente de processos, com a interação dos mundos virtual e real (JÚNIOR, 2019).

Como resultado, esta é uma das mais importantes tecnologias para a Indústria 4.0. A Internet Industrial das Coisas também permite, pelo uso de sensores, a monitoração do estado do equipamento e da indústria em tempo real. Essas informações são enviadas ao Big Data para um processamento ainda mais rápido (RIGOTTI, 2020).

Como afirmado acima monitoramento remoto é uma das possíveis utilizações desta tecnologia. Qualquer pacote, palete ou contêiner agora pode receber um sensor ou transmissor, permitindo assim o seu monitoramento. Os pacotes podem ser rastreados para permitir ao cliente acompanhar de maneira continua onde estão e como é o movimento desses produtos por toda a cadeia de fornecimento. Para empresas cuja área de atuação envolve operações com longas e complexas cadeias de fornecimento, um sistema como esse é transformador (SCHWAB, 2016).

A possibilidade de acompanhar a produção em tempo real proporciona uma maior

assertividade na tomada de decisões, permitindo ao processo atender as necessidades específicas do cliente. Para o acompanhamento ideal do processo é necessário o conhecimento sobre cada uma das etapas envolvidas neste, pois o processo pode apresentar grandes diferenças dependendo do produto em questão (DE ALMEIDA, 2018).

3.3.7 - Computação em Nuvem

Associado ao grande volume de dados (*Big Data*) gerados pela integração de sistemas característico da Indústria 4.0, a computação em nuvem, também chamada de “*Cloud Computing*”, veio para facilitar todo o processamento dessas informações e para as disponibilizar em qualquer ambiente. Esta tecnologia muitas vezes vem associada a tecnologias de virtualização (JÚNIOR, 2019).

Com essa tecnologia se elimina a necessidade de servidores físicos. Contribuindo para uma maior proteção e um maior custo-benefício. Também há um aumento na velocidade e facilidade no acesso destas informações (RIGOTTI, 2020).

Cada vez mais as ferramentas necessárias para o processo de fabricação de bens requerem o uso e transferência de dados e aplicativos que se encontram em diferentes locais. A computação em nuvem representa uma solução a esse impasse, pois ao armazenar dados na nuvem é possível acessá-los simultaneamente em diferentes locais e por meio de sistemas fora do limite da indústria. Resultando assim em uma grande redução no custo e tempo necessário juntamente com um aumento na eficiência (DE ALMEIDA, 2018).

3.3.8 - Manufatura Aditiva

Popularmente conhecida como impressão em 3D, esta tecnologia apresenta uma ampla gama de aplicações. Ao contrário do comum para a produção em massa de itens, produtos resultantes da fabricação aditiva apresentam fácil personalização (SCHWAB, 2016).

Este método de produção permite a fabricação de objetos pela adição progressiva de material, ao contrário do método de remoção de matéria prima usada na manufatura subtrativa. É uma tecnologia muito prática, vez que permite a produção de uma alta variedade de objetos e equipamentos com alta qualidade e precisão (RIGOTTI, 2020).

Normalmente a manufatura aditiva, representada pela FIG.14, é obtida por um processo em que cartuchos com plástico em fios são aquecidos pelo cabeço de uma máquina de impressão e então gradativamente depositados em camadas, seguindo as dimensões especificadas anteriormente e formando o objeto desejado. Apresenta grandes vantagens, vez que a partir da programação e referenciamento dos cabeçotes da impressora

é possível obter um produto customizado e com dimensões extremamente precisas. Essa tecnologia também possibilita a fabricação de protótipos, reduzindo assim os custos nos processos envolvendo a produção de moldes de plástico (DE ALMEIDA, 2018).

A manufatura usada antes das impressoras 3D e da chegada desse novo tipo de manufatura era a manufatura denominada subtrativa. Neste tipo de tecnologia, apresentado pela FIG. 15, o modelo final é obtido através de remoção de material a partir de um bloco. A produção de peças através das tecnologias subtrativas costuma ser mais barata do que nas aditivas, que costuma ter o custo dos insumos, assim como de hora/máquina, maiores. Entretanto, com o desenvolvimento das tecnologias aditivas isso pode mudar. Como a manufatura subtrativa é mais antiga, os métodos ideais para sua aplicação são mais conhecidos e já foram otimizados (NISHIMURA, et. al, 2016).

Ambos os processos apresentam desvantagens específicas. A manufatura subtrativa é altamente limitada quanto à fabricação de geometrias prismáticas ou rotacionais, enquanto a manufatura aditiva habilita a fabricação de peças com geometrias complexas, ainda multimatérias e multicoloridas, tirando qualquer barreira para a liberdade do design. No entanto, os processos aditivos possuem uma grande desvantagem associada à baixa precisão dimensional e pobre qualidade superficial inerente da natureza do processo de sobreposição de camadas de material, problema não presente na manufatura subtrativa (POSADA; RODRIGUEZ; ALVARES, 2019).

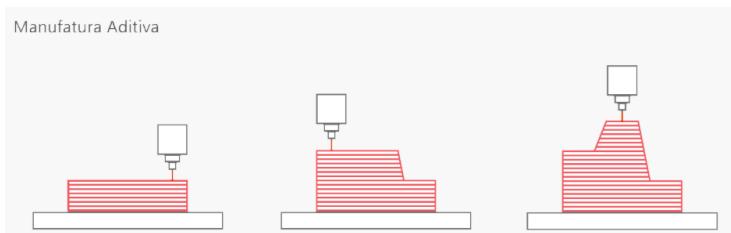


Figura 14 - Esquema do processo de manufatura aditiv. Fonte: (ODONTOLOGIA DIGITAL, 2020)⁴.

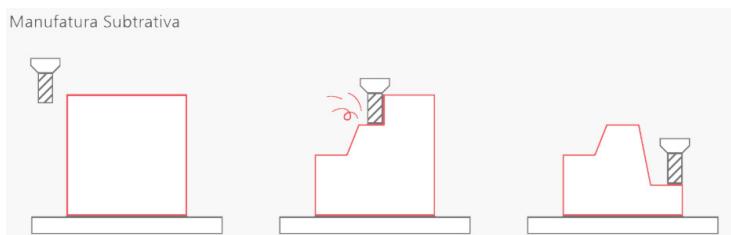


Figura 15 - Esquema do processo de manufatura subtrativa. Fonte: (ODONTOLOGIA DIGITAL, 2020)⁵.

4 Disponível em: <https://be-in.digital/impressao-3d-ou-fresagem-manufatura-aditiva-ou-manufatura-subtrativa/>. Acesso em Agosto de 2021.

5 Disponível em: <https://be-in.digital/impressao-3d-ou-fresagem-manufatura-aditiva-ou-manufatura-subtrativa/>. Acesso

Uma tendência tecnológica de fabricação ainda mais nova é a manufatura híbrida. Esse processo permite produzir de maneira mais eficiente produtos com maior qualidade e altamente personalizados, aproveitando as vantagens de combinar processos de manufatura aditiva e subtrativa. A exemplo nos processos híbridos a capacidade dos processos subtrativos para fabricação de geometrias com alta qualidade superficial pode complementar a manufatura aditiva com sua alta capacidade de personalização. Este novo enfoque de manufatura tem atraído considerável atenção, acreditando-se que será a base para a nova geração de sistemas avançados de manufatura (POSADA; RODRIGUEZ; ALVARES, 2019).

3.3.9 - Realidade Aumentada e Realidade Virtual

Realidade Aumentada, também conhecida como Realidade Ampliada ou “*Augmented Reality*” (AR), conecta o mundo real ao virtual, o que permite observar objetos virtuais sendo superpostos ou compostos ao mundo real. As 3 principais características dessa tecnologia é a combinação do real com o virtual, essa interação ocorrendo em tempo real e esse processo ocorrer em 3 dimensões (SACOMANO *et. al.*, 2018).

Realidade Aumentada é uma tecnologia que, por meio do uso de softwares especializados em simulação, permite maior facilidade em treinar funcionários a utilizar um novo equipamento de uma forma segura e outros desafios semelhantes (RIGOTTI, 2020).

