

UNIVERSIDADE NOVE DE JULHO – UNINOVE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INFORMÁTICA E GESTÃO DO
CONHECIMENTO

JERRI BERNARDES DE SOUZA

***FRAMEWORK* PARA CALIBRAÇÃO 4.0 DE SENSORES ANALÓGICOS:**
INTEGRAÇÃO DIGITAL E INTEROPERABILIDADE NA METROLOGIA 4.0

São Paulo
2025

JERRI BERNARDES DE SOUZA

***FRAMEWORK PARA CALIBRAÇÃO 4.0 DE SENSORES ANALÓGICOS:
INTEGRAÇÃO DIGITAL E INTEROPERABILIDADE NA METROLOGIA 4.0***

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Informática e Gestão do Conhecimento – PPGI (Linha 1) da Universidade Nove de Julho - UNINOVE, como requisito parcial para obtenção do grau de doutor em Informática e Gestão do Conhecimento.

Orientador: Prof. Dr. Peterson Belan

São Paulo
2025

Souza, Jerri Bernardes de.

Framework para calibração 4.0 de sensores analógicos: integração digital e interoperabilidade na metrologia 4.0. / Jerri Bernardes de Souza. 2025.

152 f.

Tese (Doutorado) - Universidade Nove de Julho - UNINOVE, São Paulo, 2025.

Orientador (a): Prof. Dr. Peterson Belan.

1. Sensores analógicos. 2. Calibração 4.0. 3. Indústria 4.0. 4. Metrologia 4.0. 5. Aquisição de dados automática.

I. Belan, Peterson. II. Título

CDU 004



PARECER – EXAME DE DEFESA

Parecer da Comissão Examinadora designada para o exame de defesa do Programa de Pós-Graduação em Informática e Gestão do Conhecimento a qual se submeteu o aluno Jerri Bernardes de Souza.

Tendo examinado o trabalho apresentado para obtenção do título de "Doutor em Informática e Gestão do Conhecimento", com Tese intitulada "FRAMEWORK PARA CALIBRAÇÃO 4.0 DE SENSORES ANALÓGICOS: INTEGRAÇÃO DIGITAL E INTEROPERABILIDADE NA METROLOGIA 4.0", a Comissão Examinadora considerou o trabalho:

(☒) **Aprovado** (☐) **Aprovado condicionalmente**
(☐) **Reprovado com direito a novo exame** (☐) **Reprovado**

EXAMINADORES

Prof. Dr. Peterson Adriano Belan - Uninove (Orientador)

Prof. Dr. João Alexandre Paschoalin Filho - PPGCIS Uninove (Membro Externo)

Prof. Dr. Geraldo Cardoso de Oliveira Neto - UFABC (Membro Externo)

Prof. Dr. Sidnei Alves de Araújo - UNINOVE (Membro Interno)

São Paulo, 20 de dezembro de 2024

DEDICATÓRIA

Ao conhecimento transcendental da Cultura Racional e as forças conscientes da Natureza que me orientaram para mais esta realização em minha vida.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Energia Superior a todas as energias, por iluminar o meu caminho, me dar força e capacidade para superar os obstáculos encontrados.

Ao Sr. Manoel Jacintho Coelho por ter me ensinado o caminho da razão.

Ao meu orientador Prof. Dr. Peterson Belan, pela disponibilidade, competência, ensinamentos e atenção, que sempre dedicou a mim e ao meu trabalho.

À minha esposa Paxinka Ferreira Barbosa Silva, pelo amor, incentivo, paciência e contínuo companheirismo.

À minha mãe Helena Caracioly de Souza, pelo apoio, estímulo e preocupação com as realizações de meus objetivos.

À minha irmã Eliane Bernardes de Souza, que sempre me incentivou e exaltou as minhas qualidades, me convencendo sempre a confiar em meu potencial.

À Universidade Nove de Julho por ter concedido a bolsa de estudo integral para a realização deste curso de doutorado.

À Banda Racional Universo em Desencanto por ter me proporcionado uma formação disciplinar e equilibrada qual indiretamente me auxiliou neste trabalho.

À todos e a tudo que, embora não nomeados individualmente, contribuíram de alguma forma para a realização desse trabalho,

minha gratidão.

RESUMO

A transição para a Indústria 4.0 trouxe uma revolução nos processos industriais, integrando tecnologias avançadas para otimizar a produção e a coleta de dados. Nesse cenário, a Metrologia 4.0 emerge como um campo essencial, impulsionando a digitalização e a eficiência dos processos metrológicos. A Calibração 4.0, como parte desse movimento, utiliza técnicas inovadoras para melhorar a precisão das medições, reduzir o tempo de operação e aumentar a confiabilidade nos processos industriais que dependem de calibração periódica. O objetivo principal deste trabalho é propor um *framework* para Calibração 4.0, voltado para sensores analógicos sem protocolo de comunicação digital, promovendo sua integração em sistemas de calibração inteligentes. Para isso, desenvolveu-se uma metodologia que permite a coleta automática de dados e a adaptação desses sensores aos requisitos da Metrologia 4.0. A pesquisa adota uma abordagem quantitativa e qualitativa, baseada em análise bibliométrica, revisão sistemática de literatura e entrevistas semiestruturadas com especialistas. A partir dessa análise, foi concebido um *framework* estruturado que combina padrões de referência com sensores sob calibração, permitindo sua integração direta ao processo produtivo. Os principais resultados indicam que a adoção do *framework* reduz significativamente o tempo de calibração e os custos operacionais, ao eliminar a necessidade de calibrações manuais e transporte de sensores para laboratórios especializados. Além disso, o modelo melhora a rastreabilidade e confiabilidade das medições, contribuindo para maior eficiência dos processos industriais. A pesquisa também revelou desafios técnicos e operacionais na implementação da calibração digital para sensores analógicos, destacando a importância de soluções adaptáveis para diferentes setores industriais. Este trabalho oferece contribuições relevantes à indústria ao viabilizar a digitalização de processos de calibração que tradicionalmente exigem intervenção manual. Seu potencial de aplicação se estende a diversas áreas da manufatura, garantindo maior eficiência, confiabilidade e alinhamento com as práticas da Indústria 4.0, promovendo avanços na Metrologia 4.0 e impulsionando a transformação digital no setor.

Palavras-chave: Sensores Analógicos; Calibração 4.0; Indústria 4.0; Metrologia 4.0; Aquisição de Dados Automática.

ABSTRACT

The transition to Industry 4.0 has brought a revolution in industrial processes, integrating advanced technologies to optimize production and data acquisition. In this context, Metrology 4.0 emerges as a key field, driving the digitalization and efficiency of metrological processes. Calibration 4.0, as part of this movement, leverages innovative techniques to enhance measurement accuracy, reduce operational time, and increase reliability in industrial processes that require periodic calibration. The primary objective of this study is to propose a framework for Calibration 4.0, specifically designed for analog sensors without digital communication protocols, enabling their integration into intelligent calibration systems. To achieve this, a methodology was developed to allow automatic data acquisition and the adaptation of these sensors to the requirements of Metrology 4.0. The research adopts a quantitative and qualitative approach, based on bibliometric analysis, a systematic literature review, and semi-structured interviews with experts. Based on this analysis, a structured framework was conceived, integrating reference standards with sensors under calibration, allowing their direct incorporation into the production process. The key findings indicate that adopting the proposed framework significantly reduces calibration time and operational costs by eliminating the need for manual calibrations and the transportation of sensors to specialized laboratories. Furthermore, the model improves measurement traceability and reliability, contributing to greater efficiency in industrial processes. The research also identified technical and operational challenges in implementing digital calibration for analog sensors, highlighting the importance of adaptable solutions for different industrial sectors. This study provides significant contributions to the industry by enabling the digitalization of calibration processes that traditionally require manual intervention. Its potential applications extend across various manufacturing sectors, ensuring greater efficiency, reliability, and alignment with Industry 4.0 practices, thereby promoting advancements in Metrology 4.0 and driving digital transformation in the sector.

Key-words: Analog Sensors; Calibration 4.0; Industry 4.0; Metrology 4.0; Automatic Data Acquisition.

Lista de Ilustrações

Figura 1	Estrutura do Trabalho	25
Figura 2	Cadeia de rastreabilidade metrológica	29
Figura 3	Elementos de um sistema de medição	31
Figura 4	Elementos Funcionais Básicos de Sistema de Medição	32
Figura 5	Tipos de Sinais	33
Figura 6	Modelo de Sistema de Calibração Remota	41
Figura 7	Macrofluxo do processo de calibração contemporânea	56
Figura 8	Fluxo da Metrologia 4.0	57
Figura 9	Possível fluxograma da calibração 4.0	58
Figura 10	Fluxograma do modelo conceitual de calibração 4.0 para Kerma Ar	59
Figura 11	Exemplo de Diagrama de Pesquisa	67
Figura 12	Etapas da Revisão Sistemática de Literatura	69
Figura 13	Seleção e avaliação das pesquisas	74
Figura 14	Produção científica anual em termos de número de artigos	90
Figura 15	Países mais produtivos em termos de publicações científicas	91
Figura 16	Autores mais produtivos com base no número de documentos publicados	92
Figura 17	Gráfico de Sankey	93
Figura 18	Fontes mais relevantes	94
Figura 19	Fontes Mais Citadas Localmente	95
Figura 20	Produção acadêmica dos autores ao longo do tempo	96
Figura 21	Mapa temático	97
Figura 22	Desenvolvimento e Validação do <i>Framework</i> para calibração 4.0	111
Figura 23	Conceito de <i>Framework</i> estrutural para calibração 4.0	114
Figura 24	Fases conceituais do <i>Framework</i> estrutural para Calibração 4.0	115
Figura 25	Exemplificação do <i>Framework</i> para Calibração 4.0 – Grandeza Pressão	117
Figura 26	Exemplificação do <i>Framework</i> para Calibração 4.0 – Protocolo Digital	119
Figura 27	Barreiras Tecnológicas	122
Figura 28	Benefícios Identificados	123

Lista de Quadros

Quadro 1	Descritores de Pesquisa	73
Quadro 2	Sintetização das Pesquisas mais relevantes	83
Quadro 3	Autores Seminais para Calibração 4.0	88

Lista de Abreviaturas e Símbolos

A/D	Analógico para digital (conversor)
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACM	<i>Association for Computing Machinery</i> (Associação para Maquinaria de Computação)
AMR	Leitura Automática de Medidores
API	<i>Application Programming Interface</i> (Interface de Programação de Aplicações)
ASME	<i>American Society of Mechanical Engineers</i> (Sociedade Americana de Engenheiros Mecânicos)
BP	<i>Backpropagation</i> (Retropropagação)
CEP	Controle Estatístico de Processo
CGPM	<i>Conférence Générale des Poids et Mesures</i> (Conferência Geral de Pesos e Medidas)
CMM	<i>Capability Maturity Model</i> (Modelo de Maturidade de Capacidade)
CNN	<i>Convolutional Neural Network</i> (Rede Neural Convolucional)
CPS	<i>Cyber-Physical System</i> (Sistema Ciber-Físico)
CRNN	<i>Convolutional Recurrent Neural Network</i> (Rede Neural Convolucional Recorrente)
DCNN	<i>Deep Convolutional Neural Network</i> (Rede Neural Convolucional Profunda)
DQI	Infraestrutura de qualidade digital
ELM	<i>Extreme Learning Machine</i> (Máquina de Aprendizado Extremo)
ERP	<i>Enterprise Resource Planning</i> (Planejamento de Recursos Empresariais)
EUA	Estados Unidos da América
GUM	<i>Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement</i> (Guia para a Expressão da Incerteza na Medição)
HOG	<i>Histogram of Oriented Gradients</i> (Histograma de Gradientes Orientados)
IA	Inteligência Artificial
IATF	<i>International Automotive Task Force</i>

ICCASIT	<i>International Conference on Control, Automation, Signal, and Information Technology</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i> (Comissão Eletrotécnica Internacional)
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i> (Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos)
IIoT	<i>Internet Industrial das Coisas</i>
IoT	<i>Internet das Coisas</i>
ISI	<i>Institute for Scientific Information</i> (Instituto para Informação Científica)
ISO	<i>International Organization for Standardization</i> (Organização Internacional de Normalização)
M2M	<i>Machine-to-Machine</i> (comunicação entre dispositivos ou sistemas sem intervenção humana)
MAcc	Mili Amper de corrente contínua
MEMS	<i>Microelectromechanical Systems</i> (Sistemas Microeletromecânicos)
MMS	<i>Manufacturing Management System</i> (Sistema de Gerenciamento de Manufatura)
MSC	<i>Master of Science</i> (Mestre em Ciências)
NBR	Norma Brasileira
NIST	<i>National Institute of Standards and Technology</i> (Instituto Nacional de Padrões e Tecnologia)
NLOS	<i>Non-Line-of-Sight</i> (Fora de linha de visão)
PFMEA	<i>Process Failure Modes and Effects Analysis</i> (Análise de Modos e Efeitos de Falha de Processo)
PRISMA	<i>Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses</i> (Itens de Relatório Preferidos para Revisões Sistemáticas e Meta-Análises)
R-CNN	<i>Region-based Convolutional Neural Network</i> (Rede Neural Convolucional Baseada em Região)
RNN	<i>Recurrent Neural Network</i> (Rede Neural Recorrente)
ROI	<i>Return on Investment</i> (Retorno sobre Investimento)
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i> (Sociedade de Engenheiros Automotivos)

SGQ	Sistema de Gestão da Qualidade
SI	Sistema Internacional de Unidades
SPIE	<i>International Society for Optics and Photonics</i> (Sociedade Internacional de Óptica e Fotônica)
SVM	<i>Support Vector Machine</i> (Máquina de Vetores de Suporte)
TCAL	<i>Touchless Calibration</i>
TCP/IP	<i>Transmission Control Protocol/Internet Protocol</i> (Protocolo de Controle de Transmissão/Protocolo de <i>Internet</i>)
TI	Tecnologia da Informação
U-net	U-Net (Arquitetura de rede neural para segmentação de imagens)
UTT	<i>User Test Tool</i> (Ferramenta de Teste do Usuário)
UUT	Unit Under Test (Unidade sob Teste)
UWB	<i>Ultra Wideband</i> (Banda Ultra Larga)
Vcc	Tensão de corrente contínua
WSEAS	<i>World Scientific and Engineering Academy and Society</i> (Academia e Sociedade Científica e de Engenharia Mundial)
XLM	Macro de Linguagem de Extensibilidade do Excel

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	16
1.1	PROBLEMA E LACUNA DE PESQUISA.....	17
1.2	OBJETIVOS.....	19
1.2.1	Objetivo Geral.....	19
1.2.2	Objetivos Específicos.....	19
1.3	JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA DO TRABALHO.....	20
1.4	ESCOPO DA PESQUISA.....	23
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	25
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	26
2.1	EVOLUÇÃO DA METROLOGIA.....	26
2.2	CONCEITOS BÁSICOS SOBRE CALIBRAÇÃO.....	27
2.3	CARACTERÍSTICAS DOS SENSORES DE MEDIÇÃO.....	30
2.4	METROLOGIA NO CONTEXTO DA INDÚSTRIA 4.0.....	35
2.5	DIGITALIZAÇÃO DOS DADOS NA METROLOGIA.....	41
2.6	LIMITAÇÕES DAS TÉCNICAS CONVENCIONAIS DE CALIBRAÇÃO.....	42
2.7	BENEFÍCIOS E DESAFIOS DA CALIBRAÇÃO DIGITALIZADA.....	43
2.8	GARANTIA DA QUALIDADE EM PROCESSOS INDUSTRIAIS.....	46
2.9	VISÃO COMPUTACIONAL NA METROLOGIA.....	50
2.10	CERTIFICADO DIGITAL DE CALIBRAÇÃO.....	52
2.11	METROLOGIA 4.0.....	54
2.12	CALIBRAÇÃO 4.0.....	58
2.13	MÉTODOS AVANÇADOS DE CALIBRAÇÃO NA INDÚSTRIA.....	60
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	65
3.1	INSTRUMENTOS DE PESQUISA.....	66
3.2	REVISÃO SISTEMÁTICA DE LITERATURA SOBRE MÉTODOS DE CALIBRAÇÃO NA INDÚSTRIA.....	68
3.3	PESQUISA DOCUMENTAL.....	69
3.3.1	Critérios para a Pesquisa.....	69
3.3.2	Critérios de Elegibilidade.....	70
3.3.3	Critérios de Inclusão.....	70
3.3.4	Critérios de Exclusão.....	71

3.4	BASE DE DADOS	71
3.5	ESTRATÉGIA DE BUSCA	72
3.6	EXTRAÇÃO DE DADOS - FLUXOGRAMA PRISMA.....	73
3.7	LIMITAÇÕES DA PESQUISA	74
3.8	AVALIAÇÃO E COLETA DE DADOS DE CAMPO	76
3.8.1	Estrutura das Entrevistas	76
3.8.2	Procedimento da Coleta de Dados	76
3.8.3	Análise dos Dados da Entrevista Semiestruturada	76
3.8.4	Questionário Utilizado	77
3.8.5	Justificativa para o Uso de Entrevistas Semiestruturadas.....	77
3.8.6	Roteiro para a Entrevista Semiestruturada	77
3.9	CARACTERÍSTICAS DOS ESTUDOS PESQUISADOS	78
4	RESULTADOS DA PESQUISA	79
4.1	SÍNTESE DOS DADOS.....	82
4.2	AUTORES SEMINAIS PARA CALIBRAÇÃO 4.0.....	87
4.3	REVISÃO BIBLIOMÉTRICA - BIBLIOMETRIX.....	88
4.4	ANÁLISE DA REVISÃO SISTEMÁTICA DE LITERATURA	97
4.4.1	Considerações Sobre o Artigo “ <i>Mapping of Processes and Risks in the Digital Transformation in Metrology of Ionizing Radiation, a Case Study in X-rays Air Kerma Calibration</i> ”	103
5	FRAMEWORK PARA CALIBRAÇÃO 4.0	107
5.1	CONTRIBUIÇÕES DAS PESQUISAS NA CONSOLIDAÇÃO DO <i>FRAMEWORK</i>	107
5.1.1	Aspectos Inovadores do Estudo.....	110
5.2	ESTRUTURAÇÃO DO <i>FRAMEWORK</i>	111
5.3	EXEMPLOS DE ESTRUTURA FÍSICA DO <i>FRAMEWORK</i>	116
5.4	ANÁLISE DAS ENTREVISTAS SEMIESTRUTURADAS.....	119
6	CONCLUSÕES.....	124

1 INTRODUÇÃO

A metrologia desempenha um papel fundamental na garantia da qualidade dos produtos, segurança e eficiência dos processos industriais. No contexto da Indústria 4.0, a digitalização e a automação têm redefinido os padrões de operação nas indústrias, destacando a necessidade de uma abordagem mais inteligente e eficiente para a calibração de instrumentos industriais. Tecnologias como IoT (*Internet das Coisas*), IIoT (*Internet Industrial das Coisas*), inteligência artificial, computação em nuvem e *big data* têm sido integradas às práticas tradicionais, resultando na "calibração 4.0", que visa aprimorar a rastreabilidade, a eficiência e a confiabilidade das medições em ambientes digitalizados (GADELRAÏ; ABOUHOGAIL, 2021; BENITEZ *et al.*, 2019; HALL, 2019).

Desafios tecnológicos, no entanto, ainda limitam a implementação plena da calibração 4.0. Muitos instrumentos de medição convencionais utilizados nas indústrias carecem de protocolos de comunicação digital, o que impede sua integração direta aos sistemas informatizados (MUSTAPÄÄ *et al.*, 2020; ANDONOV; CUNDEVA-BLAJER, 2018). Entre os principais obstáculos estão as limitações de *hardware* dos dispositivos analógicos, que não foram projetados para interagir com plataformas digitais, e a dificuldade em criar interfaces que conectem tais instrumentos a redes inteligentes.

Este estudo propõe um *framework* para integrar instrumentos analógicos ao ambiente da calibração 4.0. Na introdução, são definidos os objetivos principais e específicos, como: analisar barreiras técnicas, desenvolver uma estrutura de calibração 4.0 para instrumentos analógicos, criar um guia prático de implementação e realizar uma entrevista semiestruturada com especialistas da área. A pesquisa segue uma abordagem quantitativa, utilizando análise bibliométrica e revisão sistemática da literatura para identificar lacunas e tendências nas práticas de calibração no contexto da Metrologia 4.0.

O *framework* proposto combina padrões de referência com instrumentos analógicos em um modelo digitalmente integrado, contemplando coleta, transmissão e análise automatizada de dados, além da geração de certificados digitais de calibração. Exemplo teórico utilizando *hardwares* comerciais é apresentado para demonstrar sua aplicabilidade em grandeza física controlada em processos industriais.

Dentre os benefícios esperados incluem maior eficiência operacional, redução de custos e mitigação de riscos associados a erros humanos. Esses avanços são particularmente valiosos para as indústrias que ainda dependem amplamente de dispositivos analógicos, oferecendo uma solução viável para a modernização da manutenção periódica de seus ativos.

Conclusão e contribuição: o *framework* oferece um passo importante na transição de sistemas convencionais para soluções mais avançadas e conectadas, alinhadas aos princípios da Indústria 4.0. Ao integrar as tecnologias analógica e digital, a pesquisa promove a modernização de processos de calibração, contribuindo com a eficiência, rastreabilidade e confiabilidade. A tese está estruturada em capítulos que abordam Introdução, Fundamentação Teórica, Materiais e Métodos, Resultados da Pesquisa, *Framework* para Calibração 4.0 e Conclusão, com informações detalhadas e dentro do rigor acadêmico.

1.1 PROBLEMA E LACUNA DE PESQUISA

O avanço das tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0 trouxe desafios para a metrologia industrial, especialmente no que se refere à interoperabilidade e integração de dispositivos de medição analógicos. Apesar das melhorias proporcionadas pela automação e conectividade, muitos setores industriais ainda dependem de dispositivos de medição convencionais. A ausência de protocolos de comunicação digital nesses dispositivos gera uma lacuna na implementação integral da calibração 4.0, criando obstáculos para a adoção de métodos de calibração automatizados e digitalizados.

Este trabalho de doutorado contribui com o preenchimento dessa lacuna, por meio da proposta de um *framework* para calibração 4.0 adaptado aos avanços da Indústria 4.0, sendo embasado em artigos, livros e normas atualizadas que fornecem subsídios teóricos para a estruturação de uma metodologia digital para a calibração de instrumentos de medição sem protocolo de comunicação digital.

Segundo Andanov e Cundeva-Blajer (2020); Martins, Farinha e Cardoso (2020), na indústria existem centenas, até milhares de sensores incorporados nos processos de produção, realizando medições em tempo real. Esses sensores necessitam de inspeção, monitoramento e calibração periódica, o que normalmente resulta na interrupção dos processos e na perda de tempo de produção. Contudo, a adoção de uma metodologia para calibração automática favorece a economia de

dinheiro e tempo para as empresas, sem comprometer a confiabilidade das calibrações.

De acordo com Andanov e Cundeva-Blajer (2020), apesar de atualmente não existir uma metodologia padronizada para calibração automática, os custos de calibração para fabricantes de médio porte podem chegar a € 275.000 por ano, enquanto fabricantes de grande porte, com mais de 10.000 sensores instalados, podem gastar até € 1,1 milhão por ano. Além disso, o transporte inadequado dos sensores e o risco de danos durante a calibração convencional são fatores importantes a serem considerados neste processo.

Na visão de Taymanov e Sapozhnikova (2020), existem problemas de rastreabilidade nas medições em muitos segmentos da indústria aeroespacial e nuclear, nos quais não é admissível falha nos dispositivos de medição dos processos. Sendo assim, há uma grande exigência regulatória para a calibração periódica desses dispositivos, e isto contribui diretamente ao custo devido as paradas programadas nos processos produtivos.

Para que a metodologia de calibração 4.0 seja adequadamente adotada, é necessário superar desafios relacionados a confiabilidade das medições, padronizações, rastreabilidade ao SI e a aplicabilidade em diferentes grandezas físicas e particularidades metrológicas. A adoção eficiente desse método também depende do desenvolvimento de soluções aprimoradas, incluindo o reconhecimento do método por parte da indústria manufatureira, a capacitações de profissionais e a conformidade com normas regulamentadoras.

Outra questão que merece atenção é a integração de diferentes tecnologias e plataformas na Indústria 4.0. A implementação da inteligência bem sucedida da operação na Indústria 4.0 requer não apenas o desenvolvimento de novas técnicas e métodos de descoberta, mas também sua integração com outras tecnologias, como sistemas de produção aditiva, robótica avançada, *big data* e IA. Trabalhar na direção desta integração é um desafio significativo que precisa ser desbravado. De forma simplificada, o sistema proposto possui o seguinte fluxo de processamento:

Os dados da calibração, oriundos do(s) padrão(ões) da grandeza física e do(s) instrumento(s) sob calibração, inseridos no processo, são coletados simultaneamente e automaticamente, por meio de dispositivos de conversão de padrões de dados. Esses dados são enviados ao módulo processador central, e posteriormente a uma rede de processamento, desta rede vai para um local de armazenamento e

processamento. Esses dados serão analisados e processados com base em parâmetros pré-estabelecidos e um certificado digital será emitido, qual poderá estar interligado a base de dados do sistema de gestão da qualidade local.

Além disso, a adequação das práticas de calibração às variáveis críticas específicas de cada contexto industrial é uma questão complexa que requer atenção detalhada. Cada ambiente industrial pode apresentar desafios únicos, e a calibração deve ser adaptada para atender a essas condições diversas, visando assim assegurar resultados confiáveis independentemente das circunstâncias operacionais.

Desse modo, este *framework* para calibração 4.0, caracteriza um passo essencial para a digitalização dos processos de calibração convencionais, alinhando-se aos objetivos e desafios da indústria 4.0, contribuindo com a promoção da melhora na confiabilidade, operacionalização e eficiência dos sistemas de medição nos ambientes industriais.

A pergunta de pesquisa é: Como viabilizar a integração de sensores analógicos sem protocolo de comunicação digital em sistemas de calibração inteligentes no contexto da Calibração 4.0?

A resposta a essa questão é crucial para resolver desafios práticos enfrentados por indústrias que utilizam dispositivos analógicos. A proposta não apenas viabiliza a calibração 4.0 nesse contexto, mas também contribui para o avanço das práticas de gestão de qualidade e segurança industrial.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Desenvolver um *framework* para calibração 4.0 de sensores analógicos, sem comunicação digital.

1.2.2 Objetivos Específicos

1. Pesquisar sistemas de calibração que utilizem tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0, aplicadas a sensores industriais;
2. Identificar limitações das técnicas convencionais de calibração em ambiente industrial e apontar os benefícios de sua digitalização;
3. Elaborar um guia prático para a implementação do *framework* de calibração 4.0;

4. Demonstrar teoricamente a aplicação do *framework* em um contexto de calibração 4.0;

5. Conduzir entrevistas semiestruturadas com especialistas para captar percepções do mercado sobre o *framework* proposto.

1.3 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA DO TRABALHO

A relevância deste estudo está diretamente ligada às mudanças tecnológicas impulsionadas pela Indústria 4.0, que geraram uma necessidade de adaptação dos sistemas metrológicos. A automação, conectividade digital e análise de dados são elementos essenciais da Indústria 4.0 e estão transformando os processos industriais. No entanto, uma lacuna significativa persiste no campo da calibração, especialmente em relação aos sensores analógicos que não possuem conectividade digital. A digitalização dos dados de calibração não apenas facilita a rastreabilidade, mas possibilita a mitigação de variabilidades, o que é um fator crucial para assegurar a qualidade e a segurança industrial.

Os estudos de Garcia *et al.* (2023) e Andonov e Cundeva-Blajer (2018a; 2018b; 2018c; 2019a; 2019b; 2020a; 2020b) contribuíram significativamente para a compreensão da importância e dos fundamentos da calibração 4.0, fornecendo um embasamento conceitual para a digitalização e automação dos sistemas metrológicos. Nos estudos de Andonov e Cundeva-Blajer é apresentada uma metodologia denominada de “calibração *touchless*” que possui características de medição remota e autônoma, com ênfase em calibração de sensores eletroeletrônicos. Esses estudos exploram os benefícios e desafios da calibração sem intervenção humana, focando na redução de custos, no aumento da segurança e na melhoria da eficiência dos processos de manufatura, especialmente em ambientes industriais complexos.

O método convencional de calibração, que implica no envio dos itens sob calibração a um laboratório especializado, é objeto de análise por Andonov e Cundeva-Blajer (2018). Eles observaram que embora esse método seja eficaz, sua eficiência é questionável. O processo é caracterizado por uma morosidade que resulta em custos mais elevados, além de apresentar um risco inerente de danos aos itens durante o transporte e manipulação, o que poderia comprometer a validade dos resultados da calibração e integridade do sensor.

O estudo de Garcia *et al.* (2023) também contribuiu para o entendimento da calibração 4.0 ao enfatizar a importância da digitalização e automação dos processos

metrológicos, eles apresentam uma base para a transição da calibração convencional para métodos mais eficientes, baseados em tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0, como IoT, IA e *big data*. No entanto, o trabalho deles não aborda diretamente a calibração automática para sensores de medição que não possuem protocolos digitais. Em vez disso, eles se concentram nas vantagens da digitalização da calibração, propondo a integração de dados e o uso de tecnologias para aumentar a eficiência e confiabilidade dos processos de calibração.

De acordo com Barbosa *et al.* (2022), uma infraestrutura de qualidade digital (DQI) é fundamental para avaliar a conformidade dos produtos, estabelecer padrões dos produtos, monitorar o mercado e impulsionar a inovação em várias áreas da manufatura. Em essência, a digitalização da metrologia é vista como um pilar essencial para o sucesso da manufatura inteligente. Esses pesquisadores apontam iniciativas que variam desde o desenvolvimento de infraestruturas de medição digital até a pesquisa em métodos analíticos para lidar com grandes volumes de dados. Esses esforços são direcionados para atender às demandas da manufatura inteligente, que dependem da coleta e análise de dados confiáveis e em tempo real.

Além disso, Frost e Sullivan (2021), previram que até o final de 2024 haveria um crescimento global no setor de serviços de calibração e reparo na ordem de US\$ 3,997 bilhões. Este crescimento é impulsionado pela preocupação crescente dos clientes com a qualidade e regulamentações mais rigorosas. Os sensores utilizados nas indústrias requerem calibração regular para garantir precisão e confiabilidade. Os usuários finais desejam um monitoramento remoto e análise de cada sensor e equipamento, o que aumenta a demanda por serviços de calibração e reparo de ativos conectados.

Barbosa *et al.* (2022) apontam o crescimento significativo da literatura relacionada à digitalização da metrologia nos últimos anos, onde o número de artigos publicados sobre o assunto aumentou consideravelmente, refletindo o crescente interesse e importância desse campo.

Conforme Taymanov e Sapozhnikova (2020), o aumento na produção de equipamentos complexos com sistemas automáticos e a incorporação de sensores geraram um crescimento de aproximadamente 25 % nas vendas anuais de sensores, destacando a importância da confiabilidade metrológica. No entanto, a complexidade desses dispositivos requer automação para assegurar a qualidade da produção, reduzir custos operacionais e prevenir falhas.

Taymanov e Sapozhnikova (2020) relatam que os dados estatísticos indicam que entre 40 % e 100 % das falhas em instrumentos de medição são decorrentes de falhas metrológicas, ao invés de falhas súbitas. Mas, a manutenção de intervalos curtos de calibração se torna insustentável, pois aumentaria consideravelmente os custos.

Espera-se que os provedores de serviços combinem *software* de gerenciamento de ativos com serviços de calibração para atender às necessidades dos clientes em mercados digitais mais avançados. A demanda por calibração eletrônica, elétrica e serviços de reparo é impulsionada pelos setores de aviônicos, aeroespacial, comunicações e indústrias automotivas, representando 39,8 % do mercado global. Os serviços mecânicos representam 27,6 %, enquanto os termodinâmicos e temperatura representam 18,1 %. Os restantes 14,5 % são atribuídos à calibração dimensional, física e serviços de reparo (FROST; SULLIVAN, 2021).

Embora Benitez, Ramirez e Vazquez (2019) tenham discutido a integração de sensores eletrônicos no ambiente da Indústria 4.0, eles observam a necessidade de novos padrões de calibração que atendam às exigências da metrologia 4.0. No entanto, o estudo não apresenta detalhes sobre tecnologias como IoT, IA ou computação em nuvem para facilitar essa integração. Embora estas abordagens contribuam para o fortalecimento tecnológico, ainda existem lacunas na calibração de sensores analógicos, indicando a necessidade de um *framework* adaptado para essas condições.

A calibração 4.0, ao integrar sistemas autônomos e conectados, possibilita a coleta, transmissão, processamento e armazenamento de dados de calibração de forma mais rápida e confiável. Esse avanço é particularmente relevante em cenários industriais onde os sensores analógicos ainda são amplamente utilizados devido à sua robustez e custo relativamente baixo.

Considera-se que adoção de um sistema de calibração 4.0 poderá contribuir com minimização dos custos associados à calibração, em função de que não requer a utilização de alguns dispositivos tradicionais do sistema de calibração, como geradores de mensurandos (simuladores de grandezas físicas do processo), instrumento de *backup* e parada de processo e logística de transporte. Além disso, trata-se da possibilidade de realizar a calibração de maneira mais segura e eficiente, como em ambientes de difícil acesso ou com elevado grau de periculosidade,

mitigando assim possíveis riscos de acidentes e exposição prolongada do efetivo operacional nestas áreas de risco permanente.

A digitalização da calibração não apenas melhora a eficiência industrial, mas também tem implicações sociais significativas. A adoção de calibração 4.0 pode reduzir a exposição de trabalhadores a ambientes de risco, como instalações industriais com altas temperaturas, pressão ou substâncias tóxicas. Além disso, a necessidade de novas competências técnicas para operar e gerenciar sistemas de calibração digital pode impulsionar programas de capacitação profissional, promovendo a atualização dos profissionais da área. Por fim, a democratização do acesso à tecnologia de calibração digital pode beneficiar pequenas e médias empresas, permitindo que adotem padrões de qualidade elevados sem os altos custos associados à calibração convencional.

Baseado neste cenário, este trabalho de doutorado é motivado por uma intenção clara: desenvolver um *framework* para calibração 4.0 de instrumentos que não possuam protocolo de comunicação digital, lacuna essa não contemplada pelos pesquisadores Andonov e Cundeva-Blajer, Garcia *et al.* e Benitez, Ramirez e Vazquez. É intenção complementar, refinar e contextualizar os trabalhos em um âmbito mais específico, propiciando uma visão mais holística e eficiente sobre a calibração 4.0.

1.4 ESCOPO DA PESQUISA

O *framework* proposto abrange o processo de “ponta a ponta”, incluindo desde a aquisição dos dados comparativos dos instrumentos (padrão da grandeza física, sob calibração e ambientais), até a emissão do certificado digital de calibração.

Os sensores de medição contemplados neste *framework* são os que apresentam exclusivamente sinais de saída em formato analógico, caracterizando:

- Sensores que operam com protocolo de comunicação de sinal elétrico analógico, exemplo: 4 a 20 mA_{cc}, 0 a 5 V_{cc}, 0 a 10 V_{cc}, etc.;
- Sensores que possuam somente indicação local por meio de mostrador de dígitos (*display* digital) e/ou mostrador com escala graduada (*display* analógico);
- Sensores de formatação analógica mista, equipados com mostrador (*display*) e protocolo de sinal elétrico analógico;

- Sensores “cegos”, que não possuem forma de apresentação ou emissão quantitativa da grandeza da variável de processo, exemplo: válvulas de segurança, pressostatos, termostatos, etc.

O motivo para esse trabalho enfatizar exclusivamente os sensores sem protocolo de comunicação digital, reside na necessidade de preencher uma lacuna específica existente na integração e/ou digitalização dos dispositivos analógicos com a metodologia de calibração 4.0. Tal ênfase se justifica em função dos instrumentos “*smart*”, em sua maioria, possuírem recursos inteligentes embarcados, como a função autocalibração e autodiagnóstico. Assim, os sensores analógicos representam um desafio ampliado para a elaboração de uma sistemática de integração tecnológica com os preceitos da indústria 4.0.

Essa abordagem também é ratificada pelo trabalho desenvolvido por Schütze, Helwig e Schneider (2018), onde são abordadas as integrações de funcionalidades avançadas. Essas propriedades estão disponibilizadas em função da integração de elementos eletrônicos e algoritmos inteligentes embarcados, condicionando-os a se ajustarem automaticamente às variáveis de influência sobre o sensor, sem qualquer intervenção humana.

Por outro lado, os sensores não equipados com protocolo de comunicação digital e/ou funcionalidade avançadas, classificados esses como “analógicos” ou “convencionais”, dependem de metodologias de calibração externas periódicas para um diagnóstico de funcionalidade e precisão requerida. Apesar desses não possuírem funcionalidades avançadas embarcadas do que os sensores “*smart*”, os sensores analógicos ainda são amplamente utilizados por diversas razões, como: custo, robustez, simplicidade, tradição e confiabilidade em ambientes industriais. No contexto da calibração 4.0, a calibração de sensores analógicos contempla a adoção de tecnologias avançadas visando a digitalização dos dados desses dispositivos de medição.

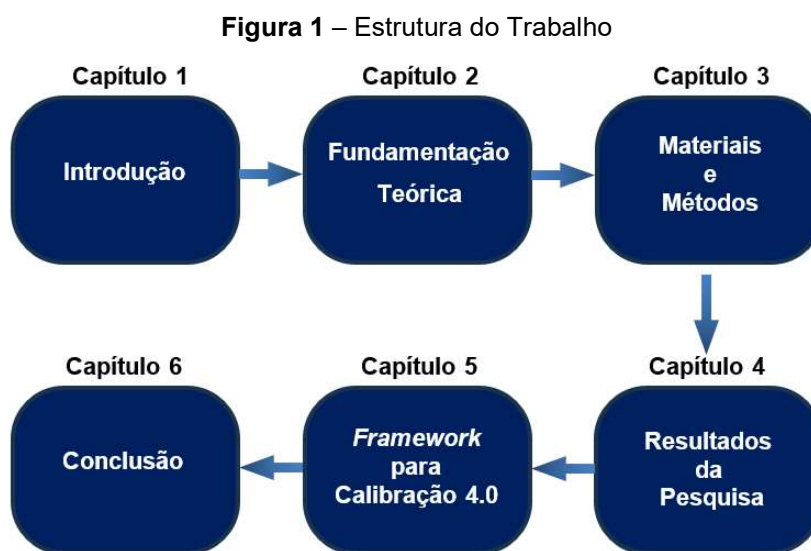
Entende-se que este trabalho oferece uma contribuição singular ao abordar a calibração de instrumentos de medição sem protocolo de comunicação digital, mesmo excluindo instrumentos digitais e/ou híbridos. Ao delimitar o escopo e apresentar as justificativas para esse direcionamento, este estudo não apenas propõe a fundamentação do método, mas também oferece elementos para futuras explorações ao tema, que podem contribuir com a área da metrologia 4.0.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

Com o propósito de realizar os objetivos propostos neste trabalho de doutorado, este foi particionado em seis capítulos, sendo o primeiro capítulo um compêndio introdutório ao tema, estabelecendo o contexto e a relevância desta pesquisa. O segundo capítulo aborda a fundamentação teórica, qual tem por objetivo trazer os conceitos relacionados ao tema, além de fundamentar a lacuna existente na literatura e desenvolver os pressupostos desta pesquisa. No terceiro capítulo é apresentada a metodologia utilizada para estruturar essa tese e seus respectivos procedimentos metodológicos.

No capítulo quarto estão apresentados os resultados da pesquisa. No capítulo quinto é apresentada a estruturação do *framework* para calibração 4.0. Por fim, no sexto capítulo é composto pelas conclusões desta tese, qual apresentam as limitações, oportunidades, contribuições e indicações de pesquisas futuras.

A **Figura 1** apresenta o fluxo simplificado da estrutura desta tese.



Fonte: Elaborado pelo Autor

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 EVOLUÇÃO DA METROLOGIA

Baseado no levantamento de dados sobre a evolução da instrumentação industrial observa-se que, ao longo dos anos, a instrumentação teve um desenvolvimento dos sensores simples e manuais para sistemas sofisticados e digitais, contribuindo significativamente para um aumento da confiabilidade das medições. O progresso da metrologia demonstra como a compreensão do tema e a capacidade de medição têm sido aperfeiçoadas ao longo dos séculos.

Kudo (2007), aponta em seu trabalho a importância da padronização das medições desde a China antiga ao Egito, de produtos manuais e controle de qualidade qual impulsionou o desenvolvimento de padrões de medição, contribuindo com a flexibilidade e a padronização dos sensores.

Segundo Larroyed *et al.* (2015), no século XIX a utilização do sistema métrico marcou o avanço da metrologia, contribuindo com a precisão e rastreabilidade das medições. A evolução da metrologia teve sua continuidade no século XX com a adoção da metrologia digital juntamente com o uso dos computadores, possibilitando uma maior ampliação das medições, como a velocidade da luz e a massa de um átomo.

A evolução da metrologia também é evidente na crescente complexidade dos sistemas de medição e na necessidade de métodos de calibração que possam lidar com essa complexidade. A norma ABNT NBR ISO 10012 (2004) e a norma ABNT NBR ISO/IEC 17025 (2017) são exemplos de normas que estabelecem requisitos para os processos de medição e para a competência de laboratórios de ensaio e calibração, respectivamente, destacando a contínua busca por aprimoramento na precisão e na confiabilidade das medições.

Contudo, a metrologia atual enfrenta desafios complexos devido aos avanços recentes abrangerem as medições de grandezas com valores cada vez menores, bem como a necessidade de garantir qualidade e rastreabilidade em um mundo globalizado e conectado digitalmente. A metrologia desempenha um papel fundamental na inovação, competitividade da indústria e segurança dos consumidores, destacando a ligação com investimentos em pesquisa e desenvolvimento. Desde o primeiro padrão até os sistemas de medição sofisticados com os quais são empregados atualmente, tem sido o fator determinante em prol da conquista tecnológicas que tem contribuído com a qualidade no setor (FANTON, 2019).

Segundo Taymanov e Sapozhnikova (2020), definem que a evolução da história da metrologia foi caracterizada por mudanças qualitativas, baseadas nas necessidades da indústria e da sociedade em diferentes estágios de desenvolvimento. Todas essas mudanças estiveram associadas à revisão de atos legislativos e às regulamentações metroológicas que surgiram. Entre as transformações apresentadas, pode-se destacar o surgimento de sistemas regionais de unidades, a transição para unidades métricas, a adoção do SI e o surgimento de novos padrões de referência baseados na natureza quântico-mecânica.

A metrologia tem experimentado uma transformação profunda, impulsionada pela inovação tecnológica e pelas demandas de um mercado globalizado que requer medições cada vez mais precisas e confiáveis. A adoção de novas tecnologias e a harmonização de práticas em todo o mundo são desafios atuais que a metrologia enfrenta, enquanto continua a desempenhar um papel crucial no desenvolvimento sustentável e na garantia da qualidade em todas as esferas da atividade humana (MARQUES *et al.*, 2019; TAYMANOV; SAPOZHNIKOVA, 2022).

Com base nessa visão abrangente, a metrologia possui suas particularidades. A medição deve ser realizada com cada vez mais precisão, e a metrologia deve assumir um papel ainda mais relevante na era das tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0.

2.2 CONCEITOS BÁSICOS SOBRE CALIBRAÇÃO

Segundo Martins, Farinha e Cardoso (2020), a calibração é um dos serviços realizados pela metrologia de sensores de medição, sendo uma ferramenta essencial para assegurar a rastreabilidade e confiabilidade da medição. Pela análise de Morris e Langari (2021), a calibração é um processo fundamental que envolve a comparação entre o sinal de saída de um sensor sob teste com um sensor de referência mais preciso (padrão de referência). Esta comparação é realizada idealmente em uma ampla faixa de pontos para abranger toda a capacidade de medição do sensor. A finalidade da calibração é garantir a precisão das medições em todo o processo, desde que os sensores de calibração sejam utilizados em condições ambientais em que foram calibrados.

Os sensores de referência devem ser sensores confiáveis e precisos, calibrados e que possuam uma curva conhecida. São usados para fornecer uma medição de referência para comparar com as saídas dos sensores de teste. Ao

comparar as saídas dos sensores de teste com as saídas dos sensores de referência, é possível determinar a precisão dos sensores de teste e calibrá-los para obter uma estimativa mais precisa da grandeza calibrada. Esse método é amplamente utilizado em medições elétricas, ópticas e mecânicas (YAN *et al.*, 2022).

Na visão de Morris e Langari (2021), determinar a periodicidade adequada para a recalibração do sensor requer um conhecimento aprofundado de sua construção e características relevantes, como: o tipo de sensor, deriva temporal típica, sua frequência de uso e as condições ambientais predominantes, que exercem uma forte influência na frequência necessária da calibração.

No entanto, Morris e Langari (2021) apontam que é difícil estabelecer teoricamente essa frequência devido à complexidade de diversos fatores envolvidos que podem afetar a qualidade da medição dos sensores. Portanto, é necessário realizar experimentos práticos para determinar a taxa de mudanças nas características dos sensores, com base no limite máximo de erro de medição permitido é possível estatisticamente e historicamente estimar um intervalo de tempo que sugere quando o sensor poderá atingir os limites de desempenho aceitável.

É crucial revisar periodicamente o sistema e a frequência de calibração estabelecidos, para garantir a eficácia e a eficiência contínuas dos sensores de medição. Com a evolução tecnológica, é possível que possa surgir métodos de calibração mais econômicos, porém que atenda igualmente a eficácia, e que poderá ser adotado para melhorar a eficiência no sistema metrológico (MORRIS; LANGARI, 2021).

Os alicerces da metrologia estão atrelados a rastreabilidade da cadeia metrológica qual se trata de um sistema de transferência de padrões de metodologias que garantem a exatidão e a rastreabilidade das medições, esta possui uma interconexão de níveis desses padrões de reconhecimento nacional e internacional, até as matrizes fundamentais do Sistema Internacional de Unidades de Medida (SI) (MORRIS; LANGARI, 2021).

A **Figura 2** ilustra a cadeia de rastreabilidade metrológica, onde o SI é base de toda a cadeia detentora dos padrões das grandezas fundamentais, e por meio dos métodos de transferência por calibração entre os níveis desta cadeia, a rastreabilidade chega até o usuário final.

Figura 02 – Cadeia de rastreabilidade metrológica

Fonte: Adaptado de Morris e Langari (2021)

Segundo Rodrigues e Farinha (2020), a calibração é um processo de comparação de um elemento "desconhecido" com um padrão equivalente ou melhor. Esta pode incluir um ajuste para corrigir o desvio em relação ao valor obtido pelo padrão, que é quantificado pelo desvio padrão. A calibração é uma comparação entre a informação do sinal de saída do sensor a ser calibrado e a informação do sensor padrão, respondendo a um mesmo valor de entrada aplicado aos dois sensores simultaneamente. Também afirmam que a calibração pode opcionalmente ser realizada ao longo de uma faixa de valores de entrada para cobrir toda a faixa de capacidade de medição do sensor.

Segundo Martins, Farinha e Cardoso (2020), a calibração proporciona consistência nas leituras e contribui para redução de erros, normalizando as medições do sensor de forma universal. Também afirmam que a calibração serve para revelar a individualidade de um sensor, comparando-o com um padrão de referência, sendo que através da calibração do sensor é possível obter a curva de comportamento em

relação a grandeza de medição. Essa curva de calibração pode ser tabelada e específica para cada dispositivo, onde no uso prático é convertida a medição bruta em medição corrigida.

Na base de uma regulamentação padronizada sobre a calibração de sensores de medição, encontram-se normas e padrões estabelecidos para alinhamento com recomendações de sistemas de gestão da qualidade, conforme estabelecido na norma internacional ISO/IEC 17025 (2017). No Brasil, existem normalizações emitidas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), que desde a década de 1990 oferece critérios para a certificação de sensores.

Para garantir uma correta calibração, várias etapas devem ser seguidas contemplando desde recomendações de fabricantes até normas pertinentes. Nesse processo, a prevalência de várias operações manuais pode aumentar as chances de erros humanos. O esquecimento de um parâmetro do sensor ou a leitura e registros incorretos de um valor coletado podem comprometer a integridade do processo de calibração.

Segundo Martins, Farinha e Cardoso (2020), a calibração deve contemplar essencialmente os seguintes itens:

- **Padrão de referência:** Este elemento é uma ferramenta que possui um valor de medição conhecido e exato. Este instrumento é empregado como referência para a verificação de outros equipamentos ou instrumentos;
- **Precisão e exatidão:** A precisão refere-se à reprodutibilidade de medições realizadas de forma repetida, enquanto a exatidão é a proximidade entre o valor medido e o seu valor real. Um instrumento devidamente calibrado, idealmente, deve possuir tanto precisão quanto exatidão;
- **Rastreabilidade:** Este conceito implica que todas as especificações podem ser rastreadas e comparadas a um padrão universalmente aceito (SI). A rastreabilidade garante a confiabilidade da exatidão;
- **Incerteza de medição:** Esse parâmetro estatístico representa a dispersão dos valores atribuídos a uma grandeza. A incerteza de medição leva em consideração tanto os erros sistemáticos quanto os aleatórios;
- **Intervalos de falha:** Este é o período de tempo durante o qual um instrumento deve manter uma medição precisa. Este intervalo pode variar, dependendo da natureza do instrumento.

2.3 CARACTERÍSTICAS DOS SENSORES DE MEDIÇÃO

A inovação tecnológica na área da instrumentação industrial, teve um grande impulsionamento devido ao crescente número de normas e regulamentações de cobertura mundial, juntamente com a ascensão de sistemas digitais aplicados aos processos de manufatura.

Para Morris e Langari (2021), todos os sensores de medição podem ser classificados em ativos ou passivos, conforme possui ou não uma fonte de energia contida dentro deles. Outra distinção é entre o tipo nulo (cego) que são sensores que requerem ajuste até um nível de referência de atuação e os sensores de deflexão, que fornecem uma medição de saída na forma de uma deflexão de um ponteiro contra uma escala ou um visor numérico.

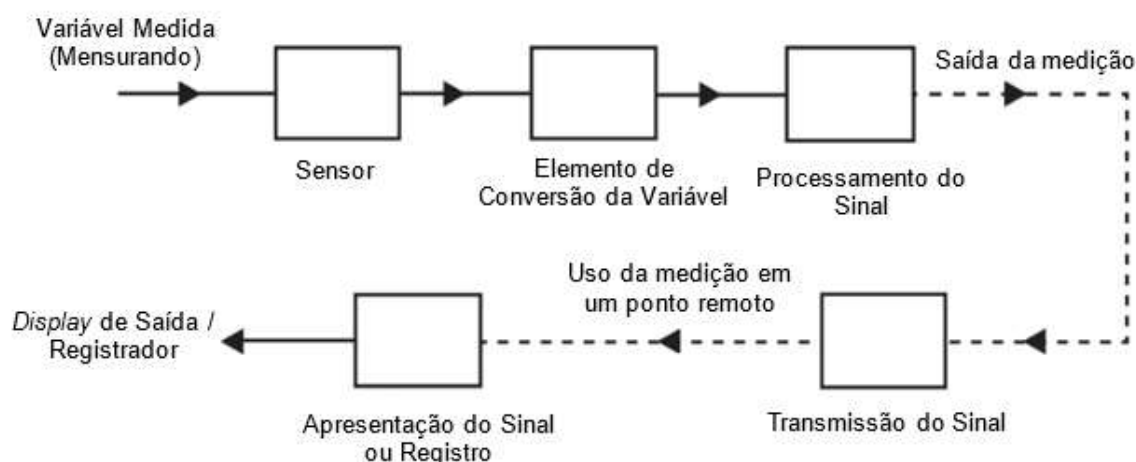
Outra característica é entre sensores analógicos e sensores digitais, que diferem conforme o sinal de saída, entre o sinal que varia continuamente (sensor analógico) ou discretamente (sensor digital). Outra distinção é entre sensores que são meramente indicadores e aqueles que transmitem um sinal de saída ou possui um sistema de comutação (MORRIS; LANGARI, 2021).

Os indicadores fornecem alguma indicação visual ou de áudio, da magnitude da quantidade de medição e são comumente encontrados nas indústrias de manufatura. Sensores com um sinal de saída são comumente encontrados como parte de sistemas de controle de automação (MORRIS; LANGARI, 2021).

Com base na pesquisa de Morris e Langari (2021), a distinção entre sensores inteligentes e não inteligentes, é que os Inteligentes muitas vezes conhecido como “*smart*”, são os que possuem algum grau de inteligência artificial embarcada.

A **Figura 3** apresenta um diagrama de blocos dos elementos de um sistema de medição.

Figura 3 - Elementos de um sistema de medição



Fonte: Adaptado de Morris e Langari (2021)

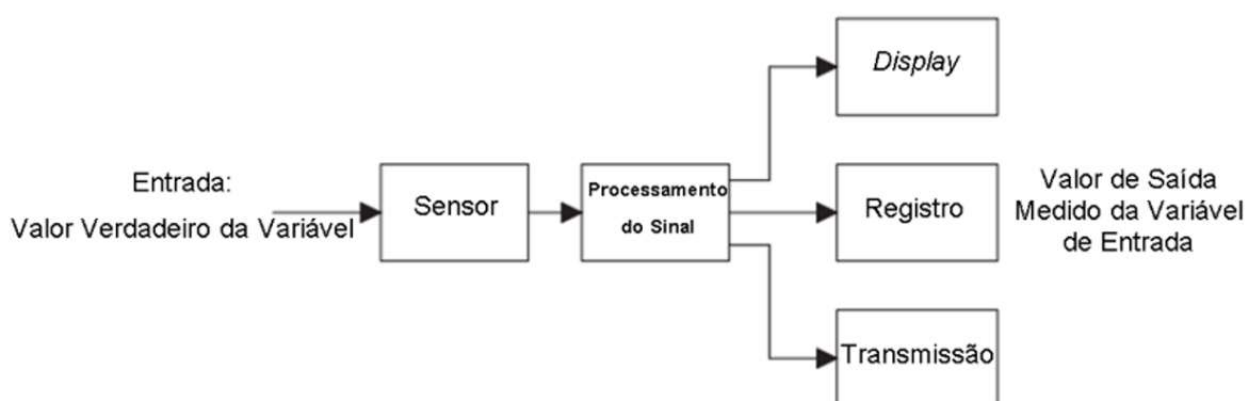
De acordo com Morris e Langari (2021), a inovação dos sensores de medição trouxe consigo a necessidade de diferentes métodos de comunicação com os sistemas de controle e supervisão, resultando em uma variedade de sensores, interfaces e protocolos. Isso representa um desafio para os usuários, que precisam dominar diversas formas de comunicação e ficam limitados às especificações impostas pelos fabricantes dos equipamentos.

Entretanto, uma desvantagem com dispositivos indicadores é que necessitam de uma intervenção humana para a realização da leitura e registro das medições. Este procedimento é susceptível a erros, principalmente em saídas de sinais analógicos, em exibições numéricas com escala graduada.

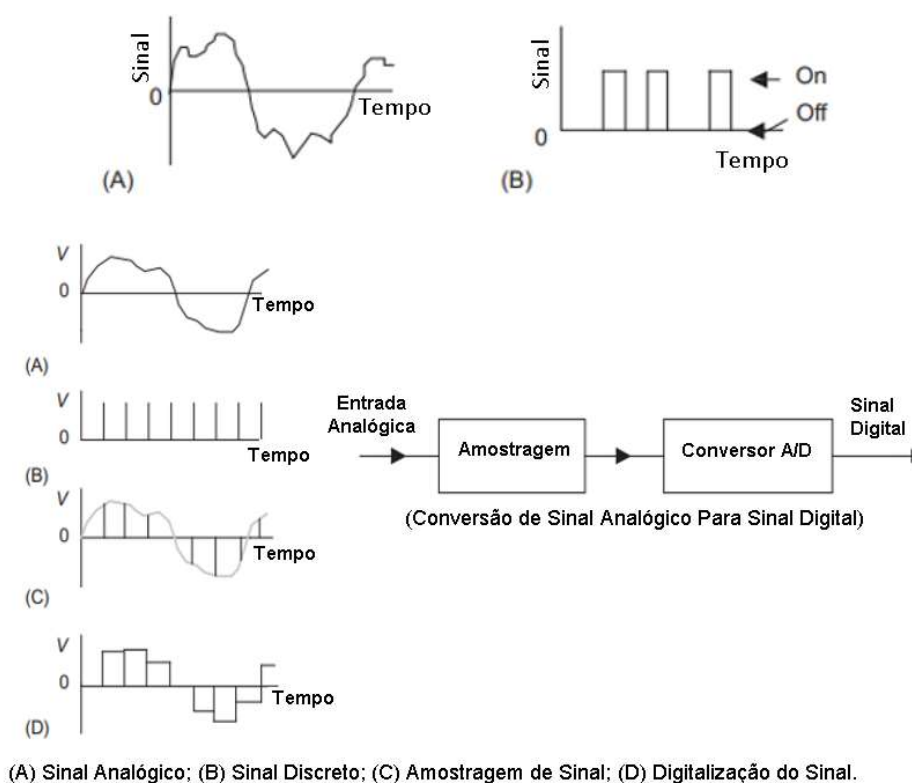
Por meio de um mostrador de dígitos é menos propenso a ocorrência de erros humanos, a não ser por questões de desatenção na leitura e/ou escrita. São utilizados comumente como parte integrante de um sistema automatizado os sensores que possuem uma saída de sinal elétrico, como uma faixa de tensão elétrica ou corrente elétrica referenciada a uma faixa da grandeza física medida pelo sensor (MORRIS; LANGARI, 2021).

As **Figuras 4 e 5** mostram como esses elementos funcionais básicos formam um sistema de medição.

Figura 4 - Elementos Funcionais Básicos de Sistema de Medição



Fonte: Adaptado de Morris e Langari (2021)

Figura 5 - Tipos de Sinais

Fonte: Adaptado de Morris e Langari (2021)

De acordo com Bolton (2021), sensores de medição que fazem monitoramento e/ou controle de processos industriais e que precisam transmitir seus dados a longa distância para uma unidade de exibição e/ou controle, fazem uso de protocolos de comunicação, onde os métodos mais comuns de transmissão dos dados de medição, são transmissão de sinal analógico que envolve o uso de sinais de tensão contínua, como 0 a 5 Vcc ou 0 a 10 Vcc; transmissão de *loop* de corrente, onde utiliza um sinal de corrente contínua, geralmente na faixa de 4 a 20 mAcc; e sinais de tensão digital transmitidos por redes de comunicação.

Os dados de medição são convertidos em sinais de tensão digital e transmitidos por meio de redes de comunicação, utilizando comunicação serial ou paralela. Os sinais de medição emitidos, podem possuir formato digital e formato analógico, sendo que a forma analógica possui restrições de uso, como em painéis de indicadores onde apresentam momentaneamente o mensurando medido (BOLTON, 2021).

Pode-se considerar que os medidores digitais são um tipo de voltímetros digitais, desenvolvidos para medir uma grande diversidade de grandezas físicas. Estes possuem uma tecnologia mais aprimorada qual visa uma maior precisão e

velocidade de resposta comparativamente aos de tecnologia analógica. Os sensores digitais possuem vantagens sobre os de tecnologia analógica em quase todos os aspectos. O sinal de saída de um sensor digital é binário e pode ser exibido na formatação discreta. Por meio dessa sistemática é possível mitigar alguns erros, como o de paralaxe inerentes aos sensores analógicos (BOLTON, 2021).

Os mostradores (*displays*) eletrônicos apresentam a leitura da medição instantaneamente e possuem também a vantagem de uma apresentação de informações no formato alfanumérico. Além disso, os medidores digitais têm a capacidade de exibir informações de vários valores de parâmetros em uma única tela de exibição. Essas características dos medidores digitais contribuem para a confiabilidade, precisão e facilidade de leitura das medições, permitindo uma resposta imediata quando necessário. Por outro lado, os sensores analógicos mesmo possuindo desvantagens técnicas em relação aos digitais, características de precisão, impedância de entrada e custo, ainda são amplamente utilizados nos processos industriais (MORRIS; LANGARI, 2021).

Conforme Morris e Langari (2021), estes sensores são comumente adotados como indicadores em painéis de monitoramento, devido à facilidade de detecção de desvios de parâmetros controlados fora da faixa normal esperada. O movimento do ponteiro em relação a uma escala, em um medidor analógico, torna-se mais fácil perceber essas variações em comparação com um valor numérico exibido em um mostrador digital. Além disso, os medidores analógicos tendem a ser menos afetados por ruídos e problemas de isolamento elétrico, o que os torna adequados para aplicações específicas.

Sua capacidade de funcionar sem fonte de alimentação é vantajosa em situações em que uma fonte não é possível. No entanto, os medidores analógicos estão sujeitos a erros de medição devido a variáveis como: marcação imprecisa na escala durante a fabricação, fricção do mecanismo, vibrações do processo, ponteiros desalinhados, variações de temperatura ambiente, erros humanos como erro de paralaxe e erros na interpolação entre as marcações da escala (MORRIS; LANGARI, 2021).

Atualmente, na era da Indústria 4.0, as fábricas inteligentes utilizam cada vez mais sensores eletrônicos ou digitais para medir diversos parâmetros em seus processos de manufatura. Esses sensores fornecem informações em tempo real, que podem ser apresentadas em painéis de controle e serem enviadas para sistemas

SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition*). Embora os sensores inteligentes sejam sensores de medição dotados de alta precisão, eles precisam ser calibrados em intervalos específicos e em conformidade com padrões de medição rastreáveis ao SI.

2.4 METROLOGIA NO CONTEXTO DA INDÚSTRIA 4.0

Os fundamentos da Indústria 4.0 são basicamente minicomputadores “inteligentes” incorporados aos sistemas ciberfísicos (CPS). Estes minicomputadores processam informações coletadas por meio de sensores e eles são capazes de determinar o estado atual dos equipamentos e processos. Estes fazem isso através da interconexão de *hardware* e *software* por uma rede digital. Ao lado disso, os principais requisitos da metrologia por trás da Indústria 4.0 são eficiência de tempo e custo (ANDONOV; CUNDEVA-BLAJER, 2018).

Baseado em Oks *et al.* (2022) e Majstorovic e Stojadinovic (2020), o CPS industrial é um componente fundamental, que abrange tanto sistemas de produção física quanto produtos “inteligentes” que fornecem dados relevantes. Os CPS possuem relevância nas várias áreas de foco da transformação digital, incluindo manutenção preditiva, planejamento de pedidos, administração de energia e manufatura, prevenção de desastres e controle de qualidade, entre outros. Seu uso efetivo nesses cenários destaca sua importância crítica na revolução industrial, atualmente em progresso.

Segundo Javaid *et al.* (2021), a era da Indústria 4.0 é um evento histórico importante da manufatura e automação industrial. À medida que a tecnologia digital e a conectividade se tornam onipresentes, as fábricas e corporações em todo o mundo estão passando por uma transformação sem precedentes. A Indústria 4.0 é um conceito que abrange a digitalização, automação e obtenção de dados em tempo real para otimizar a produção e as decisões tomadas. Esta evolução industrial envolve a fusão dos mundos físico e digital, com sistemas inteligentes, sensores avançados e análise de dados desempenhando um papel central.

Segundo Javaid *et al.* (2021), um CPS é um termo genérico usado para descrever as entidades combinadas de componentes físicos, como sensores, atuadores e sistemas de produção, e sistemas computacionais interconectados. Os CPS são caracterizados por sua capacidade de se adaptar a mudanças nas condições do ambiente e nas demandas do usuário, tornando-os altamente flexíveis.

Estes sistemas de manufatura são a espinha dorsal de uma fábrica inteligente, possibilitando a automação, a comunicação máquina a máquina (M2M) e a otimização de processos em todos os setores da cadeia produtiva. À medida que as empresas buscam alcançar maior eficiência e qualidade na produção, a compreensão aprofundada dos CPS se torna fundamental (JAVAID *et al.*, 2021).

Além disso, a Indústria 4.0 traz desafios adicionais, como a necessidade de transmitir com segurança informações de medição em longas distâncias, usar interfaces sem fio para conectar sensores de medição a redes de informação, priorizar a transmissão de informações com base na importância e nas mudanças dos dados de saída, aplicar tecnologias em nuvem para transmitir informações e processar dados em tempo real. A metrologia precisa ser atualizada nestes cenários para acompanhar a revolução da Indústria 4.0. Isso inclui, por exemplo, desenvolver métodos para verificar automaticamente a confiabilidade das informações de medição com base na variação da incerteza e para corrigir informações de medição se necessário (TAYMANOV; SAPOZHNIKOVA, 2020).

De acordo com Taymanov e Sapozhnikova (2022), a metrologia avançada desempenha, assim, um papel importante nos CPS, uma vez que envolve a busca de medições exatas de componentes e processos. Dado que as medições são executadas em tempo real, os dados de medição têm de ser utilizados para o controle de qualidade e, dessa forma, auxiliar na tomada de decisões em relação a produção e processos automatizados. Devido ao aumento do número de sensores em instalações industriais e sistemas de medição, é essencial garantir a confiabilidade das informações fornecidas por estes sensores.

Em muitos casos, a manutenção dos sensores é um dos maiores custos operacionais. A calibração ou verificação tradicionais foram e continuam a ser os métodos mais populares para garantir a confiabilidade das informações de medição. No entanto, a periodicidade de tais procedimentos idealmente tende a ser baixa para mitigar falhas metrológicas catastróficas que possam influenciar negativamente a produção ou até mesmo, em casos extremos, levar a acidentes graves. Portanto, é necessário realizar verificações automáticas mais frequentes da "saúde metrológica" dos sensores durante seu tempo de operação para reduzir os custos de manutenção (TAYMANOV; SAPOZHNIKOVA, 2022).

Na era digital, os dados se tornaram ativos, portanto, as avaliações quantitativas da qualidade dos dados serão mais demandadas. Isso implica a criação

de uma “metrologia para dados” para garantir as qualidades e a interoperabilidade dos mesmos. Também os algoritmos possuem um papel a desempenhar nesse refinamento de dados; métodos baseados em dados, como *machine learning*, estão se tornando mais populares. Nesse sentido, uma metrologia para algoritmos baseados em dados será imperativa para garantir a confiabilidade e a precisão (EICHSTÄDT; KEIDEL; TESCH, 2021).

Portanto, conforme Eichstädt, Keidel e Tesch (2021), a interoperabilidade dos dados é essencial, e é necessário ter uma representação comum de dados medidos e unidades em infraestruturas digitais. Diretrizes e padrões metrológicos também precisam ser legíveis por máquina para facilitar sua integração em certificados digitais e *software*. A transformação digital tem um impacto significativo em sistemas ciberfísicos e na *Internet* das Coisas (IoT). A integração de sensores digitais de baixo custo em sistemas ciberfísicos traz desafios metrológicos devido à sua precisão, segurança e confiabilidade questionáveis.

Se os laboratórios de calibração de referência e os laboratórios dos clientes puderem ser conectados usando o envio de dados em vez de transporte de sensores, todo o processo de calibração pode ser realizado *online* e em tempo real. Os dados são transferidos digitalmente de um lugar, laboratório de calibração de referência, para outro, calibração secundária ou laboratório do cliente, possibilidade esta que permite a calibração em vários locais sem trazer o padrão de referência e a unidade sob calibração para o mesmo local (ANDONOV; CUNDEVA-BLAJER, 2018).

Isso pode ser possível ao estabelecer um procedimento para produzir, transferir e controlar dados de calibração, que compara os valores padrão de referência com os valores do sensor a calibrar, sem comprometer a precisão e a rastreabilidade necessária para a calibração (ANDONOV; CUNDEVA-BLAJER, 2018).

Alguns laboratórios de calibração já desenvolveram uma série de sistemas de calibração automática, mas geralmente, visando um único tipo de sensor, e a quantidade de sensor padrão e de testes está relativamente fixa. Se precisar calibrar ou adicionar tipos ou modelos de sensor diversificados ao sistema, terá de adicionar novo processo ao sistema já existente, como *hardware* e/ou *software*, o que ficará mais complexo. Em muitos casos, eles devem reconstruir o sistema novamente, o que muitas vezes levará um tempo muito longo e maior custo devido à duplicação do trabalho entre cada reconstrução do sistema (HONG *et al.*, 2021).

De acordo com Andonov e Cundeva-Blajer (2019), a técnica *touchless calibration* envolve também técnicas avançadas de processamento de imagem tais como, mas não se limitando, a análise de padrões de contraste, detecção de bordas, e análise de textura. Essas técnicas permitem a identificação precisa dos pontos de interesse nos equipamentos, garantindo a alta precisão da calibração. É garantida, com relativa precisão por meio destas técnicas, a abordagem de *touchless calibration*, sendo uma forma inovadora e promissora de calibrar os sensores na indústria.

Esta permite uma calibração precisa, rápida e segura de equipamentos sensíveis, reduzindo o tempo e o custo da calibração. Por se tratar de uma técnica automatizada, ela reduz o tempo necessário para realizar a calibração em até 90 % em comparação com os métodos de calibração tradicionais. Da mesma forma, reduz o custo em 50 % porque não requer a compra de acessórios caros e não consome o material de calibração. Com a crescente demanda por sensores de medição mais precisos na indústria 4.0, a técnica de calibração *touchless* é uma solução promissora para a calibração de sensores em vários setores da indústria (ANDONOV, CUNDEVA-BLAJER, 2019).

A *Internet das Coisas* desempenha um papel fundamental na metrologia, auxiliando na calibração e teste de forma mais eficiente. A digitalização dos processos de fabricação também contribui para melhorar a confiabilidade, segurança e transparência dos dados medidos pelos sensores inteligentes. Essas tecnologias avançadas são cruciais na otimização da eficiência de produção, melhoria dos parâmetros de qualidade e asseguram conformidade com os padrões de qualidade industrial tanto nacionais como internacionais (VARSHNEY *et al.*, 2021).

No entanto, é necessário destacar que há preocupações sobre a proteção dos dados da calibração e medição. Portanto, a implementação destas tecnologias requer cuidados para salvaguardar a infraestrutura metrológica digital. Um dos principais objetivos é desenvolver um ambiente em que dados da medição poderão ser lidos, armazenados e enviados eletronicamente à distância de forma segura. Ao fazê-lo, a integração de IoT, digitalização, infraestrutura metrológica e de tecnologias de calibração são cruciais ao crescimento econômico, eficiência industrial e atendimento aos objetivos da Indústria 4.0 (VARSHNEY *et al.* 2021).

Segundo Taymanov e Sapozhnikova (2020), as propriedades complexas são definidas como grandezas multidimensionais (multiparamétricas) e o desenvolvimento de modelos de medição que relacionam todas as grandezas envolvidas em uma

medição. Isso envolve a determinação das etapas do ciclo de vida do objeto de medição e a seleção de parâmetros relevantes que afetam significativamente a grandeza de saída. É importante o monitoramento contínuo dessas grandezas multidimensionais durante a operação dos objetos de medição.

Existe a possibilidade de desenvolver “gêmeos digitais” (*digital twins*) com base nesses modelos de medição, que podem reproduzir objetos de medição em uma ampla gama de parâmetros e fatores de influência. Esses “gêmeos digitais” permitem depurar algoritmos e *software* de monitoramento e aplicar os modelos de medição correspondentes em sensores de medição ou sistemas de medição (TAYMANOV; SAPOZHNIKOVA, 2020).

Métodos de testes virtuais estão sendo desenvolvidos para avaliar a confiabilidade de sensores de medição e sistemas de medição multicanal (MMS). Esses testes analisam variações temporais das medições dos sensores e dos valores das grandezas influentes para identificar possíveis problemas e desenvolver duplicatas digitais para sistemas de monitoramento e alarme. A implementação deste sistema tem aplicações práticas em diversos campos, incluindo testes não destrutivos e sistemas de monitoramento para diferentes segmentos industriais (TAYMANOV; SAPOZHNIKOVA, 2020).

O MSC permite intervalos de calibração/verificação mais longos em comparação com sensores tradicionais, resultando em economia de custos. São necessários padrões de referência para garantir a eficiência e confiabilidade dos resultados das medições, e a documentação técnica deve incluir informações sobre a confiabilidade metrológica (TAYMANOV; SAPOZHNIKOVA, 2020).

Pela visão de Eichstädt, Keidel e Tesch (2021), a comunicação de dados medidos em redes IoT é comum em CPS, mas requer uma consideração maior do ponto de vista metrológico. Princípios de metrologia e métodos de análise de incerteza de medição precisam ser adaptados para lidar com os desafios de sistemas com IoT. Modelos baseados em dados, como *machine learning* e inteligência artificial, são comumente aplicados em CPS devido à complexidade dos dados, mas sua aplicabilidade e avaliação de incerteza de medição ainda estão em estágios iniciais de pesquisa.

A caracterização metrológica de redes IoT e CPS apresentam desafios na comunicação e avaliação de dados medidos. Padrões e métodos de codificação de metadados são necessários para garantir o uso não ambíguo dos dados por *machine*

learning e IA. Modelos de informação e uma abordagem harmonizada são necessários para garantir a disponibilidade de informações dos sensores em um formato legível por máquina (EICHSTÄDT; KEIDEL; TESCH, 2021).

Os estudos de Lee *et al.* (2022) enfatizam a necessidade de uma metodologia estruturada na aplicação dos sistemas de medição, argumentando que considerar as variabilidades nos parâmetros pode melhorar significativamente a exatidão e a confiabilidade em diferentes ambientes industriais.

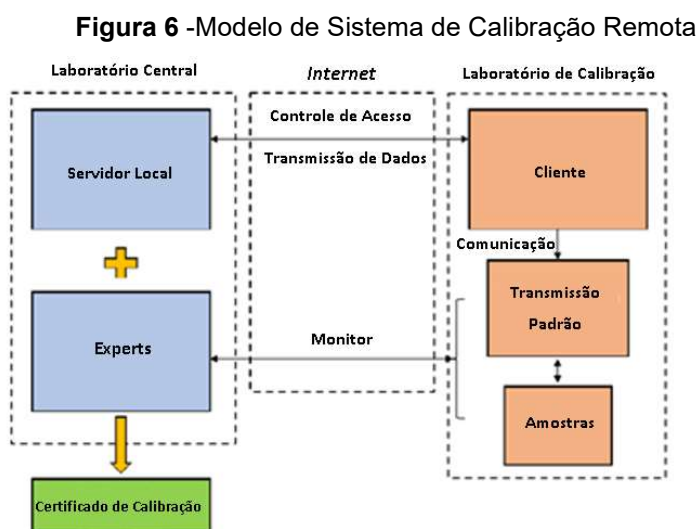
A adoção do método Calibração 4.0 enfrenta um obstáculo significativo devido à ausência de um padrão definido. Os fabricantes de equipamentos de medição adotam abordagens distintas ao incorporar diversas tecnologias envolvidas, resultando em discrepâncias que podem comprometer a interoperabilidade. Essa variedade nas implementações gera barreiras para a comunicação eficaz entre diferentes dispositivos existentes, dificultando a integração de processos e o compartilhamento de dados essenciais.

Segundo Wang *et al.* (2022b), o processo de calibração tradicional exige um especialista para estar realizando o procedimento, o que pode ser dispendioso e sujeito a erros sistemáticos e aleatórios. No entanto, os avanços nas interfaces de comunicação e nas capacidades de rede favorecem à implementação de sistemas de calibração remota.

De acordo com Wang *et al.* (2022b), os métodos tradicionais de detecção e reconhecimento de texto envolvem etapas como binarização, correção de inclinação e recorte de caracteres, seguidas da extração de características artificialmente projetadas, como Histograma de Gradientes Orientados (HOG) e mapas de características de Redes Neurais Convolucionais (CNN). No entanto, esses métodos são superados por abordagens baseadas em aprendizado profundo em termos de precisão e adaptabilidade, especialmente em cenários desafiadores ou complexos.

Wang *et al.* (2022b), mencionam em seu trabalho o uso da estrutura de rede *Convolutional Recurrent Neural Network* (CRNN), que combina uma Rede Neural Convolucional Profunda (DCNN) com uma Rede Neural Recorrente (RNN), obtendo resultados de reconhecimento satisfatórios. Em relação à arquitetura funcional geral, é descrito o uso de diferentes dispositivos de borda heterogêneos para facilitar a comunicação entre o laboratório de calibração e o laboratório central por meio de protocolos de comunicação em rede. A arquitetura funcional geral do serviço de calibração remota envolve o envio de sinais padrão físicos ou não físicos do

laboratório central para o laboratório da calibração, bem como o monitoramento e operação remotos do processo de calibração pelo laboratório central. A **Figura 6** apresenta um modelo de sistema de calibração remota.



Fonte: Adaptado de Wang *et al.* (2022b)

Segundo Wang *et al.* (2022b), a calibração de sensores utilizando circuitos de *hardware* é pode ser mais cara e apresentar maior incerteza na medição, o que as torna inadequadas para aplicações práticas na linha de produção. Com o avanço da tecnologia de computação, os algoritmos de *software* para compensação de erro de sensores emergiram como uma área de pesquisa relevante. Existem principalmente dois métodos: o método de matriz de tabela e o método de ajuste de curva, ambos podem demandar tempo significativo de trabalho e maior custo de processamento.

2.5 DIGITALIZAÇÃO DOS DADOS NA METROLOGIA

Conforme Barbosa *et al.* (2022), a definição da digitalização de dados na metrologia pode ser entendida como a aplicação de tecnologias digitais e métodos avançados de coleta e análise de dados gerados pelos dispositivos de medição. A digitalização na metrologia é considerada essencial no contexto da “fabricação inteligente” (*smart manufacturing*), que é um sistema de produção totalmente integrado capaz de responder em tempo real às necessidades das atividades industriais, redes de suprimentos e demandas do cliente.

De acordo com Barbosa *et al.* (2022), os principais componentes da digitalização na metrologia incluem:

- **Sensores Digitais:** A substituição ou complementação de instrumentos analógicos de medição por sensores digitais que coletam dados eletronicamente;
- **Plataformas de Computação:** O uso de computação de alto desempenho para processar grandes volumes de dados de medição e realizar análises complexas;
- **Tecnologia de Comunicação:** A integração de tecnologia de comunicação que permite a transmissão de dados em tempo real entre dispositivos de medição, sistemas de controle e bases de análise de dados;
- **Modelagem de Dados:** Aplicação de técnicas avançadas de modelagem e análise de dados para entender melhor os resultados das medições;
- **Automação:** Automação de processos de medição para reduzir erros humanos e melhorar a consistência das medições;
- **Integração com Sistemas de Produção:** Integração das medições digitais com sistemas de produção para permitir respostas em tempo real às mudanças nas operações industriais.

De acordo com os estudos de Barbosa *et al.* (2022), a digitalização na metrologia é essencial para enfrentar os desafios da medição em ambientes industriais e agilizar o processo de medição dos produtos, contribuindo para uma inserção mais rápida destes no mercado. Portanto, a digitalização na metrologia desempenha um papel importante na evolução da infraestrutura de qualidade digital para avaliação de conformidade, padronização de produtos, vigilância de mercado e inovação em contextos diversos de “fabricação inteligente”.

Segundo Javaid *et al.* (2021), a convergência do mundo físico e digital na indústria 4.0 está redefinindo a maneira como as empresas operam. A digitalização de processos e a interconexão de máquinas, dispositivos e sistemas promovem um vasto potencial de eficiência, produtividade e flexibilidade. A capacidade de coletar dados em tempo real permite uma tomada de decisão mais precisa e uma adaptação eficaz aos cenários em constantes modificações.

2.6 LIMITAÇÕES DAS TÉCNICAS CONVENCIONAIS DE CALIBRAÇÃO

Segundo Prato *et al.* (2021), as técnicas convencionais de calibração são amplamente aplicadas em várias indústrias para atender requisitos normativos e garantir a precisão e a confiabilidade de sensores de medição. No entanto, elas possuem algumas limitações que impactam negativamente na qualidade dos resultados obtidos. Uma das principais limitações das técnicas convencionais de calibração é a sua dependência de um modelo preciso e bem definido. Esses modelos muitas vezes não consideram as não-linearidades e todas as variáveis de influência

presentes nos processos industriais, o que pode levar a erros de medição significativos.

Essas técnicas convencionais de calibração podem ser influenciadas por fatores externos, como variações de temperatura, umidade, pressão atmosférica, altitude, vibração, entre outros, que podem afetar a precisão dos resultados obtidos. Essas variações podem ser difíceis de controlar em ambientes industriais, o que pode comprometer a eficácia das técnicas de calibração realizada em ambiente controlado. Outra limitação das técnicas convencionais de calibração, é a sua incapacidade de lidar com a heterogeneidade dos sensores utilizados na indústria, onde cada sensor pode apresentar características únicas que podem afetar a precisão da medição. As técnicas convencionais muitas vezes não são capazes de levar em conta essas diferenças, o que pode levar a erros de medição (PRATO *et al.*, 2021).

De acordo com Prato *et al.* (2021), as técnicas convencionais de calibração geralmente são realizadas em um ambiente controlado e estático, o que pode não refletir as condições reais de operação dos sensores na indústria. As condições reais podem ser muito mais dinâmicas e imprevisíveis, o que pode afetar a precisão das medições. Sendo assim, as técnicas convencionais de calibração muitas vezes requerem equipamentos e procedimentos complexos e caros, o que também pode limitar a sua utilização em muitos cenários industriais. A ausência de acessibilidade as técnicas de calibração adequadas podem levar a erros de medição, qual pode ocasionar consequências negativas para a qualidade dos produtos e a segurança dos processos.

2.7 BENEFÍCIOS E DESAFIOS DA CALIBRAÇÃO DIGITALIZADA

A indústria 4.0 é apresentada como a quarta revolução industrial com base na digitalização e integração de empresas por meio de soluções inteligentes e redes digitais. A evolução para a indústria 4.0 é impulsionada pela necessidade de eficiência de tempo e custo, fácil manuseio, execução em tempo real, automação e alta velocidade de processamento. No contexto da evolução dos processos de manufatura em direção à integração e autonomia, a rápida adaptação aos sistemas de segurança e a inclusão de dados extraídos dos processos são essenciais, uma vez que as informações metrológicas desempenham um grande papel nos processos em que são aplicadas (ANDONOV; CUNDEVA-BLAJER, 2019).

Cumprir os requisitos legais e normativos para calibração e rastreabilidade das medições é uma tarefa desafiadora e por vezes onerosa, que tradicionalmente envolve o transporte de sensores entre laboratórios e clientes. A calibração remota propõe o transporte de dados e não o transporte de sensor. No entanto, a implementação dessa solução requer o estabelecimento de um procedimento robusto para garantir a precisão e rastreabilidade dos dados, enfrentando desafios adicionais que devem ser abordados para assegurar a confiabilidade e conformidade do processo (ANDONOV; CUNDEVA-BLAJER, 2019).

Com base no estudo de Andonov e Cundeva-Blajer (2018), a calibração remota oferece vantagens significativas, como a permissão de que a calibração seja realizada de forma conveniente e eficiente, sem a necessidade de enviar o sensor de medição para um laboratório distante. Isso economiza tempo e reduz os custos associados ao transporte e manuseio dos equipamentos. Além disso, a calibração remota possibilita o acesso a especialistas em calibração em qualquer localização geográfica, eliminando as restrições de proximidade física. Isso é especialmente útil em cenários em que o equipamento de medição está localizado em áreas remotas ou de difícil acesso.

Por outro lado, a calibração remota também traz alguns desafios. Em primeiro lugar, como uma rede de comunicação aceitável, segura e estável, como uma rede da indústria 4.0, isto é crucial para transmitir os dados de calibração de maneira plena e segura. Uma interrupção no *link* da rede poderá afetar a qualidade e a integridade dos dados transmitidos, o que compromete a confiabilidade da calibração. Portanto, a calibração remota é restringida quanto à complexidade e aos tipos de sensores que podem ser calibrados. Certos sensores de medição de alto nível tecnológico pode precisar de uma investigação de calibração mais completa e precisa, o que não pode ser totalmente realizado remotamente (ANDONOV; CUNDEVA-BLAJER, 2019).