Apesar de ser um dos pilares da Indústria 4.0 que recebe menos atenção, essa tecnologia oferece uma ampla variedade de aplicações e serviços em diferentes áreas. Ao ser aplicada no ambiente industrial possibilita feitos como transmissão de dados contendo instruções de montagem desde o uso de óculos de Realidade Aumentada para auxiliar a utilização de certo maquinário, como pode ser observado na FIG. 16 (DE ALMEIDA, 2018).



Figura 16 - O uso de realidade aumentada para auxílio na manutenção do equipamento. Fonte: Shutterstock⁶.

em Agosto de 2021.

6 Disponível em: <https://cio.com.br/noticias/realidade-aumentada-colaborativa-auxilia-fabricacao-de-ventiladores-respi>

Paralelamente existe o conceito de Realidade Virtual, também chamada de “Virtual Reality” (VR). É importante diferenciar esse conceito com o de Realidade Aumentada. Enquanto na Realidade Aumentada os elementos virtuais servem para complementar o ambiente real, na Realidade Virtual há a criação de um espaço inteiramente virtual que substitui o ambiente real (SACOMANO *et. al*, 2018).

A Realidade Virtual utiliza de equipamentos como computadores, fones de ouvido, óculos, luvas sensíveis ao movimento e outros, para transmitir sensações de uma realidade que não condiz com a presente, a Realidade Virtual (SACOMANO *et. al*, 2018).

Os usos dessas tecnologias também são variados, desde a simulação de carros para que potenciais clientes possam testá-los até simuladores de voo para o treinamento de pilotos de aviação, tudo isso são possibilidades oferecidas pela aplicação dessa tecnologia no mercado. Pode-se ver um exemplo dessa tecnologia na FIG. 17 que mostra um laboratório da Volkswagen, uma empresa especializada na fabricação de carros, que utiliza de Realidade Virtual para testar seus produtos (SACOMANO *et. al*, 2018).



Figura 17 - Laboratório de Protótipo Virtual da Volkswagen. Fonte: (MOTOR MAIS, 2019)⁷.

3.4 – IMPACTOS NA SOCIEDADE E ECONOMIA

A Quarta Revolução Industrial é um período de grandes desenvolvimentos, mas também apresenta grande perigo. Juntamente com seus grandes benefícios, existem grandes desafios que necessitam ser enfrentados. Em destaque temos o aumento da desigualdade social e econômica e a preocupação crescente com as injustiças resultantes (SCHWAB, 2016)

ratorios/. Acesso em Setembro de 2021.

⁷ Disponível em: <http://motormais.com/volkswagen-inaugura-laboratorio-de-prototipo-virtual/> Acesso em Setembro de 2021.

A desindustrialização é um fenômeno que se refere tanto à redução da produção quanto à substituição do trabalhador por meio da automação das indústrias. Tal substituição que tudo indica ocorrerá em grande escala nos próximos anos com o progresso da revolução 4.0 (SACOMANO *et. al.*, 2018).

Os grandes beneficiários deste processo são os provedores de capital intelectual ou físico. Inovadores, investidores e acionistas estão dentro do grupo de profissões beneficiadas. E como existe um grupo de beneficiados também existe um grupo de prejudicados. Profissões que dependem de sua própria mão de obra sofreram de uma grande perda de valor, vez que terão que concorrer com novas tecnologias que realizam sua função, contribuindo para a criação de um grande fosso entre a riqueza desses dois grupos (SCHWAB, 2016).

Estudos indicam que entre 70 e 80 por cento dos trabalhadores atuais desaparecerão nos próximos 20 anos. A utilização de sistemas que aumentam a autonomia das fábricas torna os números de trabalhadores atuais extravagantes (SACOMANO *et. al.*, 2018).

Os resultados desse processo já são visíveis. Há um aumento de desilusão e pessimismo entre os trabalhadores. Muitos temem ser incapazes de acumular riquezas ou aumentar sua renda durante sua vida e que a próxima geração não terá uma vida melhor que eles (SCHWAB, 2016).

Por outro lado, outras profissões estão surgindo. Entre essas novas oportunidades profissionais podemos citar: *hacker* genético, especialista em gestão de resíduos, consultor de genoma, polícia virtual, consultor de aprimoramento virtual. Esses são só alguns exemplos de novas tendências que estão surgindo pelas mudanças no mercado (SACOMANO *et. al.*, 2018).

Também é necessário levar em consideração o “efeito plataforma⁸” que pode resultar no monopólio do mercado por um pequeno grupo de corporações. Tal monopólio contribuirá para a concentração de capital e poder nas mãos de uma pequena elite (SCHWAB, 2016).

Outra tendência resultante dessa revolução é a produção local de produtos. No mundo atual, peças são produzidas em todos os cantos do mundo para no final do processo serem unidas e enviadas ao cliente. A Indústria 4.0 pode reverter essa estratégia. A manufatura aditiva tornou muito mais fácil produzir produtos customizados rapidamente. Atualmente vários estabelecimentos já produzem os produtos que necessitam por meio de impressoras 3D, sem necessitarem participar da complexa rede de relações comerciais envolvida na produção da maior parte dos produtos modernos (SACOMANO *et. al.*, 2018).

8 Efeito plataforma é definido como o efeito no qual grandes organizações criam redes digitais com o objetivo de emparelhar clientes e outras empresas de uma diversa gama de produtos para aumentar de forma escalar seu rendimento (SCHWAB, 2016).

O desenvolvimento de uma quantidade significativa de empresas digitais são um outro impacto previsto dessa revolução. Empresa digital é um conceito novo que indica a total utilização dos sistemas de informação para a realização de negócios. Empresas digitais realizam quase todos as suas transações e outras operações, sejam estas com o cliente, parceiros ou operários, por meios digitais (SACOMANO *et. al*, 2018).

Os impactos sociais e políticos são inevitáveis. Contudo, com um correto planejamento e controle do ambiente político e econômico, é possível transformar a situação em uma oportunidade para o crescimento e desenvolvimento tecnológico e industrial (SCHWAB, 2016).

METROLOGIA NO CONTEXTO DA INDÚSTRIA 4.0

Com a vinda da Quarta Revolução Industrial, grandes mudanças ocorreram no ambiente industrial. Consequentemente, várias áreas associadas ao desenvolvimento industrial tiveram que se adaptar e encontrar o seu lugar dentro dessa nova ordem mundial.

Nesta seção será abordado como a metrologia se encaixa dentro da Indústria 4.0 e seu novo sistema. Entre os tópicos relevantes a esse assunto têm-se a função desempenhada pela metrologia nessa nova indústria, as novas técnicas e tecnologias da indústria 4.0 que utilizam da metrologia e os desafios enfrentados por essa disciplina em se adaptar a essa nova realidade.

Há de se destacar o uso do termo “Metrologia 4.0”. Apesar de ser popularmente utilizada em vários artigos como (BENITEZ; RAMIREZ; VAZQUEZ, 2019) e (ANDONOV; CUNDEVA-BLAJER, 2018), não se encontrou uma definição desse termo que possa validar seu uso. Por isso esse não está presente neste relatório.

4.1 – FUNÇÃO DA METROLOGIA NA INDÚSTRIA 4.0

Ao analisar a função da metrologia na Quarta Revolução Industrial é necessário ponderar se a Indústria 4.0 é um resultado de desenvolvimentos na metrologia, ou se esses desenvolvimentos são resultado do surgimento da Indústria 4.0 (LANGNAU, 2021).

Os sistemas metrológicos atuais mais avançados são baseados na segurança de qualidade ou “Quality Assurance” (QA). Dados de QA controlam a produção, o limite mínimo desta e a reproduzibilidade necessária para a produção em cadeia. Como resultado cabe a esse a função de facilitar a eficiência e os benefícios dos processos de produção (LANGNAU, 2021).

Sendo assim, é possível afirmar que o QA direciona e controla o crescimento da Indústria 4.0. O crescimento de sistemas não invasivos e outros processos de inspeção baseados em imagens e visão reforçam este argumento por causa da sua importância para a Indústria 4.0 (LANGNAU, 2021).