A escolha de um sistema de calibração remota envolve várias considerações importantes. Um dos fatores principais é como os dados de calibração serão transmitidos e convertidos. Essa conversão precisa apresentar uma incerteza substancialmente menor que a do processo de comparação da calibração, idealmente sendo 100 vezes menor que a incerteza da grandeza a ser calibrada. Dessa forma, a precisão do método de conversão não comprometerá a qualidade da calibração. (ANDONOV; CUNDEVA-BLAJER, 2020).

Existem sistemas capazes de monitorar e coletar dados em tempo real, além de armazenar informações de forma segura na nuvem. No entanto, a falta de padrões unificados de comunicação entre fabricantes é um desafio. Sistemas de comunicação como LoRa ou Sigfox, devido às suas propriedades de interoperabilidade, provavelmente prevalecerão no mercado. Além disso, o mercado já oferece sensores de alta qualidade e estabilidade, que exigem poucas calibrações, complementando a eficiência dos sistemas de monitoramento (ANDONOV; CUNDEVA-BLAJER, 2019).

Em alguns casos, as quantidades a serem calibradas são significativamente dependentes das condições ambientais, como pressão, temperatura e umidade. Portanto, é necessário fornecer dados de calibração que representem essas mesmas condições no laboratório do fabricante. Isso pode exigir o uso de dispositivos adicionais para garantir que as condições do ambiente sejam reproduzidas de maneira adequada (ANDONOV; CUNDEVA-BLAJER, 2020).

Segundo Andonov e Cundeva-Blajer (2020), no XXII Congresso Mundial da IMEKO, foi introduzido o conceito de Calibração sem Contato -TCal (*touchless calibration*) como uma ideia para simplificar o processo geral de calibração de sensores de medição na indústria manufatureira. O TCal é um método de calibração em que o padrão de medição e a unidade em teste (UTT) não estão na mesma sala, podendo estar distantes milhares de quilômetros um do outro.

Conforme Andonov e Cundeva-Blajer (2020), a tecnologia “calibração *touchless*” é provável que seja comum em um futuro próximo e, por outro lado, ganhará popularidade devido aos benefícios de segurança, eficiência e precisão. A técnica é baseada em abordagem ótica e visão computacional que permite a eliminação da necessidade de abordagem física para calibrar sensores, o que diminui o tempo, custo e riscos de dano.

Uma análise comparativa das incertezas da TCal com a calibração clássica foi realizada e demonstrou que na área de incertezas do tipo A, a TCal possui vantagem sobre a calibração clássica. Na área de incertezas do tipo B, a calibração clássica prevalece, mas isso não significa que o método TCal deva ser descartado, sendo necessário realizar um desenvolvimento mais específico nas áreas de sensores/transdutores para tornar as influências das incertezas do tipo B menores (ANDONOV; CUNDEVA-BLAJER, 2020).

De acordo com Andonov e Cundeva-Blajer (2020), a principal vantagem da TCal em relação à calibração clássica é sua abordagem inovadora à rastreabilidade,

o que a torna mais eficiente. Isso é especialmente relevante na indústria manufatureira, onde, por exemplo, a indústria química utiliza sensores sofisticados que realizam medições críticas em tempo real. Essa capacidade de monitorar continuamente os parâmetros de qualidade garante operações controladas sem interrupções, resultando em alta precisão e confiabilidade.

Portanto, todos esses sensores precisam ser verificados, monitorados e calibrados periodicamente. Os sensores de controle estão incorporados nos sistemas de produção, e essa é outra razão pela qual a produção fica parada quando precisa calibrá-los. Em suma, o conceito de calibração remota é constituído por um transmissor, uma rede e um receptor, com dispositivos baseados em sistemas ciberfísicos para transferência de dados de alta velocidade e processamento confiável. O processo de calibração é realizado no receptor, comparando os dados recebidos do transmissor com os dados do sensor a ser calibrado, permitindo ajustes, cálculos de erros e incertezas (ANDONOV; CUNDEVA-BLAJER, 2020).

No entanto, a aplicação das diretrizes dos fabricantes muitas vezes encontra obstáculos no ambiente real de uso, onde as condições processuais e ambientais podem variar significativamente em relação ao cenário controlado de um laboratório. Além disso, há regulamentações obrigatórias que definem especificidades para determinados setores.

Conforme aponta Stojadinovic, Majstorovic e Durakbasa (2020) a metrologia 4.0, envolve o uso avançado de tecnologias de automação, instrumentação e tecnologia da informação. Dentro de um sistema interconectado, há vários aspectos críticos a serem considerados. Entre eles estão a integridade, que garante que os dados recebidos pelo usuário final sejam exatamente os que foram medidos pelo sensor; a validação de dados, que confirma a origem dos dados de um sensor específico em uma data e hora determinada e a garantia de que não houve alteração desses dados durante a transmissão; e privacidade, que protege as informações de medição para que sejam acessadas somente por partes autorizadas.

2.8 GARANTIA DA QUALIDADE EM PROCESSOS INDUSTRIAIS

Segundo Garcia *et al.* (2023), um sistema de gestão da qualidade integra todos os processos, técnicas e estratégias para garantir que os produtos e serviços sejam fornecidos de acordo com os padrões definidos.

De acordo com Benitez, Ramirez e Vazquez (2019), com a implementação das normas ISO (*International Organization for Standardization*), houve um aumento na demanda de calibração dos sensores de medição utilizados nos processos industriais. Antes das normas ISO, nos Estados Unidos da América, as normas militares que eram utilizadas como referência metodológica pelos laboratórios de calibração, em alguns outros países também se referenciavam a estas.

No entanto, na década de 1990, algumas normas ISO tornaram-se referências obrigatórias para a certificação de sistemas de qualidade e acreditação de laboratórios de calibração e ensaio. Com o avanço da indústria 4.0, os sensores de medição são predominantemente eletrônicos e integrados ao controle de processo, muitas vezes transmitindo seus dados por meio de sinal sem fio. Para calibrar esses sensores eletrônicos ou digitais, são necessários padrões de referência digitais ou eletrônicos, substituindo os antigos padrões analógicos ou mecânicos utilizados no passado (BENITEZ; RAMIREZ; VAZQUEZ, 2019).

A norma ABNT NBR ISO 9001 (2015), estabelece no subitem 7.1.5, diretrizes referentes aos recursos de monitoramento e medição. Segundo esta norma, a organização tem a responsabilidade de identificar e disponibilizar os recursos necessários para garantir resultados válidos e confiáveis ao utilizar o monitoramento ou medição para verificar se os produtos e serviços estão em conformidade com os requisitos exigidos. Esta norma também estabelece diretrizes específicas para medição e monitoramento de processos de manufatura, conforme descrito no subitem 9.1.1.1, onde a organização deve realizar estudos de desempenho em todos os novos processos de manufatura (incluindo montagem ou sequenciamento) para verificar a capacidade do processo e prover entrada adicional para controle de processos, incluindo aqueles para características especiais.

De acordo com a norma ABNT NBR ISO 9001 (2015), para alguns processos de manufatura, pode não ser possível demonstrar conformidade do produto através da capacidade do processo. Para estes processos, métodos alternativos tais como conformidade de lote com a especificação, podem ser usados. A organização deve manter a capacidade do processo de manufatura ou resultados de desempenho conforme especificado por requisitos do processo de aprovação de itens do cliente.

A organização deve verificar que o diagrama de fluxo do processo, PFMEA (Análise de Modo e Efeito de Falha Potencial) e plano de controle se estão implementadas, incluindo:

- a) técnicas de medição;
- b) planos de amostragem;
- c) critérios de aceitação;
- d) registros dos valores de medição atual e/ou resultados de ensaios para dados variáveis;
- e) planos de reação e processo de escalonamento, quando os critérios de aceitação não são cumpridos.

A norma ABNT NBR ISO 14001 (2015), no subitem 9.1, aborda o tema do monitoramento, medição, análise e avaliação. De acordo com essa norma, a organização tem a responsabilidade de realizar o monitoramento, medição, análise e avaliação de seu desempenho ambiental. Além disso, ela deve determinar:

- a) o que precisa ser monitorado e medido;
- b) os métodos de monitoramento, medição, análise e avaliação, como aplicável, para assegurar resultados válidos;
- c) os critérios pelos quais a organização irá avaliar seu desempenho ambiental e indicadores apropriados;
- d) quando o monitoramento e a medição devem ser realizados;
- e) quando os resultados de monitoramento e medição devem ser analisados e avaliados.

Esta norma também informa que a organização deve assegurar que o equipamento de monitoramento e medição, calibrado ou verificado, seja usado e mantido em conformidade. E que também a organização deve avaliar seu desempenho ambiental e eficácia do sistema de gestão ambiental.

A organização deve comunicar interna e externamente as informações pertinentes sobre o desempenho ambiental, como identificado em seu(s) processo(s) de comunicação e como requerido por seus requisitos legais e outros requisitos.

A organização deve reter informação documentada apropriada como evidência de monitoramento, medição, análise e resultados da avaliação. Convencionalmente há algumas situações onde a calibração dos instrumentos de medição é requerida:

- a) Instrumento de medição novo (nunca calibrado);
- b) Instrumento com uma carga horária de uso excessiva;
- c) Instrumento submetido a algum choque mecânico, *stress* mecânico, anomalia, ou agentes contaminantes de processo;
- d) Instrumento submetido a condições de uso fora da especificação do fabricante;
- e) Instrumento retornado de reparo;
- f) Instrumento apresentando deriva, histerese, medições não confiáveis/típicas;
- g) Instrumento com periodicidade de calibração programada.

A norma ABNT NBR ISO 10012 (2004), determina no subitem 5.2.2 que a organização deve estabelecer e manter procedimentos documentados para calibração de equipamentos de medição e certificar-se de que o equipamento é calibrado ou verificado a intervalos especificados ou antes de cada uso, se necessário.

A norma ABNT NBR ISO/IEC 17025 (2017), descreve no subitem 5.4.6 que a instituição deve ter procedimentos documentados para a calibração e verificação de equipamentos de medição e outros equipamentos relevantes, e deve garantir que esses procedimentos sejam aplicados de maneira consistente, e no subitem 5.6.2 informa que o laboratório deve estabelecer e manter procedimentos documentados para a determinação da rastreabilidade da medição. Esses procedimentos devem incluir a calibração de equipamentos de medição e a utilização de materiais de referência certificados.

A norma ABNT NBR ISO 13485 (2016), descreve no subitem 7.6 que a organização deve estabelecer e manter procedimentos para controlar e calibrar equipamentos de monitoramento e medição e manter registros da calibração.

A norma AS9100D (2016), descreve no subitem 8.2.4 que a organização deve manter procedimentos para controlar e calibrar o equipamento de monitoramento e medição usado para verificar a conformidade com os requisitos do produto e no subitem 8.5.1 informa que a organização deve usar técnicas apropriadas de CEP (Controle Estatístico de Processo), incluindo a calibração do equipamento de medição.

A norma ISO/IEC 80079-34 -Parte 34 (2020), especifica no subitem 6.1.2 que a organização deve estabelecer e manter procedimentos para controlar e calibrar o equipamento de monitoramento e medição usado para verificar a conformidade com os requisitos do produto.

Com base nestas informações, verifica-se que a garantia da qualidade, em processos industriais, é apoiada por diversas normas que fazem referências a atividade de calibração dos sensores de medição. Esta atividade teve uma evolução significativa com o passar dos anos e em especial atenção das normas ISO, que atualmente desempenham uma referência mundial neste quesito, que abrangem desde certificação de sistemas de gestão da qualidade até acreditação de laboratórios de calibração e ensaio.

No cenário da quarta revolução industrial, é notória a transição de sensores convencionais analógicos para sensores “*smart*”, como sensores digitais conectados ao processo e a rede de controle e gestão da indústria. Mas, mesmo estes sensores possuindo algum grau de evolução tecnológica, as normas não isentam a importância da calibração periódica em conformidade com os padrões rastreáveis ao Sistema Internacional de Unidade de Medidas.

Outrossim, as normas de qualidade compulsoriamente determinam diretrizes específicas para a prática de controle e medição, validando resultados em conformidade aos requisitos estipulados. Estas normas reforçam a importância de garantir a confiabilidade e qualidade dos resultados de medição em consonância com as tecnologias habilitadoras da indústria 4.0.

2.9 VISÃO COMPUTACIONAL NA METROLOGIA

Na pesquisa de Belan, Araújo e Librantz (2019), são ressaltados os problemas comuns encontrados em laboratórios de metrologia, sendo a repetibilidade dos resultados durante os processos de calibração, a produtividade dos técnicos e erros humanos. Em alguns casos, o resultado apresentado em um certificado emitido pode diferir da medição realizada durante a calibração devido a erros na transcrição manual dos dados. O nível de precisão do processo de medição pode ser significativamente afetado quando o sensor ou dispositivo a ser calibrado não possui interfaces de comunicação de dados.

A presença de erros humanos em leituras e transcrições de dados pode ser recorrente em processos manuais. Para mitigar esses erros, foi proposta a calibração automática de sensores de medição utilizando técnicas de visão computacional. Essa automação se destaca por oferecer maior eficiência, produtividade e qualidade nos resultados. A medição assistida por visão computacional proporciona altos níveis de repetibilidade e eficiência, além de reduzir significativamente os custos em comparação com os métodos tradicionais. Além disso, a automação elimina os erros humanos comuns relacionados à leitura e registro de dados (BELAN; ARAÚJO; LIBRANTZ, 2019).

De acordo com Wang (2022), os sensores de medição analógicos são comumente usados em processos industriais devido à sua robustez, estruturas confiáveis e custos baixos. A desvantagem dos sensores analógicos é que tradicionalmente a leitura é feita apenas por humanos e não está diretamente conectada a um sistema digital por falta de uma interface digital embarcada. A leitura manual dos dados desses sensores e a sua transcrição para um banco de dados é inconveniente e ineficaz.

Uma solução para este problema é que técnicas de visão computacional têm sido aplicadas para reconhecer automaticamente a leitura de vários tipos de sensores analógicos. As técnicas envolvem a segmentação do ponteiro, a extração das marcas

da escala e a obtenção da posição do ponteiro para fazer a leitura do sensor. No entanto, a maioria desses métodos são feitos por câmeras de varredura de área, o que limita a frequência operacional e torna a identificação dinâmica de ponteiros mais difícil (WANG, 2022).

Com base na visão de Wang (2022), o uso de câmeras de varredura linear melhora a precisão das posições do ponteiro e permite a identificação dinâmica da leitura. Esse método é recomendado devido a superação da influência das marcas da escala. Por meio deste, pode-se observar o movimento dinâmico na imagem capturada, tornando visível a monitoração dinâmica em processos industriais. O método inclui a captura e armazenamento de imagens do ponteiro em posições de zero da escala e escala máxima em um banco de dados. A localização do centróide é a referência no algoritmo de reconhecimento do ponteiro para calcular as coordenadas do ponteiro nas posições de escala zero e escala máxima. Com essas coordenadas, pode-se obter a leitura do sensor.

Baseado em Li e Gao (2021), a *Internet* das Coisas (IoT) refere-se a um paradigma de rede ubíqua que conecta vários dispositivos/sensores para a realização de um sensoriamento massivo atrelado a *big data* para aplicações como cidades inteligentes, incluindo casas inteligentes, sistemas de transporte inteligentes e monitoramento ambiental. Um exemplo típico é o sistema de leitura automática de medidores (AMR). Ele permite a coleta automática de dados de consumo, diagnóstico e status dos dispositivos de medição, que são então enviados a um banco de dados central para faturamento, solução de problemas e análise de desempenho.

Atualmente, apesar de muitos países terem adotado o sistema AMR para faturamento de eletricidade, o faturamento de água ainda depende de medidores de água mecânicos tradicionais, que exigem a transcrição manual por um operador humano, resultando em baixa eficiência, erros inevitáveis e alto custo de mão de obra (LI; GAO, 2021).

Trabalhos pioneiros relataram a substituição de medidores de água mecânicos convencionais por medidores eletrônicos inteligentes, cujo custo se torna infelizmente o principal obstáculo que impede sua implantação em larga escala. Enquanto isso, o processamento digital de sinais tem evoluído rapidamente nas últimas duas décadas, sendo que o processamento digital de imagens desempenha um papel importante em muitas áreas de pesquisa. O processamento digital de imagens inclui análise de sinais em várias escalas, classificação, extração de

características, projeção e reconhecimento de padrões. Entre essas técnicas, o reconhecimento de padrões é frequentemente adotado para extrair informações significativas de imagens digitais, o que leva à sua aplicação popular na análise de imagens (LI; GAO, 2021).

Segundo Wang, Chen e Wang (2021), existem duas categorias principais de pesquisas no campo de leituras automáticas de sensores. Uma delas é o estudo de sensores inteligentes que realizam a leitura automática por meio de *hardware* otimizado, porém, o custo dessa otimização é elevado. A outra categoria busca simplificar as etapas primárias da operação manual por meio de abordagens mais simplificadas. Existem algoritmos para realizar a leitura de sensores com ponteiro, mas comumente utilizam métodos de binarização ou detecção de objetos.

Na visão de Li e Jia (2022), os medidores de ponteiro são amplamente utilizados em monitoramento e aquisição de dados devido à sua precisão de leitura, baixo custo de fabricação, estrutura simples e manutenção fácil. No entanto, a leitura manual resulta em detecções incorretas devido a interferências de leitura subjetivas e ambientes adversos. Com o desenvolvimento da tecnologia de inteligência artificial, a técnica *deep learning* é aplicada em visão computacional com a vantagem da precisão e capacidade geral mais aprimorada que os métodos tradicionais.

2.10 CERTIFICADO DIGITAL DE CALIBRAÇÃO

Atualmente, os certificados de calibração são normalmente fornecidos em formato físico ou digital em arquivo PDF (*Portable Document Format*), o que torna o processo de análise manual e com menor eficiência.

Assim, em processos de produção altamente sincronizados, onde os dados circulam de forma independente, a análise convencional manual de um certificado particular, que depende de documentos em formatos não uniformes e que não podem ser incorporados automaticamente aos fluxos de dados existentes, destaca-se como um obstáculo a eficiência do sistema de gestão da cadeia produtiva.

Os serviços de metrologia precisam se adaptar às novas exigências impostas pelas cadeias de produção avançadas. Além disso, as mudanças digitais que diferentes setores da sociedade têm enfrentado elevam a expectativa de eficácia e rapidez na execução desses serviços. Assim, é essencial alinhar esses elementos da prestação de serviços metrológicos às novas tendências do setor industrial e às

expectativas da sociedade, estudos como os de Nazaré e Martins (2019), Cardoso (2018) e Nummiliuikki *et al.* (2023) chamam esse conceito de Certificado 4.0.

Conforme Nazarre e Martins (2019), o certificado de calibração desempenha um papel fundamental na garantia da qualidade e confiabilidade dos dados de medição. Com a digitalização do certificado, é possível obter resultados mais facilmente integráveis a outros sistemas. Os dados são entregues por meio de um aplicativo *web*, acessível em dispositivos móveis e *desktop*, possibilitando a integração automatizada dos resultados e conclusões das análises com fluxos de dados existentes, por meio de API (Interface de Programação de Aplicativos). Essa abordagem cria um canal direto de dados digitais entre o laboratório responsável pela calibração do sistema de gestão de qualidade e o processo produtivo do usuário final.

Dessa forma, as informações relevantes são disponibilizadas aos sistemas que fazem parte da cadeia de integração, otimizando todo o fluxo e gerando maior valor para o cliente que contrata a calibração. Essas características ressaltam a importância do certificado de calibração e como sua digitalização permite um processo mais ágil e integrado, contribuindo para a eficiência e confiabilidade nos processos industriais (NAZARRE; MARTINS, 2019).

De acordo com Nummiliuikki *et al.* (2021), a transformação digital na Indústria 4.0 está impulsionando a necessidade de dados digitais na metrologia. Os certificados digitais de calibração surgem como uma solução para melhorar a eficiência e integridade dos dados. Por meio da digitalização, é possível garantir a comunicação automatizada dos dados dos certificados, mitigando erros humanos e agilizando os processos de calibração. No entanto, a digitalização completa requer um processo automatizado de calibração, integrando os sistemas dos remetentes e destinatários.

Baseado nos estudos de Mustapää *et al.* (2020), os certificados digitais de calibração são importantes na área da metrologia, principalmente com a segmentação da *Internet* das Coisas e a ampla utilização de redes colaborativas de sensores. Com a crescente utilização de dispositivos conectados à *internet* e o compartilhamento de dados entre esses dispositivos, há uma preocupação em relação à qualidade dos dados coletados, o que acaba gerando incertezas nos resultados das medições realizadas. Para resolver esse problema, os autores propuseram o uso de Certificados Digitais de Calibração, que são documentos em formato digital contendo informações sobre as calibrações realizadas nos sensores.

Esses certificados são submetidos a uma análise automática para validação da qualidade e confiabilidade dos dados obtidos, além de proporcionar rastreabilidade ao Sistema Internacional de Unidades de Medidas, com isso é possível garantir que os dados de medição sejam confiáveis e estejam em conformidade com os padrões de calibração, o que melhora a precisão das análises, tomadas de decisão e a segurança nas aplicações industriais que dependem desses dados (MUSTAPÄÄ *et al.*, 2020).

Benitez e Benitez Jr. (2019), alegam que desde o início dos serviços de calibração, os certificados de calibração devem conter informações sobre o estado do sensor, o tipo e o método adotado para calibrá-lo. Além disso, outros requisitos são incluídos no certificado, como a incerteza de medição e a evidência dos testes de proficiência que o laboratório deve fornecer. E esses certificados são documentos importantes que validam a precisão e a conformidade dos sensores de medição com os padrões metrológicos, o que os tornam adequados para qualquer aplicação crítica onde a precisão seja requerida.

Assim, o *framework* para calibração 4.0 proposto por este trabalho, contempla a geração do certificado digital na etapa final do processo de calibração, e com isso não apenas contribui com a eficiência do processo e segurança dos dados, mas também facilitam a documentação e a certificação permitida para manter os padrões de qualidade e conformidade no sistema de manufatura.

2.11 METROLOGIA 4.0

De acordo com Garcia *et al.* (2023), recentemente surgiu um novo conceito de gestão, denominado de gestão 4.0, em resposta às demandas da quarta revolução industrial, a transformação digital. Seu princípio é baseado no ambiente digital, fundindo as demais áreas de modo que todos os dados possam ser monitorados e analisados em tempo real.

O uso de IA, automação e a digitalização dos certificados de calibração podem reduzir significativamente o risco em comparação com o processo de calibração convencional, uma vez que a análise seja realizada separadamente por máquinas, eliminando os principais fatores associados a falha humana. No entanto, a calibração 4.0 apresenta um cuidado diferenciado, dependendo do transmissor e receptor, processador, sensor e atuador, confiabilidade e integridade da rede de comunicação (GARCIA *et al.*, 2023).

Com a integração de sistemas de calibração, a metrologia industrial começou a se adequar aos conceitos da quarta revolução industrial, caracterizada pela digitalização e interconexão dos dispositivos e processos (TAYMANOV; SAPOZHNIKOVA, 2020). A Metrologia 4.0 é uma nova era onde a calibração e a medição são integradas em tempo real aos sistemas de produção, permitindo uma resposta rápida e adaptativa às variações do processo (ANDONOV; CUNDEVA-BLAJER, 2018; 2019).

Segundo Benitez e Benitez Jr. (2019), com o avanço tecnológico na eletrônica, os sensores se tornaram mais sofisticados e precisos, onde com o uso de computadores e *softwares* dedicados para calibração desenvolveram novos métodos de calibração. A Indústria 4.0 inclui uma ampla variedade de sensores para monitorar diferentes parâmetros ao longo dos processos ou para medir especificações de qualidade, sendo a maioria desses sensores integrados eletronicamente ao sistema de controle do processo. A Metrologia 4.0 proporciona uma nova forma de serviços de calibração, aplicando IA e IoT.

A Metrologia 4.0 é impulsionada por avanços tecnológicos, como a calibração sem contato e métodos de autocalibração, que oferecem maior eficiência e redução de custos (ANDONOV, CUNDEVA-BLAJER, 2020). Além disso, a aplicação de algoritmos de aprendizado de máquina e redes neurais na calibração de sensores está estabelecendo novos padrões de precisão e confiabilidade (BENITEZ *et al.* 2019; CLARK, 2018).

A sustentabilidade também se tornou uma preocupação central na metrologia industrial, com a norma ISO 14001(2015) enfatizando a importância da gestão ambiental nos processos de medição. A Metrologia 4.0, portanto, não apenas busca eficiência e precisão, mas também a minimização do impacto ambiental das atividades de medição.

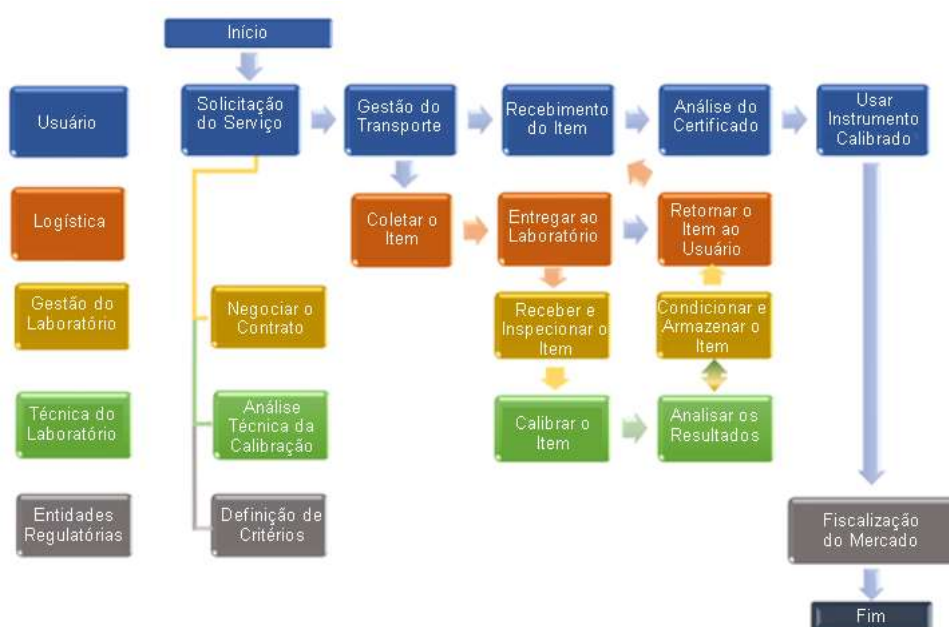
Existem significativos desafios para a metrologia 4.0, como a necessidade de uma segurança cibernética robusta e a integração de sistemas ligados com as novas tecnologias habilitadoras (SHAH *et al.*, 2019). No entanto, esta oferece oportunidades significativas para melhorar a rastreabilidade, a eficiência e a qualidade dos produtos em diversos setores, incluindo saúde (ABNT NBR ISO 13485, 2016), aviação (ABNT NBR AS9100D, 2016) e automotivo (IATF 16949, 2016).

Como resultado de uma evolução contínua, a metrologia 4.0 é impulsionada pela inovação e pela necessidade de atender aos padrões de qualidade e eficiência

cada vez mais elevados. Esta representa uma convergência entre a metrologia e as tecnologias digitais, oferecendo um caminho promissor para o futuro da produção industrial (EICHSTÄDT *et al.*, 2021).

Segundo Garcia *et al.* (2023), a **Figura 7** apresenta uma visão geral do processo de calibração contemporâneo, que vai desde as solicitações dos usuários até a vigilância de mercado pelos órgãos reguladores. Exceto pela etapa "solicitação de calibração", não há uma inter-relação direta entre as partes do processo. Em geral, não existem múltiplas conexões entre eles para a execução do fluxo, o que significa que cada parte do processo realiza sua tarefa de forma independente.

Figura 7 – Macrofluxo do processo de calibração contemporânea



Fonte: Adaptado de Garcia *et al.* (2023)

Segundo Garcia *et al.* (2023), a **Figura 8** apresenta um diagrama de relacionamento que analisa a inter-relação entre os diferentes elementos do conceito da Metrologia 4.0.

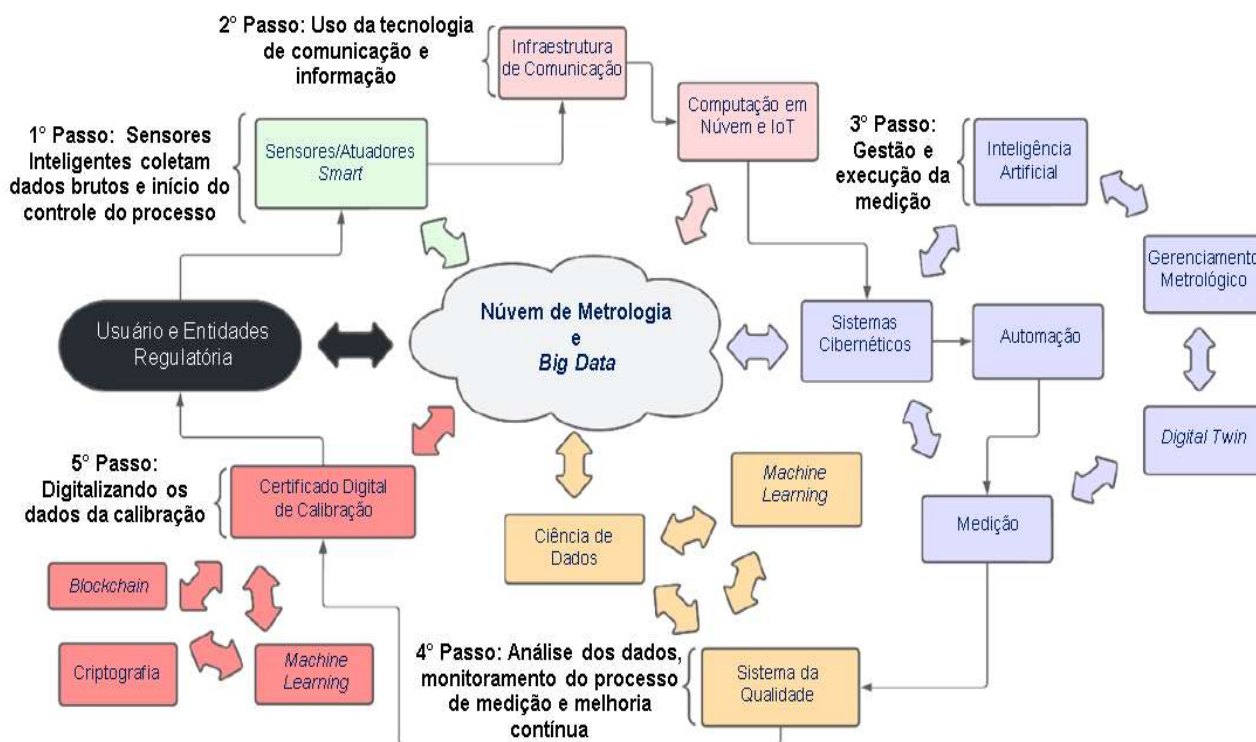
Na 1ª etapa, os sensores/atuadores inteligentes coletam os dados brutos e iniciam o processo de medição. Na 2ª etapa, são utilizadas tecnologias de informação e comunicação (computação em nuvem, *Internet* das Coisas - IoT).

Na 3ª etapa, a gestão e execução da medição ocorrem por meio de sistemas ciberfísicos e automação, gerando a medição que pode ter uma ação direta ou paralela da IA com o *Digital Twin*. Na 4ª etapa, o sistema de gestão da qualidade analisa os dados e monitora o processo, melhorando continuamente por meio de ciência de dados e aprendizado de máquina.

Na 5ª etapa, os Certificados de Calibração Digitais - DCC são gerados usando *blockchain*, criptografia e uma linguagem de marcação com regras para

formatação de documentos (para que humanos e máquinas possam lê-los facilmente), por exemplo, Linguagem de Marcação Extensível - XML. Essas ações possibilitam a proteção de dados e a automação da análise de certificados.

Figura 8 – Fluxo da Metrologia 4.0



Fonte: Adaptado de Garcia *et al.* (2023)

Segundo a Presys (s.d.), no futuro, espera-se que o papel do técnico de instrumentação e metrologia, evolua para além da realização de calibrações, assumindo responsabilidades mais externas para análise do que para operações. Esta mudança deverá potencializar a eficiência, minimizar as falhas e elevar o padrão de qualidade dos serviços prestados. Profissionais que sempre se destacam no ambiente fabril moderno deverão se empenhar no aprimoramento de suas habilidades e competências. A metrologia 4.0 caracteriza-se pela completa autonomia e, paradoxalmente, pela interconexão entre os sensores de medição, os padrões de referência, os sistemas de gerenciamento e os sistemas de planejamento de recursos empresariais (ERP) usados pelos clientes. Essa conectividade dos calibradores à rede permite que eles comuniquem os dados de medição em tempo real, ressaltando a importância crescente da interação entre o *hardware* e o *software*. O Controle Estatístico de Processos beneficia essa integração, possibilitando a visualização de gráficos e a análise de desempenho.

Fora isso, o processo é aprimorado com a coleta automática de todos os dados do sensor que está sendo calibrado, resultando em uma entrada manual zero e, portanto, eliminando a possibilidade de erro. As plataformas a serem operadas tanto em redes locais quanto em *intranets*, podem proporcionar uma maior facilidade operacional. Para uma gestão eficaz, pode haver um sistema multiusuário que registra os operadores das calibrações, garantindo a integridade dos dados e a atribuição clara das atividades realizadas, essencial para a rastreabilidade e a conformidade nos processos industriais (PRESYS, s.d.).

Portanto, sugere-se que a Metrologia 4.0 possui um potencial de promover uma sinergia inigualável entre *hardware* e *software*, juntamente com o desenvolvimento pessoal, melhorando a confiabilidade e eficácia da instrumentação e, por extensão, na indústria como um todo.

2.12 CALIBRAÇÃO 4.0

De acordo com Garcia *et al.* (2023), a **Figura 9** apresenta um modelo conceitual de um macrofluxo de um sistema de calibração 4.0 para radiação ionizante para kerma do ar em raios-X.

Figura 9 – Possível fluxograma da calibração 4.0



Fonte: Adaptado de Garcia *et al.* (2023)

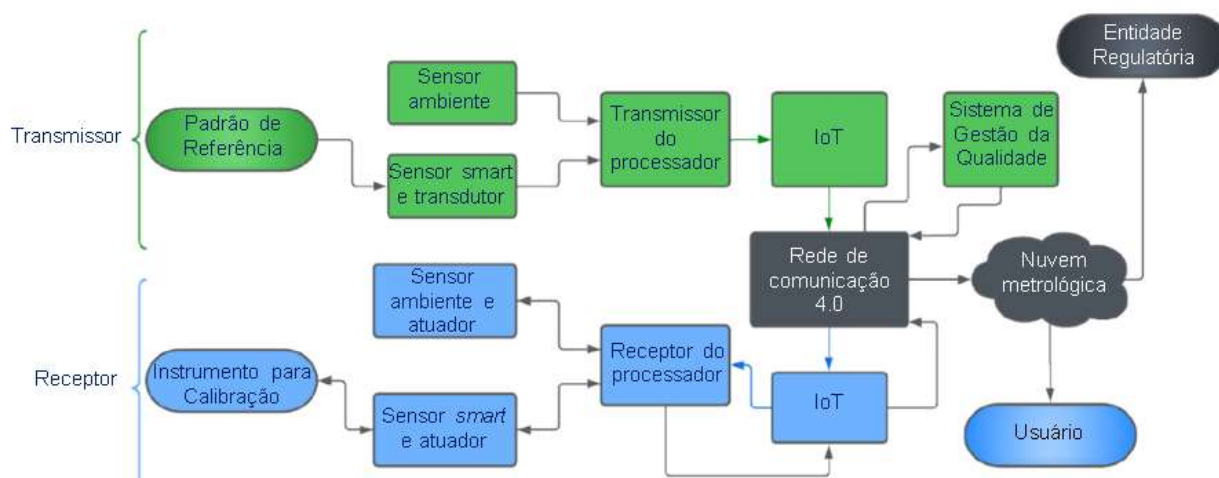
Segundo Garcia *et al.* (2023), a **Figura 10** ilustra o macrofluxo do processo de calibração 4.0. Esse sistema é estruturado por três partes principais: o transmissor

(laboratório de calibração), uma rede de comunicação 4.0 e o receptor (equipamento a ser calibrado). Em todas essas partes, dispositivos inteligentes permitem a transferência de dados em alta velocidade, confiabilidade e integridade.

O processo pode ser delineado conforme segue:

- 1) O padrão de referência (no caso de um medidor de ionização ou sensor de estado sólido) é acoplado a um sensor/transdutor inteligente, que mede o valor de referência, o transforma em um sinal elétrico e o envia para o processador do transmissor;
- 2) O sensor ambiental mede as condições ambientais e envia para o processador do transmissor;
- 3) O processador do transmissor sincroniza os sinais elétricos dos sensores e os processa em uma mensagem de calibração de radiofrequência;
- 4) O dispositivo IoT do laboratório envia as informações usando a rede de comunicação 4.0 para o dispositivo IoT do receptor;
- 5) O processador do receptor verifica os dados em busca de erros e os divide em dados de calibração e condições ambientais. Os dados são transformados em um formato que permitirá a comparação com os dados obtidos pelo equipamento a ser calibrado. Ao mesmo tempo, o processador converte os dados ambientais em um formato apropriado que será enviado como sinal para o sensor de atuador ambiental;
- 6) O sensor de atuação ambiental ajusta e mantém as condições ambientais nas mesmas condições do laboratório;
- 7) O sensor e o atuador inteligentes medem os valores do equipamento a ser calibrado e produzem um sinal elétrico correspondente;
- 8) Esse sinal é submetido ao processador do receptor e comparado com os dados do padrão de referência. A diferença entre os dados é registrada e processada para calcular os erros e a incerteza do instrumento. Se necessário, o sensor e o atuador inteligentes ajustam alguns parâmetros do equipamento a ser calibrado solicitado pelo processador do receptor;
- 9) Em seguida, os dados processados são enviados para o sistema de gestão da qualidade do laboratório, que analisa e gera o certificado de calibração digital.
- 10) Ao final do processo, o laboratório envia o certificado digital de calibração para a nuvem metrológica.

Figura 10 - Fluxograma do modelo conceitual de calibração 4.0 para Kerma Ar



Fonte: Adaptado de Garcia *et al.* (2023)

2.13 MÉTODOS AVANÇADOS DE CALIBRAÇÃO NA INDÚSTRIA

Na indústria, diversas técnicas de calibração são empregadas para assegurar a precisão e confiabilidade dos sensores de medição. Contudo, essas abordagens enfrentam limitações que podem comprometer a qualidade dos resultados. Uma limitação central das técnicas convencionais é a dependência de modelos matemáticos mais precisos, muitas vezes incapazes de considerar não-linearidades e incertezas nos sensores, resultando em erros significativos. Adicionalmente, fatores externos, como variações de temperatura, pressão e umidade, podem afetar a precisão, sendo desafiadores de controlar em ambientes industriais.

No trabalho de Šimić, Ambruš e Bilas (2023), são utilizadas de redes neurais convolucionais 1D para processar e classificar dados de sensores de indução de pulso. Essa abordagem de aprendizado de máquina destaca-se por sua capacidade de extrair características significativas dos dados do sensor, utilizando-as para distinguir entre objetos metálicos comuns e ameaças potenciais, como minas terrestres. A calibração do sistema é realizada através de uma metodologia que inclui ajuste de hiperparâmetros e a validação cruzada, visando otimizar o desempenho do modelo em diferentes condições ambientais e garantir a confiabilidade das classificações realizadas pelo detector.

Este método não apenas melhora a eficiência e a precisão na identificação, mas também oferece uma estrutura robusta que pode ser adaptada para outras aplicações que requerem análise precisa de dados sensoriais complexos. A flexibilidade do modelo e a metodologia de calibração facilitam sua aplicação em campos variados, como inspeção industrial, segurança e diagnósticos médicos (ŠIMIĆ; AMBRUŠ; BILAS, 2023).

O método de calibração baseado em rede é uma técnica utilizada na indústria para melhorar a precisão dos sensores nos processos produtivos. Este método inclui a criação de uma nova rede de sensores de referência em locais estratégicos para atualizar os dados corrigidos dos sensores de processo de medição. Essa abordagem, devido à correção em tempo real dos resultados medidos, é mais confiável em comparação com a verificação *offline*, proporcionando maior precisão, melhor tomada de decisão e é aplicável a vários tipos de sensores, como distância, temperatura ou pressão. Este método é amplamente utilizado nas indústrias automobilística, aeronáutica e eletrônica (ENGEL, 2023).

Como vantagem, este método de calibração pode ser realizado em condições de campo, eliminando a necessidade de interromper a produção para realizar o procedimento. Além disso, essa técnica pode ser aplicada para calibrar sensores complexos, em que é difícil ou impossível obter uma medição de referência exata e direta (ENGEL, 2023).

Conforme Wang *et al.* (2022b), o método de calibração de campo, é uma técnica que pode ser utilizada para calibrar sensores de medição em situações de uso real, em vez de em um ambiente controlado de laboratório. Este método é particularmente útil em processos industriais, onde o ambiente de operação pode variar de acordo com as condições de produção. Este método utiliza uma abordagem de calibração múltipla, que é capaz de calibrar simultaneamente várias fontes de erros de medição. A calibração é realizada *online*, o que significa que os parâmetros de calibração são atualizados continuamente em tempo real.

O método usa um algoritmo de otimização para estimar os parâmetros de calibração a partir dos dados brutos dos sensores. Com base nos resultados dos testes realizados em um ambiente industrial, foi demonstrado que o método de calibração múltipla é capaz de melhorar significativamente a precisão das medições. A precisão das medições é avaliada em termos de erro de posição e orientação, e os resultados dos testes mostraram que o método de calibração é capaz de reduzir significativamente esses erros em comparação com a calibração convencional (WANG *et al.*, 2022b).