Essa é uma mudança enorme se comparada com a revolução anterior, quando a QA ainda era considerada um processo que não adicionava diretamente valor à produção e era somente responsável por detectar falhas e defeitos. Porém no novo mundo industrial proveniente da quarta revolução a segurança de qualidade é responsável por produzir um grande volume de dados, cuja informações contidas nestes são fundamentais para fábricas inteligentes, pois sua produção é feita com base nos dados produzidos (LANGNAU, 2021).

Desenvolvimento metrológico será o principal responsável por suportar a evolução

e conexão das fábricas. Esse desenvolvimento também será responsável por reduzir intervalos e acelerar o ritmo de produção ao mesmo tempo que produz produtos de melhor qualidade e design. Sendo assim é fundamental a melhora no processo de inspeção e utilizar dos instrumentos de medição mais inteligentes e acessíveis que estão surgindo (ELEY METROLOGY, [s.d.]).

Tendências nas aplicações industriais foram analisadas e mecanismos de alta precisão foram estudados para estabelecer uma rede de relações entre diferentes disciplinas tradicionais. Isso se deve a necessidade de cooperação entre diferentes áreas e posições na linha de manufatura para enfrentar os desafios da metrologia ao se adaptar a Indústria 4.0. As indústrias sempre precisam estar em dia com as inovações tecnológicas, as manufaturas da próxima geração têm laços fortes com os desenvolvedores de tecnologias para gerar soluções que contribuam para uma melhor integração de tendências como automação, IT e metrologia ao ambiente de manufatura (DURAKBASA; BAUER; POSZVEK, 2017).

Por meio do uso de inteligências artificiais e de IT é possível tornar realidade designs e manufatura voltados ao consumidor e que mantenham custo efetivos, por meio de levar em consideração a importância e papel de “*Interated Management Systems*” (IMS) e da metrologia sofisticada. Esse novo conceito pode ser realizado por meio de tecnologias de produção inteligentes e sistemas integrados juntamente com o uso extensivo de IT, AI, simulações, robôs e diversas outras tecnologias características do modelo da Indústria 4.0. Ainda mais, ao utilizar análises avançadas de informações, maquinário conectado a redes e instrumentos mais eficientes se torna possível um sistema de produção ágil e otimizado em qualquer tipo ou modelo de indústrias e especialmente em SMEs (*Small and medium-sized enterprises*) atualizados e voltados a indústria 4.0 (DURAKBASA; BAUER; POSZVEK, 2017).

Um novo modelo que foi desenvolvido para futuras companhias que presem ficar em dia com as novas tecnologias presentes na indústria 4.0 é o chamado "*Multi-Functions Integrated Factory - MFIF*". Essa rede inteligente de maquinário e instrumentos conectada a outros sistemas de informação irá permitir a internacionalização da pesquisa e do desenvolvimento de tecnologias. Esses novos sistemas devem incluir o conceito de – *Jidoka* – ou autonomação. O termo autonomação tem como ideia central é a separação entre homem e máquina, por meio da autonomia do ambiente industrial. Esse conceito permite a continua aumento na eficiência e produção mesmo em um mercado global competitivo. Com o desenvolvimento de sensores e outras tecnologias metrológicas, o conceito de autonomação será ainda mais aprimorado, levando a 100 % de utilização dos recursos, não sendo necessário o descarte de nenhuma peça produzida por serem impróprias. Como resultado, a autonomação marca uma revolução importante tanto para a metrologia quanto

para as indústrias em si (DURAKBASA; BAUER; POSZVEK, 2017).

4.2 – METROLOGIA NAS TECNOLOGIAS DA QUARTA REVOLUÇÃO

A quarta revolução industrial foi responsável pelo surgimento de diversas novas tecnologias e técnicas que podem ser aplicadas no ambiente industrial. Entre essas inovações várias delas se relacionam a área da metrologia. Nesta seção abordaremos algumas dessas novas técnicas e sua relação com a metrologia.

4.2.1 - Inline Metrology

“*Inline Metrology*” é uma técnica metrológica que apresenta várias vantagens sobre os métodos convencionais utilizados em operações de manufatura. Em vez de tratar as inspeções como uma atividade separada, esse método consiste na realização das medições como parte do processo, o que evita atrasos causados pela necessidade de passar o produto final por um departamento especializado (ELEY METROLOGY, [s.d.]).

Algumas vantagens desse processo são: maior velocidade como resultado da diminuição de etapas, redução da necessidade de refazer ou descartar produtos como resultado de uma detecção e correção mais eficiente de defeitos e uma prevenção mais efetiva de falhas, evitando que elas ocorreram (ELEY METROLOGY, [s.d.]).

A “*Inline Metrology*”, presente na FIG. 18, também chamada de metrologia em linha, demonstra perfeitamente a função produtiva da metrologia. A filosofia dessa técnica se baseia na coleta de dados durante o ciclo de trabalho para tornar possível um imediato aumento de controle dos processos, assegurando-se de sua qualidade. A sua aplicação nas indústrias comprova que as contribuições da metrologia em processos produtivos têm que ser levadas em consideração independente de tecnologias voltadas a manufatura (SCHMITT; MOENNING, 2006).



Figura 18 - Linha de fabricação utilizando de sistemas de metrologia em linha. Fonte: (METROLOGY NEWS, 2018).

Ao adaptar a metrologia para seu uso nas linhas de produção, algumas mudanças são necessárias. Um exemplo é a necessidade de diferentes precauções para evitar as influências do ambiente externo. Essas precauções podem ser desde mecanismos de amortecimento para reduzir vibrações até mudanças na estrutura para melhor proteção dos mecanismos internos do maquinário. Outro ponto a se considerar é a necessidade das medições ocorrem em tempo real e em sincronia ao processo de produção, para tal feitos serem possíveis é necessário um alto nível de automação e um sistema flexível que processe todos esses dados (SCHMITT; MOENNING, 2006).

4.2.2 – Non-contact Metrology

“Optical and Laser Systems” são exemplos de tecnologias dentro da área da metrologia não invasiva, sendo essa crucial para fábricas inteligentes. Esse tipo de metrologia permite uma análise de alta resolução de peças, tanto como a manobra de instrumentos de medição a longa distâncias. Por outro lado, esse tipo de metrologia também apresenta algumas limitações, necessitando de posicionamento preciso para medir alguns detalhes. Existem planos para aumentar a eficácia dessa tecnologia em manter altos níveis de precisão a longas distâncias (ELEY METROLOGY, [s.d.]).

Softwares especializados no reconhecimento de imagens são uma das possíveis tecnologias aplicadas para realizar medições baseadas em imagens, sendo classificado como um tipo de “Optical System”. A medição por meio de imagens pode ser aplicada em diversos setores da indústria, desde permitir a autocalibração de equipamentos até o controle e monitoração da automação nas indústrias, consolidando as tecnologias da nova revolução em todos seus processos (TACCOLA; SAITA, 2021).

MVS (Machine Vision Systems) é outro exemplo de tecnologia que utiliza da captura de imagens para recolher dados metrológicos necessários. Um esquema representando seu funcionamento pode ser visto na FIG. 19. Como resultado de novas tecnologias permitindo a esse processo uma precisão ainda maior e medições mais exatas, MVS se tornou uma tecnologia em manufatura e indústria, sendo aplicado em tarefas desde a montagem e verificação de equipamento até a criação de modelos 3-D (ALONSO et al, 2019).

Sistemas que utilizam em MVS constituem uma porcentagem tão importante da Indústria 4.0, pois permite uma melhor comunicação entre câmeras e outros sensores que se baseiam na visão, permitindo assim comunicação entre equipamento. Os vastos volumes de dados também podem ser inseridos no Big Data para facilitar o controle da indústria (ALONSO et al, 2019).

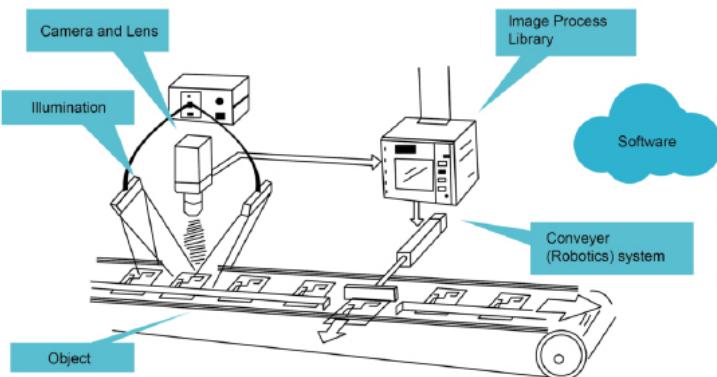


Figura 19 - Esquema do funcionamento da tecnologia MV em uma linha de produção. Fonte: (INNOMILES INTERNATIONAL, [s.d.]).

4.2.3 – Robôs especializados em inspeção

Apesar da introdução de robôs no ambiente industrial não tivesse esse objetivo, é possível adaptar robôs para realizarem inspeções em equipamentos e peças, como pode ser visto na FIG. 20. Robôs são limitados a medirem próximo ou acima de 100 micrometros, abaixo disso as limitações na precisão dos robôs prevalecem sobre sua flexibilidade e velocidade, sendo mais apropriado o uso de um instrumento de medição dedicado a este objetivo (ELEY METROLOGY, [s.d.]).

Os robôs apresentados na FIG. 20 foram projetados como parte de uma competição envolvendo diversos times de várias partes do mundo. O desafio tinha como o objetivo a criação de um modelo funcional de robô que utilize da flexibilidade mencionada, juntamente com uma inteligência artificial que proporcione uma maior autonomia, permitindo que essas máquinas reajam em situações urgentes sem necessidade de ajuda humana. A robótica contribui significativamente para a segurança nas indústrias, justamente por causa de projetos como esse, como robôs podem facilmente entrar em áreas inacessíveis a seres humanos eles realizam serviços necessários nessas áreas sem riscos a vida humanas. Com tudo isso em mente, veio a equipes participantes montaram seus robôs, sendo o vencedor o ARGONAUTS, desenvolvido por uma parceria entre cientistas alemães e austríacos (ARGOS, 2017).

Quando comparado a técnicas anteriores de inspeções, como as inspeções de qualidade manual, a combinação de inspeções não destrutivas com o uso de robôs apresenta diversos benefícios. Entre eles, o aumento na precisão, exatidão e velocidade em que a inspeção é realizada diminuem por uma quantidade substancial. Também

é importante notar que há uma grande redução em custos associado a substituição de funcionários especializados nestes processos por robôs com a mesma função. Porém, é importante levar em consideração que até mesmos robôs estão propensos a falhas e erros. Sendo muitas vezes necessário calibrar os robôs que efetuam as inspeções (MOROZOV, 2016).



Figura 20 - Exemplos de robôs sendo desenvolvidos para a inspeção de uma indústria petrolífera.
Fonte: (HAPPICH, 2018).

4.2.4 – Calibração por amostragem (Sensores)

O processo automatizado de calibração por meio de sensores de medição utilizado em indústrias inteligentes é uma das características marcantes da Indústria 4.0. Essas novas técnicas de calibração usam da Internet e a rede mundial para fornecer de maneira mais eficiente o serviço. Com as informações coletadas pelos sensores, sendo enviados diretamente a base de dados, como é característico da metrologia na Industria 4.0 (BENITEZ; RAMIREZ; VAZQUEZ, 2019).

A calibração por meio de sensores geralmente vem acompanhada do uso de CPS (*Cyber-Physical Systems*). Esses minicomputadores são responsáveis por processar a informação recolhida pelos sensores e, por meio dessa informação, realizam a medição do estado atual do equipamento e processos. Essa informação é então enviada para a rede digital que conecta a indústria. Por meio da integração dos *softwares* e *hardwares* nas indústrias inteligentes é possível utilizar desses dados recolhidos pelos sensores para otimizar ou calibrar de forma automática os processos e equipamentos em tempo real (ANDONOV; CUNDEVA-BLAJER, 2018).

4.2.5 - Autocalibração

A constante necessidade de calibração e medição está sempre presente no ambiente industrial. Especialmente o crescimento de características como a agilidade, produtividade

e eficiência dos processos são constantemente monitorados. Essa necessidade incentiva a inovação e a melhora das atividades e tecnologias utilizadas para realizar a calibração. Como resultado, a automação da calibração tem um papel extremamente importante na Indústria 4.0, pois permite a obtenção de resultados mais precisos com uma menor variabilidade em um menor tempo. Ao automatizar a calibração os operários não precisam estar constantemente prestando absoluta atenção a esse processo, permitindo a eles realizar outras atividades e aumentar a velocidade do processo de produção (TACCOLA; SAITA, 2021).

Ao aplicar no processo de calibração softwares especializados, é possível aumentar o número de calibrações sendo realizadas sem ser necessário um aumento na carga de trabalho dos operários. Esses softwares voltados a automação também permitem a redução nos erros de transcrição, uma melhora nas condições de trabalho e a possibilidade de calibrações simultâneas e remotas (TACCOLA; SAITA, 2021).

Outras tecnologias que permitam a autocalibração muitas vezes se baseiam no sistema internacional e estão ganhando proeminência com a mudança do Sistema Internacional, pois esta facilitou incrivelmente o processo. A contribuição da mudança no S.I. para a indústria 4.0 e a metrologia em particular serão discutidas mais a fundo em uma próxima seção juntamente com as tecnologias que exemplificam este benefício.

4.2.6 – Metrologia na manufatura aditiva

A captura, análise e alteração de dados se tornou um instrumento fundamental para a manufatura na Indústria 4.0. Isso se deve ao uso da manufatura aditiva como um aspecto fundamental da manufatura nessa revolução. Como resultado a metrologia, particularmente o ramo responsável por simulações em 3D, se torna essencial para esse processo, mais importante do que sua função em identificar falhas e defeitos na produção como na revolução anterior (LANGNAU, 2021).

Além das simulações 3D, alguns outros ramos da metrologia também apresentam vital importância para a metrologia na manufatura aditiva. Entre esses ramos se encontra a “Form Metrology”, também chamada da metrologia da forma, um ramo que se baseia na medição e identificação de formatos. Controle da geometria da peça é extremamente importante na manufatura aditiva por causa da dependência de alguns materiais de deformarem logo após o processo. Consequentemente, técnicas metrológicas voltadas a esse propósito são essenciais durante e após os processos. As técnicas aplicadas durante o processo não podem requerer contato para não atrapalhar a formação da peça (LEACH, 2016).

Várias técnicas metrológicas são aplicadas em conjunto a manufatura aditiva para

garantir a qualidade do produto e a eficiência do processo. Entre eles pode-se destacar o uso de “*Optical Techniques*” que são baseadas nos “*Optical Systems*” discutido previamente. Ao utilizar essas técnicas que se baseiam na análise de imagens, o monitoramento desses processos se torna muito mais simples, principalmente ao se considerar o uso dessas técnicas para a construção de módulos 3D que são muitas vezes essenciais para o projeto da peça na construção aditiva. Outras técnicas também são utilizadas, desde o uso de laser ultrassônicos para medições até espectroscopia acústica existem várias alternativas que podem auxiliar na manufatura aditiva, sendo as técnicas baseadas em imagens mais utilizadas por causa de sua simplicidade e eficiência (KOESTER *et al*, 2016).

A manufatura aditiva é uma ferramenta efetiva para otimizar o processo de envolvimento de produtos. Como resultado, para reduzir o tempo entre o desenvolvimento e a entrada do produto no mercado, melhorar a qualidade do produto e reduzir o preço, empresas vieram a se apoiar na manufatura aditiva como a ferramenta principal para rápida produção e desenvolvimento. Porém essa tática apresenta certos problemas, entre eles a dificuldade da produção de peças em escalas nano ou menor é uma das mais notáveis. Para suprir tal problema o uso da metrologia se provou indispensável em permitir testes que permitam comprovar a conformidade de peças e equipamentos em escalas minúsculas (DURAKBASA; BAUER; POSZVEK, 2017).

4.3 – DESAFIOS DA METROLOGIA NA INDÚSTRIA 4.0

Com a expansão da responsabilidade dessa área, resultante do aumento da importância desta no processo de produção, pode acontecer falhas como resultado desse crescimento exagerado. Uma dessas falhas comuns é o problema relacionado à confiabilidade das medições fornecidas. O fluxo de informação se torna tão grande que controlar e conhecer a origem de cada dado se tornou extremamente complicado (TAYMANOV; SAPOZHNIKOVA, 2018).