No estudo de Gabrielsson e Trygg (2006), é apresentada a calibração multivariável por meio de uma abordagem estatística que visa relacionar várias variáveis independentes (preditoras) a uma variável dependente (resposta) em um conjunto de dados de calibração a fim de construir modelos matemáticos que permitam prever valores desconhecidos de uma ou mais variáveis de interesse a partir das outras variáveis medidas. Esse método é especialmente útil em situações em que a variável resposta é afetada por vários fatores simultaneamente. Além disso, pode-se lidar com dados altamente correlacionados, permitindo a inclusão de informações redundantes e, portanto, melhorando a precisão do modelo de calibração.

De acordo com Yan *et al.* (2022), na calibração por comparação direta, o objetivo é obter uma estimativa precisa da grandeza calibrada, com a menor quantidade possível de erros. Esse método envolve a comparação de um dispositivo a ser calibrado com um dispositivo de referência. Isso é feito aplicando a mesma

entrada a ambos os dispositivos e comparando as saídas. A diferença entre as saídas é utilizada para calibrar o dispositivo em teste.

Segundo Monteiro, Feital e Pinto (2021), a calibração multivariável é um método utilizado para desenvolver modelos que relacionam múltiplas variáveis medidas a uma variável de interesse. Na indústria, essa técnica é comumente utilizada para a calibração de sensores de medição que requerem o monitoramento simultâneo de diversas variáveis. Por meio da calibração multivariável, é possível melhorar a precisão e a confiabilidade desses sensores, além de permitir a detecção de possíveis desvios em tempo hábil.

Na visão de Stavrinides e Karatza (2023), o método de calibração por substituição é amplamente utilizado na indústria para verificar a precisão dos sensores de medição. Esse método é baseado em comparar as leituras de um sensor de medição desconhecido com as leituras de um sensor de referência conhecido, sendo esse mais preciso. A calibração por substituição é realizada colocando o sensor desconhecido e o sensor de referência no mesmo processo, de forma que o mesmo mensurando seja detectado por ambos.

Ao comparar as leituras dos dois sensores, a precisão do sensor desconhecido é determinada. A calibração por substituição é uma técnica que pode ser usada para calibrar vários tipos de sensores de medição, incluindo termômetros, pressostatos, manômetros, indicadores de nível, medidores de vazão, entre outros. O processo de calibração pode ser automatizado ou realizado manualmente, dependendo do sensor e dos requisitos do usuário (STAVRINIDES; KARATZA, 2023).

No trabalho de Vajs, Drajić e Cica (2023), é descrito um método de calibração baseada em modelo que usa dados coletados por uma rede de sensores híbridos para monitorar a qualidade do ar. O objetivo do método é estender a calibração de um sensor de referência a outros sensores na rede, melhorando assim a precisão das medições. O método de calibração baseada em modelo, parte da premissa de que as medições dos sensores possuem uma relação linear com o que está sendo medido. Essa relação pode ser modelada matematicamente, e os coeficientes dessa equação podem ser estimados a partir de um conjunto de dados de treinamento que contém as medições do sensor de referência e dos sensores que devem calibrar.

A calibração convencional de sensores pode ser cara e demorada, além de exigir conhecimentos especializados. A calibração baseada em inteligência artificial (IA) tem sido amplamente estudada como uma alternativa potencialmente mais

eficiente e precisa. A abordagem por aprendizado de máquina consiste em usar dados coletados por sensores na rede para treinar um modelo de aprendizado de máquina, que é capaz de prever os valores corretos dos sensores. Uma vez treinado, o modelo é usado para calibrar os sensores em tempo real, permitindo que a rede híbrida de sensores forneça dados precisos e confiáveis da qualidade do ar, sem a necessidade de calibração manual convencional (VAJS; DRAJIC; CICA, 2023).

De acordo com Eichstädt *et al.* (2021), a comunicação de dados medidos em redes IoT é comum ao CPS, mas requer uma consideração maior do ponto de vista metroológico. Os princípios de metrologia e os métodos de análise de incerteza de medição precisam ser adaptados para lidar com os desafios dos sistemas IoT. Modelos baseados em dados, como *machine learning* e IA são comumente aplicados ao CPS devido à complexidade dos dados, mas sua aplicabilidade e avaliação de incerteza ainda estão em estágios iniciais de pesquisa.

Conforme Varshney *et al.* (2021), a transformação digital, conduzida pela Indústria 4.0, está desenvolvendo avanços significativos no campo da calibração ao empregar tecnologias inovadoras. Nesse contexto, sensores inteligentes são integrados para medir e processar parâmetros de qualidade, transmitindo os dados eletronicamente ou por meio de sinais sem fio. Sobre tudo, para manter os níveis de precisão, todos esses sensores necessitam de calibração, utilizando bases digitais ou eletrônicas. A *internet* das coisas, também desempenha um papel fundamental na metrologia, uma vez que esta permite a calibração e testes a serem desenvolvidos autonomamente.

De acordo com Taymanov e Sapozhnikova (2020), os métodos de testes virtuais constituem outro campo em desenvolvimento, no qual a confiabilidade de sensores de medição e sistemas de medição multicanal são avaliados. Aplicando a técnica de Capacidade de Monitoramento e Vigilância (MSC), é analisada a variação temporal de medições de sensores e dos valores de grandezas influentes, com isso identificando possíveis problemas, que podem ser identificados pelas cópias digitais dos sistemas de monitoramento e alarme.

A implementação do MSC tem aplicações práticas em diversos campos, incluindo testes não destrutivos e sistemas de monitoramento em diferentes indústrias. Isso permite intervalos de calibração e verificação mais longos em comparação com sensores tradicionais, resultando em economia de custos. A existência de padrões internacionais é essencial para garantir a eficiência e confiabilidade dos resultados

das medições, e a documentação técnica deve incluir informações sobre a confiabilidade metrológica e os componentes de incerteza da medição (TAYMANOV; SAPOZHNIKOVA, 2020).

Peng, Kuntao e Xiuhua (2015), utilizaram uma rede neural *Back Propagation* (BP) para calibrar um sensor de pressão e melhorar a sua precisão na medição. Os autores afirmam que ao construir um modelo de calibração de sensor usando uma rede neural, é importante não apenas implementar o modelo em um computador, mas também considerar a possibilidade de implantá-lo em um *firmware*, a fim de atender aos requisitos de aplicação específicos. Isso sugere que o modelo de calibração deve ser adaptado para funcionar eficientemente e com precisão em dispositivos embutidos, como microcontroladores ou sistemas embarcados, permitindo sua aplicação em cenários reais de medição.

Diversos métodos de calibração, que foram relatados aqui, possuem limitação em lidar com a heterogeneidade dos sensores utilizados na indústria, por vezes, não considerando suas características únicas, o que pode levar a erros de medição. Com o aumento do número de sensores em instalações industriais e suas diversidades, é crucial garantir a confiabilidade das informações fornecidas e mantendo os custos de manutenção aceitáveis. Embora a calibração tradicional seja a mais usual, esta pode ser insuficiente para atender os diversos cenários tecnológicos, visando a mitigação de falhas metrológicas, ineficiências na medição e controle dos processos de manufatura e até de acidentes.

Nesse contexto, verificações automáticas frequentes da "saúde metrológica" dos sensores durante a vida útil de sua operação, são necessárias para reduzir os custos de manutenção e tempo de parada dos processos. A Indústria 4.0 apresenta desafios adicionais, como a transmissão segura de informações, uso de interfaces sem fio e aplicação de tecnologias em nuvem para processamento dos dados em tempo real. A atualização tecnológica da ciência da medição é crucial, contemplando métodos para verificação automática e confiabilidade das informações de medição.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente estudo adota uma abordagem mista, combinando métodos quantitativos e qualitativos para investigar a integração de sensores analógicos sem protocolo de comunicação digital em sistemas de calibração inteligentes. A pesquisa foi estruturada em três etapas principais:

(i) uma revisão sistemática da literatura e análise bibliométrica para mapear o estado da arte e identificar lacunas nos estudos sobre Calibração 4.0;

(ii) a construção do *framework* proposto, fundamentada na integração de sensores analógicos com padrões de referência e na digitalização do processo de calibração, visando à interoperabilidade com sistemas industriais modernos;

(iii) a validação conceitual do *framework*, realizada por meio de entrevistas semiestruturadas com especialistas da área, que forneceram percepções sobre a aplicabilidade, os benefícios e os desafios da implementação da solução proposta.

Essa abordagem permitiu o desenvolvimento de um modelo estruturado e adaptável, alinhado às demandas da Indústria 4.0, garantindo maior rastreabilidade, confiabilidade e eficiência nos processos metrológicos.

A parte qualitativa desta pesquisa desempenhou um papel essencial na compreensão dos desafios e oportunidades relacionados à calibração de sensores analógicos sem protocolo de comunicação digital no contexto da Indústria 4.0. Para isso, foram conduzidas entrevistas semiestruturadas com especialistas da área de metrologia, calibração e automação industrial. Essas entrevistas possibilitaram a coleta de percepções aprofundadas sobre a aplicabilidade do *framework* proposto, além da identificação de barreiras técnicas e operacionais que podem influenciar sua implementação.

Além das entrevistas, a pesquisa qualitativa incluiu uma análise crítica da literatura especializada, buscando correlacionar as tendências emergentes na Metrologia 4.0 com as limitações práticas enfrentadas por indústrias que ainda utilizam sensores analógicos. Essa abordagem não apenas validou conceitualmente o modelo teórico desenvolvido, mas também enriqueceu a discussão sobre a adaptação de tecnologias convencionais ao ambiente digital, promovendo sugestões relevantes para futuras implementações e aprimoramentos do *framework*.

Ao integrar essas análises qualitativas ao estudo, foi possível estruturar uma solução inovadora, garantindo que sua concepção estivesse alinhada às necessidades reais do setor industrial. Dessa forma, reforça-se a relevância e

viabilidade prática do *framework* proposto, consolidando sua contribuição para a modernização dos processos de calibração na Indústria 4.0.

3.1 INSTRUMENTOS DE PESQUISA

Segundo Gil (2017), não há regras fixas para elaboração de um projeto, pois sua estrutura é determinada pelo tipo de problema a ser pesquisado e pelo estilo de seus autores. É necessário que o projeto esclareça como a pesquisa será conduzida, quais as etapas que serão desenvolvidas e quais os recursos que devem ser alocados para atingir seus objetivos. Além disso, o projeto seja suficientemente detalhado para permitir a avaliação do processo de pesquisa. A elaboração de um projeto depende de inúmeros fatores, sendo que o primeiro e mais importante refere-se à natureza do problema.

A análise de documentos é um método de pesquisa amplamente utilizado, no qual busca-se coletar e examinar uma variedade de documentos relevantes para o objeto de estudo. Estes documentos podem ser relatórios, artigos científicos, livros e normas. Essa abordagem permite um aprofundamento nas fontes de informação, extraindo visões relevantes dentro do tema de pesquisa. Os documentos analisados contribuem para o reconhecimento da estrutura e contextualização do estudo, somando-se informações secundárias para o desenvolvimento do trabalho (GIL, 2017).

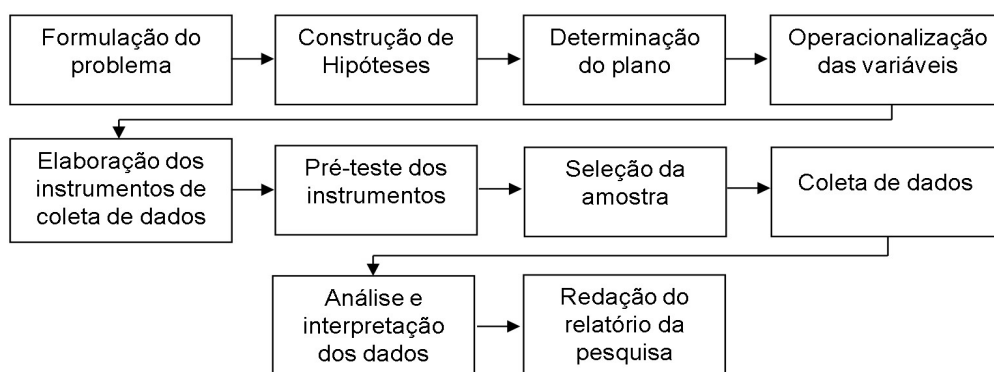
No trabalho de Gil (2017), informa que os elementos habitualmente requeridos num projeto são os seguintes:

- a) Formulação do problema;
- b) Construção de hipóteses ou especificação dos objetivos;
- c) Identificação do tipo de pesquisa;
- d) Operacionalização das variáveis;
- e) Seleção da amostra;
- f) Elaboração dos instrumentos e determinação da estratégia de coleta de dados;
- g) Determinação do plano de análise dos dados;
- h) Previsão da forma de apresentação dos resultados;
- i) Cronograma da execução da pesquisa;
- j) Definição dos recursos humanos, materiais e financeiros a serem alocados.

Rigorosamente, um projeto só pode ser definitivamente elaborado quando o problema está claramente formulado, os objetivos bem definidos e o plano de coleta e análise dos dados estabelecidos. A elaboração de um projeto é feita mediante a consideração das etapas necessárias ao desenvolvimento da pesquisa. Para facilitar

o acompanhamento das ações correspondentes a cada uma dessas etapas, é comum apresentar o fluxo da pesquisa em forma de diagrama, conforme apresentado na **Figura 11**. É conveniente lembrar que a ordem dessas etapas não é absolutamente rígida. Em muitos casos, é possível simplificá-la ou modificá-la. Essa é uma decisão que cabe ao pesquisador, que poderá adaptar o esquema às situações específicas (GIL, 2017).

Figura 11 – Exemplo de Diagrama de Pesquisa



Fonte: Gil (2017)

A técnica de análise PRISMA, desenvolvido por Moher *et al.* (2009), é uma ferramenta essencial para a condução de revisões sistemáticas e meta-análises. Esta proporciona um protocolo estruturado para a coleta, seleção e análise crítica de documentos relevantes a uma determinada questão de pesquisa. Esta técnica destaca-se por sua ênfase na transparência e replicabilidade do processo de pesquisa, estabelecendo critérios claros para a inclusão de estudos e a avaliação de sua qualidade. Ao adotar a técnica PRISMA, os pesquisadores são guiados por um *checklist* e um fluxograma que detalham cada etapa da revisão, desde a identificação e triagem dos documentos até a inclusão e análise dos dados. Este procedimento não apenas fortalece a integridade da pesquisa, mas também facilita a compreensão e a avaliação dos resultados (MOHER *et al.*, 2009).

De acordo com Moher *et al.* (2009), para selecionar os documentos, o primeiro passo é definir as palavras-chave e suas variações. A pesquisa segue as seguintes etapas metodológicas:

- 1) Definição do conjunto de palavras-chave;
- 2) Pesquisa em bases de dados específicas;
- 3) Estabelecimento dos critérios de exclusão;
- 4) Aplicação dos critérios de seleção;
- 5) Identificação e escolha dos documentos selecionados;

Essas etapas são seguidas para garantir uma abordagem sistemática e organizada na seleção dos documentos relevantes para a pesquisa.

3.2 REVISÃO SISTEMÁTICA DE LITERATURA SOBRE MÉTODOS DE CALIBRAÇÃO NA INDÚSTRIA

Baseado no trabalho de Yin (2015), a sistematização de uma pesquisa pode envolver diversos métodos, como experimentos, estudos de caso e levantamentos bibliográficos sistemáticos. Por meio desses métodos, é possível obter observações que, de acordo com a amplitude da contextualização, podem levar a criação de hipóteses, ampliando assim a compreensão do tema estudado.

De acordo com Gil (2017), é apontado que um projeto de pesquisa deve possuir um detalhamento criterioso que permita avaliar o processo de pesquisa adaptado as características do objeto de estudo, considerando na prática os objetivos, a metodologia e as respectivas fases do desenvolvimento.

Em suma, esta pesquisa sobre calibração 4.0 contemplou uma abrangência tecnológica e práticas metrológicas industriais, qual culminou na construção de um *framework* para calibração 4.0 em uma estruturação teórica dentro da diversidade das tecnologias habilitadoras aplicadas na indústria 4.0. Esta pesquisa promove uma ampliação da compreensão sobre as implicações práticas, recursos e demandas técnicas e desafios para a implementação do *framework* para a calibração 4.0.

A compreensão deste contexto é fundamental para criar um sistema modular para calibração 4.0, eficiente e adaptável às necessidades específicas dos sensores de medição que não possuam protocolo de comunicação digital. Dessa forma, por meio deste trabalho, é ampliado o embasamento estrutural conceitual para uma sustentação de superação aos obstáculos, entender as demandas reais dos sistemas de calibração e garantir que o sistema atenda de forma eficaz às suas necessidades.

Segundo Gil (2017), uma das maneiras mais tradicionais de classificar as pesquisas é estabelecer duas grandes categorias. A primeira, denominada pesquisa básica, qual reúne estudos que tem como propósito preencher lacunas no conhecimento. A segunda, denominada pesquisa aplicada, abrange estudos elaborados com a finalidade de resolver problemas práticos identificados no âmbito das sociedades em que os pesquisadores vivem.

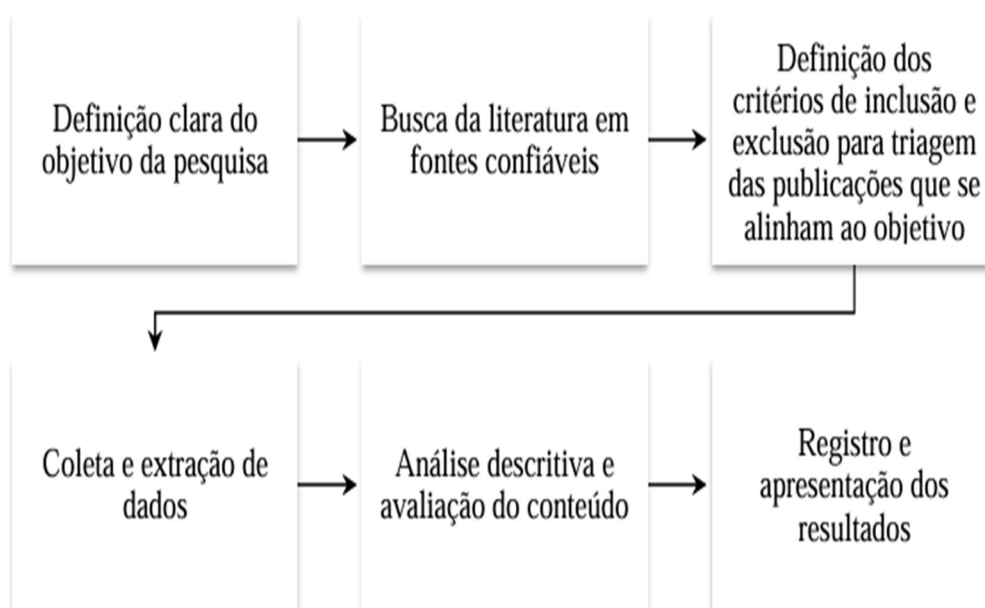
3.3 PESQUISA DOCUMENTAL

Segundo Moher *et al.* (2009), a revisão sistemática de literatura possui uma grande significância atrelada ao método empregado, aos resultados obtidos e a transparência dos dados. A variabilidade na qualidade das pesquisas pode comprometer a avaliação das limitações.

A revisão sistemática de literatura utiliza um processo transparente e reproduzível, enfatizando as contribuições chaves para um campo específico. Esta pesquisa está classificada como exploratória, com o objetivo de elucidar conceitos, englobando equacionamentos de problemas para pesquisas futuras.

O estudo emprega uma abordagem de método quantitativo adotando um protocolo de revisão sistemática de literatura seguindo etapas sistemáticas para garantir a integridade do processo. A **Figura 12** apresenta as etapas envolvidas no processo de revisão sistemática de literatura.

Figura 12 - Etapas da Revisão Sistemática de Literatura



Fonte: Adaptado de Brizola e Fantini (2016)

3.3.1 Critérios para a Pesquisa

Para desenvolver uma revisão sistemática de literatura, as pesquisas devem ser selecionadas criteriosamente. Este item detalha os critérios de seleção dos textos que compõem a base desta pesquisa, visando atingir os objetivos definidos. A análise inclui um processo de filtragem que começa com uma visão mais abrangente e se torna mais meticulosa. Os critérios de exclusão e inclusão são parâmetros essenciais

para filtrar a literatura acessível, direcionando a coleta das informações relevantes ao tema central.

Esses critérios de pesquisa foram considerados para garantir uma maior compreensão do tema, visando alinhar os critérios com os objetivos. A definição dos parâmetros visa a uma análise balanceada, filtrando dados desnecessários.

A seguir, serão detalhados os critérios de exclusão e inclusão, com o objetivo de compreender a metodologia adotada e permitir a replicação por outros interessados, a fim de comprovar os resultados obtidos.

3.3.2 Critérios de Elegibilidade

Previamente foi realizado um teste piloto para verificar se os critérios estavam de acordo com os objetivos estipulados, visando uma possível readequação dos filtros de inclusão e exclusão. Esse teste piloto serviu para avaliar a viabilidade dos critérios e realizar ajustes para evitar a exclusão de estudos relevantes ou a inclusão de estudos não pertinentes. A amostra piloto incluiu aproximadamente 20 % do volume estimado de estudos, proporcionando uma visão preliminar sobre a adequação dos critérios definidos.

Os critérios de inclusão e exclusão foram cuidadosamente selecionados para garantir a qualidade dos trabalhos referenciados.

Por exemplo, a elegibilidade de trabalhos publicados nos último dez anos, estes permitem traçar uma tendência evolutiva das tecnologias aplicadas após ao reconhecimento do marco da quarta revolução industrial, que ocorreu em 2011, na Alemanha.

Outrossim, ao delimitar os estudos publicados na língua inglesa, assegura-se uma maior amplitude e alcance internacional, sustentando a diversidade dessas publicações. Sendo assim, os critérios foram estipulados visando garantir que a revisão sistemática de literatura cubra a questão de pesquisa, excluindo elementos fora do contexto.

3.3.3 Critérios de Inclusão

Ao determinar a metodologia para esta pesquisa, o primeiro item engloba a seleção minuciosa dos tipos de publicações a serem enquadradas na inclusão. Foram adotados artigos de periódicos científicos e artigos de congressos, devido a sua credibilidade, sendo estes revisados por pares.

Esse procedimento contribuiu com a garantia da qualidade e veracidade dos conteúdos divulgados. Esse perfil de fonte forneceu um embasamento sustentável para o levantamento do panorama atual e suas tendências tecnológicas na área da metrologia 4.0. Outro aspecto de grande relevância para a estratégia de pesquisa é a delimitação temporal, definida como os últimos 10 anos mais o ano corrente.

Este intervalo temporal amostral assegura a atualidade dos dados, considerando que as ocorrências de inovações possam superar os dados coletados anteriormente. Com relação aos critérios metodológicos, foram adotados estudos focados na abrangência holística do tema.

Essas especificidades contribuem com os resultados para que sejam diretamente aplicáveis e relevantes para atendimento aos objetivos definidos e explorados.

3.3.4 Critérios de Exclusão

Na metodologia aplicada, além de estabelecer critérios de inclusão, foi fundamental definir os critérios de exclusão. Um critério significativo é a exclusão de certos tipos de publicações que não são relevantes ao contexto desta pesquisa. Foram excluídos trabalhos de dissertações, teses e capítulos de livros. Embora estes trabalhos possam ter informações relevantes, mas a título de referência não fornece uma solidificação metodológica sustentável para uma relevância científica.

Além disso, estes podem apresentar vieses sem embasamentos consistentes. Outro aspecto, é que trabalhos com metodologias frágeis podem levar a conclusões inverídicas e gerar dados poluídos comprometendo o rigor desta pesquisa.

Para mitigar essa vulnerabilidade, os trabalhos que não se correlacionam com as questões deste estudo foram descartados. Visando ao atendimento dos objetivos especificados, este procedimento direciona para uma análise criteriosa dos dados levantados. Essa apuração sistemática é essencial para expor uma compreensão abrangente do tema em questão.

3.4 BASE DE DADOS

Os artigos científicos foram obtidos nas bases de dados Compendex, Scopus e *Web of Science*.

Segundo Elsevier (2024), a base de dados Compendex é focada na área de engenharia. A singularidade da Compendex reside na sua extensa cobertura, que

inclui periódicos, atas de conferências, dissertações, padrões, livros e pré-impressões, provenientes de milhares de editoras ao redor do mundo, incluindo importantes sociedades de engenharia como IEEE, ASME, SAE, ACM, entre outras. Esta possui um critério rigoroso de seleção e avaliação que asseguram conteúdo de elevada qualidade. Abrange 190 disciplinas de engenharia e mais de 17 milhões de artigos. Compendex é adotado amplamente por muitas instituições de relevância na área de engenharia e com integração ao Engineering Village/Elsevier.

De acordo com a Elsevier (2024), a Scopus é uma base de dados criada pela Elsevier, qual oferece uma enorme gama de literatura científica revisada por pares em diversas disciplinas. Se destaca pela abrangência de áreas, indexando milhares de revistas, conferências, livros e patentes, elevando a um nível de uma das bases mais relevante no meio de pesquisa acadêmica. Dentre as diversas propriedades que esta base possui, se destacam: cobertura abrangente, ferramentas de análise e métricas, atualização contínua, recursos de pesquisa avançada, interoperabilidade e filtro de qualidade.

Baseado na Clarivate Analytics (2024), a *Web of Science* é uma base científica relevante no meio acadêmico, aprimorada pelo *Institute for Scientific Information*. Reconhecida mundialmente no meio científico e acadêmico, disponibilizando uma abrangência multidisciplinar e possui diversas características relevantes. Isso inclui a indexação de publicações, citações e referências, ferramentas de análise de métricas, pesquisa avançada e atualizações constantes. A base *Web of Science* abrange milhares de revistas científicas, livros acadêmicos e anais de conferências.

3.5 ESTRATÉGIA DE BUSCA

Esse esforço de busca bibliográfica empregou uma estratégia de pesquisa avançada, direcionando as palavras-chave para campos específicos como resumos, títulos e palavras-chave dos documentos.

Para selecionar os estudos, foi utilizada uma combinação de palavras-chave e termos de indexação relevantes, relacionados no **Quadro 1**. Os documentos que retornaram foram submetidos a um processo de triagem com base no título, resumo e palavras-chave. Se o documento fosse considerado relevante nesses itens de filtragem, passava para a próxima etapa, que consistia em uma leitura mais

aprofundada do contexto desenvolvido no artigo, visando constatar a conformidade ou pertinência ao tema central desta tese, utilizando os critérios de inclusão e exclusão.

Quadro 1 – Descritores de Pesquisa

Descritores	
1º Termo	"Metrology 4.0" OR "Calibration 4.0" OR "Industry 4.0" OR "Digital Metrology" OR "Fourth Industrial Revolution" OR "Factory of the Future"
AND	
2º Termo	"Touchless" OR "Internet-enabled" OR "Dynamic" OR "Smart" OR "Automatic" OR "Remote" OR "Digitized" OR "Image-based" OR "Wireless" OR "Machine learning based" OR "Internet of measurement things" OR "Automatic meter reading" OR "Machine vision system" OR "Process" OR "Instrument" OR "System" OR "Method of calibrating" OR "Sensor" OR "Online calibration" OR "Calibrating industrial" OR "Framework"
AND	
3º Termo	"Calibration"

Fonte: Elaborado pelo autor

3.6 EXTRAÇÃO DE DADOS - FLUXOGRAMA PRISMA

Com base nos dados extraídos e filtrados, das bases Compedex/Elsevier-Engineering Village, Scopus e *Web of Science*, foi obtido um compêndio que fornece uma apresentação atual e estruturada das pesquisas existentes nesta área.

As categorias relacionadas representam o título do trabalho, visando com isto uma apresentação macro do cerne do estudo; os Autores, listando os pesquisadores destacados do estudo vinculado ao alcance geográfico do desenvolvimento destas pesquisas; o Ano de Publicação, que situa a temporalidade da evolução e tendências pesquisadas no contexto da calibração 4.0.

Os principais resultados apresentam sucintamente as descobertas de maior relevância de cada trabalho, destacando sua contribuição para o setor e as conclusões específicas sobre a relação com a Metrologia 4.0 em dispositivos de medição. Esses resultados ressaltam os advenços para a efetivação da Metrologia 4.0, destacando a importância prática e/ou teórica de cada trabalho.

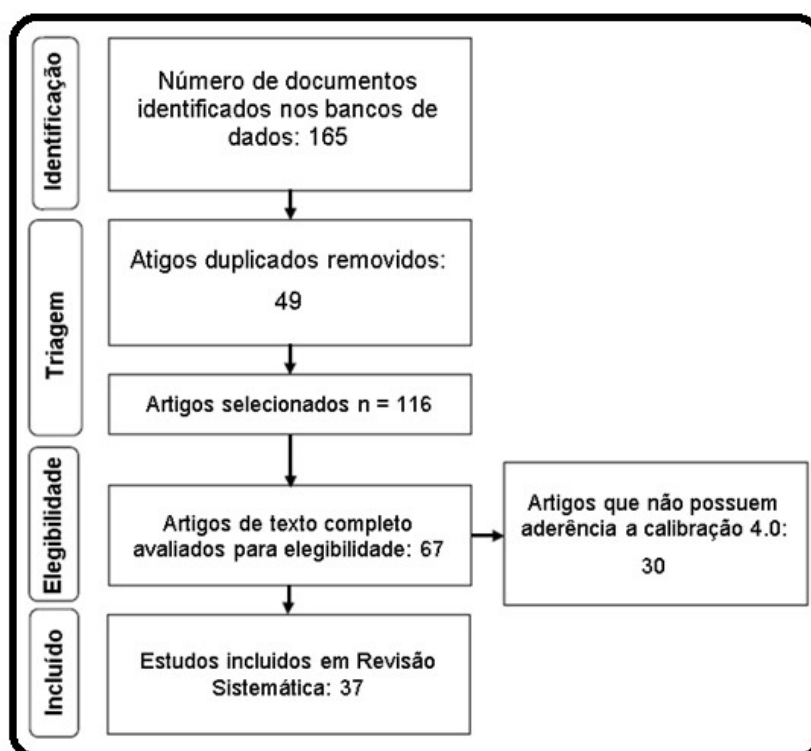
De acordo com o critério PRISMA, a pesquisa nas bases Compedex/Elsevier-Engineering Village, Scopus e *Web of Science*, identificou inicialmente 165 documentos. Após a triagem, foram removidos 49 artigos duplicados, resultando em 116 artigos selecionados para a etapa de elegibilidade. Destes, foram submetidos a

leitura de texto, resultando em 67 elegíveis sendo que 30 artigos não possuíam aderência direta ao tema da calibração 4.0.

Por meio deste método foram contabilizados 37 artigos para a revisão sistemática de literatura.

Na **Figura 13** está apresentada uma sintetização do fluxo desta pesquisa, que abrange a fase de identificação, triagem elegibilidade e inclusão.

Figura 13 – Seleção e avaliação das pesquisas



Fonte: Adaptado de Moher *et al.* (2009)

3.7 LIMITAÇÕES DA PESQUISA

Neste trabalho foram defrontadas algumas limitações relevantes que afetaram sua abrangência e especificidade. O mecanismo de busca utilizado foi direcionado a sensores destinados ao uso em ambientes industriais para o monitoramento e controle de variáveis de processo. Essa amostragem excluiu segmentos fora do contexto industrial, levando em consideração os seguintes critérios:

-Segurança de Dados: As tecnologias de segurança dos dados não estão contempladas nesse estudo. As informações das calibrações podem ser limitadas ou restritas devido a questões de confidencialidade, acesso restrito a equipamentos e limitações operacionais;

-Variáveis Não Consideradas: Devido a elevada diversidade de sensores aplicados no contexto industrial, existem famílias de sensores que podem ter parâmetros de calibração personalizados, foi inviável a realização de uma pesquisa global que abrangesse na totalidade as famílias existentes de sensores;

-Limitação Tecnológica: Devido a dinâmica evolução e inovação tecnológica dentro do contexto da Indústria 4.0, esta conjunção aumenta o desafio para a atualização simultânea desta pesquisa no campo da calibração 4.0;

-Metodologia Restrita: A carência de padronização nas técnicas aplicadas na metrologia 4.0 vinculadas aos sensores de medição industriais, vem a ser uma limitação da aplicação deste trabalho, devido à grande diversidade de métodos normalizados e não normalizados;

-Limitações de Recursos e Tempo: Devido às restrições de tempo e recursos, este trabalho não contempla a experimentação prática em ambiente fabril. Desse modo, a abordagem do desenvolvimento do *framework*, permaneceu hegemonicamente no âmbito teórico.

-Abrangência de Aplicação: Este trabalho enfatiza um escopo específico da área de calibração de sensores utilizados na indústria, sem considerar uma análise de expansão para áreas correlatas.

-Detalhamento Aprofundado das Tecnologias: Este trabalho propõe um *framework* conceitual para calibração 4.0, não contemplando as particularidades técnicas das diversidades existentes nos módulos deste sistema.

-Custos de implantação e manutenção: Este trabalho não apresenta uma análise aprofundada dos custos de implantação e manutenção deste sistema de calibração 4.0.

-Quantificação Comparativa: Este trabalho não contempla uma análise quantitativa comparativa entre os procedimentos convencionais e este *framework* para calibração 4.0, exemplificando, por exemplo, com dados de exatidão, tempo de execução e eficácia funcional.

-Legislação e Normalizações: Este trabalho não aborda as possíveis lacunas modeladas nas legislações e normas vigentes para contribuir com suas atualizações na adoção das técnicas de calibração 4.0.

-Capacitação da Mão de Obra Especializada: Este trabalho não contempla a qualificação e manutenção da qualificação profissional necessária para implantar e utilizar o *framework* proposto.

-Impacto Ambiental e Sustentabilidade: Este trabalho não contempla aspectos ambientais e de sustentabilidade da calibração 4.0.

3.8 AVALIAÇÃO E COLETA DE DADOS DE CAMPO

Visando obter uma percepção prática sobre a potencial aplicação e viabilidade do *framework* para calibração 4.0, foi realizado um levantamento de dados qualitativos por meio de entrevistas semiestruturadas de profissionais da área de calibração e gestão da qualidade.

A formatação de detalhamento foi um dos fatores para a escolha deste método de extração das percepções dos entrevistados e com isso permite um subsídio mais aprofundado sobre os desafios, benefícios e objeções em relação à adoção de uma implantação deste *framework* num ambiente industrial.

3.8.1 Estrutura das Entrevistas

As entrevistas foram divididas em quatro seções principais, cada uma projetada para abordar aspectos específicos do *framework* e sua aplicação prática:

- **Conhecimento Geral;**
- **Implementação e Aplicação;**
- **Desempenho e Resultados;**
- **Desafios e Melhorias.**

3.8.2 Procedimento da Coleta de Dados

As entrevistas foram realizadas com especialistas técnicos, engenheiros e gestores que atuam direta ou indiretamente em processos de calibração em ambientes industriais. Elas foram conduzidas por meio de um formulário do Google Forms®, com o consentimento dos participantes, para posterior análise de conteúdo.

3.8.3 Análise dos Dados da Entrevista Semiestruturada

Os dados obtidos das entrevistas foram analisados qualitativamente e quantitativamente, com base no método de análise de conteúdo. O objetivo principal foi reconhecer os padrões nas respostas que possam validar a estrutura do *framework*, detectar desafios comuns de implementação e sugerir adaptações com base nas percepções dos especialistas. As classificações de análise incluem: viabilidade de

implementação, integração tecnológica, confiabilidade dos resultados, mão de obra especializada e sugestões de aperfeiçoamento.

3.8.4 Questionário Utilizado

O questionário aplicado durante as entrevistas foi elaborado para abranger tanto os aspectos técnicos quanto operacionais do *framework*. Ele foi estruturado de forma a permitir respostas abertas e fechadas, facilitando a coleta de dados. O questionário completo encontra-se no apêndice A deste trabalho.

3.8.5 Justificativa para o Uso de Entrevistas Semiestruturadas

O motivo para a adoção do método de entrevista semiestruturada baseia-se no caráter exploratório da pesquisa, que visa não apenas avaliar a potencial adoção do *framework*, mas também entender as percepções dos especialistas envolvidos no processo de calibração, seja como fornecedores ou consumidores. Esta metodologia conduz uma flexibilidade no manejo da entrevista, possibilitando a inclusão de perguntas complementares, dependendo das repostas dos especialistas. De outra forma, essa abordagem também possibilita a coleta de ideias práticas que podem não ser obtidos por métodos mais estruturados.

3.8.6 Roteiro para a Entrevista Semiestruturada

1. Introdução:

- Apresentação do entrevistador.
- Breve explicação do objetivo da entrevista: validar a metodologia proposta para calibração 4.0.
- Informar que todas as respostas serão confidenciais.

2. Parte 1: Conhecimento Geral

- Avaliar o conhecimento geral do entrevistado sobre a Calibração 4.0 e os conceitos relacionados ao *framework*.

3. Parte 2: Implementação e Aplicação

- Discussão sobre as etapas da implementação do *framework* no contexto do trabalho do entrevistado.

4. Parte 3: Desempenho e Resultados

- Analisar o benefício da eficácia e eficiência do *framework* durante a execução dos processos de calibração.

5. Parte 4: Desafios e Melhorias

- Solicitar *feedback* sobre possíveis desafios e sugestões de melhorias.

6. Encerramento:

- Agradecimento pela participação.
- Esclarecimento sobre os próximos passos após a coleta de dados.

3.9 CARACTERÍSTICAS DOS ESTUDOS PESQUISADOS

Durante as etapas preliminares da execução da revisão sistemática de literatura, foram consideradas as necessidades de possíveis ajustes nos critérios de exclusão e inclusão. É fato que a evolução tecnológica é exponencialmente dinâmica e acompanhá-la em tempo real é uma tarefa inviável para o foco do desenvolvimento deste trabalho.

A pesquisa foi inicialmente delineada de forma meticulosa para abranger um período de uma década, compreendendo o intervalo de 2017 a 2023. Não houveram resultados de 2013 a 2016. As fontes incluíram artigos publicados em periódicos e artigos apresentados em conferências sendo que todos estavam disponíveis somente na língua inglesa. O *corpus* autoral compreendeu 189 autores. Entre estes, 5 documentos foram identificados como de autoria única, enquanto a média de coautores por documento situava-se em torno de 3,6.

As palavras-chave adicionais totalizaram 454, enquanto as palavras-chave dos autores foram 187. A porcentagem de publicações científicas com coautores de diferentes países foi de 10,5 % e a média anual de crescimento da pesquisa dentro do tema foi 55,3 %. A média de documentos gerados por autor foi 0,35. Os critérios de exclusão para a revisão sistemática de literatura foram estabelecidos por meio da leitura de títulos, palavras-chave e resumos, a fim de identificar quais estudos cumprem os critérios de elegibilidade de acordo com as particularidades da pesquisa. Estes incluem artigos que não correspondem ao tema da pesquisa, pois não possuem correlação com a metrologia 4.0.

4 RESULTADOS DA PESQUISA

Os 37 trabalhos elegidos foram explorados e sintetizados qualitativamente e quantitativamente, com foco nas abordagens de calibração, tecnologias utilizadas e impactos observados na precisão e eficiência da calibração no cenário da metrologia 4.0.

Prato *et al.* (2021), fazem uma contribuição significativa ao campo da metrologia e calibração, com foco na análise estatística de acelerômetros MEMS (*Micro-Electro-Mechanical Systems*) digitais de 3 eixos. Este estudo se destaca ao abordar a necessidade de calibrações em larga escala, um tema relevante à medida que a indústria avança em direção à automação e à integração de dispositivos IoT (*Internet das Coisas*) em sistemas de monitoramento e controle.

Gadelrab e Abouhogail (2021), examinam um aspecto essencial da metrologia na era digital: a transição dos certificados de calibração para o formato digital. Este tema é de grande relevância, dado o aumento da digitalização nos processos industriais e a necessidade de garantir a precisão, confiabilidade e rastreabilidade das medições em diversos setores. Hackel *et al.* (2023), mostram uma contribuição significativa ao campo da metrologia e qualidade na indústria 4.0 ao investigar a implementação de certificados digitais de calibração como um componente essencial para a infraestrutura de qualidade digital, destacando-se por sua abordagem inovadora na integração dos processos de calibração com as demandas tecnológicas emergentes da quarta revolução industrial.

Andonov e Cundeva-Blajer (2019), exploram um tema crucial para a quarta revolução industrial: a necessidade de avanços na metrologia que estejam alinhados aos princípios e tecnologias da indústria 4.0. O estudo apresenta o desenvolvimento de uma ferramenta, denominada TCal, que visa integrar processos de calibração com as demandas de automação, eficiência e integração digital da indústria 4.0. Xiong *et al.* (2021), investigam o desenvolvimento de um sistema de calibração de fluxo, com um *design* de controlador inteligente, um especialmente relevante em um contexto onde precisão e eficiência em sistemas de medição são cruciais para uma ampla gama de aplicações industriais e de pesquisa.

Andonov e Cundeva-Blajer (2020), traz uma temática de seleção de métodos para calibração em diversas áreas da ciência e engenharia, especialmente na indústria 4.0, onde a precisão e a confiabilidade dos dados são fundamentais. Geronymo (2021), explora a aplicação dos princípios de *design* da indústria 4.0 em

laboratórios de calibração, sugerindo uma abordagem inovadora para melhorar a eficiência, precisão e conectividade desses ambientes.

Ahmed *et al.* (2022), examinam uma implementação de uma infraestrutura inteligente para a geração de certificados digitais de calibração pela Autoridade Saudita de Normas, Metrologia e Qualidade (SASO) no Centro Nacional de Metrologia e Controle de Calibração (NMCC). A importância desse tema é evidente, considerando o contexto da indústria 4.0 e a transformação digital em curso. Benitez, Ramirez e Vazquez (2019), sugerem novas técnicas de calibração que utilizam tecnologia inteligentes integradas com os conceitos da metrologia 4.0, incluindo um sistema para calibração sem fio (*wireless*).