Inteligência é uma característica essencial para os futuros sistemas de produção e desenvolvimento e a produção inteligente é um dos maiores componentes no futuro desta área. A crescente demanda por produtos com menores ciclos de produção e inovação está presente nesta nova geração de sistemas manufatureiros, resultando em uma redução do ciclo de vida e diversidade no número de variantes do mesmo produto (DURAKBASA; BAUER; POSZVEK, 2017).

Esse desafio se torna de crucial importância levando em consideração a ocorrência de invasões e alterações maliciosas de informações por parte de hackers em até mesmo sistemas fechados. Outro potencial problema do fluxo desse enorme volume de informações é a probabilidade de atrasos na transmissão desses dados, falhas no controle das

informações referentes a medidas e controle dessas fábricas pode resultar em catástrofes. Apesar do crescimento de meios de proteger e garantir a segurança dessa informação, esse crescimento não é suficiente para acompanhar o expoente aumento no volume de dados (TAYMANOV; SAPOZHNIKOVA, 2018).

Para atingir acabamentos de superfície e tolerâncias no nível de nanômetros é necessário incorporar instrumentação e metrologia sofisticada no design. Medir corretamente a corrosão, degaste e fricção demanda a criação de escalas nanométricas que necessitam de extrema precisão, que somente pode ser obtida com laser, raios de elétrons e outras novas tecnologias de manufatura e medição. Todas essas demandas apresentam mais um desafio para a metrologia: como manufaturar superfícies de forma eficiente, econômica e não-poluente enquanto aprimora a funcionalidade e precisão do processo? (DURAKBASA; BAUER; POSZVEK, 2017).

Há um crescente aumento na demanda por peças e outros equipamentos com detalhes em níveis nanométricos ou menores. Essa tendência apresenta um desafio para as indústrias que resulta na estratégia de medição para determinar parâmetros como o tempo, custo e garantia da estabilidade do processo entrar em foco (DURAKBASA; BAUER; POSZVEK, 2017).

A produção tem que apresentar uma vasta quantidade de requerimentos vindos de diversas fontes. Produtos com ciclos de vidas curtos e uma rápida mudança nas características dos produtos sendo produzidos exigem que a manufatura e seus mecanismos se tornem mais flexíveis. Ao mesmo tempo há uma constante exigência por produtos de qualidade cada vez melhores. Para atender essas demandas houve a criação de uma enorme pressão sobre o campo da metrologia. Somente ao conhecer todos os parâmetros envolvidos no processo de produção se torna possível aumentar sua eficiência (SCHMITT; MOENNING, 2006).

Existe também uma dificuldade no desenvolvimento e aplicação de um sistema automático de obtenção de dados. Essa dificuldade é resultado da grande variedade de instrumentos de medição disponíveis no mercado, porém a maioria desses instrumentos não apresentam uma interface que permita a comunicação automática das leituras destes equipamentos (TACCOLA; SAITA, 2021).

A Indústria 4.0 se baseia na conectividade, tanto técnica e organizacional, para funcionar. Sendo assim, fica claro que as organizações necessitam trabalhar juntas, o que requere melhor fluxo de informação e mais visibilidade, ambos fatores relacionados a interoperabilidade das empresas. Um desafio que as indústrias estão enfrentando é a necessidade de superar barreiras físicas e os vácuos na informação metrológica em cada

etapa da cadeia de produção para que se torne possível suportar uma produção autônoma e digital (ELEY METROLOGY, [s.d.]).

Para atender as demandas do mercado no ambiente industrial globalizado que vem se formando nas últimas décadas, as empresas manufatoras de todos os tipos necessitam ser ágeis e flexíveis o bastante para responder a mudanças constantes nos requerimentos dos produtos (DURAKBASA; BAUER; POSZVEK, 2017).

Inovações tecnológicas vêm focando no desenvolvimento de micro-, femto-, pico e nanotecnologias por meio da junção de diferentes disciplinas. Esse fenômeno é o resultado da busca por soluções aos “*Grand Challenges*” (Grandes Desafios) estabelecidos pela Comissão Europeia, entre esses desafios se encontra a dificuldade em melhorar a qualidade de bens de consumo de modo a contribuir para uma melhora no padrão de vida, que foi um dos tópicos que a estratégia Europa 2020 desejava abordar (DURAKBASA; BAUER; POSZVEK, 2017).

Existe uma necessidade de companhias de manufatura para fundamentalmente mudar ou desenvolver sua abordagem em relação ao design para garantir que o produto final atenda às necessidades de sua aplicação. Isso significa que existe uma despesa considerável relacionada ao teste dos parâmetros necessários para garantir que o design e o produto resultante, também levando em consideração fatores como os materiais selecionados, atenda as condições necessárias (DURAKBASA; BAUER; POSZVEK, 2017).

Variáveis complexas e problemas de controle dinâmicos do processo de produção são exemplos de empecilhos que necessitam ser levados em consideração para a autonomização da garantia de qualidade. Logo, o sistema de design e outros processos de manufatura devem ser considerados como um todo ao implementar processos que se otimizam automaticamente. Sendo este um impasse para a metrologia na Indústria 4.0 por causa do papel importante que sistemas de garantia de qualidade com funções inteligentes, interativas, autônomas e que se otimizem e organizem de forma rápida e automática, apresentam para a Indústria 4.0 (DURAKBASA; BAUER; POSZVEK, 2017).

O principal desafio é implementar criativamente os conceitos de autonomização justo as possibilidades de novos sensores que permitam que tecnologias metrológicas e processos de produção telepresentes integrados em direção a Indústria 4.0 não só em grande produção, mas também em SMEs (DURAKBASA; BAUER; POSZVEK, 2017).

IMPACTOS DAS ALTERAÇÕES DO S.I. NA INDÚSTRIA 4.0

Como visto nas seções anteriores, a mudança nas unidades básicas do Sistema Internacional resultou em diversas ramificações. Neste capítulo será abordado como esses impactos poderão afetar a indústria 4.0, dando especial destaque a área de metrologia.

5.1 – AUTOCALIBRAÇÃO

Como mencionado anteriormente, as alterações no S.I. apresentaram um grande impacto no campo da calibração dos equipamentos. A autocalibração já era um conceito existente nas indústrias, porém, ao utilizar constantes como base para as unidades, a autocalibração se tornou incrivelmente mais fácil. A relação da mudança do SI com o campo da autocalibração é tão grande que se torna difícil falar dessa área sem mencioná-la.

Dentro do campo da calibração se destacam alguns projetos inovadores, dentre eles, tem-se o “*Nist on a chip*” também chamado de NOAC. Este programa foi lançado pela NIST (National Institute of Standards and Technology) com o objetivo de criar tecnologias de medição com uma confiabilidade inigualável, que possam ser utilizadas a qualquer hora e lugar. O programa tem um foco especial na medição de unidades em escalas micro e nano (NIST, 2020).

Não é suficiente ter o equipamento mais moderno que realize uma função específica se este equipamento não está calibrado. Calibração constante com um padrão confiável é sempre necessário. Como resultado, muitos equipamentos têm que passar por um ciclo de calibrações regulares onde os equipamentos ficam indisponíveis durante um considerável período (NIST, 2020).

O NOAC planeja eliminar esse período não produtivo ao possibilitar acesso universal a instrumentos de medição portáteis que não requeiram calibração externa, pois se baseiam em constantes universais (NIST, 2020).

Entre as tecnologias sendo desenvolvidas pelo programa, tem-se ferramentas voltadas a calibração de unidades de tempo, frequência, distância, massa, força, corrente elétrica, entre outros. Todos eles, como resultado da alteração do SI, se baseando nos conceitos da física quântica e das constantes universais, permitindo uma grande confiabilidade e precisão (NIST, 2020).

Para permitir o acesso universal dessa tecnologia, a NOAC planeja produzir esses dispositivos por meio da tecnologia de fabricação já comumente utilizada para produzir circuitos e outros sistemas micro eletromecânicos. Os equipamentos resultantes seriam incorporados ao maquinário, permitindo a este se calibrar automaticamente quando necessário (NIST, 2020).

5.1.1 Áreas beneficiadas pelo NOAC

O projeto NOAC se provou como um grande interesse com aplicações em diversas áreas, como resultado a NIST estabeleceu parcerias com diversas indústrias. Essas indústrias estão sendo beneficiadas pelas novas tecnologias sendo desenvolvidas pelo projeto (NIST, 2020).

Entre as indústrias que o NIST planeja ajudar, se encontram 3 em especial que vem trabalhando com o projeto NOAC há tempo e por meio desses novos métodos de calibração, se abrem novas possibilidades. Essas 3 são, a Indústria Aeroespacial, a Indústria de Comunicações e as Biociências (NIST, 2020).

A indústria aeroespacial está se beneficiando dos sensores ultra precisos de pressão que se baseiam nas constantes universais sendo produzidos pela NOAC, tais sensores como os presentes na FIG. 21, permitem a medição da altitude da aviação entre outras funções importantes para a indústria. Esses sensores não precisam ser transportados para calibração periódica porque utilizam das constantes quânticas em suas medições. Outras vantagens a indústria da aviação que sensores da NOAC fornecem são: uma maior precisão nas medidas de altitude, fornecendo uma maior segurança, e os sensores térmicos fotônicos da NOAC das patentes (US 10,955,617) (US Patent 9,726,553) (US 10,782,421) (US 10,718,872 B2) (US 2020/0041431 A1) permitem detectar falhas em lugares que seriam inacessíveis aos outros sensores (NIST, 2020).

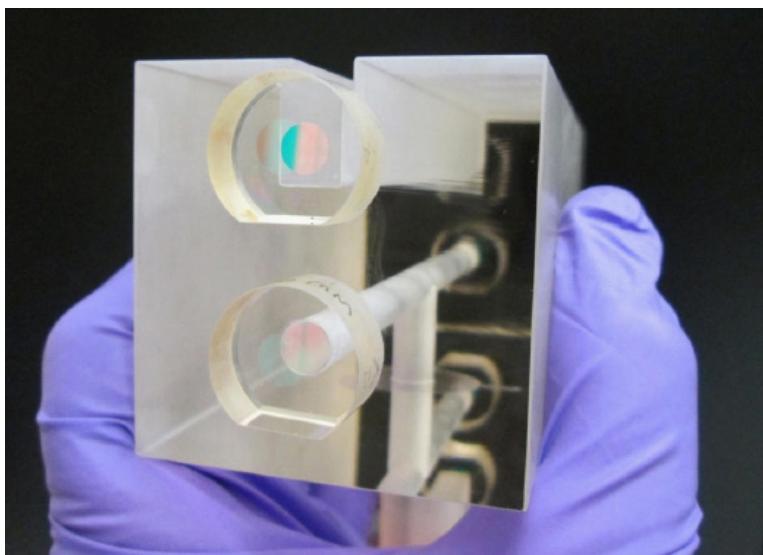


Figura 21 - Uma estrutura construída pela NIST que realiza medições de pressão. Fonte: (NIST, 2020).

Além de sensores de pressão, a indústria aeroespacial também está se beneficiando dos sensores de temperatura produzidos pela NIST. Ao medir a temperatura interna de motores e tanques de combustível se torna possível detectar sinais de problemas rapidamente. A solução está nos termômetros fotônicos sendo desenvolvidos pela NOAC, tais sensores usariam de raios de luz para realizar a medição da temperatura e se baseariam em princípios quânticos, não necessitando de calibração como resultado.

A área das comunicações também foi beneficiada por essa parceria. Com a vinda do 5G se tornou necessário novas tecnologias para analisar e controlar o fluxo dessas informações. Os sensores de frequência, voltagem e tempo da NOAC satisfez essa demanda, sendo possível quantificar os dados com precisão por meio dessa tecnologia (NIST, 2020).

Por fim, com as inovações atuais, se tornou necessário medir o fluxo de amostras minúsculas de fluido na área da biologia. Tal precisão necessitou a invenção de sensores ainda mais precisos pela NOAC. Porém não foram só os fluidos que necessitaram de novas tecnologias para sua medição, sensores para a medição da atividade dos neurônios e para a medição da radiação absorvida pelo corpo na terapia de câncer também foram desenvolvidos. Por causa da exatidão requerida desses sensores, muitos deles se apoiam nas constantes quânticas para poderem realizar suas funções (NIST, 2020).

5.1.2 NOAC para Tempo e Frequência

Para permitir a autocalibração de equipamentos que utilizam de unidades de tempo ou frequência, a NOAC investiu na miniaturização de relógios atômicos e outras tecnologias que realizam o segundo. Entre os mais utilizados tem-se relógios atômicos óticos, como demonstrado na FIG. 22, patente (US6806784B2), que utilizam de sinais luminosos de alta frequência, com os avanços de tecnologia se tornou possível reduzir esses relógios para o tamanho de chips e aumentar sua precisão (NIST, 2020).

Essa área foi um dos maiores sucessos da NOAC até hoje. A crescente necessidade por relógios digitais, entre outros fatores, tornou o CSAC (*Chip-Scale Atomic Clock*) um grande sucesso. A importância desse desenvolvimento foi tão grande, que vários museus já passaram a registrar a criação do primeiro CSAC. O seu sucesso também impulsionou o desenvolvimento de mais tecnologias semelhantes, não só dentro da NIST, mas mundialmente (NIST, 2020).



Figura 22 - Um CSAC juntamente com o físico John Kitching responsável por sua criação. Fonte: NIST¹.

5.1.3 NOAC para Campos Elétricos e Magnéticos

Para permitir a autocalibração de equipamentos que utilizam de unidades de campos elétricos e magnéticos, a NOAC investiu em sensores de baixo consumo que utilizem do Sistema Internacional para garantir resultados consistentes ao realizar as unidades envolvidas por meio de suas constantes (NIST, 2020).

O funcionamento de tais sensores se dá por meio do uso de vapores de átomos em pequenas celas. Os átomos confinados responderão aos campos presentes e sua resposta será medida por lasers (NIST, 2020).

5.1.4 NOAC para Termodinâmica

Para permitir a autocalibração de equipamentos que utilizam de unidades termodinâmicas, especialistas da NIST desenvolveram meios de medir temperatura, pressão e vácuo usando-se da luz. A temperatura é medida por meio da identificação das mudanças causadas pelo calor nas ondas da luz. A pressão é medida ao monitorar como diferentes densidades de gases afetam a refração da luz. O vácuo é medido pela perda de átomos confinados por meio da quantificação da quantidade de luz emitida pelos átomos restantes (NIST, 2020).

5.1.5 NOAC para Metrologia Dimensional

Para permitir a autocalibração de equipamentos que utilizam de unidades

¹ Disponível em: <https://www.nist.gov/noac/success-story-chip-scale-atomic-clock> Acesso em novembro de 2021

relacionadas à metrologia dimensional, está sendo desenvolvido dispositivos, como o apresentado na FIG. 23, que produzam medições derivadas diretamente do Sistema Internacional. A metodologia utilizada pelo dispositivo consiste no confinamento de vapor de átomos em uma cela de silício e vidro com aproximadamente 1 mm em cada lado. Um laser é então utilizado para encontrar a frequência da transição atômica de um dos átomos. Pelo uso da constante da velocidade da luz é possível descobrir o comprimento de onda de uma frequência de luz, que então será usada para medir a distância (NIST, 2020).

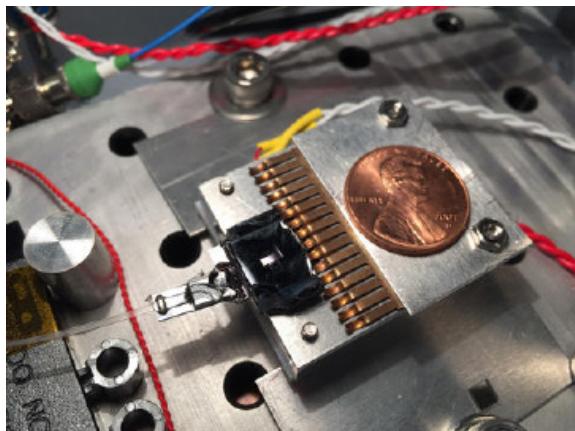


Figura 23 - Protótipo de chip da NIST com o objetivo de medir comprimento. Fonte: Hummon/NIST.