Gruber *et al.* (2020), discutem a integração de informações semânticas em redes de sensores para aplicações de metrologia na indústria 4.0. O estudo foca em como combinar ontologias existentes, vocabulários e esquemas de dados para melhorar a interoperabilidade, a compreensão dos dados e a automação em redes de sensores, facilitando a comunicação entre dispositivos heterogêneos e sistemas de informação. Vedurmudi *et al.* (2021), destacam a importância de considerar a qualidade dos dados em redes de sensores de forma semântica, o que contribui para a confiabilidade e eficiência dos sistemas de medição.

Aranha *et al.* (2021), enfatizam a necessidade de garantir a segurança na cadeia metrológica por meio de dispositivos IoT, propondo um *framework* para proteção de dados em redes de sensores contra manipulações maliciosas. Rucki (2023), detalham os avanços recentes na tecnologia de medição por ar (*air gauging*) no contexto da indústria 4.0, destacando sua precisão e aplicabilidade. Sanjid *et al.* (2023), investigam as oportunidades, desafios e implicações futuras da digitalização na metrologia dimensional, apontando uma área crítica para garantir precisão e qualidade na manufatura e engenharia.

Liu, Liang e He (2019), exploram a calibração *online* de medidores inteligentes nos setores de energia elétrica, água e gás, utilizando métodos de calibração remota com o objetivo de aumentar a eficiência e reduzir custos. Dorst *et al.* (2019), discutem uma abordagem inovadora para a indústria 4.0, com foco na aplicação da metrologia para monitoramento das condições de equipamentos e processos de manufatura, ressaltando a importância de medições precisas para prevenir falhas e aumentar a produtividade na “Fábrica do Futuro”.

Eichstädt e Ludwig (2019), abordam a importância da metrologia em redes de sensores heterogêneos, especialmente no contexto da indústria 4.0, onde a precisão e confiabilidade das medições são fundamentais para automação e otimização dos processos de produção. Kuster (2021), analisa a transformação digital que está reformulando o panorama industrial, com a indústria 4.0 trazendo avanços significativos em automação, conectividade e análise de dados. A completude dos dados metrológicos é essencial para assegurar precisão, a confiabilidade e a eficiência nos processos produtivos.

Mustapää *et al.* (2020), abordam o impacto da indústria 4.0 e da *Internet* das Coisas (IoT) na calibração de sensores, sendo crucial para assegurar a integridade dos dados. O estudo destaca a aplicabilidade de certificados digitais de calibração para enfrentar os desafios metrológicos em ambientes de sensoriamento colaborativo.

Gogolinskiy e Syasko (2020), discorre sobre a importância da garantia metrológica e da padronização de ferramentas avançadas para testes não destrutivos e monitoramento de condições, atendendo às necessidades emergentes da indústria 4.0, onde a eficiência operacional e a segurança são essenciais. Budylna e Danilov (2019), discutem a confiabilidade das medições, tema central para o sucesso da quarta revolução industrial, onde decisões e processos automatizados baseiam-se cada vez mais em dados.

D'emilia *et al.* (2021), tratam da variabilidade da taxa de amostragem em acelerômetros MEMS (*Micro-Electro-Mechanical Systems*) digitais, dispositivos amplamente utilizados em aplicações industriais e de consumo, destacando a importância de uma calibração precisa para a confiabilidade das medições. Keidel e Eichstädt (2021), exploram a transformação digital da infraestrutura de qualidade por meio de processos e sistemas interoperáveis.

Brown *et al.* (2020), abordam a digitalização dos certificados de calibração como aspecto essencial na transição para a indústria 4.0, realçando sua importância para a eficiência, rastreabilidade e confiabilidade da informação em ambientes industriais. Engel (2023), discute a digitalização da metrologia para a indústria 4.0, enfatizando a necessidade de atualizar práticas e sistemas para melhorar a eficiência, precisão e interoperabilidade com tecnologias digitais.

Mustapää *et al.* (2020), destacam a importância de associar a metrologia digital a sistemas IoT para medições mais precisas em dispositivos conectados, com aplicações em manufatura e cidades inteligentes. Nummiliukki *et al.* (2020), analisam

a implementação de certificados digitais de calibração em aplicações industriais, sublinhando sua relevância para a indústria 4.0 em comparação com os métodos tradicionais em papel. Taymanov e Sapozhnikova (2023), examinam a evolução da metrologia no contexto da indústria 4.0, destacando sua importância para a precisão, eficiência e qualidade em processos de produção automatizados.

Ačko *et al.* (2020), discutem a interseção entre metrologia e a *Internet* das Coisas (IoT), destacando a importância da comunicação e validação de dados em redes inteligentes. Andonov e Cundeva-Blajer (2018), apresentam um contexto atual da indústria 4.0 e do crescente ecossistema da *Internet* das Coisas (IoT), focando na confiabilidade e precisão nas operações industriais autônomas. Softic, Zaimovic e Samir (2021), apresentam o uso da tecnologia *blockchain* para assegurar a rastreabilidade metrológica em medições e calibrações, demonstrando como sua integridade e segurança podem beneficiar setores que exigem precisão.

Nummiliikki *et al.* (2021), exploram os efeitos de rede e a interoperabilidade no gerenciamento de certificados digitais de calibração, beneficiando a indústria com uma melhor integração e comunicação entre sistemas. Hall (2019), explora como a rastreabilidade metrológica pode ser melhorada no contexto da transformação digital em andamento na indústria 4.0, contribuindo para a precisão e confiabilidade das medições. Taymanov e Sapozhnikova (2022), propõem uma perspectiva inovadora sobre a manutenção da metrologia em sistemas baseados em Inteligência Artificial (IA), tema crescente no contexto da quarta revolução industrial.

4.1 SÍNTESE DOS DADOS

O **Quadro 2** apresenta um detalhamento dos subcampos centrais da metrologia industrial, obtidos por meio da revisão sistemática de literatura, servindo como um recurso embasador para a identificação de padrões, técnicas emergentes, lacunas de pesquisa e oportunidades para futuras investigações. Em síntese, é apresentada uma análise sucinta do avanço da metrologia 4.0 em ambientes industriais, destacando as principais contribuições e as tendências mais recentes no campo metrológico. Este quadro compila os estudos mais relevantes, oferecendo *insights* e conclusões fundamentadas que orientam o aprimoramento das práticas de calibração e a integração de tecnologias digitais no contexto da Indústria 4.0.

Quadro 2 – Sintetização das Pesquisas mais Relevantes

Autor(es)/ Ano	Metodologia/ Tecnologia	Contribuições	Conclusão	Autor(es)/ Ano	Metodologia /Tecnologia	Contribuições	Conclusão
Prato, A. et al. (2021)	Análise estatística de calibração.	Identificação de padrões de variação e desempenho em MEMS acelerômetros.	A análise revela <i>insights</i> críticos para a calibração em larga escala, sugerindo direções para otimização da calibração.	Geronymo, G. M. (2021)	Estudo de caso.	Melhoria na eficiência e precisão do laboratório de calibração.	Aborda a melhoria da eficiência e precisão em laboratórios de calibração, otimizando processos na Indústria 4.0.
Gadelrab, M. S.; Abouhogail, R. A. (2021)	Análise de certificados digitais de calibração.	Proposta de melhorias e padrões para certificados digitais.	Conclusão sobre a necessidade de novos padrões para suportar a integridade e validação dos certificados digitais.	Ahmed, K. M. et al. (2022)	Criação de infraestrutura para digitalização de certificados.	Implementação bem-sucedida de certificados digital de calibração.	A infraestrutura digital é crucial para a emissão eficiente de certificados de calibração no contexto atual.
Hackel et al. (2023)	Desenvolvimento de um <i>framework</i> de certificado digital de calibração.	Estabelecimento de um sistema completo para a infraestrutura de qualidade digital.	O estudo destaca a importância de uma infraestrutura de qualidade digital integrada para a Indústria 4.0.	Benitez, R.; Ramirez, C.; Vazquez, J. A. (2019)	Tecnologia de calibração avançada.	Avanços significativos na calibração de sensores para aplicações na Metrologia 4.0.	O estudo enfatiza sobre a importância da calibração de sensores no contexto da Metrologia 4.0.
Andonov, S.; Cundeva-Blajer, M. (2019)	<i>Touchless Calibration.</i>	Avaliação do impacto da tecnologia Tcal na metrologia para a Indústria 4.0.	Enfatiza a relevância do Tcal como uma ferramenta essencial para a metrologia na era da Indústria 4.0.	Gruber et al. (2020)	Integração de ontologias.	Melhoria na interoperabilidade e eficiência da rede de sensores.	A combinação eficaz de ontologias existentes realça a aplicabilidade e funcionalidade das redes de sensores na metrologia.
Xiong et al. (2021)	Proposta de controlador inteligente para sistemas de calibração.	Demonstração da eficácia do controlador inteligente em sistemas de calibração de fluxo.	Apresenta o controlador inteligente como uma solução viável para melhorar a precisão e eficiência dos sistemas de calibração.	Vedurmudi et al. (2021)	Criação de ontologias.	Melhoria na interpretação e uso de dados dos sensores.	A descrição semântica é essencial para a qualidade dos dados em redes de sensores.

Andonov, S.; Cundeva-Blajer, M. (2020)	Análise estatística comparativa.	Identificação de critérios-chave para a seleção de métodos Tcal.	Métodos Tcal específicos oferecem vantagens distintas baseadas em diferentes critérios de seleção.	Aranha, H. et al. (2021)	<i>Framework</i> arquitetônico.	Segurança aprimorada na cadeia metroológica de ambientes IoT.	A implementação de um <i>framework</i> robusto é vital para a segurança metroológica em IoT.
Rucki, M. (2023)	Avanços tecnológicos em medição de ar.	Eficiência melhorada e precisão em medições de ar.	A medição de ar adaptada à Indústria 4.0 oferece vantagens significativas.	Sanjid, M. A. et al. (2023)	Digitalização da metrologia dimensional.	Avanços na precisão e acessibilidade da medição.	A digitalização transforma a metrologia dimensional, tornando-a mais eficiente.
Liu, F.; Liang, C.; He, Q. (2019)	Métodos de calibração <i>online</i> .	Calibração contínua e precisa de medidores inteligentes.	Calibração <i>online</i> é eficaz para manter a precisão dos medidores inteligentes a longo prazo.	Dorst, T. et al. (2019)	Estudo de caso em monitoramento de condição.	Demonstração de como a metrologia pode ser aplicada para melhorar o monitoramento de condição na fábrica do futuro.	A integração da metrologia moderna é crucial para a otimização da manutenção preditiva e do monitoramento de condição em ambientes de manufatura avançada.
Eichstädt, S.; Ludwig, B. (2019)	Análise de redes de sensores heterogêneos.	Melhoria na precisão e confiabilidade dos dados coletados de redes de sensores heterogêneos na IoT.	A padronização e calibração de redes de sensores são fundamentais para o sucesso da implementação da IoT em diversos setores.	Eichstädt, S.; Ludwig, B. (2021)	Avaliação da aplicação da metrologia em redes de sensores e Indústria 4.0.	Avaliação positiva do impacto da metrologia na eficiência e confiabilidade de redes de sensores no contexto da Indústria 4.0.	A metrologia é essencial para garantir a qualidade e otimizar processos na Indústria 4.0, especialmente em redes de sensores heterogêneos.
Kuster, M. (2021)	Análise da completude de dados metroológicos para transformação digital.	Identificação de lacunas e recomendações para garantir a completude dos dados metroológicos na transformação digital.	A completude e precisão dos dados metroológicos são essenciais para aproveitar ao máximo as oportunidades de transformação digital.	Mustapää, T. et al. (2020)	Investigação sobre o uso de certificados digitais de calibração em sensoriamento colaborativo.	Uso de certificados digitais de calibração para melhorar a confiabilidade e precisão em sensoriamento colaborativo.	Certificados digitais de calibração são uma solução promissora para desafios metroológicos em sensoriamento colaborativo.
Gogolinskiy, K. V.; Syasko, V. A. (2020)	Desenvolvimento de padrões para ensaios não destrutivos e	Estabelecimento de novos padrões e protocolos que melhoram a confiabilidade e	A padronização e garantia metroológica são cruciais para a eficácia e confiabilidade de técnicas NDT e monitoramento de condição	Budylna, E. A.; Danilov, A. A. (2019)	Estratégias para melhorar a confiabilidade das medições.	Identificação e implementação de métodos inovadores que asseguram a	Métodos avançados de calibração e validação são fundamentais para manter a confiabilidade das

	monitoramento de condição.	eficácia dos ensaios NDT e monitoramento de condição.	em ambientes da Indústria 4.0.			precisão e confiabilidade das medições.	medições na era da Indústria 4.0.
D'emilia, A. G. et al. (2021)	Análise da variabilidade da taxa de amostragem em MEMS durante a calibração dinâmica.	Desenvolvimento de técnicas para gerenciar a variabilidade da taxa de amostragem, melhorando a precisão da calibração.	O gerenciamento eficaz da variabilidade da taxa de amostragem é essencial para calibrações precisas em acelerômetros.	Keidel, A.; Eichstädt, S. (2021)	Avaliação de processos e infraestrutura interoperáveis para transformação digital.	Abordagem com ênfase em interoperabilidade visando a adequação digital de sistemas da qualidade.	Com a implantação de sistemas que conjugam interoperabilidade demonstra a integração ao sistema de gestão da qualidade.
Brown, C. et al. (2020)	Desenvolvimento de infraestrutura para certificados digitais de calibração.	Implementação de uma infraestrutura robusta que suporta a emissão e gestão de certificados digitais de calibração.	Uma infraestrutura sólida para certificados digitais de calibração é fundamental para a modernização e eficiência da calibração metrológica.	Engel, T. (2023)	Criação de uma plataforma digital para metrologia.	Criação de um sistema eficaz para a digitalização de processos metrológicos, aumentando a precisão e eficiência.	A digitalização é um passo crucial para o avanço da metrologia, trazendo melhorias significativas na precisão e na gestão de dados.
Mustapää, T. et al. (2020)	Integração de dispositivos IoT em sistemas de metrologia digital.	Implementação bem-sucedida de dispositivos IoT para monitoramento e análise em tempo real.	A incorporação da IoT na metrologia digital amplia suas aplicações e melhora a coleta e análise de dados.	Nummiluikki, J. et al. (2020)	Utilização de certificados digitais de calibração em ambientes industriais.	Redução de tempo e custos associados à calibração, além de aumentar a rastreabilidade.	Certificados digitais de calibração são essenciais para a eficiência operacional e conformidade em ambientes industriais.
Taymanov, R.; Sapozhnikova, K. (2023)	Análise do impacto da Indústria 4.0 na ciência da medição.	Identificação de novas oportunidades e desafios para a ciência da medição na era da Indústria 4.0.	A evolução da ciência da medição é fundamental para suportar as demandas e inovações trazidas pela Indústria 4.0.	Andonov, S.; Cundeva-Blajer, M. (2020)	Comparação entre calibração tradicional e calibração baseada em tecnologia (Tcal).	Tcal apresenta melhor relação custo-benefício em comparação com métodos tradicionais, além de oferecer maior	A adoção de Tcal pode trazer economias significativas e maior agilidade para organizações que demandam calibração precisa.

						flexibilidade e eficiência.	
Ačko, B. et al. (2020)	Análise de dados e comunicação em redes IoT.	Melhoria na precisão e na confiabilidade da comunicação de dados metrológicos em redes IoT.	A eficácia da gestão de dados metrológicos em redes IoT melhora significativamente com protocolos de comunicação avançados.	Andonov, S.; Cundeva-Blajer, M. (2018)	Técnicas de calibração sem contato.	Redução do tempo e aumento da segurança nos processos de calibração.	A calibração sem contato é ideal para ambientes de produção da Indústria 4.0, oferecendo eficiência e segurança.
Softic, A.; Zaimovic U., Nermina; L., Samir. (2021)	Aplicação da tecnologia <i>blockchain</i> na rastreabilidade metrológica.	Aumento na transparência e na segurança dos registros metrológicos.	A tecnologia <i>blockchain</i> é uma solução robusta para garantir a integridade e rastreabilidade dos dados metrológicos.	Nummiluikki, J. et al. (2021)	Interoperabilidade e efeitos de rede na gestão de certificados digitais.	Melhoria na gestão e compartilhamento de certificados de calibração.	A interoperabilidade e os efeitos de rede ampliam os benefícios dos certificados digitais de calibração, facilitando a gestão e o acesso aos dados.
Hall, B.D. (2019)	Estratégias para melhorar a rastreabilidade metrológica em sistemas digitais.	Melhor integração e rastreabilidade dos dados metrológicos em sistemas digitais.	A adoção de novas estratégias digitais potencializa a rastreabilidade metrológica, agregando valor aos sistemas de medição.	D'emilia, G. et al. (2021)	Abordagens holísticas para a confiabilidade dos dados de medição.	Aumento na confiabilidade dos dados de medição em ambientes da Indústria 4.0.	Uma abordagem holística é crucial para garantir a confiabilidade dos dados de medição na Indústria 4.0, suportando decisões precisas e eficazes.
Taymanov, R.; Sapozhnikova, K. (2022)	Manutenção metrológica de sistemas baseados em IA.	Melhoria na precisão e na manutenção de sistemas de IA através de métodos metrológicos avançados.	A integração da metrologia com sistemas baseados em IA oferece novas perspectivas para a manutenção e calibração mais precisas com tecnologias avançadas.				

Fonte: Elaborado pelo Autor

Esta pesquisa contemplou a coleta de dados e a aplicação dos critérios de elegibilidade, contribuindo com subsídios para uma maior compreensão a construção de um *framework* aplicado à calibração 4.0. Esses resultados serviram de base para os próximos tópicos, focando no preenchimento da lacuna identificada por este estudo. Onde é possível que destes resultados surjam novas lacunas correlacionadas, que ajudarão a ter uma visão mais abrangente sobre o tema.

O artigo "*Mapping of Processes and Risks in the Digital Transformation in Metrology of Ionizing Radiation, a Case Study in X-rays Air Kerma Calibration*", discutido mais profundamente no subitem 4.4.1 deste trabalho, propõe um modelo para a digitalização da calibração de radiação ionizante, enfatizando rastreabilidade e confiabilidade. No entanto, não aborda a calibração de sensores analógicos sem protocolo de comunicação digital, uma lacuna central que esta pesquisa busca preencher. Embora compartilhe similaridades com este estudo no que se refere à digitalização da calibração e adoção de certificados digitais, o artigo analisado limita-se a dispositivos já digitalizados, sem considerar os desafios da integração de sensores analógicos à Metrologia 4.0. Diferenciando-se dessa abordagem, a presente pesquisa propõe um *framework* inovador para a calibração 4.0 de sensores analógicos, viabilizando sua interoperabilidade com sistemas digitais. Assim, evidencia-se que este trabalho avança ao oferecer uma solução prática para a modernização de sensores analógicos, suprimindo uma necessidade não contemplada pelo estudo anterior.

4.2 AUTORES SEMINAIS PARA CALIBRAÇÃO 4.0

Autores seminais são aqueles que são relevantes e influentes em um determinado campo de pesquisa. Eles se destacam por fazerem contribuições significativas, por terem ideias inovadoras e deixarem um impacto duradouro em sua área. Muitas vezes, estudiosos os citam e fazem referência a eles, porque estão interessados em entender, desenvolver ou até mesmo questionar as teorias e conceitos já estabelecidos nesse campo. Os autores listados no **Quadro 3** são considerados seminais por estarem na vanguarda da pesquisa em metrologia 4.0 e suas correlações tecnológicas aplicadas à calibração de sensores de medição industrial.

Quadro 3 - Autores Seminais para Calibração 4.0

Tema	Tecnologia Aplicada	Autores	Quantidade Citada
<i>Towards a new generation of digital calibration certificate: Analysis and survey</i>	Análise de certificados digitais de calibração	Gadelrab, M.S.; Abouhogail, R. A. (2021)	8
<i>Sensors Calibration for Metrology 4.0</i>	Tecnologia de calibração avançada	Benitez, R. <i>et al.</i> (2019)	10
<i>Semantic Information in Sensor Networks: How to Combine Existing Ontologies, Vocabularies, and Data Schemes to Fit a Metrology Use Case</i>	Integração de ontologias	Gruber, M. <i>et al.</i> (2020)	7
<i>Semantic Description of Quality of Data in Sensor Networks</i>	Desenvolvimento de ontologias	Vedurmudi, A. <i>et al.</i> (2021)	9
<i>Metrology for the Factory of the Future: Towards a Case Study in Condition Monitoring</i>	Estudo de caso em monitoramento de condição	Dorst, T. <i>et al.</i> (2019)	14
<i>Metrological Challenges in Collaborative Sensing: Applicability of Digital Calibration Certificates</i>	Investigação sobre o uso de certificados digitais de calibração em sensoriamento colaborativo	Mustapää, T. <i>et al.</i> (2020)	15
<i>Infrastructure for Digital Calibration Certificates</i>	Desenvolvimento de infraestrutura para certificados digitais de calibração	Brown, C. <i>et al.</i> (2020)	13
<i>Digital Metrology for the Internet of Things</i>	Integração de dispositivos IoT em sistemas de metrologia digital	Mustapää, T. <i>et al.</i> (2020)	11
<i>Calibration for Industry 4.0 Metrology: Touchless Calibration</i>	Técnicas de calibração sem contato	Andonov, S.; Cundeva-Blajer, M. (2018)	14
<i>An Opportunity to Enhance the Value of Metrological Traceability in Digital Systems</i>	Estratégias para melhorar a rastreabilidade metrológica em sistemas digitais	Hall, B. D. (2019)	12

Fonte: Elaborado pelo Autor

4.3 REVISÃO BIBLIOMÉTRICA - BIBLIOMETRIX

De acordo com o *website* Bibliometrix (2024), bibliometrix é um conjunto de ferramentas para a linguagem de programação R, sendo aplicado em pesquisas

quantitativas na área de bibliometria e cientometria. Esta ferramenta oferece diversos recursos de análise quantitativa dos dados bibliométricos.

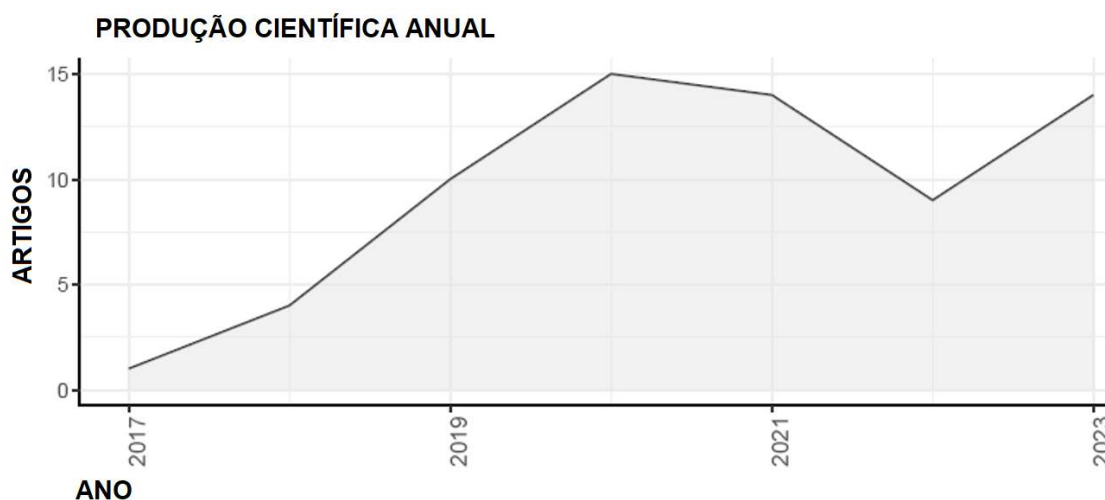
Com base em um *script* rodado no programa R, utilizado o pacote bibliometrix, foi extraído um conjunto de dados estatísticos para o levantamento bibliométrico deste trabalho. A seguir, são apresentados os dados extraídos, com foco nas técnicas e métodos publicados que se correlacionam com a calibração 4.0

A **Figura 14** mostra um gráfico de linha que representa a produção científica anual com base nos 165 trabalhos compilados pelo bibliometrix, estendendo-se de 2017 a 2023. É observado um relativo aumento linear dos trabalhos científicos no período de 2017 a 2019, este pode estar atrelado a algum incentivo de financiamento ou necessidades latentes de expansão do conhecimento sobre os temas dentro deste contexto. No ano de 2020 houve uma significativa diminuição de trabalhos publicados, muito provavelmente ocasionado pela pandemia da COVID-19.

Esta redução de produção deve ter sido consequência de interrupções de pesquisas, ausência de congressos e colaborações internacionais de países mais afetados pela pandemia.

No ano de 2021 é notada uma tendência de ascensão dos trabalhos, pode-se atribuir uma retomada gradual das pesquisas e/ou uma adaptação ao “novo normal” ocasionado pela crise sanitária mundial.

Nos anos de 2022 e 2023 fica demonstrada uma estabilidade das publicações com tendência de aumento das pesquisas na área. Por meio deste gráfico pode-se extrair uma sinalização de contribuições consideráveis, dando subsídios para o setor de políticas científicas, gestores de pesquisas científicas e acadêmicas, e com este também desenvolver parâmetros para uma metodologia de adaptação aos efeitos de eventos externos que podem impactar nas produções científicas.

Figura 14 – Produção científica anual em termos de número de artigos

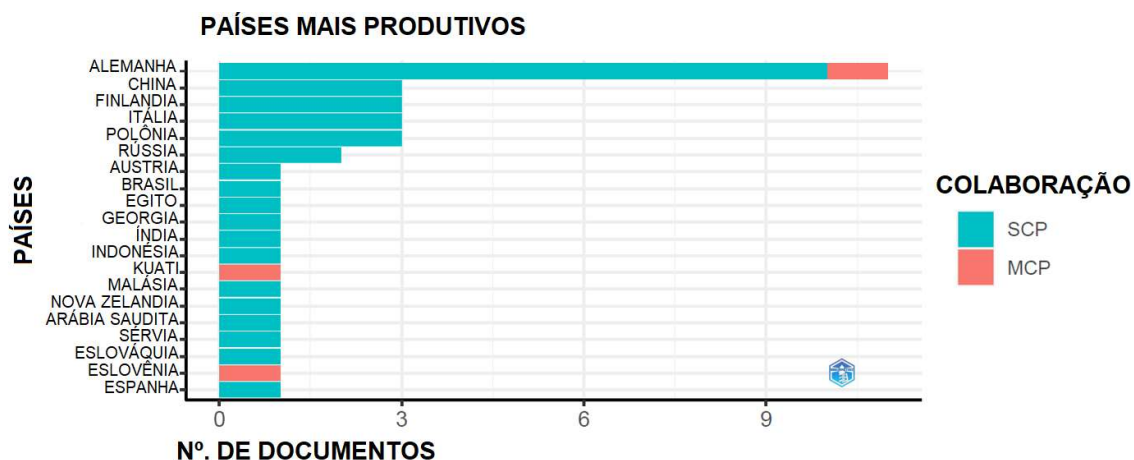
Fonte: Adaptado de Bibliometrix (2024)

A **Figura 15** ilustra um gráfico de barras horizontais que representa os países mais produtivos em termos de publicações científicas, no segmento metrológico. As barras são diferenciadas por duas cores, azul claro (SCP - *Single Country Publications*) e vermelho (MCP - *Multiple Country Publications*), indicando o número de documentos publicados individualmente por um país e/ou em colaboração internacional.

Por meio dos dados apresentados neste gráfico, é notório que o país Alemanha lidera em publicações individuais e em colaboração com outros países, isto sinaliza um destaque no meio científico global e com viés para trabalhos em rede.

Outro país que se destacou foi a China, este possui uma quantidade expressiva de publicações, mas com um menor grau de colaborações com outros países, qual isto pode indicar um certo conservacionismo de pesquisas regionais ou políticas de fomentação que visam promover somente a tecnologia local nacional.

Os demais países, como Itália e Finlândia, possuem uma participação ativa demonstrando um bom ponto de equilíbrio entre MCP e SCP, qual sinaliza um interesse de compartilhamento tecnológico global. O Brasil, Espanha e Rússia, possuem também participação com as comunidades científicas, embora com uma menor quantidade de publicações comparativamente com os principais publicadores.

Figura 15 – Países mais produtivos em termos de publicações científicas

Fonte: Adaptado de Bibliometrix (2024)

A **Figura 16** apresenta um histograma que classifica os autores mais produtivos com base no número de documentos publicados. O eixo horizontal indica o número de documentos (de 0 a 5), enquanto o eixo vertical lista os autores em ordem decrescente de produtividade.

A partir da figura, é observado que o autor mais produtivo contribuiu com cinco documentos, destacando-se como uma figura significativa no campo de estudo em questão. Seguem-se vários autores com quatro publicações, indicando que há um grupo de pesquisadores que também são ativos.

Além desses, um número maior de autores publicou três ou menos documentos. Este padrão sugere uma distribuição típica de produtividade na pesquisa acadêmica, onde poucos autores publicam a maioria dos trabalhos, enquanto a maioria dos autores publica menos.

Isto pode refletir o envolvimento desses autores em projetos de pesquisa extensivos, a sua posição de liderança em grupos de pesquisa ou a sua especialização em áreas de alta demanda.

O gráfico pode servir de base para identificar potenciais colaboradores ou líderes de opinião no campo, e também pode indicar áreas de pesquisa em crescimento ou declínio, dependendo da comparação destes dados ao longo do tempo. Além disso, tais análises podem ser úteis para instituições e financiadores a tomarem decisões sobre onde investir recursos para pesquisa e desenvolvimento.

Figura 16 – Autores mais produtivos com base no número de documentos publicados



Fonte: Adaptado de Bibliometrix (2024)

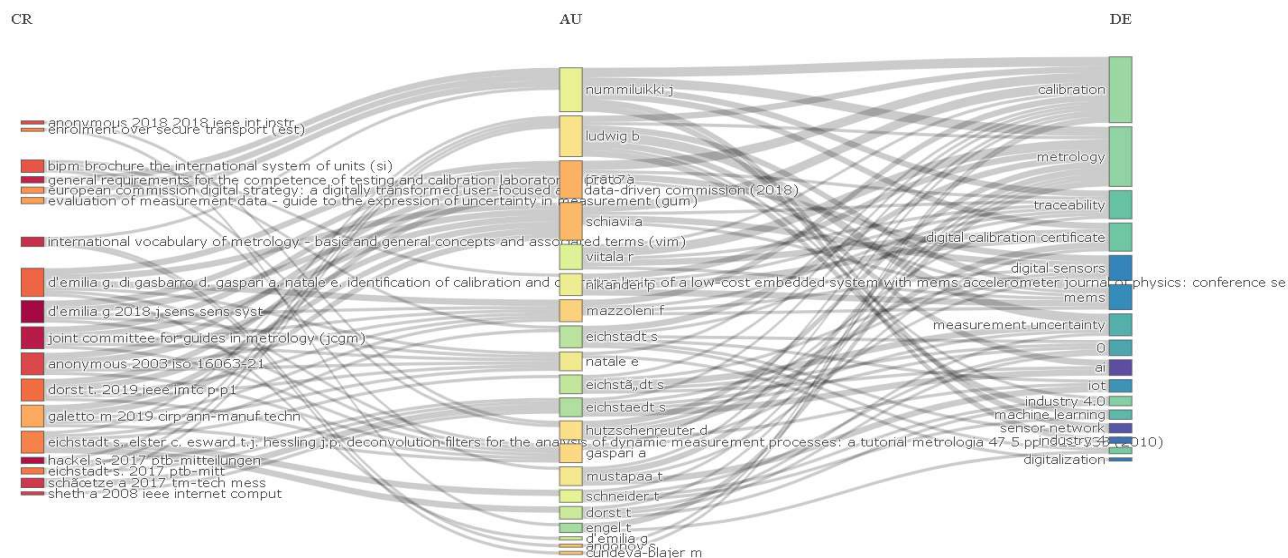
A **Figura 17** apresenta um gráfico de Sankey, que é utilizado para representar fluxos e suas quantidades proporcionalmente, neste caso, para mostrar a relação entre referências citadas (CR), autores (AU), e descritores ou palavras-chave (DE) de publicações científicas. No lado esquerdo, as referências citadas aparecem variadas, com algumas destacando-se pela espessura das conexões, indicando que foram frequentemente referenciadas. No centro, os autores servem como intermediários, demonstrando quais indivíduos contribuíram significativamente para o campo e quais publicações ou conceitos eles estão mais frequentemente associados.

À direita, as palavras-chave demonstram os principais temas ou conceitos discutidos nas publicações. A largura das conexões entre os autores e as palavras-chave sugere a frequência e a força da associação entre os autores e os temas específicos. Palavras-chave como "*calibration*", "*metrology*", "*traceability*", e "*digital calibration certificate*" estão proeminentemente conectadas a vários autores, sugerindo que estes são tópicos centrais em suas pesquisas. Isso indica uma forte ênfase na digitalização e na precisão dentro do campo da metrologia. Tópicos como "*AI*", "*IoT*", "*Industry 4.0*", e "*machine learning*" também aparecem, refletindo o interesse crescente na interseção entre metrologia e tecnologias avançadas.

Em suma, o gráfico fornece uma visão instantânea das redes de conhecimento e colaboração dentro deste campo de estudo, indicando quais são os tópicos mais relevantes e quem são os principais contribuintes. Isso pode ser particularmente útil para novos pesquisadores que buscam entender as tendências

atuais, bem como para acadêmicos e profissionais que procuram colaboradores com interesses de pesquisa similares.

Figura 17 – Gráfico de Sankey



Fonte: Bibliometrix (2024)

A **Figura 18** apresenta um gráfico de bolhas que ilustra as "Fontes Mais Relevantes" em um determinado campo de pesquisa ou estudo. As bolhas representam o número de documentos publicados pelas fontes, com sua localização no eixo horizontal indicando a quantidade de documentos e a posição vertical correspondendo a fontes específicas.

Neste caso, a fonte mais produtiva, que se destaca com a maior bolha (indicando 6 documentos), é o "2021 IEEE *International Workshop on Metrology for Industry 4.0*", seguido pelo "Journal of Physics: *Conference Series*" com 5 documentos.

Outras fontes como "2019 IEEE *International Workshop on Metrology for Industry 4.0*", "2019 IMEKO TC4 *International Symposium Electrical*", "IMEKO TC6 *International Conference on Metrology*", e "Sensors" são consistentemente produtivas com 3 documentos cada.

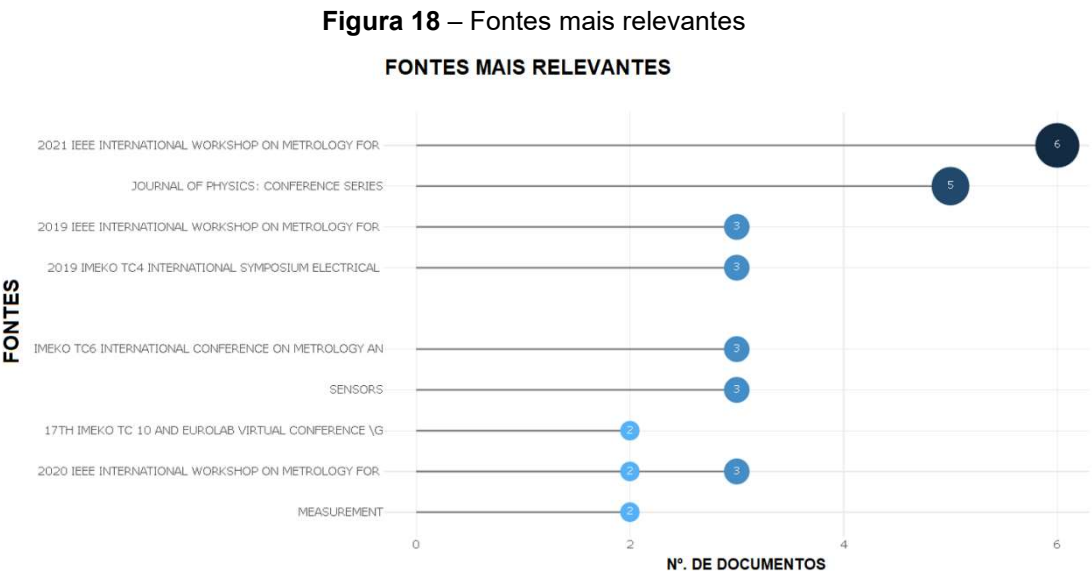
Este gráfico é útil para identificar quais conferências, simpósios ou revistas são os mais ativos e influentes na publicação de trabalhos relacionados ao tema em questão.

A presença de conferências e simpósios especializados sugere um foco significativo na área de metrologia aplicada à Indústria 4.0, refletindo a importância

deste tópico e o interesse da comunidade científica em discutir avanços e colaborar na área.

A distribuição das bolhas pode indicar tendências de publicação ao longo do tempo, sugerindo também quais fontes podem ser consideradas líderes de pensamento ou centros de inovação dentro do campo. Além disso, a variação no número de documentos pode refletir o impacto ou a relevância de cada evento ou publicação.

Por exemplo, o *workshop* de 2021 da IEEE demonstra ter sido um evento particularmente frutífero para novas pesquisas, o que poderia ser resultado de um ano específico de avanços notáveis ou de um aumento no interesse pelo tema.



Fonte: Adaptado de Bibliometrix (2024)

A **Figura 19** apresenta um gráfico de dispersão que destaca as "Fontes Mais Citadas Localmente" em um contexto específico de pesquisa ou estudo. Cada ponto no gráfico representa uma fonte diferente, com o número de citações locais que cada uma recebeu disposto ao longo do eixo horizontal.

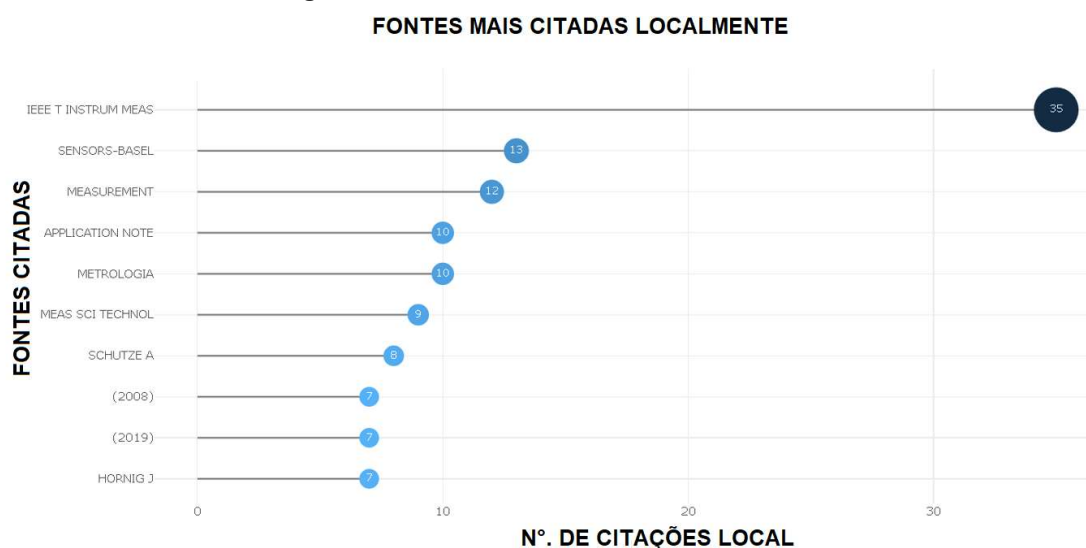
O destaque do gráfico é a fonte "*IEEE T. INSTRUM/MEAS*", que lidera significativamente com 35 citações locais, indicando uma influência ou relevância proeminente no campo em questão. Seguem-se "*SENSORS-BASEL*" e "*MEASUREMENT*" com 13 e 12 citações locais respectivamente, o que sugere que essas fontes são também referenciadas na comunidade local ou contexto de pesquisa.

As citações locais podem referir-se a citações dentro de uma determinada base de dados, instituição, ou mesmo um conjunto específico de estudos relacionados. A predominância de uma fonte em termos de citações locais pode refletir a relevância do conteúdo publicado, bem como o grau em que essa fonte é considerada autoritária ou influente na área de estudo específico.

Este gráfico é útil para identificar quais periódicos, conferências ou autores são frequentemente referenciados em pesquisas relacionadas, o que pode ajudar novos pesquisadores a localizar fontes importantes e estabelecer fundamentos para seus trabalhos. Além disso, pode auxiliar bibliotecários e instituições acadêmicas a decidirem quais fontes assinar ou adquirir.

No entanto, é importante notar que o número de citações não é necessariamente um indicador direto de qualidade, pois documentos altamente citados podem ser tanto de alta qualidade quanto controversos ou amplamente criticados. Portanto, enquanto um alto número de citações indica relevância e influência, avaliações adicionais são necessárias para compreender o contexto e o impacto dessas citações.

Figura 19 – Fontes Mais Citadas Localmente

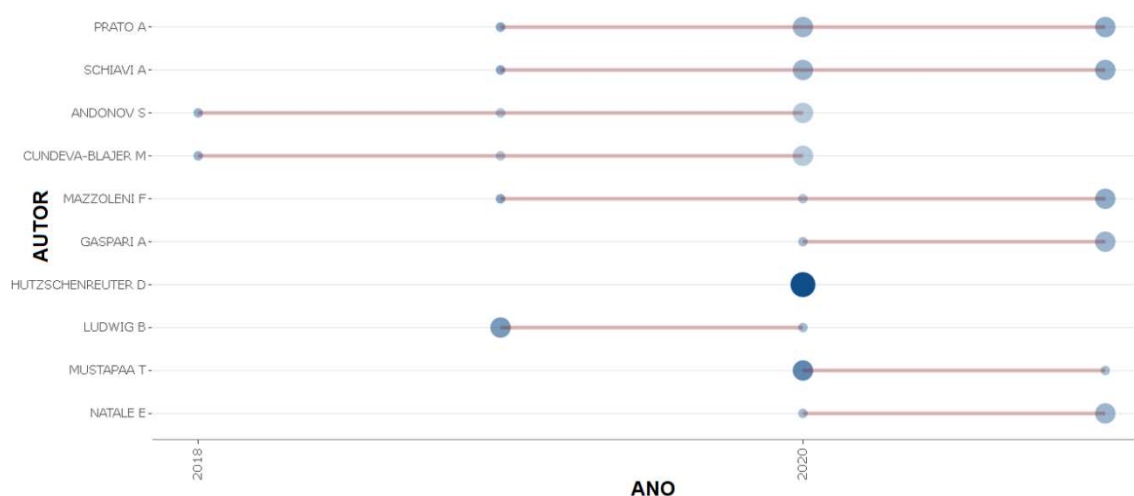


Fonte: Adaptado de Bibliometrix (2024)

A **Figura 20** apresenta um gráfico de dispersão que detalha a produção acadêmica ao longo do tempo de vários autores. Os círculos no gráfico apresentam publicações dos autores em anos específicos. De acordo com a dispersão dos círculos é apresentada a atividade de publicação de cada autor em função do tempo.