Este método apresenta alguns benefícios em comparação aos anteriores, como o seu menor custo e tamanho. Essas vantagens permitem a esse protótipo um número de possíveis aplicações muito maiores, como por exemplo na calibração de instrumentos industriais críticos (NIST, 2020).

5.1.6 NOAC para Massa, Força e Aceleração

A NIST desenvolveu um método chamado EFB (*Eletrostatic Force Balance*), o qual foi utilizado para medir massa em miligramas com a menor incerteza no mundo, porém também pode ser usado para medições maiores, como em metros. Esse método garante uma rastreabilidade da massa e força por meio de metrologia elétrica, permitindo uma referência primária que não requer manifestações físicas das unidades (NIST, 2020).

Os instrumentos da NIST programados para realizarem este processo permitem a medição de massas muito menores do que os padrões físicos que eram usados anteriormente permitiriam. Esses instrumentos também permitem rastrear os resultados até o sistema internacional e pode ser escalado para uso em quantidades muito pequenas (NIST, 2020).

5.1.7 NOAC para outras Grandezas

O time do NIST vem desenvolvendo equipamentos e métodos que focam em satisfazer os requerimentos das novas definições das unidades básicas, como a do ampere, que vieram com a mudança do S.I. (NIST, 2020).

Outros métodos e chips também vem sendo desenvolvidos para permitir maior precisão e confiabilidade na medição de quantidades em níveis cada vez menores. Sempre que possível são incorporadas as constantes universais associadas a grandeza sendo trabalhada, por causa dos benefícios que essa compatibilidade com o S.I. garante (NIST, 2020).

5.2 - COMO A ALTERAÇÃO DO SI SOLUCIONOU DESAFIOS DA METROLOGIA

Como estabelecido no capítulo anterior, a metrologia encontrou diversos desafios ao se inserir no novo cenário mundial criado pela Indústria 4.0. Entre esses novos desafios têm-se uma crescente necessidade por uma precisão e exatidão em suas medições. As indústrias vêm trabalhando com unidades cada vez menores e a metrologia tem que satisfazer essa nova demanda.

As alterações na definição das unidades do SI vieram para solucionar alguns desses empecilhos. Como a NIST já provou com seu projeto “NIST on a Chip”, ao usar de sensores e outros equipamentos baseados em princípios quânticos é possível obter números muito mais precisos e exatos. Essa maior qualidade de medição já soluciona diversas dificuldades na aplicação de várias tecnologias. Como por exemplo, na metrologia não invasiva em que muitas vezes o posicionamento do equipamento é essencial para a obtenção da medição correta, com a maior precisão e exatidão fornecida por sensores que utilizam das constantes universais para realizar as unidades, obter o posicionamento ideal não é mais um problema.

A tendência da Indústria 4.0 de utilizar de unidades cada vez menores continua a crescer, medidas em nanometros estão se tornando cada vez mais comuns, isso previamente apresentou um dilema para a metrologia. Contudo, a alteração no SI ao proporcionar sensores que utilizam das constantes para obter as unidades também proporcionou instrumentos de medição com a precisão e exatidão necessária para realizar as medições requeridas.

CONCLUSÃO

Considerando a proposta desse trabalho de analisar as possíveis repercussões da alteração na definição das unidades básicas do S.I. no contexto da Indústria 4.0, dando foco a área da metrologia, algumas conclusões foram obtidas.

A alteração realizada pelo Sistema Internacional veio beneficiar as indústrias ao ampliar a capacidade do que é possível e diminuir o custo do uso de certas tecnologias, provando que a instituição vem seguindo a promessa que fez desde a sua fundação, sempre alterando o sistema para que este continue a servir como uma ferramenta eficaz para a inovação tecnológica.

As novas definições para as unidades básicas realmente se provaram como grandes fontes de desenvolvimento tecnológico. Rapidamente, instrumentos e tecnologias que utilizam das novas vantagens desse sistema foram criados por institutos como o NIST.

A mudança nas unidades básicas complementou os princípios básicos da quarta revolução industrial. A capacidade para a criação de instrumentos de medição que não precisem ser calibrados combina perfeitamente com a Indústria 4.0 que vêm tornando o ambiente industrial cada vez mais independente do ser humano.

Instrumentos que se autocalibram / instrumentos que dispensam a necessidade de calibração eram antes somente presentes em protótipos caros ou na ficção. Contudo, com essa alteração nas definições das unidades, não só se tornou possível o desenvolvimento dos mais diversos sensores que tenham essas funções, mas também se tornou possível a produção em massa desses, sendo este um dos objetivos da NOAC para esta nova tecnologia.

Ao poder realizar a grandeza e obter a unidade diretamente, os sensores alcançaram novos níveis de precisão e exatidão. Como resultado, realizar medições nos níveis nano e micro, o que podia antes ser difícil, se tornou muito mais simples e eficaz com essas novas tecnologias que utilizam da vantagem do novo sistema.

Outras tecnologias, como algumas técnicas da metrologia não intrusiva, também beneficiaram dessa mudança. Algumas técnicas requeriam um posicionamento muito específico, pedindo uma precisão que era difícil de ser alcançada. Contudo, com as mudanças e o aumento de precisão resultante, se tornou muito mais fácil utilizar de tais técnicas.

Em geral, com as novas definições das unidades de base abriram-se diversas novas janelas de oportunidade para o desenvolvimento científico. A mudança proporcionou a criação de novos instrumentos de medição, dando origem a novas tecnologias, sem

necessariamente inviabilizar tecnologias antigas. Sendo assim, é possível afirmar que os impactos de basear as definições das unidades de base em constantes universais são definitivamente positivos para a indústria 4.0, tendo um efeito ainda mais amplificado na área da metrologia.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Alguns possíveis trabalhos futuros ainda dentro deste tema são:

- Tecnologias que usem da alteração do SI desenvolvidas por outras organizações além da NIST.
- Impactos socioeconômicos da alteração do SI.
- A posição que laboratórios de calibração se encontram agora que a alteração do SI viabilizou chips que permitem a autocalibração do maquinário industrial.
- O desenvolvimento de um chip que realize uma unidade básica, com base nas tecnologias desenvolvidas pelo projeto NOAC.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBERTAZZI, Armando. Souza, André R. Fundamentos de metrologia científica e industrial. Barueri, SP. Editora Manoel. 2013.

ANDONOV, S.; CUNDEVA-BLAJER, M. Calibration for Industry 4.0 Metrology: Touchless Calibration Calibration for Industry 4.0 Metrology: Touchless Calibration. 2018. p. 0–4.

AZEVEDO, J. S.; MONTEIRO JÚNIOR, F. N. Tratamento Histórico Presente em Livros Didáticos de Física Concernente à Velocidade da Luz. *História da Ciência e Ensino: construindo interfaces*, 6 jul. 2020. v. 21, n. 2013, p. 48–64. Disponível em: <<http://revistas.pucsp.br/hcensino/article/view/45690>>.

BALASINGHAM, K. Industry 4.0: Securing the Future for German Manufacturing Companies. School of Management and Governance Business Administration, 2016. v. 11, n. 2, p. 15. Disponível em: <http://essay.utwente.nl/70665/1/Balasingham_BA_MA.pdf>.

BENITEZ, R.; RAMIREZ, C.; VAZQUEZ, J. A. Sensors calibration for Metrology 4.0. [S.I.]: IEEE, 2019. p. 296–299. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8792886/>>

BIPM. The International System of Units (SI). 2019. v. 9th editio, p. 102.

BLOEM, JAAP; VAN DOORN, MENNO; DUIVESTEIN, SANDER; EXCOFFIER, DAVID; MAAS, RENÉ; VAN OMMEREN, ERIK. The Fourth Industrial Revolution: Things to Tighten the Link Between IT and OT. Sogeti VINT. 2014.

B. N. Taylor and P. J. Mohr, "The role of fundamental constants in the International System of Units (SI): present and future," in IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 50, no. 2, pp. 563–567, 2001.

BRANDI, Humberto. "A redefinição das unidades do Sistema Internacional, o SI. Na Medida, Inmetro". 2018.

CAVALCANTE, M. A.; HAAG, R. Corpo negro e determinação experimental da constante de Planck. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, set. 2005. v. 27, n. 3, p. 343–348. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1806-11172005000300007&lng=pt&tlng=pt>.

CESAR, J. O Segundo: de 1964 até o fim do Tempo. Canal Metrologia. 2019. Disponível em: <<https://canalmetrologia.com.br/o-segundo-de-1964-ate-o-fim-do-tempo/>>.

CONDE, D. R., MAFRA, F. L. N., & CAPPELLE, M. C. A. (2014). Escambo. Revista Interdisciplinar De Gestão Social, 3(1).

DAHMEN, S. R. A obra de Boltzmann em Física. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 2006. v. 28, n. 3, p. 281–295. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1806-11172006000300005&lng=pt&tlng=pt>.

DAVIS, R. S. How to Define the Units of the Revised SI Starting from Seven Constants with Fixed Numerical Values. Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, 3 dez. 2018. v. 123, p. 123021. Disponível em: <<https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/jres/123/jres.123.021.pdf>>.

DE ALMEIDA, PAULO SAMUEL. Indústria 4.0: Princípios Básicos, Aplicabilidade e Implementação na Área Industrial. Érica. 2018.

DURAKBASA, N. M., Bauer, J., & Poszvek, G. (2017). Advanced Metrology and Intelligent Quality Automation for Industry 4.0-Based Precision Manufacturing Systems. *Solid State Phenomena*, 261, 432–439. doi:10.4028/www.scientific.net/ssp

ENGENHARIA – PRESYS. O que é Indústria 4.0. Notas Técnicas: Notas técnicas sobre calibração e automação de processos. Agosto de 2019. Disponível em: <http://www.presys.com.br/blog/industria-4-0/>

FANTON, J.-P. A brief history of metrology: past, present, and future. **International Journal of Metrology and Quality Engineering**, 19 jan. 2019. v. 5, n. Int. J. Metrol. Qual. Eng. Volume 10, 2019, p. 8.

FERNANDES, R.F. “Constante de Avogadro” Rev. Ciência Elem., V3(3):191, 2015

FLOUD, R.; MCCLOSKEY, D. N. The Economic History of Britain since 1700. Cambridge University Press. 1994.

GLISTAU, E., & Coello Machado, N. I. (2018). Industry 4.0, Logistics 4.0 and Materials - Chances and Solutions. *Materials Science Forum*, 919, 307–314. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.919.307>

HEINZ, Werner. History of Medieval Metrology. Volume 2, edited by Albrecht Classen, Berlin, München, Boston: De Gruyter, 2015, pp. 1057-1092.

JÚNIOR, M. F. F. A Terceira Revolução Industrial e o novo paradigma produtivo: algumas considerações sobre o desenvolvimento industrial brasileiro nos anos 90. *Fae*, 2000. v. 3, n. 2, p. 45–61.

JÚNIOR, SÉRGIO LUIZ STEVAN; LEME, MURILO OLIVEIRA; SANTOS, MAX MAURO DIAS. Indústria 4.0: Fundamentos, perspectivas e aplicações. Érica. 2019.

LIMA, L.S. “Lei de Avogadro” Rev. Ciência Elem., V1(1):046, 2013.

MARTIN-DELGADO, M. A. The new SI and the fundamental constants of nature. **European Journal of Physics**, 2020. v. 41, n. 6.

MAX PLANCK; ABREU, E. Dos S. **Autobiografia científica e outros ensaios**. [S.I.]: Contraponto Editora, 2020, 2020.

MILLEA, A.; MUNTEANU, R.; MARCUS, I. U. Teaching General Metrology: Why , What , How ? XVII IMEKO World Congress Metrology in the 3rd Millennium, 2003. p. 64. Disponível em: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.620.3042&rep=rep1&type=pdf>>.

MILLS, I. M. et. al., Adapting the International System of Units to the twenty-first century. **Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, 28 out. 2011. v. 369, n. 1953, p. 3907–3924.

MOHAJAN, HARADHAN (2019). The First Industrial Revolution: Creation of a New Global Human Era. Published in: Journal of Social Sciences and Humanities, Vol. 5, No. 4 (17 October 2019): pp. 377-387.

NISHIMURA, P. L. G. et. al., PROTOTIPAGEM RÁPIDA: UM COMPARATIVO ENTRE UMA TECNOLOGIA ADITIVA E UMA SUBTRATIVA. São Paulo: Editora Blucher, 2016. p. 4481–4491. Disponível em: <<http://www.proceedings.blucher.com.br/article-details/24622>>.

PERRY, M. F. Remembering the oil-drop experiment. **Physics Today**, 2007. v. 60, n. 5, p. 56–60.

PITRE, L. et. al., Determinations of the Boltzmann constant. **Comptes Rendus Physique**, 2019. v. 20, n. 1–2, p. 129–139. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.crhy.2018.11.007>>.

POLYCARPO, É.; BARROSO, M. F. Uma breve história do mundo dos quanta. [s.d.]. p. 1–8.

POÓR, P.; BASL, J. Readiness of Companies in Relation to Industry 4.0 Implementation. (P. Maresova, P. Jedlicka, & I. Soukal, Org.). [S.I.]: [s.n.], 2019. V. 9, p. 236–248.

POSADA, A.; RODRIGUEZ, E.; ALVARES, A. UM MODELO FUNCIONAL DE ATIVIDADES DE APLICAÇÃO PARA MANUFATURA ADITIVA E SUBTRATIVA (MANUFATURA HIBRIDA). [S.I.]: ABCM, 2019. Disponível em: <<http://abcm.org.br/anais-de-eventos/COF2019/0331>>.

RIGOTTI, GENARA. Conheça as tecnologias habilitadoras da indústria 4.0 e algumas aplicações. ABII IIOT & 14.0. Outubro de 2020. Disponível em: <https://www.abii.com.br/single-post/conhe%C3%A7%C3%A7%C3%A1o-as-tecnologias-habilitadoras-da-ind%C3%A7%C3%A3o-astr%C3%ADria-4-0-e-algumas-aplica%C3%A7%C3%A7%C3%A1o>

ROBLEK, V.; MEŠKO, M.; KRAPEŽ, A. A Complex View of Industry 4.0. **SAGE Open**, 1 abr. 2016. v. 6, n. 2, p. 215824401665398.

ROYCHOUDHURI, C.; TIRFESSA, N. **The Nature of Light**. [S.I.]: CRC Press, 2017.

SACOMANO, JOSÉ BENEDITO; GONÇALVES, RODRIGO FRANCO; DA SILVA, MÁRCIA TERRA; BONILLA, HELENA SILVIA; SÁTYRO, CARDOSO WALTER. Indústria 4.0: conceitos e fundamentos. Editora Edgard Blücher Ltda. 2018.

SCHLAMMING, S.; HADDAD, D. The Kibble balance and the kilogram. **Comptes Rendus Physique**, jan. 2019. v. 20, n. 1–2, p. 55–63.

SCHWAB, KLAUS. A Quarta Revolução Industrial. Edipro Edições Profissionais Ltda. 2016

TABER, K.S. “The Atom in the Chemistry Curriculum: Fundamental Concept, Teaching Model or Epistemological Obstacle?” **Foundations of Chemistry**. 2003.

TACCOLA, G. M.; SAITA, M. T. Automatic calibration with character recognition software. **Journal of Physics: Conference Series**, 2021. v. 1826, n. 1.

TANNUS, A. M.; PEREIRA, N. S. Sistemas de Medidas. 2019.

ESTUDO DAS ALTERAÇÕES DO SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES E POSSÍVEIS IMPACTOS RELACIONADOS À INDÚSTRIA 4.0

- 🌐 www.atenaeditora.com.br
- ✉️ contato@atenaeditora.com.br
- ⌚ [@atenaeditora](#)
- FACEBOOK www.facebook.com/atenaeditora.com.br

ESTUDO DAS ALTERAÇÕES DO SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES E POSSÍVEIS IMPACTOS RELACIONADOS À INDÚSTRIA 4.0

- 🌐 www.atenaeditora.com.br
- ✉️ contato@atenaeditora.com.br
- ⌚ [@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora)
- FACEBOOK www.facebook.com/atenaeditora.com.br