Este gráfico apresenta uma consistente produção ao longo dos anos, com modesto aumento de produção para alguns autores. O autor Hutzschenreuter, D. possui um círculo maior e mais baixo, remetendo uma publicação de maior impacto num específico ano. A variação do tamanho dos círculos informa a quantidade de publicações por ano, com círculos maiores indicando maior publicação.

Figura 20 – Produção acadêmica dos autores ao longo do tempo



Fonte: Adaptado de Bibliometrix (2024)

A **Figura 21** apresenta um mapa temático, que é uma ferramenta analítica importante na identificação da dinâmica de um campo específico de pesquisa. No mapa, cada tema é categorizado com base na sua centralidade, que indica sua relevância, e no seu grau de desenvolvimento, que aponta para sua maturidade dentro da área em questão.

Os temas de nicho, situados no quadrante superior esquerdo, são altamente desenvolvidos, mas ainda não são predominantes, o que sugere que eles possuem importância para subcomunidades dentro do campo.

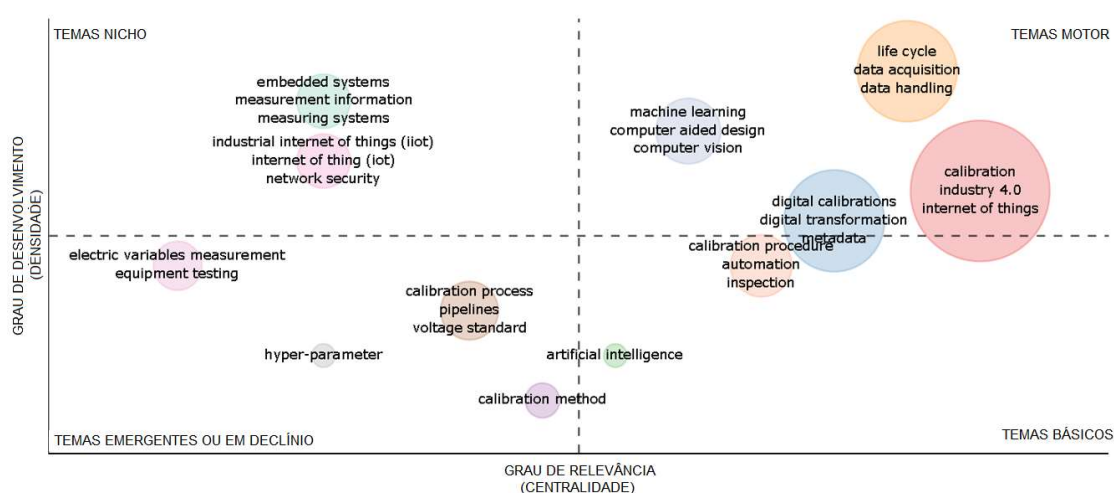
Por outro lado, os temas emergentes ou em declínio, encontrados no quadrante inferior esquerdo, são aqueles que estão começando a ganhar atração e despertar interesse ou, inversamente, estão perdendo sua antiga proeminência.

Dominando o quadrante superior direito, os temas motores são os pilares centrais do campo, demonstrando um alto grau de desenvolvimento e relevância. Estes são os tópicos frequentemente discutidos, publicados e citados, refletindo seu papel em impulsionar a pesquisa e o desenvolvimento na área.

Em contraste, os temas básicos, embora sejam centrais para a estrutura da área de pesquisa, não apresentam o mesmo nível de desenvolvimento que os temas motores, indicando que são conceitos fundamentais e que dão suporte ao campo, mas não necessariamente lideram o avanço do conhecimento.

Dentro deste contexto, temas como "*calibration*", "*industry 4.0*", e "*internet of things*" são classificados como motores, destacando-se como áreas de foco intensivo e interesse contínuo.

Figura 21 – Mapa temático



Fonte: Adaptado de Bibliometrix (2024)

4.4 ANÁLISE DA REVISÃO SISTEMÁTICA DE LITERATURA

Nesta seção, estão discutidos os resultados obtidos pela pesquisa, os quais contribuem para um melhor entendimento do contexto da metrologia 4.0 e, conseqüentemente, da calibração 4.0. É destacada a identificação de uma lacuna neste trabalho de tese, o que também leva à proposição de direcionamento para a fundamentação de pesquisas futuras.

O *framework* para calibração 4.0 foi desenvolvido com o objetivo de preencher uma lacuna na calibração de sensores de medição sem protocolo de comunicação digital, inseridos em um ambiente digitalizado como o da indústria 4.0. Este visa proporcionar benefícios, como maior eficiência na execução desta atividade, além da integração digital. Destaca-se a relevância da contextualização no âmbito da indústria 4.0, onde são fundamentais os sistemas de integração, automação e digitalização para a atualização e competitividade da manufatura industrial.

De acordo com a pesquisa de revisão sistemática de literatura, esta proposta está alinhada com as demandas tecnológicas relacionadas no contexto da metrologia 4.0. Os resultados sobre as tecnologias avançadas empregadas na metrologia reforçam que este *framework* possui potencial de uso em comparação com os métodos de calibração tradicionais. Por meio de integração das tecnologias habilitadoras, como visão computacional, IA, IoT, *big data* em computação em nuvem, são promovidas vantagens no procedimento de calibração.

A utilização de coletores de dados automáticos, como medidores de corrente elétrica, câmeras para identificação de caracteres nos *displays*, aliada a transmissão automática dos dados para a nuvem, processamento dos dados e geração autônoma de certificados digitais de calibração, proporciona uma melhoria considerável na transparência e disponibilidade dos dados obtidos.

Com base na análise dos 37 trabalhos, constatou-se uma tendência de adoção de tecnologias avançadas, como IA, IoT/IIoT, *big data*, automação, “*digital twin*” e computação em nuvem, na metrologia industrial. Os autores desses trabalhos apontam benefícios em diferentes etapas do processo comparativamente aos métodos convencionais de calibração, seja na coleta dos dados, transmissão, processamento ou na emissão do certificado digital de calibração. Sendo que nenhum destes trabalhos abordaram sobre o desenvolvimento de um *framework* para calibração 4.0, específico para sensores de medição sem protocolo de comunicação digital.

Conforme Garcia *et al.* (2023), as tecnologias habilitadoras da indústria 4.0 promovem um grande impacto na metrologia, contribuindo principalmente para um novo modelamento metodológico na realização das calibrações em campo. Benitez, Ramirez e Vazquez (2019), conduziram uma investigação sobre métodos integrativos de sensores digitais no ambiente da indústria 4.0 com ênfase em calibrações, e destacaram que a ciência metrológica necessita de novos métodos de calibração para atender os atuais conceitos da metrologia 4.0. De acordo com Barbosa *et al.* (2022), é essencial uma infraestrutura de qualidade digital (DQI) associada à digitalização da metrologia para uma manufatura inteligente.

Nos trabalhos de Gedelrab e Abouhogail (2021), Mustapää *et al.* (2020) e Brown *et al.* (2020), foram apresentadas análises críticas de certificados digitais de calibração, contribuindo para o desenvolvimento de uma nova geração de

documentos digitais, essenciais para a metrologia moderna. Segundo Gruber *et al.* (2020), demonstraram o ganho de eficiência na integração de ontologias em redes de sensores. O estudo de Dorst *et al.* (2019), demonstrou os desafios metrológicos nas condições de monitoramento da fábrica do futuro. Hall (2019), apresentou estudos sobre estratégias para a melhoria da rastreabilidade metrológica em sistemas digitais. Os autores Aranha *et al.* (2021), propuseram um modelo de arquitetura metrológica para ambientes com IoT.

Apesar das vantagens apresentadas por esses trabalhos, a adoção dessas técnicas apresenta alguns desafios, como integração de tecnologias, gestão de riscos, capacitação e a segurança de dados industriais. Alguns autores destacaram que esses aspectos devem ser abordados cuidadosamente para mitigar possíveis vulnerabilidades ao sistema como um todo.

Para a adoção desse *framework* pela indústria, foram identificados alguns desafios técnicos e operacionais. A quebra de paradigma por parte da indústria pode ser um dos principais obstáculos, pois as organizações tendem ao conservadorismo e a manutenção de tradições. Outra barreira envolve as adequações necessárias à infraestrutura tecnológica junto a necessidade de mão de obra especializada.

Para superar esses desafios sugere-se a adoção de estratégias baseadas no retorno sobre o investimento (ROI), o desenvolvimento de uma metodologia de capacitação operacional e a aplicação de testes pilotos para a demonstração do sistema. Por meio das estratégias de combate à rejeição, espera-se uma aceitação gradual e positiva deste *framework*. Esses desafios destacam a importância de uma abordagem estratégica para a adoção da implementação de novas tecnologias e a adequação à integração digital dos sensores analógicos. Uma comunicação eficiente dos benefícios pode contribuir para a superação das rejeições. A adoção de testes pilotos também poderá ajudar a identificar e mitigar problemas antes de uma implementação em larga escala, assegurando uma transição de metodologia mais eficaz.

A adoção de tecnologias como IA pode ampliar os benefícios, permitindo diagnósticos em tempo real e apontamento de ações para intervenção corretiva e/ou preventiva. Estes recursos contribuem significativamente para a gestão estratégica do tempo e a prevenção de possíveis paradas não programadas nos processos onde os sensores de medição sob calibração possuam algum nível de criticidade de

monitoramento e/ou controle. Essas características respaldam os estudos levantados sobre técnicas avançadas aplicadas na metrologia, demonstrando que essas tecnologias contribuem para a melhoria dos processos metrológicos.

A integração do *framework* com o sistema de gestão da qualidade informatizado, prevê o compartilhamento de dados em tempo real, contribuindo para um gerenciamento mais eficiente da conformidade nos processos de calibração da instrumentação instalada nas indústrias. Essas ações representam um avanço significativo em relação aos métodos tradicionais de calibração.

As pesquisas desenvolvidas na área da metrologia aplicada à Indústria 4.0 precisam considerar as normas pertinentes em vigor. As normas ABNT NBR ISO, como a 13485:2016, 14001:2015, 9001:2015 e ISO/IEC 17025:2017, são fundamentais para assegurar a conformidade e a eficácia dos processos metrológicos em ambientes regulados e industriais. A norma AS9100D, específica para organizações de aviação, espaço e defesa, complementa tais requisitos, enfatizando a qualidade e a segurança para processos críticos da indústria.

O predado dos estudos revisados reflete uma tendência de integração e inovação dos processos metrológicos, destacando a necessidade de novas abordagens e metodologias para lidar com os desafios da metrologia na era digital. A digitalização em consonância com a implementação das normas ISO não apenas assegura a qualidade dos produtos e serviços, mas também demonstra um compromisso com a sustentabilidade ambiental. Isso é particularmente relevante para organizações que operam em setores sensíveis como saúde, aviação, espacial e defesa, onde a precisão e a confiabilidade são críticas. A integração das normas com as práticas de metrologia para a Indústria 4.0, como a calibração automática e a utilização de certificados digitais de calibração, oferece uma base sólida para a inovação e a melhoria contínua.

A integração dessas normas com as tecnologias emergentes da indústria 4.0, conforme ilustrado pelos estudos de Andonov e Cundeva-Blajer (2018, 2019, 2020), indica uma evolução metrológica para além dos métodos tradicionais, adotando técnicas de calibração sem contato e análises comparativas entre calibrações tradicionais e baseadas em tecnologia Tcal.

Com base na revisão de literatura e em estudos recentes sobre as técnicas adotadas para a calibração 4.0, entende-se que um *framework* para calibração 4.0

pode contribuir para o preenchimento desta lacuna e, conseqüentemente, trazer benefícios para o setor metrológico industrial. Esses benefícios incluem a redução de custos com a aquisição de sensores de *back-up*, a parada da linha para retirada e instalação do sensor, a vulnerabilidade da linha por rodar sem um sensor, o tempo de espera para a execução do serviço de calibração, o custo de logística de transporte, a vulnerabilidade ao dano do sensor no processo de transporte, geração automática do certificado de calibração, integração automática dos resultados da calibração com o sistema de gestão da qualidade, e a vinculação dos dados da calibração às variáveis de ambiente controlado de laboratório.

Os estudos revisados também evidenciam a importância e tendência da digitalização dos processos metrológicos. O avanço das infraestruturas para Certificados Digitais de Calibração (CDC) e a aplicação de tecnologias como *blockchain* para rastreabilidade metrológica, conforme Softic *et al.* (2021), são passos importantes para garantir a integridade e eficiência dos dados metrológicos. A interoperabilidade e os efeitos de rede na gestão de CDC's, conforme discutido por Nummiluikki *et al.* (2021), destacam a capacidade de aprimoramento da gestão de certificados de calibração.

A comunicação de dados e análise em redes de IoT, conforme discutido por Ačko *et al.* (2020), e a integração de dispositivos IoT em sistemas de metrologia digital apontados por Mustapää *et al.* (2020), ilustram a convergência da metrologia com as tecnologias da Indústria 4.0, expandindo as aplicações e melhorando a coleta de dados e sua análise. Essa convergência é necessária quando se trata de abordar os desafios metrológicos em ambientes de sensoriamento colaborativo, onde a precisão e a confiabilidade são cruciais.

A eficácia dessas sistemáticas na era digital depende da capacidade das organizações de se adaptarem e inovarem continuamente. A colaboração entre o meio acadêmico, os profissionais da indústria e os órgãos reguladores é fundamental para desenvolver soluções inovadoras que atendam às demandas emergentes, garantindo a relevância contínua das normas de gestão da qualidade. Este estudo ressalta a importância de uma abordagem holística e adaptativa na integração dos elementos de sustentação da garantia da qualidade na Indústria 4.0, destacando a necessidade de pesquisa contínua, desenvolvimento tecnológico e formação de competências para superar os desafios futuros.

A redução dos custos operacionais por meio da análise preditiva de dados de calibração, implica que os padrões de dados podem indicar a necessidade de manutenção ou algum tipo de ação. Esse fato permite intervenções antes de falhas críticas e implementação de algoritmos de prognóstico que podem prever o desempenho futuro do sensor com base nas tendências históricas de suas calibrações.

A contribuição para o aumento da qualidade dos produtos pode ser vista na implantação de sistemas de controle estatístico de processo (CEP) que usam dados de calibração em tempo real para verificar desvios estatisticamente significativos. Algoritmos usam técnicas de análise multivariável para determinar correlações entre variáveis de calibração e qualidade do produto, auxiliando na correção imediata dos desvios. Os sistemas de controle adaptativo ajustam automaticamente os parâmetros de produção com base nos resultados da calibração em tempo real, utilizando sistemas de comunicação acopladas para transmitir informações de calibração diretamente para os sistemas de controle de produção.

Embora este estudo forneça contribuições sobre a aplicação das tecnologias habilitadoras no avanço da metrologia e gestão da qualidade na Indústria 4.0, as limitações destacadas sublinham a necessidade de uma abordagem contínua de pesquisa e desenvolvimento. A adaptação às rápidas mudanças tecnológicas e às exigências regulatórias requerem um esforço colaborativo entre acadêmicos, profissionais da indústria e órgãos reguladores para garantir que as práticas de metrologia e gestão da qualidade evoluam para atender às necessidades emergentes da Indústria 4.0.

Outros segmentos de pesquisa potencialmente relevantes podem incluir o uso de redes neurais para análise dos dados voltados às condições preditivas e preventivas, e a aplicação de técnicas de realidade aumentada e realidade virtual para a visualização, monitoramento e treinamento nos processos de calibração. Estas sugestões de pesquisa podem fornecer informações importantes para o campo da metrologia, contribuindo para a contínua evolução tecnológica associada ao setor.

Para isso, é fundamental uma abordagem estratégica e colaborativa entre pesquisadores, profissionais da indústria e órgãos reguladores. Além disso, também é essencial considerar a necessidade de uma pesquisa continuada e desenvolvimento tecnológico para garantir a evolução das práticas de metrologia e gestão da qualidade na Indústria 4.0. Portanto, a calibração 4.0 é uma proposta importante para a melhoria

da competitividade e da sustentabilidade das organizações industriais, contribuindo para que elas atendam às demandas emergentes da Indústria 4.0 de forma eficiente e eficaz.

4.4.1 Considerações Sobre o Artigo “*Mapping of Processes and Risks in the Digital Transformation in Metrology of Ionizing Radiation, a Case Study in X-rays Air Kerma Calibration*”

O artigo “*Mapping of processes and risks in the digital transformation in metrology of ionizing radiation, a case study in X-rays air kerma calibration*”, elaborado por Garcia *et al.* (2023), aborda um estudo sobre a adoção da digitalização na metrologia aplicada à radiação ionizante, com foco na calibração do kerma do ar em raios-X (quantidade de energia transferida de partículas ionizantes para a matéria disposta no ar). Neste artigo, os autores pesquisam como as tecnologias habilitadoras da indústria 4.0 impactam na metrologia, promovendo uma modelagem conceitual para a calibração 4.0, a qual adota as recentes tecnologias e a integração digital.

Ao longo do estudo, esta pesquisa contextualiza a importância crescente dos sistemas de gestão da qualidade, juntamente com a metrologia, no contexto da indústria 4.0, incluindo a virtualização dos ambientes, os sistemas de integração e a supervisão de dados em tempo real. Além disso, são revisados alguns pontos de regionalização industrial na Europa, observados na Alemanha, sobre a indústria 4.0, e a importância de simulações matemáticas e físicas, exemplificando os experimentos digitalizados ao tornar-se igual ao real.

O artigo aborda ainda a realização do método FMEA (Análise de Modo e Efeito de Falha) para mensurar riscos vinculados a calibração digitalizada, com foco na confiabilidade dessa metodologia. O trabalho revela uma modelagem conceitual para calibração de quantidades de radiação ionizante, com equiparação a processos tradicionais e também os convencionais riscos com referência a calibração 4.0. Esta proposta de calibração 4.0 para medidor de radiação ionizante, é particionada em três módulos: um receptor (dispositivo a ser calibrado), uma rede de comunicação 4.0 e um transmissor (laboratório de calibração), associando-os tecnologias adotadas pela indústria 4.0.

Com base na análise desse estudo, foi detectado uma redução no risco total comparando-o aos processos de calibração convencionais, mas também foi

identificada a existência de riscos adicionais significativos, particularmente relacionados ao processo de digitalização do método. Foi destacado que a minimização desses é ainda um desafio para a ciência metrológica, apesar de que a IA e os sistemas de automação possam mitigar estes riscos. Esse trabalho levanta a importância da aplicação das técnicas de mapeamento de risco, visando o gerenciamento de deficiências latentes e desvios inerentes ao sistema de calibração.

Por fim, o trabalho destaca os principais desafios para a implantação deste modelo de calibração 4.0, que são: integração de tecnologias, gerenciamento de riscos, padronização, interoperabilidade, validação e confiabilidade, adoção por parte da indústria e desenvolvimentos de sistemas para digitalização de certificados de calibração. As considerações apresentadas no trabalho *“Mapping of processes and risks in the digital transformation in metrology of ionizing radiation, a case study in X-rays air kerma calibration”*, elaborado por Garcia *et al.* (2023), divulgado no *Brazilian Journal of Radiation Sciences*, possuem uma significativa contribuição para a prática da calibração 4.0, especificamente no cenário da metrologia de radiação ionizante, na área da saúde.

Por meio de uma observação mais meticulosa e fundamentada conceitualmente, os autores abordaram diversos aspectos críticos e importantes do processo de digitalização da metrologia, contribuindo com sugestões para a área. Seu aporte para a evolução da ciência na implementação da calibração 4.0 é incontestável, apresentando as possibilidades e desafios intrínsecos a esta modalidade contemporânea.

Porém, apesar das significativas contribuições ao campo da metrologia de radiação ionizante, uma análise mais criteriosa demonstra certas lacunas relevantes. Estas lacunas não geram demérito ao trabalho desenvolvido, mas evidenciam áreas que necessitam de uma atenção particularizada. Ao apontar estas lacunas, a intenção é melhorar o estudo existente, recomendando um norteamento às próximas intenções de pesquisas sobre as questões pendentes e contribuir com a ciência da metrologia 4.0.

Com base nessa avaliação, foram levantadas as seguintes lacunas:

Detalhamento técnico de soluções: A pesquisa aborda os desafios tecnológicos e sugere um modelo conceitual de calibração 4.0, mas há ausência de uma maior imersão nas resoluções técnicas. Detalhes sobre como os dados são

processados, avaliados, e aplicados para a calibração dos sensores seriam relevantes para a compreensão da viabilidade técnica do modelo apresentado.

Aspectos de implantação e custo: São apresentadas superficialmente as dificuldades sobre a aplicação da calibração 4.0, considerando ao receio da implantação de métodos diferenciados. No entanto, não é discutido em profundidade as características da implementação das tecnologias, os custos relacionados e estratégias para a superação dos obstáculos, bem como empresas de portes diversificados poderiam se adaptar a estas tecnologias.

Avaliação quantitativa do impacto: Há ausência de análise quantitativa dos benefícios da calibração 4.0 equiparada aos métodos convencionais. A compreensão sobre as vantagens na exatidão, redução no tempo de execução da calibração e os efeitos na eficácia funcional seriam pertinentes para fundamentar a defesa da adoção de novas práticas na calibração.

Legislação e normas: O trabalho menciona a importância de padrões e normalizações para a adoção da calibração 4.0, mas não investiga as lacunas atuais na legislação ou futuras normalizações que podem ser modeladas visando a adesão da calibração digitalizada.

Treinamento e educação: Uma outra ausência de abordagem é com relação a necessidade de qualificação e habilitação de profissionais para se atualizarem às novas tendências tecnológicas da metrologia. Apontamentos sobre sistemas de capacitação e conhecimentos necessários são essenciais para o êxito na implantação da calibração.

Sustentabilidade e impacto ambiental: O trabalho não contempla a implicação ao impacto ambiental da calibração 4.0 ou como este método se relaciona com os requisitos da sustentabilidade. Uma abordagem sobre a adoção da calibração 4.0 pode auxiliar as operações no quesito sustentabilidade.

Integração de sistemas legados: Existe uma grande gama de indústrias que operam com sensores e sistemas de medição convencionais e analógicos, sem conexão às redes digitais da indústria 4.0. A adequação ou integração desses sistemas legados as redes digitais é um grande desafio. É de significativa relevância uma abordagem de integração de sistemas analógicos aos digitais, considerando *retrofitting* de dispositivos convencionais aplicando interfaces de leitura/comunicação

ou até considerar o desenvolvimento de *middleware* fazendo o papel de conexão entre os tipos de formatos de dados.

Análise de retorno sobre investimento (ROI): Neste trabalho existe ausência sobre a abordagem relacionada ao retorno sobre investimento na adoção da calibração 4.0. Apesar de que seja evidente os benefícios operacionais deste método como precisão, eficácia, logística, o investimento inicial e a complexidade da implantação podem ser fatores impeditivos para tal aplicação. Considerar um detalhamento sobre o ROI da implantação do sistema de calibração 4.0, aportando todas as esferas de investimento, é de significativa relevância, pois contribuiria com as indústrias considerarem a adoção da calibração 4.0.

Limitações de abrangência: O trabalho apresentado é focado num projeto para a calibração de dispositivos de raio-X adotando tecnologias habilitadoras digitais qual delimita seu emprego em outros tipos de dispositivos, especialmente os convencionais analógicos sem conexão digital. Esta exclusão deixa uma lacuna voltada a uma ampla gama de dispositivos analógicos inseridos nos diversificados processos industriais.

Com base nestes apontamentos, é de fundamental relevância a existência de um modelo de calibração 4.0 mais amplo qual possa atender aos sensores de medição de tecnologias convencionais. O desenvolvimento de interfaces digitais de comunicação possibilita a digitalização dos dados dos dispositivos analógicos, facilitando a integração aos sistemas de calibração 4.0.

5 **FRAMEWORK PARA CALIBRAÇÃO 4.0**

Segundo Green *et al.* (2012), um *framework* trata-se de uma associação lógica e conectada de premissas e conceitos elaborados por meio de uma ou mais teorias, onde o responsável pela pesquisa apresenta uma proposta de estudo. Teoricamente um *framework* contempla o estudo realizado pelo pesquisador para fazer uso dos conceitos em uma determinada aplicação.

A abordagem conceitual de um *framework* justifica a realização de uma pesquisa, qual abrange a exposição do cenário atual dos conceitos reconhecidos no meio acadêmico e/ou científico, e apresentando lacunas com base nos fundamentos metodológicos do trabalho investigado. O estudo visa responder sobre a importância da pesquisa e as contribuições que trará para o meio (GREEN *et al.*, 2012).

O *framework* para calibração 4.0 é composto por cinco partes modulares. A primeira parte consiste em um subsistema composto por dispositivos de coleta de imagem e/ou de sinais elétricos (tensão ou corrente). A segunda parte consiste em uma unidade microprocessadora para os sinais coletados. A terceira parte consiste em um subsistema responsável pela transmissão dos dados coletados a um local de armazenamento.

A quarta parte trata-se de um subsistema de armazenamento de dados em nuvem (local ou remoto). A quinta parte um subsistema de processamento final dos dados, com análise e geração do certificado digital de calibração e interface ao usuário.

Os elementos tecnológicos de cada parte podem possuir características particulares e adaptativas em virtude de cada cenário. A adoção de técnicas de IA na etapa de processamento final dos dados, pode ser empregada para identificar padrões de comportamento e aplicação de recomendações para intervenção na instrumentação.

O armazenamento dos dados de calibração e a documentação digital gerada podem ser assegurados por meio de um sistema *blockchain*, permitindo a rastreabilidade e integridade dos dados do processo de calibração.

5.1 CONTRIBUIÇÕES DAS PESQUISAS NA CONSOLIDAÇÃO DO *FRAMEWORK*

Este tópico aborda as contribuições das pesquisas analisadas para a consolidação do *framework* proposto, com foco na integração de tecnologias

emergentes e metodologias avançadas que apoiam a calibração 4.0 de sensores analógicos.

Os módulos constituintes são fundamentados em estudos relevantes e incorporam tecnologias alinhadas à quarta revolução industrial, como visão computacional, algoritmos de IA, técnicas de calibração multivariáveis e processamento digital de sinais. Essas tecnologias têm o potencial de transformar processos tradicionais, assegurando maior precisão, automação e confiabilidade nos ambientes industriais. Esses elementos qualifica o *framework* como uma solução robusta e interoperável, compatível com as demandas da gestão digital e indústria 4.0.

Os métodos de calibração, descritos por Prato *et al.* (2021), Yan *et al.* (2022) e Šimić *et al.* (2023), empregam técnicas como comparação direta, autocalibração e modelos multivariáveis para lidar com não-linearidades de sensores e variáveis de influências externas, como temperatura e pressão. Esses estudos destacam que técnicas baseadas em redes neurais auxiliam na calibração adaptativa em tempo real, enquanto a abordagem multivariável melhora a confiabilidade e reduz erros sistemáticos, otimizando os resultados nos processos industriais.

O módulo de aquisição de dados baseado em sistemas de visão computacional para calibração, elimina a dependência de medições manuais em instrumentos analógicos, que estão sujeitos a erros de leitura, baixa precisão e alta variabilidade. Esse módulo integra visão computacional e técnicas de IA, com base nos benefícios destacados por Andonov e Cundeva-Blajer (2018), Schütze *et al.* (2018), Belan *et al.* (2019), Wang (2022) e Li e Jia (2022). Combinados com a tecnologia IoT, possibilitam a transmissão de dados em tempo real, monitoramento dinâmico, mesmo em ambientes adversos, e uma maior eficiência no fluxo de calibração, especialmente para medidores analógicos sem comunicação digital.

No módulo de processamento dos sinais coletados dos instrumentos, conforme os estudos de Benitez *et al.* (2019), Eichstädt *et al.* (2021) e Zaiming *et al.* (2017), os sinais analógicos são convertidos em digitais e processados para minimizar ruídos e inconsistências. Algoritmos avançados asseguram a validação e a qualidade dos dados, permitindo a identificação de anomalias e a implementação de análises preditivas que reduzem o tempo de inatividade nos processos industriais. Além disso, modelos baseados em inteligência artificial aumentam a confiabilidade dos dados calibrados.

De acordo com o estudo de Hall (2019), o módulo de microprocessamento para tratamento de sinais elimina dependência de sistemas externos e intervenções manuais para ajustes de sensores em tempo real. Com *firmware* embarcado, esses dispositivos oferecem integração com protocolos analógicos e sistemas IoT, garantindo compatibilidade e flexibilidade.

O módulo de transmissão e integração de dados, conforme apresentado nos estudos de Garcia *et al.* (2023), Mustapää *et al.* (2020) e Varshney *et al.* (2021), supera as limitações de tecnologias convencionais ao empregar por exemplo, LoRa, Zigbee e 5G para uma transmissão de dados de calibração mais eficiente e segura. A adoção de protocolos criptográficos assegura a integridade das informações, enquanto a integração direta com sistemas ERP e MES elimina etapas manuais, otimizando os processos industriais e acelerando a gestão da calibração.

No módulo de armazenamento de dados, os estudos de Frost e Sullivan (2021) e Eichstädt *et al.* (2021) destacam o uso de uma arquitetura híbrida que combina armazenamento local, para acesso rápido, e armazenamento remoto em nuvem, para análises avançadas. Essa abordagem aumenta a confiabilidade, oferece redundância e facilita o acesso remoto aos dados.

Com base nos estudos de Yan *et al.* (2022), Schütze *et al.* (2018), Zaiming *et al.* (2017), Šimić *et al.* (2023) e Eichstädt *et al.* (2021), o módulo de tratamento dos dados coletados utiliza conversores e algoritmos para eliminar ruídos e inconsistências nos dados. Técnicas de aprendizado de máquina e redes neurais podem ser empregadas no ajuste de parâmetros em tempo real, garantindo a validação, confiabilidade e a detecção precoce de falhas. O processamento descentralizado reduz a latência, enquanto as análises preditivas minimizam a necessidade de recalibrações e antecipam problemas, otimizando a eficiência dos sistemas de manufatura.

O módulo de apresentação dos resultados da calibração, embasado nos estudos de Nazarre e Martins (2019), Schütze *et al.* (2018), Mustapää *et al.* (2020) e Nummiliikki *et al.* (2021), é automatizado e inclui elementos como histórico, padrões utilizados, metodologia, configuração (*set-up*) e dados estatísticos, com certificados digitais gerados em formatos legíveis por máquinas. Esses certificados podem ser protegidos por *blockchain* e assinados digitalmente pelo responsável técnico da calibração. A formatação desses certificados assegura rastreabilidade, autenticidade

e segurança, além de poder possibilitar a integração com sistemas de gestão industrial por meio de APIs. Essa abordagem contribui com a eliminação de riscos de adulteração, reduz erros manuais e acelera os processos de validação, auditoria e análise crítica.

5.1.1 Aspectos Inovadores do Estudo

A presente pesquisa introduz uma abordagem inovadora para a calibração 4.0, focada na integração digital de sensores analógicos, um segmento ainda pouco explorado na literatura e nas práticas industriais. Enquanto estudos anteriores abordaram a digitalização da calibração para sensores equipados com protocolos de comunicação digital, este trabalho avança ao propor um *framework* estruturado para calibração de sensores analógicos, permitindo sua interoperabilidade com os sistemas inteligentes da Indústria 4.0.

Além disso, o *framework* desenvolvido considera métodos automatizados de aquisição e processamento de dados, eliminando a necessidade de calibrações manuais e reduzindo significativamente o tempo de operação e os custos associados. Diferente das metodologias convencionais, que dependem da calibração em laboratório e do transporte dos sensores, o modelo proposto viabiliza a calibração *in situ*, garantindo maior rastreabilidade e confiabilidade dos processos metrológicos.

Outro diferencial desta pesquisa é a análise das barreiras tecnológicas e operacionais para a implementação da calibração 4.0 em dispositivos analógicos. O estudo identifica desafios específicos, como a ausência de interfaces digitais nesses sensores e a necessidade de novos métodos para compatibilizar seus dados com infraestruturas digitais. Como resultado, o *framework* propõe um modelo adaptável, que pode ser implementado em diferentes setores industriais sem a necessidade de substituição imediata dos sensores já em operação.

Por fim, esta pesquisa também destaca implicações estratégicas para a modernização da metrologia industrial, proporcionando um avanço significativo para a integração de dispositivos convencionais no ecossistema da Indústria 4.0. Os resultados obtidos sugerem que a adoção do *framework* pode contribuir para a redução de paradas produtivas, melhoria na precisão das medições e maior segurança nas operações industriais, consolidando a calibração 4.0 como um elemento essencial para o futuro da metrologia digital.

5.2 ESTRUTURAÇÃO DO *FRAMEWORK*

A **Figura 22** ilustra o fluxo para o desenvolvimento e validação do *framework* para calibração 4.0. Esta integra elementos como parametrização de critérios de aceitação, simulação do sistema de calibração, resultados de testes práticos, e a estruturação física do modelo. Cada etapa é conectada por processos-chave, como validação, verificação, execução, transformação e comparação, destacando a sinergia entre modelagem conceitual e implementação prática. Este diagrama demonstra uma abordagem sistemática e iterativa, estruturada para garantir precisão, confiabilidade e adaptabilidade em sistemas de calibração modernos, alinhando-se às demandas da Indústria 4.0.

Figura 22 - Desenvolvimento e Validação do *Framework* para calibração 4.0



Fonte: Elaborado pelo autor

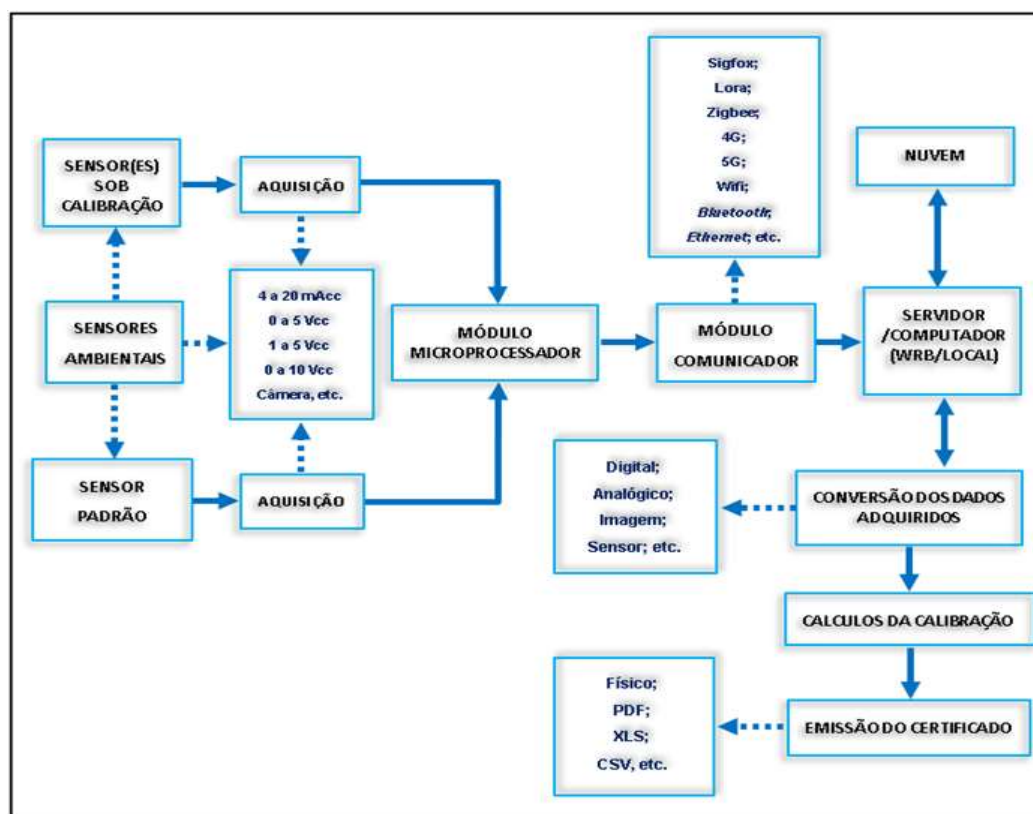
Cada etapa dessa matriz foi desenvolvida para atender à demanda da etapa subsequente, formando uma cadeia contínua de estruturação lógica e de praticidade. A seguir, são descritas as características de cada etapa que estão contidas no ciclo de desenvolvimento deste *framework*:

- **Parametrização/Critérios de Aceitação:** A parametrização e os critérios de aceitação são flexíveis, baseando-se na estrutura dos sensores em conformidade com normalizações definidas, parâmetros do processo e os limites de desempenho que os sensores de medição devem atender a diretrizes do sistema de gestão da qualidade. Esses parâmetros são estabelecidos com base em padrões internacionais, práticas de qualidade ou recomendações de fabricantes para garantir consistência e precisão das medições.
- **Fornecimento de Parâmetros:** O processo de fornecimento de parâmetros é o procedimento pelo qual as especificações necessárias são introduzidas no sistema de operação. Este procedimento informa ao sistema as expectativas de desempenho e as características operacionais dos sensores que serão calibrados.
- **Simulação do Sistema de Calibração:** A simulação do sistema de calibração permite o teste e o ajuste da configuração em um ambiente virtual controlado. Isso possibilita identificar problemas e otimizar processos antes da implementação real. Essa etapa é crucial para validar teoricamente o fluxo do modelo e identificar possíveis áreas de melhoria.
- **Modelagem:** A modelagem consiste na criação de representações matemáticas ou computacionais do processo de calibração dos sensores. Por meio da modelagem, é possível compreender a fundo a dinâmica e as interações dentro do sistema, para proporcionar uma calibração eficiente.
- **Validação:** Esse processo envolve testar o *framework* em relação aos padrões estabelecidos para verificar se as saídas de desempenho estão dentro dos limites aceitáveis pré-definidos. A validação é fundamental para garantir que o sistema de calibração seja confiável e adequado para o uso pretendido.
- **Calibração 4.0 (Modelo Conceitual):** O modelo conceitual da Calibração 4.0 prevê a integração de tecnologias e práticas de calibração avançadas, visando a automação e a precisão em sintonia com os avanços da indústria 4.0. Este modelo é o cerne do *framework*, coordenando e controlando todas as etapas do processo de calibração.
- **Implementação do Modelo Físico:** Na implementação do modelo físico, o modelo conceitual é transposto para a prática, envolvendo a configuração de *hardware* e a instalação de *software* necessários para operacionalizar o sistema de calibração.

- **Implementação do Operacional:** Implementar o *framework* envolve a aplicação prática do sistema no ambiente operacional. Essa fase é crítica, pois transita da teoria para o uso prático, e os resultados oferecem *feedbacks* para um contínuo melhoramento e adaptação do sistema.
- **Execução:** A execução é o processo ativo da calibração, onde o *framework* é operacionalizado para calibrar os sensores de acordo com os critérios estabelecidos. É o momento em que o sistema evidencia sua eficiência como uma opção de calibração 4.0.
- **Análise dos Resultados Práticos:** Os resultados práticos são os dados obtidos durante a fase de execução do *framework*. Esses resultados são analisados para avaliar a eficácia do sistema de calibração e identificar quaisquer desvios dos parâmetros definidos.
- **Transformação e Comparação:** Transformação e comparação referem-se à análise crítica dos resultados práticos em relação aos parâmetros de calibração estabelecidos. Esta etapa é essencial para transformar dados brutos em informações importantes e comparar o desempenho antes e depois da implementação do *framework*.
- **Verificação:** A verificação ocorre após a execução do *framework*, onde os resultados são comparados com os critérios de aceitação para confirmar se a calibração foi realizada como esperado. Testes adicionais podem ser aplicados na intenção de garantir a consistência dos resultados obtidos.

Na **Figura 23** é apresentada uma exemplificação do *framework* conceitual estrutural para calibração 4.0, ilustrando um diagrama em blocos do fluxo de processamento.

Figura 23– Conceito de *Framework* estrutural para calibração 4.0



Fonte: Elaborado pelo autor

O conceito de *framework* estrutural para calibração 4.0, representa uma arquitetura avançada que integra tecnologias de sensoriamento, processamento de dados e comunicação para realizar a calibração de sensores de medição de forma automatizada e inteligente. Este modelo reflete a convergência de diversas disciplinas e tecnologias, como metrologia, informática, ciência da computação e engenharia de comunicações, para a conformidade com às exigências da quarta revolução industrial, onde a precisão e a confiabilidade das medições são essenciais para garantir a qualidade e eficiência dos processos industriais.

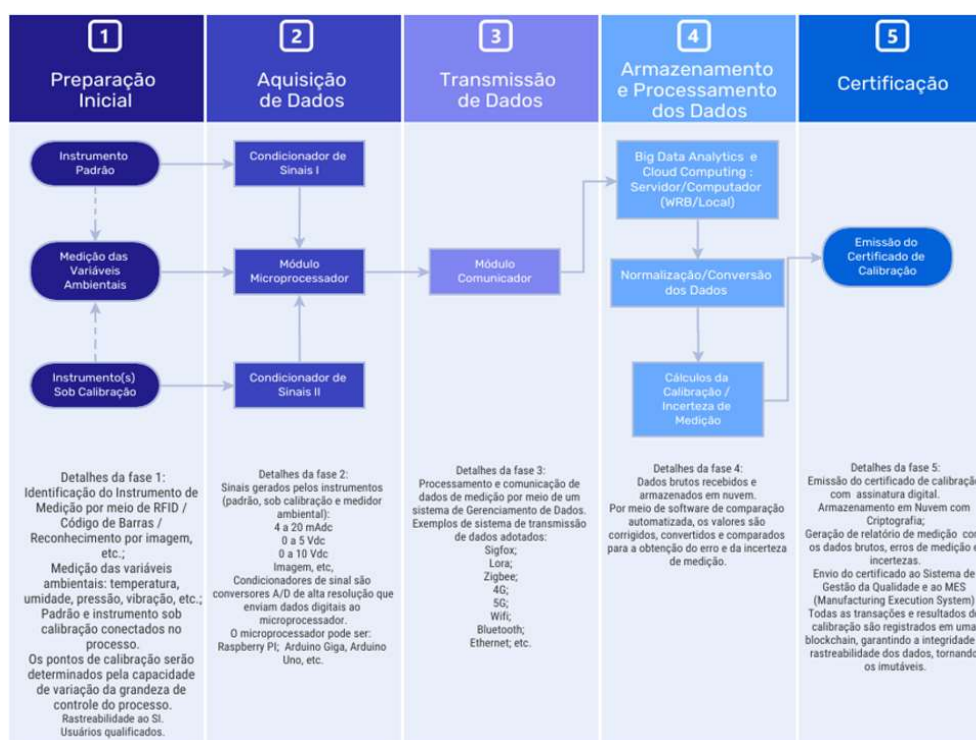
Na base primária deste *framework* conceitual encontram-se os sensores padrão e os sensores sob calibração, cujos dados são adquiridos por meio de uma interface e transmitidos a um módulo microprocessador. Essa interface é responsável pela captação dos sinais, que podem variar em natureza (como 4 a 20 mAcc, 0 a 5 Vcc, 1 a 5 Vcc, 0 a 10 V cc, dados de imagem, entre outros), convertendo-os para um formato processável digitalmente. A transmissão dos dados processados é realizada por meio de um módulo comunicador que pode utilizar diversas tecnologias de

comunicação sem fio e/ou com fio, como Sigfox, LoRa, Zigbee, 4G, 5G, Wi-Fi, *Bluetooth*, *Ethernet*, entre outros. Essa diversidade permite a flexibilidade e a escolha da tecnologia mais adequada ao ambiente específico da calibração, considerando fatores como alcance, largura de banda, consumo de energia e interoperabilidade.

Sequencialmente, os dados são enviados a um servidor, que pode estar hospedado na nuvem ou localmente (WRB/LOCAL), onde ocorre toda a tratativa dos dados. Esse estágio inclui a aplicação de algoritmos e a realização de todos os cálculos de calibração necessários, fundamentais para determinar a precisão e o desempenho dos sensores sob calibração em relação aos padrões de referência.

Por fim, o resultado do processo de calibração é a emissão de um certificado, que pode ser disponibilizado em vários formatos, como PDF, XLS, CSV, impresso, entre outros. Esse certificado constitui uma prova documentada da calibração, assegurando que os sensores estão calibrados dentro dos parâmetros especificados e garantindo a rastreabilidade metrológica. A **Figura 24** apresenta o sequenciamento das fases do conceito do *framework* estrutural, que se inicia com a preparação inicial da estrutura, seguida pela aquisição dos dados dos sensores, transmissão dos dados digitalizados, armazenamento e processamento desses dados por meio de algoritmos, culminando na emissão do certificado de calibração.

Figura 24 – Fases conceituais do *Framework* estrutural para Calibração 4.0



Fonte: Elaborado pelo autor

5.3 EXEMPLOS DE ESTRUTURA FÍSICA DO *FRAMEWORK*

O diagrama apresentado na **Figura 25**, exemplifica um *framework* para calibração 4.0 de um sensor industrial de medição de pressão relativa. A metodologia de calibração é realizada por método do comparativo com um padrão de referência de mesma grandeza física. O sensor sob calibração exibe seus valores de medição de forma analógica, por meio de um mostrador com escala graduada.

Os sensores, padrão de referência e sensor sob calibração estão conectados ao processo, qual deve ser pressurizado e despressurizado para gerar, idealmente, os ciclos e os pontos de calibração dentro da faixa de trabalho do sistema.

Essa pressurização e despressurização deverá ser gerada e controlada pelo sistema de controle da linha de processo. A coleta dos dados do mostrador está sendo realizada por meio de uma câmera de alta resolução, enquanto os dados do padrão são coletados por meio de uma interface analógico/digital.

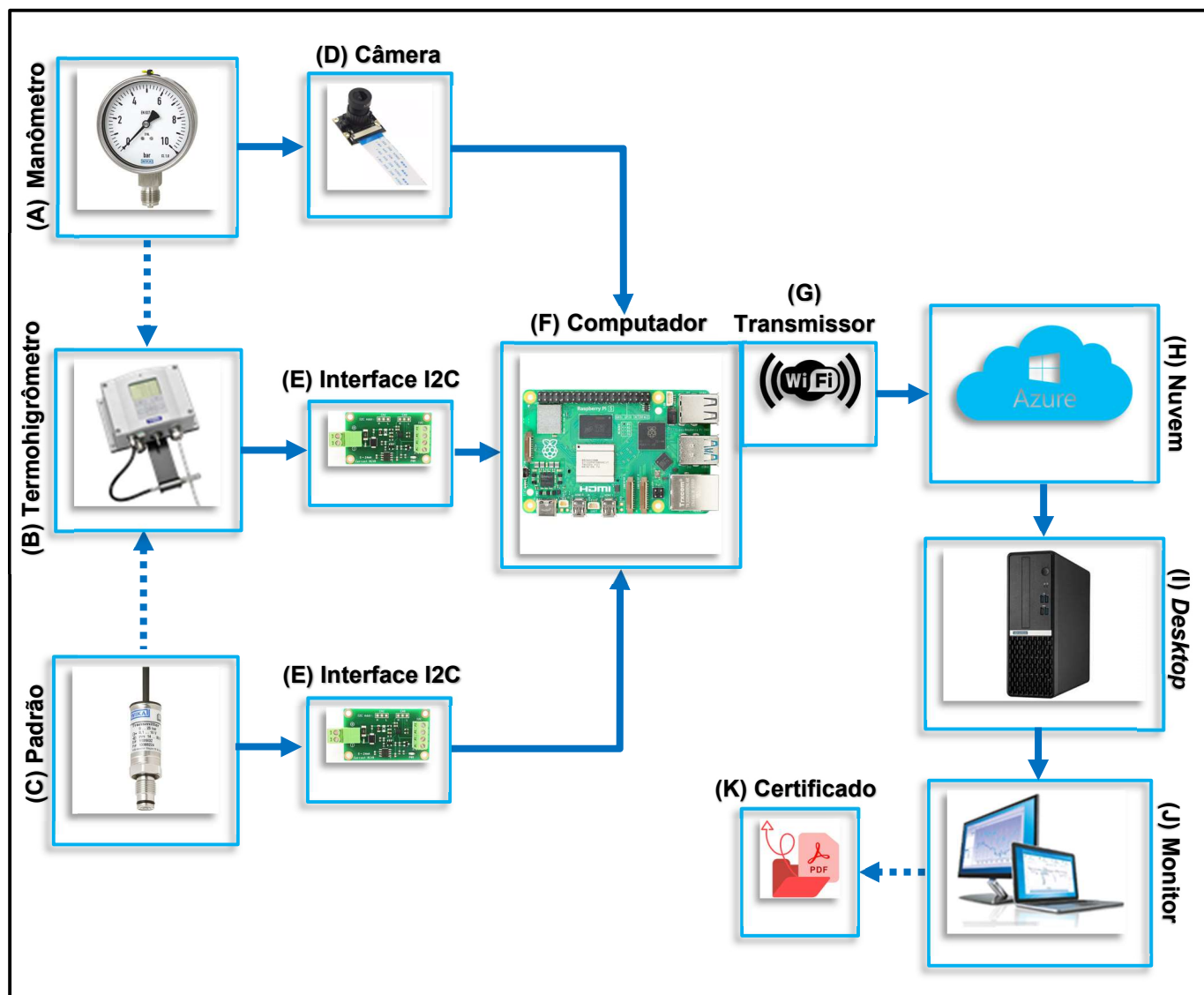
Os dados coletados pelo sensor de monitoramento ambiental, pelo sensor sob calibração e do(s) padrão(ões) são enviados, via cabo, a um módulo de processamento de dados e, em seguida, transmitidos via *Wi-fi* para a nuvem. Na nuvem, esses dados são tratados (convertidos e corrigidos) e, posteriormente, enviados a uma máquina com o *dashbord* do sistema. Por fim, com base nos parâmetros pré-estabelecidos, é gerado o certificado digital da calibração.

Os componentes exemplificados do diagrama são:

- A- Manômetro analógico relativo, por exemplo: modelo 232.50, marca Wika do Brasil;
- B- Transmissor termohigrobarométrico, por exemplo: modelo PTU300, marca Vaisala;
- C- Padrão de referência transmissor de pressão relativa, por exemplo: modelo M-10, marca Wika;
- D- Câmera de alta resolução, por exemplo: Câmera Raspberry Pi Ov5647 5mp 60° 3.6 mm 1080p;
- E- Receptor de Loop com Interface, por exemplo: tipo I2C;
- F- Computador de placa única, por exemplo: Pi Zero 2 W;
- G- Módulo de transmissão sem fio, por exemplo: Rp2040 Arm 133 MHz;
- H- Plataforma em nuvem, por exemplo: Microsoft® Azure Cloud e algoritmo para tratamento dos dados elaborado em linguagem Python;
- I- Computador *desktop*, por exemplo: 13ª geração Intel® Core™ i7-13700 (16-core, cache de 30 MB, 2.1 GHz até 5.1GHz Turbo);

- J- Monitor para apresentação do *dashboard*, por exemplo: Dell de 24" - S2421HN;
 K- Padrão de formatação de arquivo digital, por exemplo: PDF.

Figura 25 – Exemplificação do *Framework* para Calibração 4.0 – Grandeza Pressão



Fonte: Elaborado pelo autor

O diagrama apresentado na **Figura 26** exemplifica um *framework* para calibração 4.0 de um sensor industrial de medição de temperatura com transmissor de temperatura provido de protocolo exclusivamente digital. A metodologia da calibração utilizada é o método comparativo com um padrão de referência da mesma grandeza física.

O sensor sob calibração fornece seus valores de medição, de forma digital, por meio de um transmissor *smart*.

Os sensores, padrão de referência e sensor sob calibração estão conectados ao processo térmico. O sistema deve ser aquecido ou resfriado, de modo a gerar, idealmente, os pontos de calibração dentro da faixa de operação do sistema.

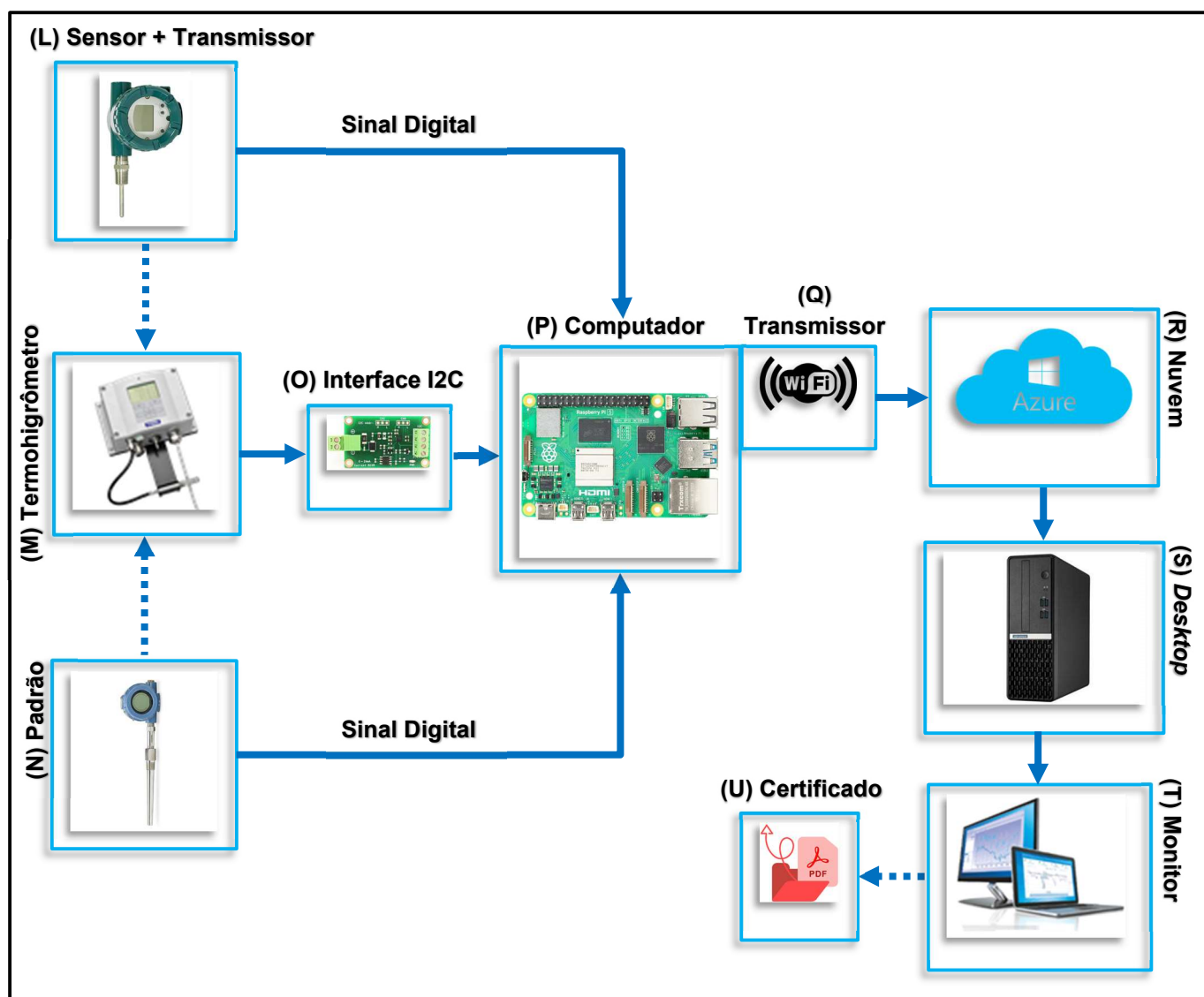
Os dados do sensor sob calibração e do padrão são enviados via cabo a um módulo de processamento de dados e transmitidos via *Wi-Fi* para a nuvem.

Na nuvem, esses dados são tratados (convertidos e corrigidos) e, em seguida, enviados a uma máquina com o *dashbord* do sistema. Com base em parâmetros pré-estabelecidos, é gerado o certificado digital da calibração.

Os elementos exemplificados do diagrama são:

- L- Sensor de temperatura com transmissor *smart*, YTA610 Yokogawa com protocolo de comunicação Foundation Fieldbus;
- M- Transmissor termohigrobarométrico, por exemplo: modelo PTU300, marca Vaisala;
- N- Padrão de referência transmissor de temperatura, por exemplo: Rosemount™ 3144P, protocolo Foundation Fieldbus;
- O- Receptor de *Loop* com interface, por exemplo: tipo I2C;
- P- Computador de placa única, por exemplo: Pi Zero 2 W;
- Q- Módulo de transmissão sem fio, por exemplo: Rp2040 Arm 133 MHz;
- R- Plataforma em nuvem, por exemplo: Microsoft® Azure Cloud e algoritmo para tratamento dos dados elaborado em linguagem Python;
- S- Computador *desktop*, por exemplo: 13ª geração Intel® Core™ i7-13700 (16-core, cache de 30 MB, 2.1 GHz até 5.1GHz Turbo);
- T- Monitor para apresentação do *dashboard*, por exemplo: Dell de 24" - S2421HN;
- U- Padrão de formatação de arquivo digital, por exemplo: PDF.

Figura 26 – Exemplificação do *Framework* para Calibração 4.0 – Grandeza Temperatura – Protocolo Digital



Fonte: Elaborado pelo autor

5.4 ANÁLISE DAS ENTREVISTAS SEMIESTRUTURADAS

As entrevistas semiestruturadas foram desenvolvidas com base em uma estrutura que abrange os seguintes eixos temáticos:

- **Desafios técnicos** na implementação do *framework* para calibração 4.0.
- **Benefícios esperados** com a adoção do *framework* proposto.
- **Relevância e aplicabilidade** do *framework* no contexto industrial atual.

Foram um total de cinco especialistas, sendo três na área de metrologia e dois na área de gestão da qualidade industrial. Cada especialista entrevistado respondeu

a um conjunto de perguntas mistas (abertas e fechadas), o que permitiu a realização de uma análise crítica de suas percepções e sugestões. A sequência das perguntas foi estruturada para capturar tanto aspectos técnicos quanto estratégicos, preservando a diversidade das perspectivas.

Os dados coletados foram organizados em planilha e analisados com base em categorias temáticas, utilizando uma abordagem quantitativa para identificar padrões e frequências, e qualitativa para captar as nuances das percepções dos entrevistados. Os resultados foram apresentados de forma estatística, facilitando a interpretação dos padrões e particularidades observadas.

Por meio de uma análise crítica, foram obtidas informações relevantes que corroboram com a validade da proposta deste *framework*, conforme sintetizado abaixo.

Recomendações para melhorias visando superar objeções por parte dos usuários e/ou contratantes:

- **Integração e Compatibilidade com Sistemas Existentes**

Com o levantamento de 65 % dos entrevistados sobre integração com sistemas já em uso deve-se priorizar respostas que considerem os protocolos abertos e interfaces flexíveis, com isso propiciando a relação entre multiplataformas. Aplicar ensaios práticos contribui com a mitigação de possíveis problemas de compatibilidade. Com isso, possuir um suporte técnico atuante e procedimentos operacionais contribui para uma implementação mais eficaz, minimizando as objeções e tornando o processo mais confiável.

- **Demonstração de Eficácia e Confiança**

Um desempenho prático e nítido referente ao apontamento de 40 % dos participantes trará comprovação de eficácia e confiança. Apresentações de desempenhos práticos e casos de sucesso contribuem para a credibilidade do sistema. Ademais, a realização de testes piloto ou demonstrações práticas oferece maior garantia aos usuários, possibilitando que conheçam a atuação efetiva antes da adesão.

- **Redundância de Dados como Garantia de Confiabilidade**

A perspectiva de 15 % dos especialistas entrevistados em relação à redundância, com o objetivo de elevar o grau de confiabilidade, pode ser atendida pela implementação de elementos robustos de validação e *backup*. A promoção de cópias de segurança automaticamente, armazenamento distribuído, verificações cruzadas de

integridade e sistema de transmissão redundante são ações que mitigam a perda de dados e elevam o nível de segurança.

- **Redução do Tempo de Calibração**

O montante de 80 % dos especialistas entrevistados considera que a redução do tempo de calibração é um diferencial primordial, proporcionando benefícios significativos em eficiência operacional. O fornecimento de desenvolvimento minimiza consideravelmente as paradas, aumentando a disponibilidade dos sensores e maximizando a produtividade em grande escala.

- **Melhoria na Rastreabilidade Metrológica**

Com 75 % dos entrevistados apontando melhoria na rastreabilidade metrológica, evidencia-se um impacto fortemente positivo e abrangente. Por meio dessa evolução é promovido um controle com maior precisão e detalhamento dos dados processados, assegurando maior fidelidade nas medições e aprimoramento nos quesitos de conformidade com normas e procedimentos, consolidando a qualidade e confiabilidade do processo.

- **Percepção de Viabilidade e Inovação**

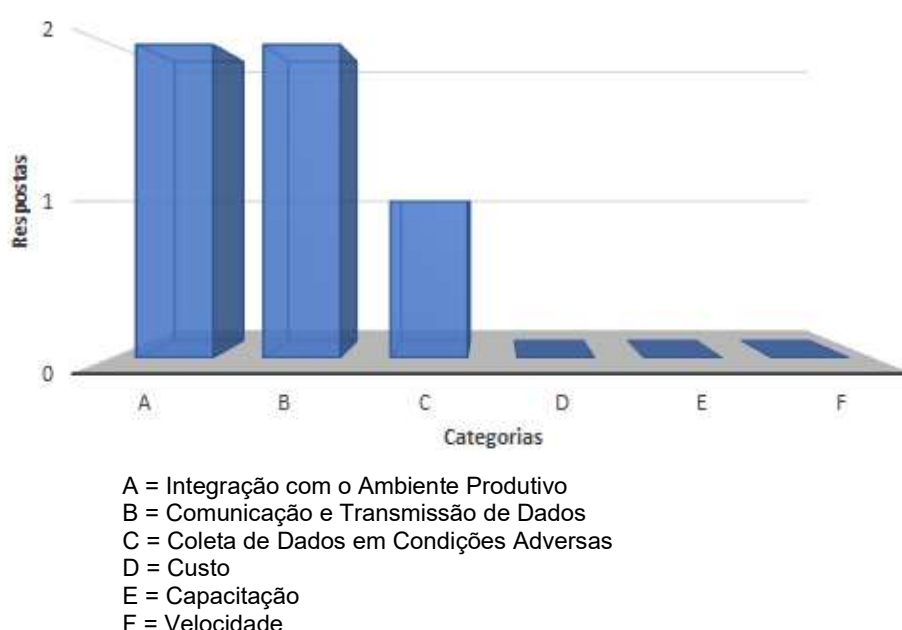
Em torno de 85 % dos entrevistados classificaram o *framework* como factível e revolucionário, destacando seu potencial de adaptação e otimização de processos no cenário da metrologia 4.0. A solução proposta se diferencia significativamente por sua propriedade de integrar a digitalização de dados de sensores analógicos, fomentando um controle ampliado, rastreabilidade ao SI e disponibilidade das informações processadas. Essa proposta tecnológica não apenas elimina a dependência de registros manuais, como também contribui para a eficiência e confiabilidade das medições, adequando-se às tendências contemporâneas da era da quarta revolução industrial e à necessidade latente de automação nos processos de calibração.

A **Figura 31** apresenta as dificuldades preliminares identificadas pelos especialistas para o processo de implantação do *framework*. As classificações A e B foram apontadas como os principais desafios, sendo que cada uma recebeu 2 votos, sinalizando que são questões que a princípio merecem maior atenção devido suas criticidades. A classificação C aparece em seguida, com 1 voto, demonstrando um desafio relevante, mas de menor impacto em relação às anteriores. As classificações D, E e F não receberam votos, sugerindo menor preocupação em relação aos demais

aspectos no momento. Os resultados apresentados como foco principal para a implementação bem-sucedida do *framework* devem estar na resolução dos desafios mais destacados (A e B), promovendo suporte e soluções particulares para essas áreas.

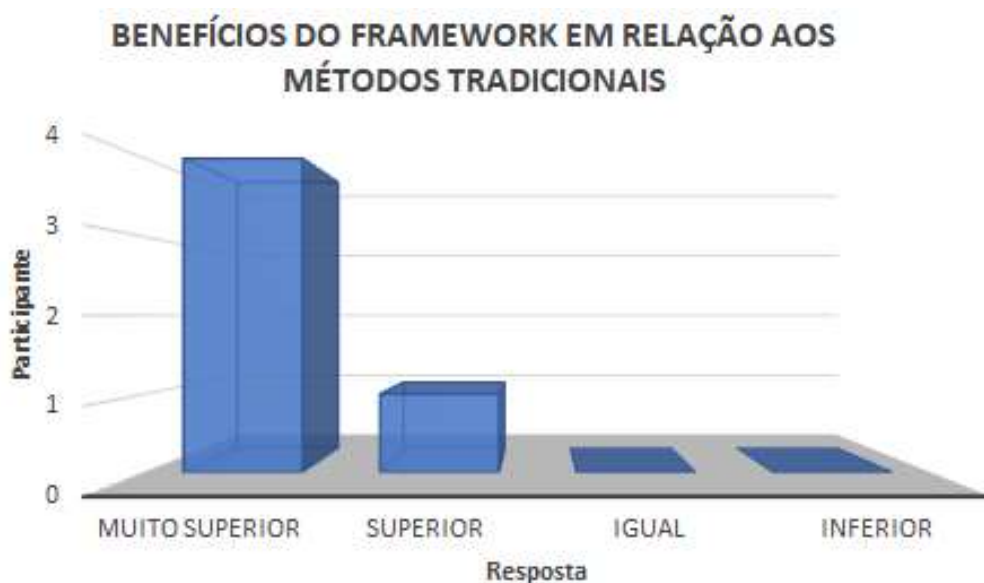
Figura 27 – Barreiras Tecnológicas

Desafios para implementar o *Framework*



Fonte: Elaborado pelo autor

A **Figura 28** apresenta os “Benefícios do *Framework* em Relação aos Métodos Tradicionais”, refletindo a opinião dos especialistas sobre os benefícios apresentados pelo *framework* em relação aos métodos convencionais. A maioria dos especialistas (4 pessoas) classificou o *framework* como muito superior em relação aos procedimentos convencionais, destacando sua eficiência e originalidade. Um especialista classificou o *framework* como superior, reconhecendo benefícios consideráveis, porém de menor impacto. As categorias “igual” e “inferior” não receberam votos, o que reforça a percepção positiva em relação à abordagem tecnológica apresentada. Os resultados demonstram a aceitação do *framework* como uma solução favorável, respaldada por benefícios significativos para os processos de calibração e digitalização de dados em sensores analógicos.

Figura 28 – Benefícios Identificados

Fonte: Elaborado pelo autor

Os resultados dessas entrevistas indicaram que o *framework* aborda uma lacuna crítica nos processos de calibração convencional, ao mesmo tempo em que enfrenta desafios relacionados à adoção tecnológica e a algumas objeções iniciais para a sua adoção. Os dados reforçam que, embora os desafios técnicos sejam relevantes, os benefícios esperados, como a redução de atividades manuais, maior controle sobre a rastreabilidade e eficiência operacional, justificam os esforços necessários para sua implementação. Além disso, a significativa receptividade favorável por parte dos especialistas sinaliza um potencial considerável de aceitação no setor industrial, particularmente quando associada a programas de capacitação e técnicas de gestão de mudança corporativa.

6 CONCLUSÕES

Este trabalho propôs um *framework* para Calibração 4.0, com ênfase na digitalização dos sinais indicativos de sensores analógicos, abordando uma lacuna crítica na integração de instrumentos convencionais em ambientes industriais modernos, especialmente naqueles que já adotam tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0. Por meio de uma abordagem sistemática e estruturada, que incluiu revisão sistemática da literatura, análise bibliométrica e entrevistas semiestruturadas, foi possível identificar desafios técnicos e propor soluções para ampliar a eficiência, confiabilidade e rastreabilidade dos processos metrológicos.

O *framework* desenvolvido associa tecnologias modulares da Indústria 4.0, oferecendo uma solução prática e adaptável às exigências industriais. Sua aplicabilidade foi exemplificada em um contexto de medição de pressão manométrica, demonstrando sua versatilidade e viabilidade prática. Além disso, a elaboração de um guia prático complementa essa contribuição, fornecendo um recurso orientativo para implementação em ambientes industriais.

Os resultados das entrevistas semiestruturadas validaram o interesse do público-alvo e a relevância prática do *framework*, destacando sua viabilidade e aceitação no contexto industrial. Os especialistas entrevistados reforçaram a aplicabilidade da estrutura proposta e ofereceram contribuições para futuros aprimoramentos, alinhando o modelo ainda mais às necessidades do setor.

Os aportes da Calibração 4.0 incluem redução de custos operacionais, maior eficiência e aumento da rastreabilidade, consolidando sua importância como um elemento estratégico da transformação digital. No entanto, desafios remanescentes foram identificados, como a interoperabilidade entre sistemas heterogêneos, a capacitação profissional e as limitações do estudo ao escopo de sensores analógicos em contextos industriais específicos.

Esta pesquisa apresentou uma contribuição significativa para as áreas de Informática Industrial Aplicada e Metrologia 4.0, ao propor um *framework* estrutural que aprimora a eficiência e a eficácia da calibração de sensores analógicos. Além disso, promove maior confiabilidade na rastreabilidade das medições ao Sistema Internacional de Unidades (SI), auxiliando em auditorias e garantindo conformidade com requisitos regulamentares.

A automação do sistema de calibração pode reduzir erros humanos e aprimorar a integração digital com a gestão da manufatura, tanto em nível vertical (dentro das empresas) quanto horizontal (ao longo da cadeia produtiva). Isso possibilita intervenções mais assertivas, apoiadas em análises estatísticas e técnicas de inteligência artificial.

O *framework* integra redes de comunicação de dados, *hardware*, computação em nuvem e algoritmos de processamento, permitindo a atualização em tempo real dos dados de calibração com o sistema de gestão. Essa convergência fortalece o uso de tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0, garantindo maior controle e eficiência operacional.

Além de aprimorar a qualidade dos serviços de calibração, o *framework* proposto é escalável e adaptável, aplicável a diversos segmentos industriais. Essa flexibilidade amplia as possibilidades de pesquisa e inovação científica, impactando diretamente a qualidade das medições e consolidando-se como um avanço alinhado às tendências tecnológicas da Indústria 4.0.

Diante das contribuições e limitações identificadas, recomenda-se que futuras pesquisas explorem:

- Segurança de dados na transmissão e processamento de informações;

- Expansão do *framework* para outros tipos de sensores de medição, visando aplicações em setores diversos;

- Atualização dos métodos e tecnologias emergentes não contempladas neste estudo;

- Exploração de outros métodos de calibração, além do método comparativo;

- Validação experimental do *framework* em ambiente fabril, testando sua implementação prática;

- Expansão da aplicabilidade do *framework* para além do setor industrial, avaliando seu uso em áreas como saúde e meio ambiente;

- Análise aprofundada dos módulos do sistema, para refinamento técnico;

- Estudo sobre custos de implementação, manutenção e operação do sistema, comparando-o ao método convencional;

- Correlação da Calibração 4.0 com práticas de sustentabilidade e impacto ambiental;

Investigação de lacunas nas normas vigentes, contribuindo para sua adaptação à Metrologia 4.0;

Desenvolvimento de uma metodologia para capacitação de profissionais, promovendo a adoção eficiente das tecnologias associadas à Calibração 4.0.

Além de sua relevância prática, o *framework* proposto constitui uma contribuição teórica, ao integrar conceitos de Indústria 4.0, gestão da qualidade automatizada e rastreabilidade metrológica. Dessa forma, esta pesquisa não apenas fortalece a Metrologia 4.0, mas também estabelece as bases para futuras inovações, promovendo a modernização dos processos de calibração industrial de maneira estratégica e impactante.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 10012**. Sistemas de gestão de medição - Requisitos para os processos de medição e equipamentos de medição. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 13485**. Produtos para a saúde - Sistemas de gestão da qualidade - Requisitos para fins regulamentares. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14001**. Sistemas de gestão ambiental - Requisitos com orientações para uso. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 9001**. Sistemas de gestão da qualidade - Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO/IEC 17025**. Requisitos gerais para competência de laboratórios de ensaio e calibração. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR AS9100D**. Sistema de gestão da qualidade - Requisitos para organizações de aviação, espacial e defesa. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14724**. Informação e documentação - Trabalhos acadêmicos - Apresentação. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10520**. Informação e documentação - Citações em documentos - Apresentação. Rio de Janeiro: ABNT, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6023**. Informação e documentação - Referências - Elaboração. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6027**. Informação e documentação - Sumário - Apresentação. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6028**. Informação e documentação - Resumo - Apresentação. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6024**. Informação e documentação - Numeração progressiva das seções de um documento - Apresentação. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6034**. Informação e documentação - Índice - Apresentação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15287**. Informação e

documentação - Projeto de pesquisa - Apresentação. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

AHMED, K. M.; ALOSAIMI, A. S.; AMIN, K.M. **Smart infrastructure for developing digital calibration certificates at SASO-NMCC**. In: IMEKO TC6 International Conference on Metrology and Digital Transformation, 19-21 setembro 2022, Berlim, Alemanha. [S.l.]: National Measurement and Calibration Center (NMCC), SASO, 2022.

ANDONOV, S.; CUNDEVA-BLAJER, M. **Calibration for Industry 4.0 Metrology: Touchless Calibration**. Journal of Physics: Conference Series. Anais...Institute of Physics Publishing, 13 nov. 2018.

ANDONOV, S.; CUNDEVA-BLAJER, M. **Comparative Cost and Benefit Analysis of TCal and Classical Calibration**. 2020 IEEE International Workshop on Metrology for Industry 4.0 and IoT, MetroInd 4.0 and IoT 2020 - Proceedings. Anais...2020.

ANDONOV, S.; CUNDEVA-BLAJER, M. **TCal: Contribution to metrology for Industry 4.0**. Journal of Physics: Conference Series. Anais...Institute of Physics Publishing, 29 nov. 2019.

ARANHA, H.; MASI, M.; PAVLESKA, T.; SELLITTO, G. P. **Securing the metrological chain in IoT environments: an architectural framework**. In: IEEE International Workshop on Metrology for Industry 4.0 & IoT (MetroInd4.0&IoT), 2021, Vienna, Austria. Anais... Piscataway, NJ: IEEE, 2021. p. 1-7. doi: 10.1109/MetroInd4.0IoT51437.2021.9488526. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9488526>.

AČKO, B.; WEBER, H.; HUTZSCHENREUTER, D.; SMITH, I. **Communication and validation of metrological smart data in IoT-networks**. Advances in Production Engineering & Management, Maribor, v. 15, n. 1, p. 107-117, mar. 2020. ISSN 1854-6250. Disponível em: <https://doi.org/10.14743/apem2020.1.353>.

BARBOSA, C. R. H.; SOUSA, M. C.; ALMEIDA, M. F. L.; CALILI, R. F. **Smart Manufacturing and Digitalization of Metrology: A Systematic Literature Review and a Research**. Sensors, [S.l.], v. 22, n. 16, p. 6114, ago. 2022. ISSN 1424-8220. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/22/16/6114>. Acesso em: 07/03/24.

BARCELO-ORDINAS, J. M.; DOUDOU, M.; GARCIA-VIDAL, J.; BADACHE, N. **Self-calibration methods for uncontrolled environments in sensor networks: A reference survey**. Ad Hoc Networks, v. 88, p. 142–159, 15 maio 2019.

BAUER, M. W.; GASKELL, G. **Pesquisa Qualitativa com Texto: Imagem e Som: Um Manual Prático**. 7ª edição. Petrópolis, RJ: Editora Vozes Ltda, 2008. 505 páginas. ISBN 978-85-326-2727-8.

BELAN, P. A.; ARAÚJO, S. A.; LIBRANTZ, A. F. H. **A machine vision system for automatic sieve calibration**. Measurement Science and Technology, v. 30, n. 12, 16 set. 2019.

BELAN, P. A.; ARAÚJO, S. A.; LIBRANTZ, A. F. H. **Técnicas de visão computacional aplicadas na automação de processos metrológicos**. 2012. Disponível em: <http://biblloTecatede.uninove.br/handle/tede/185> Acesso em: 23 nov. 2023.

BENITEZ, R.; BENITEZ, R. **Wireless calibration for Industry 4.0**. EDP Sciences, 2019.

BENITEZ, R.; RAMIREZ, C.; VAZQUEZ, J. A. **Sensors calibration for Metrology 4.0**. 2019 IEEE International Workshop on Metrology for Industry 4.0 and IoT, MetroInd 4.0 and IoT 2019 - Proceedings. Anais...2019. p. 296-299.

BIBLIOMETRIX. **Bibliometrix: an open-source tool for quantitative research in scientometrics and bibliometrics**. Disponível em: <https://www.bibliometrix.org/home/index.php>. Acesso em: 26 jan. 2024.

BOLTON, W. **Instrumentation and Control Systems**. 3rd ed. Kidlington: The Boulevard, Langford Lane, Oxford OX5 1GB, United Kingdom, 2021. 375 p. ISBN 978-0-12-823471-6.

BOULILA, N. **Cyber-Physical Systems and Industry 4.0: Properties, Structure, Communication, and Behavior**. Technical Report, Siemens, Munich, Germany, abril 2019. DOI: 10.13140/RG.2.2.27890.76485. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/332420221>.

BRIZOLA, J.; FANTIN, N. **Revisão da literatura e revisão sistemática da literatura**. Revista de Educação do Vale do Arinos-RELVA, v. 3, n. 2, 2016.

BROWN, C.; ELO, T.; HOVHANNISYAN, K.; HUTZSCHENREUTER, D.; KUOSMANEN, P. MAENNEL, O. **Infrastructure for Digital Calibration Certificates**. 2020 IEEE International Workshop on Metrology for Industry 4.0 and IoT, MetroInd 4.0 and IoT 2020 - Proceedings. Anais.2020.

BUDYLINA, E. A.; DANILOV, A. A. **Methods to ensure the reliability of measurements in the age of Industry 4.0**. Joint IMEKO TC1-TC7-TC13-TC18 Symposium 2019, Journal of Physics: Conference Series, v. 1379, 2019. Art. 012063. DOI: 10.1088/1742-6596/1379/1/012063. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1379/1/012063>.

CARDOSO, A. M. R. **Sistema de informação para troca de certificados digitais descobertos**. 2018. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/113977/2/277565.pdf>. Acesso em: 23 nov. 2023.

CHANG, Y.; CUI, X.; HOU, G.; JIN, Y. **Calibration of the Pressure Sensor Device with the Extreme Learning Machine**. 21st International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT), August 2020. DOI: 10.1109/ICEPT50128.2020.9202675.

CLARK, J. **Self-calibration and performance control of MEMS with applications for IoT**. Sensors (Switzerland), v. 18, n. 12, 12 dez. 2018.

D'EMÍLIA, G.; GASPARI, A. **Técnicas de validação de dados para sistemas de medição operando em um cenário da Indústria 4.0 e uma aplicação de monitoramento de condições**. In: Workshop 2018 sobre Metrologia para Indústria 4.0 e IoT. IEEE, 2018. p. 112-116.

D'EMILIA, G.; PRATO, A.; GASPARI, A.; MAZZOLENI, F.; NATALE, E.; SCHIAVI, A. **Managing the sampling rate variability of digital MEMS accelerometers in dynamic calibration**. In: IEEE International Workshop on Metrology for Industry 4.0 & IoT (MetroInd4.0&IoT), 2021. p. 1-7. ISBN 978-1-6654-1980-2. DOI: 10.1109/METROIND4.0IOT51437.2021.9488520. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9488520>.

D'EMILIA, G.; GASPARI, A.; NATALE, E.; ADDUCE, G.; VECCHIARELLI, S. **All-Around Approach for Reliability of Measurement Data in the Industry 4.0**. IEEE Instrumentation & Measurement Magazine, v. 34, n. 1, p. 30-37, fev. 2021. ISSN 1094-6969.

DING, W.; ZHANG, B. **Detection and recognition method for pointer-type meter based on deep learning**. Proceedings of 2021 IEEE 3rd International Conference on Civil Aviation Safety and Information Technology, ICCASIT 2021. Anais...Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2021.

ENGEL, T. GEMIMEG-II — **How metrology can go digital**. Measurement Science and Technology, v. 34, n. 104002, jul. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1361-6501/ace468>.

DORST, T.; LUDWIG, B.; EICHSTADT, S.; SCHNEIDER, T. **Metrology for the factory of the future: towards a case study in condition monitoring**. IEEE International Conference on Metrology for Industry 4.0 and IoT, 2019, Braunschweig e Berlim, Alemanha. Physikalisch-Technische Bundesanstalt; ZeMA – Centre for Mechatronics and Automation Technology; Lab for Measurement Technology, Saarland University. Proceedings. Piscataway, NJ: IEEE, 2019. p. 1-7. ISBN 978-1-5386-3460-8. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/numero>.

EICHSTÄDT, S.; KEIDEL, A.; TESCH, J. **Metrology for the digital age. Measurement: Sensors**. Anais...Elsevier Ltd, 1 dez. 2021.

EICHSTÄDT, S.; LUDWIG, B. **Metrology for heterogeneous sensor networks in the IoT**. Technisches Messen, v. 86, n. 11, p. 623-629, nov. 2019. Braunschweig, Berlin: Physikalisch-Technische Bundesanstalt.

EICHSTÄDT, S.; LUDWIG, B. **Metrology for heterogeneous sensor networks and Industry 4.0**. Automatisierungstechnik, jun. 2020. DOI: 10.1515/auto-2020-0059.

FANG, T.; JIA, Y.; XU, H.; ZHANG, H.; LIU, W. **Study on calibration method of hydraulic bolt stretcher**. Acta IMEKO, Shenyang, v. 9, n. 5, p. 156-158, dez. 2020. Disponível em: www.imeko.org. Acesso em: 26/01/2024.

FANTON, J. P. **A brief history of metrology: Past, present, and future**. International Journal of Metrology and Quality Engineering. EDP Sciences, 2019.

Martins, A. B.; Farinha, J. T.; Cardoso, A. M. **Calibration and certification of industrial sensors – a global review**. WSEAS Transactions on Systems and Control, v. 15, p. 394-405, 2020. DOI: 10.37394/23203.2020.15.41.

MORRIS, A. S. **Measurement and Instrumentation Principles**. 3. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2001. 492 P.

FEI, L., DATAN, J., BAUDOUIN, C., DU, S. **Calibration and uncertainty estimation of non-contact coordinate measurement systems based on Kriging models**. 2019.

FROST & SULLIVAN. Frost Radar™: **Global Calibration and Repair Services Market, 2021 A Benchmarking System to Spark Companies to Action-Innovation that Fuels New Deal Flow and Growth Pipelines**. Global Measurement & Instrumentation Research Team at Frost & Sullivan. Sample. K4A8-30 March 2021, 16p, Santa Clara, CA USA.

FROST & SULLIVAN. **Oportunidades de Crescimento na Calibração e Reparo Consolidação de mercado e expertise tecnológica para acelerar o crescimento em um mercado em transformação**. Amostra. Equipe de Pesquisa Global de Medição e Instrumentação da Frost & Sullivan. MD2B-30. 2018.

GABRIELSSON, J.; TRYGG, J. **Recent developments in multivariate calibration**. Critical Reviews in Analytical Chemistry, jul. 2006.

GADELRAH, M. S.; ABOUHOGAIL, R. A. **Towards a new generation of digital calibration certificate: Analysis and survey**. Measurement: Journal of the International Measurement Confederation, v. 181, 1 ago. 2021.

GARCIA, I. F. M., FERREIRA, J.S., MACEDO, E., NAVARRO, M. e PEIXOTO, J.G. **Mapping of processes and risks in the digital transformation in metrology of ionizing radiation, a case study in X-rays air kerma calibration**. Brazilian Journal of Radiation Sciences, Salvador, v. 11, n. 2, p. 01-16, 2023. DOI: <https://doi.org/10.15392/2319-0612.2023.2225>. ISSN 2319-0612.

GERONYMO, G. M. **Smart Lab: an application of Industry 4.0 design principles to calibration laboratories**. In: 10th Brazilian Congress on Metrology (Metrologia 2019), 2021. Rio de Janeiro: IOP Publishing, 2021. p. 1-11. (Journal of Physics: Conference Series, vol. 1826, art. 012027). Doi:10.1088/1742-6596/1826/1/012027.

GOGOLINSKIY, K. V.; SYASKO, V. A. **Metrological Assurance and Standardization of Advanced Tools and Technologies for Nondestructive Testing and Condition Monitoring (NDT4.0)**. Research in Nondestructive Evaluation, v. 31, n. 5-6, p. 325-339, 2020. Doi: 10.1080/09349847.2020.1841863. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/09349847.2020.1841863>.

GRUBER, M.; EICHSTÄDT, S.; NEUMANN, J. e ADRIAN, A. **Semantic Information in Sensor Networks: How to Combine Existing Ontologies, Vocabularies and Data Schemes to Fit a Metrology Use Case**. 2020. In: 2020 IEEE International Conference on Semantic Computing (ICSC), San Diego, CA, USA. Proceedings of the IEEE International Conference on Semantic Computing. Piscataway, NJ: IEEE, 2020. p. 469-472. ISBN 978-1-7281-4892-2.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2017. ISBN 978-85-9701-292-7.

GREEN, C., KOWALKOWSKI, J., PATERNO, P., FISCHLER, M., GARREN, L. e LU, Q. **The art framework**. Journal of Physics: Conference Series. Anais...Institute of Physics Publishing, 2012.

HACKEL, S., SCHÖNHALS, S., DOERING, L., ENGEL, T., e BAUMFALK, R. **The Digital Calibration Certificate (DCC) for an End-to-End Digital Quality Infrastructure for Industry 4.0**. Sci, v. 5, p. 11, 2023. DOI: 10.3390/sci5010011.

HALL, B. D. **An opportunity to enhance the value of metrological traceability in digital systems**. Measurement Standards Laboratory of New Zealand. Lower Hutt, New Zealand: Callaghan Innovation, 2019. ISBN 978-1-7281-0429-4.

HAN, P., MEI, H., LIU, D., ZENG, N., TANG, X., WANG, Y., e PAN, Y. **Calibrations of Low-Cost Air Pollution Monitoring Sensors for CO, NO₂, O₃, and SO₂**. Sensors, v. 21, n. 256, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/s21010256>. Acesso em: 26/01/2024.

HONG, W. J., SHAMSUDDIN, N., ABAS, E., APONG, R. A., MASRI, Z., SUHAIMI, H., GÖDEKE, S. H., E NOH, M. N. A. **Water quality monitoring with arduino based sensors**. Environments - MDPI, v. 8, n. 1, p. 1–15, 1 mar. 2021.

HUNG, M.; HSIEH, C. **Automatic pointer meter reading based on machine vision**. In: IEEE 4th International Conference on Image, Vision and Computing, 2019, 4p.

IATF 16949: **Quality management system for organizations in the automotive industry**. 1st ed. Versailles, France: 2016. 54 páginas.

ISO/IEC 80079-34. **Atmosferas explosivas - Parte 34: Método de seleção de equipamentos e instalação**. 3ª ed. Genebra: ISO/IEC, 2018.

JAVAID, M.; HALEEM, A.; SINGH, R. P.; RAB, S.; SUMAN, R. **Significance of sensors for industry 4.0: Roles, capabilities, and applications**. Sensors

International, [s.l.], v. 2, p. 100110, 2021. Disponível em:
<https://doi.org/10.1016/j.sintl.2021.100110>.

JURČEVIĆ, M.; HEGEDUŠ, H.; GOLUB, M. **Generic system for remote testing and calibration of measuring instruments: Security architecture**. Measurement Science Review, v. 10, n. 2, p. 50–55, 1 jan. 2010.

KANKAR, P. K.; MOONA, G.; DESAI, K. A. **Measurement and Metrology in Advanced Manufacturing Processes**. MAPAN-Journal of Metrology Society of India, v. 37, n. 4, p. 703-705, dez. 2022. Disponível em:
<https://doi.org/10.1007/s12647-022-00606-w>. Acesso em: 29/02/2024.

KEIDEL, A. EICHSTÄDT, S. **Interoperable processes and infrastructure for the digital transformation of the quality infrastructure**. 2021 IEEE International Workshop on Metrology for Industry 4.0 & IoT (MetroInd4.0&IoT) (pp. 1-5). Rome, Italy: IEEE. DOI: 10.1109/MetroInd4.0IoT51437.2021.9488563.

KUDO, J. F. **Sistema Automatizado Par aCalibração de Instrumentos Elétricos de Medição**. Projeto de Final de Curso (Graduação) - Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, (2007).

KUSTER, M. **Metrological Data Completeness for Digital Transformation**. In: IEEE International Workshop on Metrology for Industry 4.0 & IoT (MetroInd4.0&IoT), 2021. Dumas, Texas, USA: IEEE, 2021. p. 374-379. ISBN 978-1-6654-1980-2. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/METROIND4.0IOT51437.2021.9488455>.

LARROYED, A.; OTAVIO, L.; GRAMS, M. L. **A Relação histórica entre a metrologia e a propriedade intelectual no brasil: coincidências, semelhanças ou interdependência?** ENCICLOPEDIA BIOSFERA, v. 11, n. 21, 2015.

LEE, D.; HUANG, X.; HASSANI, H.; DOBRIBAN, E. **T-Cal: an optimal test for the calibration of predictive models**. In: 2020 21st International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT), December 2023. Disponível em: <https://github.com/dh7401/T-Cal>. DOI: 10.1109/ICEPT50128.2020.9202675.

LI, X. J.; GAO, Y. **Digitisation of Conventional Water Meters using Automated Number Recognition**. IEEE Régio 10 Annual International Conference, Proceedings/TENCON. Anais...Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2021.

YANG, L.; PAN, F.; ZHONG, L.; XIAOHUI, L.; ZHIBIN, L. **Biaxial angle sensor calibration method based on artificial neural network**. Chemical Engineering Transactions, v. 46, p. 361–366, 1 dez. 2015.

LI, Y.; JIA, B. **Research on reading recognition of pointer meter based on improved U-net network**. SPIE-Intl Soc Optical Eng, 1 ago. 2022.

LIN, Y.B.; LIN, Y.W.; LIN, J.Y.; HUNG, H.N. **SensorTalk: An IoT device failure detection and calibration mechanism for smart farming**. *Sensors* (Switzerland), v. 19, n. 21, 1 nov. 2019.

LIU, Y.; LI, R.; LI, H.; SUN, Y.; DU, Z.; JIANG, X.; LIU, T. **Research on self-calibration algorithms based on optical fiber distributed sensing technology**. *SPIE-Intl Soc Optical Eng*, 13 maio 2019.

LIU, F.; LIANG, C.; HE, Q. **Online Calibration for Smart Meters**. In: 23rd IMEKO TC4 International Symposium on Electrical & Electronic Measurements to Promote Industry 4.0, 17-20 setembro 2019, Xi'an, China. Harbin: Harbin Institute of Technology; Beijing: National Institute of Metrology; Changsha: Hunan University, 2019. p. 373-381.

MACEDO, E. M. *et al.* **Implantação de método não invasivo para calibração de medidores de tensão de pico (kVp)**. 2015. Disponível em: <http://repositorio.bom.org.br:8080/jspui/handle/2050011876/936>. Acesso em: Acesso em: 23 nov. 2023.

MAJSTOROVIC, V. D.; STOJADINOVIC, S. **Cyber Physical Manufacturing Metrology**. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, v. 968, n. 012001, 2020. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/968/1/012001>.

MANAKOVA, N.; VERGELES, A. **Calibration of Low-Cost IoT Sensors in Streams**. In: IEEE THIRD INTERNATIONAL CONFERENCE ON DATA STREAM MINING & PROCESSING, 2020, Lviv, Ukraine. *Proceedings*. Lviv: IEEE, 2020. 6 páginas. ISBN: 978-1-7281-3214-3/20.

MARQUES, M.; SOUSA, J. A.; RIBEIRO, L. **Calibration 4.0 – Sistema de informação para utilização de certificados digitais de calibração**. In: 19º Congresso Internacional de Metrologia (CIM2019). EDP Ciências, 2019. pág. 01002.

MARTINS, A. B.; FARINHA, J. T.; CARDOSO, A. M. **Calibration and certification of industrial sensors – a global review**. *WSEAS Transactions on Systems and Control* World Scientific and Engineering Academy and Society, 2020.

MIQUEL-IBARZ, A.; BURGUÉS, J.; MARCO, S. **Global calibration models for temperature-modulated metal oxide gas sensors: A strategy to reduce calibration costs**. *Sensors and Actuators B: Chemical*, v. 350, 1 jan. 2022.

MOHER, D.; LIBERATI, A.; TETZLAFF, J.; ALTMAN, D. G. **Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: the PRISMA**. *Statement* Open Medicine, 2009.

MONTEIRO, A. R. D.; FEITAL, T. S.; PINTO, J. C. **A numerical procedure for multivariate calibration using heteroscedastic principal components regression**. *Processes*, v. 9, n. 9, 1 set. 2021.

MORRIS, A. S.; LANGARI, R. **Measurement and Instrumentation: Theory and Application**. 3. ed. London: Editora, 2021. 711 p. ISBN: 978-0-12-817141-7.

MUSTAPÄÄ, T.; NIKANDER, P.; HUTZSCHENREUTER, D.; VIITALA, R. **Metrological Challenges in Collaborative Sensing: Applicability of Digital Calibration Certificates**. *Sensors*, v. 20, n. 4730, 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/17/4730>. DOI: 10.3390/s20174730.

MUSTAPÄÄ, T.; AUTIOSALO, J.; NIKANDER, P.; SIEGEL, J. E.; VIITALA, R. **Digital metrology for the Internet of Things**. 2020 IEEE International Conference on Metrology for the Internet of Things, Espoo, Finland. Anais... Espoo: IEEE, 2020. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/identifier>.

MUSTAPÄÄ, T.; NUMMILUIKKI, J.; VIITALA, R. **Digitalization of Calibration Data Management in Pharmaceutical Industry Using a Multitenant Platform**. *Applied Sciences (Switzerland)*, v. 12, n. 15, 1 ago. 2022.

NAZARRE, D. J.; MARTINS, A. A. **Certificado de Calibração 4.0: um novo formato para uma nova indústria**. 2019. Disponível em: <http://repositorio.bom.org.br:8080/xmlui/handle/123456789/2059>. Acesso em: 23 nov. 2023.

NUMMILUIKKI, J.; MUSTAPÄÄ, T.; HIETALA, K.; VIITALA, R. **Benefits of network effects and interoperability for the digital calibration certificate management**. IEEE International Workshop on Metrology for Industry 4.0 and IoT. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 7 jun. 2021.

NUMMILUIKKI, J.; SAXHOLM, S.; KÄRKKÄINEN, A.; KOSKINEN, S. **Digital Calibration Certificate in an industrial application**. *Acta IMEKO*, [S.l.], v. 12, n. 1, p. 1-6, mar. 2023. ISSN 2221-870X. Disponível em: https://www.imeko.org/publications/acta-imeko/2023/vol12-no1/Article_06.pdf.

OKS, S. J.; JALOWSKI, M.; LECHNER, M.; MIRSCHBERGER, S.; MERKLEIN, M.; VOGEL-HEUSER, B.; MÖSLEIN, K. M. **Cyber-Physical Systems in the Context of Industry 4.0: A Review, Categorization and Outlook**. *Information Systems Frontiers*, [s.l.], 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10796-022-10252-x>.

PATRICIO, R. S. **Plataforma computacional web para calibração de sistemas de medição**. 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufba.br/handle/ri/21758> Acesso em: 23 nov. 2023.

PENG, X.; KUNTAO, Y.; XIUHUA, Y. **A novel pressure sensor calibration system based on a neural network**. *Journal of Semiconductors*, v. 36, n. 9, p. 095004, set. 2015.

PRATO, A.; MAZZOLENI, F.; PENNECCHI, F. R.; GENTA, G.; GALETTO, M.; SCHIAVI, A. **Towards large-scale calibrations: A statistical analysis on 100 digital 3-axis MEMS accelerometers**. In: 2021 IEEE International Workshop on

Metrology for Industry 4.0 and IoT, 2021, conferência virtual. Anais... 7-9 jun. 2021. p. 578-582. DOI: 10.1109/MetroInd4.0IoT51437.2021.9488465.

PRATO, A.; BORGIATTINO, D.; MAZZOLENI, F.; FACELLO, A.; GERMAK, A. **Theoretical insights on the influence of the experimental plan in the calibration of multicomponent force and moment transducers**. Measurement: Sensors. Elsevier. 5p, 2021.

PRESYS. **Metrologia 4.0: SMART & FAST CALIBRATION. Soluções WIRELESS e REMOTE ACCESS para Calibração**. São Paulo, [s.d.]. Disponível em: <http://www.presys.com.br>. Acesso em: 11/02/2024.

RIDOLFI, M.; FONTAINE, J.; VAN HERBRUGGEN, B.; JOSEPH, W.; HOEBEKE, J.; DE POORTER, E. **UWB anchor nodes self-calibration in NLOS conditions: a machine learning and adaptive PHY error correction approach**. Wireless Networks, v. 27, n. 4, p. 3007–3023, 1 maio 2021.

RUCKI, M. **Recent Development of Air Gauging in Industry 4.0 Context**. Sensors, v. 23, 2122, 2023. Basel: MDPI. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/s23042122>.

SANJID, M. A.; CHAUDHARY, K. P.; YADAV, S.; SEN, M.; GHOSHAL, S. K. **Prospects of Digitalizing Dimensional Metrology**. Recent Advances in Metrology - Select Proceedings of AdMet 2021. Lecture Notes in Electrical Engineering, v. 906, p. 373-381, 2023. New Delhi: CSIR—National Physical Laboratory.

SCHMITT, R. H.; PETEREK, M.; MORSE, E.; KNAPP, W.; GALETTO, M.; HÄRTIG, F.; GOCH, G.; HUGHES, B.; FORBES, A.; ESTLER, W. T. **Advances in Large-Scale Metrology – Review and future trends**. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 65(2), 643-665. 2016. doi: 10.1016/j.cirp.2016.05.002.

SCHÜTZE, A.; HELWIG, N.; SCHNEIDER, T. **Sensors 4.0 – smart sensors and measurement technology enable Industry 4.0**. Journal of Sensors and Sensor Systems, v. 7, p. 359-371, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/jsss-7-359-2018>. Acesso em: 13/02/2024.

SHAH, R.; MCINTEE, M.; NAGARAJA, S.; BHANDARY, S.; AROTE, P.; KURI, J. **Secure Calibration for Safety-Critical IoT: Traceability for Safety Resilience**. 2 ago. 2019.

SOFTIC, A.; ZAIMOVIC U. N.; Samir, L. **Blockchain-based Metrological Traceability**. KATALINIC, Bernd (Ed.). Proceedings of the 32nd DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation. Vienna: DAAAM International, 2021. p. 522-526. ISBN 978-3-902734-33-4. ISSN 1726-9679. DOI: 10.2507/32nd.daaam.proceedings.075.

STOJADINOVIC, S. M.; MAJSTOROVIC, V. D.; DURAKBASA, N. M. **Toward a cyber-physical manufacturing metrology model for industry 4.0**. Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing, v. 34, n. 1, p. 1-17, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1017/S0890060420000347>.

STAVRINIDES, G. L.; KARATZA, H. D. **Cyber-physical systems, digital twins and Industry 4.0: The role of modeling and simulation**. 2023. Simulation Modelling Practice and Theory, 102727. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2023.102727>.

ŠIMIĆ, M.; AMBRUŠ, D.; BILAS, V. **Landmine Identification From Pulse Induction Metal Detector Data Using Machine Learning**. IEEE Sensors Letters, v. 7, n. 9, set. 2023. DOI: 10.1109/LENS.2023.3307091. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/373286697>.

TAL, E. **Calibration: Modelling the measurement process**. Studies in History and Philosophy of Science Part A, v. 65–66, p. 33–45, 1 out. 2017.

TAYMANOV, R.; SAPOZHNIKOVA, K. **Development of measurement science in the context of the fourth industrial revolution**. Journal of Physics: Conference Series. Anais...IOP Publishing Ltd, 9 out. 2020.

TAYMANOV, R.; SAPOZHNIKOVA, K. **A New View on Metrological Maintenance of AI-based Systems**. MAPAN - Journal of the Metrology Society of India, [s.l.], v. 37, n. 4, p. 703-705, 2022. DOI: 10.1007/s12647-022-00606-w.

TAYMANOV, R.; SAPOZHNIKOVA, K. **Development of measurement science in the context of the fourth industrial revolution**. Journal of Physics: Conference Series, [S.l.], v. 1636, p. 012028, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1636/1/012028>.

TESSARO, L.; RAFFALDI, C.; ROSSI, M.; BRUNELLI, D. **Lightweight Synchronization Algorithm with Self-Calibration for industrial LORA**. Sensor Networks, 2018.

UHLIG, D. **A Calibration Method for the Generalized Imaging Model with Uncertain Calibration Target Coordinates**, 2020.

VAJS, I.; DRAJIC, D.; CICA, Z. **Data-Driven Machine Learning Calibration Propagation in A Hybrid Sensor Network for Air Quality Monitoring**. Sensors 2023, 23, 2815. DOI:10.3390/s23052815.

VARSHNEY, A.; GARG, N.; NAGLA, K. S.; NAIR, T. S.; JAISWAL, S. K.; YADAV, S.; ASWAL, D. K. **Challenges in Sensors Technology for Industry 4.0 for Futuristic Metrological Applications**. Mapan - Journal of Metrology Society of India, v. 36, n. 2, p. 215–226, 1 jun. 2021.

VEDURMUDI, A. P.; NEUMANN, J.; GRUBER, M.; EICHSTÄDT, S. **Semantic Description of Quality of Data in Sensor Networks**. Sensors, Basel, v. 21, p. 6462, 28 set. 2021. DOI: 10.3390/s21196462. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/19/6462>.

WANG, H.; ZENG, Q.; ZHANG, Z.; WANG, H. **Research on Temperature Compensation of Multi-Channel Pressure Scanner Based on an Improved**

Cuckoo Search Optimizing a BP Neural Network. Micromachines, v. 13, n. 8, 1 ago. 2022(a).

WANG, Q. **Automatic pointer meters recognition system based on line scan vision.** Measurement Science and Technology, v. 33, n. 12, 1 dez. 2022.

WANG, Q.; LI, H.; WANG, H.; ZHANG, J.; FU, J. **A remote calibration device using edge intelligence.** Sensors, v. 22, n. 1, 1 jan. 2022(b).

WANG, X.; CHEN, J.; WANG, H. **A Pointer Instrument Reading Approach Based on Mask R-CNN Key Points Detection.** International Conference on Culture-Oriented Science and Technology, ICCST 2021. Anais...Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2021.

WANG, Y. M.; JIA, K. B.; LIU, P. Y.; ZHANG, W. J.; YANG, J. C. **Calibration method of meteorological sensor based on enhanced BP network.** Journal of Instrumentation, v. 15, n. 10, 1 out. 2020.

WANG, Z.; LI, Q.; WANG, Z.; YAN, H. **Novel method for processing the dynamic calibration signal of pressure sensor.** Sensors (Switzerland), v. 15, n. 7, p. 17748–17766, 21 jul. 2015.

WANYU, J. ; ZUO, S.; SUN, D.; WANG, Z. **Multi-channel Automatic Calibration System of Pressure Sensor. In: Key Laboratory of Precision Opto-Mechatronics Technology.** Ministry of Education, Beihang University. Beijing: IEEE, 2016. 5 páginas. ISBN: 978-1-4673-9613-4/16.

WEI, R.; OUYANG, K.; BAO, X.; GAO, X.; CHEN, C. **High-precision smart calibration system for temperature sensors.** Sensors and Actuators, A: Physical, v. 297, 1 out. 2019.

YAN, S.; LIU, G.; ZHANG, X.; SU, Y.; ZHAO, Y. **High Voltage Circuit Breaker Speed Measurement Method Based on Camera Calibration.** 2022 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Applications (ICHVE), Chongqing, China, 2022, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICHVE53725.2022.10014442.

YE, X.; XIE, D.; TAO, S. **Automatic value identification of pointer-type pressure gauge based on machine vision.** Journal of Computers (Finland), v. 8, n. 5, p. 1309–1314, 2013.

YIN, R. K. **Case Study Research - Design and Methods.** 3ª edição. Londres: Sage Publicações, 2015. 112 páginas.

YIN, X.; WEN, K.; WU, Y.; ZHOU, L.; GONG, J. **Study on Intelligent Controller Design of Flow Metrological Calibration System.** 2021. ASME Conference Publications and Proceedings, 11 p. Disponível em: <https://doi-org.ez345.periodicos.capes.gov.br/10.1115/IPC2020-9557>.

FU, Z.; YU, X.; ZHOU, W.; ZHAO, Y. **Design method of automatic calibration software based on intelligent fitting**. IEEE 13th International Conference on Electronic Measurement & Instruments (ICEMI'2017). Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2017. 5 páginas.

ZHU, Q.; SAILHAN, F.; UDDIN, M. Y. S.; ISSARNY, V.; VENKATASUBRAMANIAN, N. **Multi-sensor calibration planning in IoT-Enabled smart spaces**. Proceedings - International Conference on Distributed Computing Systems. Anais...Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019.

APÊNDICE A



QUESTIONÁRIO SEMIESTRUTURADO

Objetivo: Coleta de percepções de especialistas em metrologia e gestão da qualidade industrial acerca da proposta de *framework* para Calibração 4.0.

Pesquisa de Doutorado: *Framework* para calibração 4.0 de sensores analógicos: integração digital e interoperabilidade na Metrologia 4.0.

Autor: Engº. Msc. Jerri Bernardes de Souza.

Data de coleta: Novembro de 2024.

Introdução ao Projeto do *Framework* para Calibração 4.0

Com o avanço da Indústria 4.0, a calibração de instrumentos industriais precisa acompanhar as novas demandas por conectividade, automação e eficiência. No entanto, muitas indústrias ainda dependem de instrumentos de medição analógicos, que carecem de integração digital, tornando os processos de calibração lentos e sujeitos a intervenções manuais. Este projeto propõe um *Framework* para Calibração 4.0, com o objetivo de criar uma solução que facilite a transição desses instrumentos analógicos para um ambiente de gestão digital.

Este *framework* utiliza tecnologias habilitadoras como IoT, inteligência artificial e computação em nuvem para digitalizar e automatizar o processo de calibração. Dessa forma, busca-se não apenas aumentar a precisão e confiabilidade das medições, mas também reduzir custos e o tempo de calibração, além de proporcionar uma maior rastreabilidade e conformidade com as exigências da Indústria 4.0. Em última análise, este *framework* contribui para que as indústrias melhorem seus processos de qualidade, otimizem a gestão de instrumentos e minimizem a necessidade de intervenções manuais.

Estrutura e Funcionamento do *Framework*

O *framework* para Calibração 4.0 propõe uma solução disruptiva ao processo de calibração de instrumentos analógicos, onde a remoção do instrumento do ambiente produtivo pode ser evitada. A geração do mensurando, ou seja, da variável de referência para calibração, pode ocorrer de duas formas principais, dependendo das características e exigências do ambiente industrial:

Utilização do Próprio Processo de Manufatura: Em ambientes onde a grandeza medida é estável e controlada, o processo de manufatura pode servir como referência direta para a calibração. Nesse caso, os instrumentos analógicos captam dados do próprio processo e os comparam com padrões conectados ao sistema, possibilitando coletas contínuas sem a necessidade de interromper as operações. Essa solução permite a calibração sem gerar a intermitência ao processo, o que é especialmente vantajoso em linhas de produção que demandam alta disponibilidade.

Set-up Modular Móvel de Calibração: Em cenários onde a variabilidade ou as características do processo dificultam o uso do próprio processo como gerador da grandeza física em questão, um *set-up* móvel de calibração pode ser introduzido. Esse *set-up* é uma unidade transportável equipada com padrões de referência, sensores e dispositivos que permitem a geração e coleta de mensurandos específicos para o instrumento sob calibração. Esse sistema móvel pode oferecer flexibilidade, adaptando-se a ambientes variados, e permite uma calibração precisa diretamente na planta, sem deslocar o instrumento para um laboratório externo.

Cada um desses cenários — o uso do processo de manufatura como referência e a adoção de *set-up* móveis — será avaliado conforme a viabilidade em ambientes específicos. Essa análise considerará fatores como a estabilidade da grandeza do processo, os requisitos de precisão e a possibilidade de integração com padrões de referência apropriados.

Ao permitir a calibração *in situ*, o *framework* visa a redução de custos associados ao transporte de instrumentos, a minimização de paradas de produção e a elevação da confiabilidade dos dados. A coleta de percepções dos especialistas é fundamental para avaliar o impacto dessas metodologias no ambiente real, validando sua eficácia e identificando potenciais desafios que possam surgir na implementação prática.

Por exemplo, se um manômetro analógico precisa ser calibrado, o *framework* permite que ele envie leituras para o sistema central, onde algoritmos analisam a precisão dos dados em comparação com padrões predefinidos. Ao final, o sistema pode gerar um certificado digital de calibração, que fica disponível para consultas e auditorias, garantindo conformidade e rastreabilidade. O diagrama apresentado na abaixo exemplifica um *framework* para calibração 4.0 de um instrumento industrial de medição de pressão relativa. A metodologia da calibração é por método comparativo a um padrão de referência de mesma grandeza física.

Os instrumentos, padrão de referência e instrumento sob calibração, estão conectados ao processo, ambos detectando a grandeza da variável do processo. A coleta dos dados deste mostrador é realizada por meio de uma câmera de alta resolução, enquanto os dados do padrão são coletados por meio de um módulo conversor.

Os dados coletados do instrumento de monitoramento ambiental, do instrumento sob calibração e do padrão são enviados, via cabo, a um módulo de processamento de dados e, em seguida, transmitidos via *Wi-fi* para uma nuvem. Na nuvem, esses dados são processados (convertidos e corrigidos) e, posteriormente, enviados para uma máquina com *dashbord* do sistema. Por meio de parâmetros pré-estabelecidos, é gerado o certificado digital da calibração.

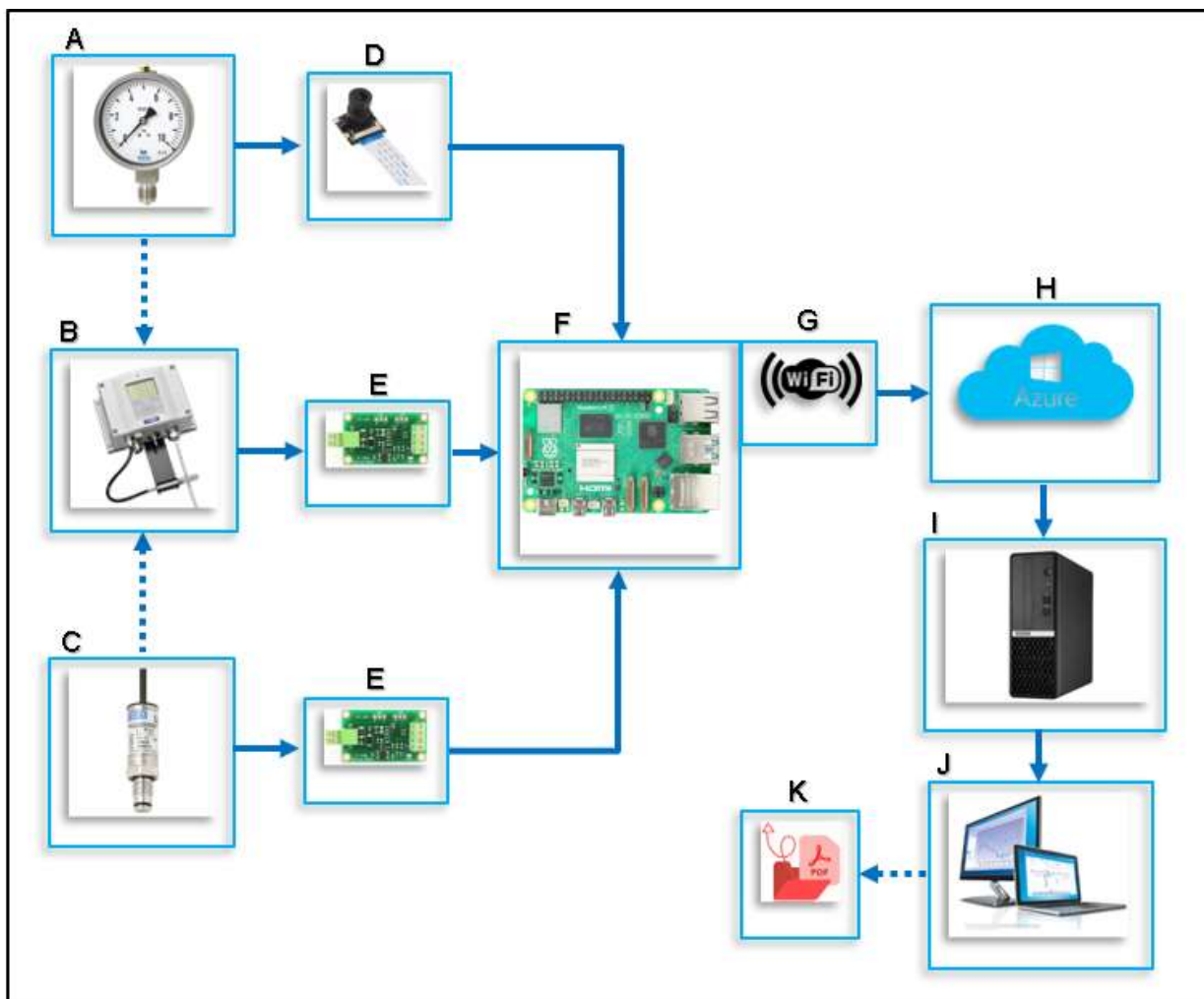
Os elementos exemplificados do diagrama são:

- A-** Manômetro analógico relativo, por exemplo: modelo 232.50, marca Wika do Brasil;
- B-** Transmissor termohigrobarométrico, por exemplo: modelo PTU300, marca Vaisala;
- C-** Padrão de referência transmissor de pressão relativa, por exemplo: modelo M-10, marca Wika;
- D-** Câmera de alta resolução, por exemplo: Câmera Raspberry Pi Ov5647 5mp 60° 3.6 mm 1080p;
- E-** Receptor de Loop com Interface, por exemplo: tipo I2C;
- F-** Computador de placa única, por exemplo: Pi Zero 2 W;
- G-** Módulo de transmissão sem fio, por exemplo: Rp2040 Arm 133 MHz;
- H-** Plataforma em nuvem, por exemplo: Microsoft® Azure Cloud e algoritmo para tratamento dos dados elaborado em linguagem Python;
- I-** Computador *desktop*, por exemplo: 13ª geração Intel® Core™ i7-13700 (16-core, cache de 30 MB, 2.1 GHz até 5.1GHz Turbo);

J- Monitor para apresentação do *dashboard*, por exemplo: Dell de 24" - S2421HN;

K- Padrão de formatação de arquivo digital, por exemplo: PDF.

Exemplificação do *Framework* para calibração de um manômetro.



Fonte: Elaborado pelo autor.

QUESTIONÁRIO

Nome:

Cargo:

Empresa (opcional):

1- Você já tinha conhecimento prévio sobre o conceito de Calibração 4.0 e sua importância para a Indústria 4.0?

☐ Sim

☐ Não

☐ Parcialmente

- 2- Com base na descrição sobre o *framework* fornecida anteriormente, a estrutura da Calibração 4.0 proposta abrange todos os aspectos relevantes para uma calibração eficiente?

☐ Sim ☐ Não ☐ Parcialmente

- 3- Quais etapas da implementação do *framework* você considera mais desafiadoras? Por quê?

- 4- Houve alguma dificuldade técnica sobre o entendimento do processo de calibração 4.0 utilizando o *framework* proposto?

☐ Sim (Se sim, por favor, explique) ☐ Não

- 5- Você considera que a metodologia proposta permite uma integração adequada entre os dispositivos de medição, o sistema de processamento de dados e o gerenciamento da calibração como um todo (operacional/documental)?

☐ Sim ☐ Não ☐ Parcialmente

- 6- Em sua experiência, o uso de tecnologias como Inteligência Artificial, IoT e Visão Computacional para a Calibração pode trazer benefícios reais ao processo?

☐ Sim ☐ Não ☐ Parcialmente

- 7- Como você avalia os benefícios propostos pelo *framework* de Calibração 4.0 em comparação às metodologias tradicionais?

☐ Muito Superior ☐ Superior ☐ Igual ☐ Inferior

- 8- Quais melhorias você sugeriria para otimizar a implementação prática deste *framework* em ambientes industriais e para superar possíveis objeções de usuários finais ou contratantes?

- 9- A documentação gerada e disponibilizada automaticamente por este *framework*, incluindo certificados digitais de calibração, poderá satisfazer os requisitos de rastreabilidade e integridade dos dados?

☐ Sim ☐ Não ☐ Parcialmente

- 10- Você considera relevante participar de um teste piloto para avaliar este *framework* de Calibração 4.0? Por quê?

☐ Sim ☐ Não

APÊNDICE B

GUIA ORIENTATIVO PARA IMPLANTAÇÃO DO *FRAMEWORK*

Este guia orientativo visa oferecer uma visão abrangente do processo de implantação do *framework* para calibração 4.0, por parte do técnico executor responsável por esta atividade.

1. Planejamento e Instalação

Requisitos Físicos: Assegurar de que a área/local da instalação do setup esteja adequada para acomodar todos os dispositivos do processo;

Requisitos Elétricos: Verificar pontos de energia para alimentação dos dispositivos, ponto de aterramento e analisar a qualidade do sinal da rede elétrica;

Conectividade de Rede: Verificar a disponibilidade de conexões de redes necessárias (Ethernet, Wi-fi, etc.) para a comunicação dos módulos;

Condições Ambientais: Avaliar as condições ambientais (temperatura, umidade, pressão, vibração, etc.) e verificar se estas variáveis estão compatíveis aos requisitos dos dispositivos do processo de calibração;

2. Instalação dos Sensores

Posicionamento: Instalar os sensores nos pontos específicos conforme instruções de técnicas (normas, especificações de fabricante, documentos orientativo, etc.);

Conexões Elétricas: Conectar os dispositivos de aquisição e monitoramento por meio de cabos específicos dos módulos (ex.: 4-20 mA; 0-5 Vcc; etc.);

Verificação de Sinal: Utilizar um multímetro ou osciloscópio para verificar a qualidade dos sinais de processo;

Instalação Física dos Sensores Ambientais: Instalar os sensores ambientais em locais estratégicos para o monitoramento das variáveis de interesse;

Conexão ao Sistema dos Sensores Ambientais: Conectar os sensores ambientais ao módulo conversor (mA → Bit) e verifique a integridade do cabeamento;

Posicionamento e Fixação do(s) Sensor(es) Padrão: Instalar o(s) sensor(es) padrão em uma adequada posição no sistema;

Conexão do(s) Sensor(es) Padrão ao Módulo de Aquisição

/Conversão: Conectar o(s) sensor(es) padrão ao módulo conversor (mA →Bit) e verifique a integridade do cabeamento;

3. Configuração do Módulo Microprocessador

Conexão dos Módulos: Conecte os módulos conversores (mA →Bit) ao módulo microprocessador, quando aplicável, conectar os sensores nas portas analógicas ou digitais do módulo microprocessador;

Configuração de Software: Configurar os parâmetros do sistema no software de calibração;

Verificação de Comunicação: Verificar a comunicação de dados entre os dispositivos do sistema;

4. Instalação do Módulo Comunicador

Montagem Física: Instale o módulo comunicador em uma localização adequada para uma boa conexão de sinal;

Configuração de Comunicação: Configure os parâmetros de comunicação (Sigfox, Lora, Zigbee, 4G, 5G, WiFi, *Bluetooth*, *Ethernet*, etc.) conforme especificações da rede;

Teste de Conectividade: Realizar testes de conectividade para garantir que o sistema de comunicação esteja funcionando corretamente com o servidor/computador;

5. Configuração do Servidor/Computador

Instalação/Habilitação do *Software*: Instale e/ou habilite o *software* adequado ao processo no servidor/computador para o recebimento, processamento e armazenamento dos dados da calibração;

6. Verificação e Testes

Testes de Sistema: Realize testes de todo o ciclo do processo para validar a funcionalidade do *setup* instalado;

Ajustes Finais: Quando aplicável, faça ajustes necessários nos parâmetros do sistema para a otimização da precisão, estabilidade e confiabilidade dos dados coletados;

7. Execução da Calibração

Procedimento de Calibração: Siga rigorosamente os procedimentos operacionais de calibração pertinentes a cada cenário/sensor de medição;

Registro de Dados: Garanta que todos os dados do processo estejam sendo registrados automaticamente no sistema;

Finalização dos Ciclos: Após a finalização correta dos ciclos, desmobilizar todo o setup;

Emissão de Certificado: Avalie o certificado emitido automaticamente, e, se o certificado estiver conforme valide-o no sistema para a sua disponibilização ao requisitante da calibração;

8. Armazenamento e Arquivamento da Documentação

Segurança de Dados: Configure o sistema para arquivar digitalmente todos os dados do processo e implemente medidas de segurança para a proteção dos dados contra acessos não autorizados;

9. Melhoria Contínua e Manutenção do Sistema

Revisões Periódicas: Realiza revisões periódicas para identificar oportunidades de melhoria;

Atualização de Procedimentos: Quando pertinente, atualize os procedimentos com base em feedbacks, referências técnicas ou pela experiência adquirida;

Manutenção Preventiva: Execute a manutenção preventiva periodicamente nos dispositivos do setup visando a garantia da integridade dos resultados;

PROCEDIMENTO OPERACIONAL PARA A REALIZAÇÃO DA CALIBRAÇÃO 4.0

1. Solicitação e Inicialização do processo

Para iniciar o processo de calibração, deve-se enviar uma solicitação formal de calibração, incluindo informações detalhadas sobre o equipamento a ser calibrado, como faixa medição, dimensões, precisão, critério de aceitação, pontos de operação, marca, modelo, tag, número de série, localização, características do processo e variáveis do sistema. Após o envio da solicitação, um responsável técnico da calibração será designado para lidar com a solicitação.

2. Análise Inicial e Planejamento

Nesta fase, a equipe de calibração realizará uma análise detalhada dos requisitos de calibração e do processo. Isso inclui determinar as faixas de medição, tolerâncias e critérios de aceitação. Os recursos necessários, como padrões de referência, serão identificados e um plano de calibração será desenvolvido.

3. Contrato e Negociação

Durante esta etapa, serão acordados os termos do contrato, custos e prazos. Os critérios da operacionalização serão alinhados entre as partes, bem como as responsabilidades em relação a desvios e ações corretivas.

4. Preparação dos Equipamentos

Os equipamentos a serem calibrados serão inspecionados visual e fisicamente para identificar possíveis irregularidades visíveis, desgaste, anomalias ou componentes faltantes. As condições iniciais e histórico de manutenção serão levados em consideração. O sistema operacional será mapeado visando à estratégia para a inserção do(s) padrão(ões) e medidores das condições ambientais.

5. Configuração do Ambiente de Calibração e do Processo

O ambiente de calibração será monitorado para atender aos requisitos específicos, como temperatura, umidade, pressão atmosférica e iluminação. Testes preliminares deverão ser realizados no sistema de controle, para averiguar parâmetros pertinentes como estabilidade, tempo e estanqueidade.

6. Coleta de Dados Pré-Calibração

Os dados de referência serão registrados automaticamente antes do início da calibração, incluindo leituras de referência, qualidade do ambiente para leitura e condições ambientais iniciais. Todos os sensores de referência usados para coletar os dados deverão ser devidamente calibrados por um laboratório acreditado.

7. Execução da Calibração

O procedimento de calibração deverá ser seguido rigorosamente, em comum acordo com o gestor do processo e sob a responsabilidade de um operador habilitado, que cuidará da variação da grandeza alvo da calibração no sistema.

Esta variação da grandeza será captada simultaneamente pelo sensor padrão inserido no processo como pelo(s) sensor(es) sob calibração. Idealmente recomenda-se cinco pontos de calibração; no entanto, quando aplicável, pede-se no mínimo três pontos de calibração, sendo o ponto e/ou faixa de operação do sensor sob calibração 20 % acima e 20 % abaixo do valor nominal. Todas as leituras e ajustes necessários serão registrados durante o processo de calibração.

8. Análise dos Resultados em Tempo Real

Os resultados da calibração serão monitorados e registrados em tempo real. Cada leitura será comparada com os critérios de aceitação definidos no plano de calibração. Idealmente, recomenda-se realizar no mínimo três ciclos de calibração (ascendente e descendente). Em comum acordo com o sistema de gestão da qualidade da empresa contratante, intervenções poderão serem tomadas imediatamente se desvios significativos forem detectados.

9. Ações Corretivas e Revisões

Se desvios significativos forem identificados, ações corretivas poderão ser implementadas imediatamente. Todas as ações corretivas serão registradas, incluindo possíveis ajustes de equipamento e procedimentos adicionais. As etapas de calibração podem ser repetidas conforme necessidade.

10. Verificação Pós-Calibração

Será realizada uma análise crítica dos resultados obtidos após a calibração visando buscar a conformidade com os critérios de aceitação. Todas as medições de verificações serão registradas e comparadas com os resultados da calibração.

11. Emissão do Certificado de Calibração

Com base nos resultados da calibração, um certificado de calibração detalhado será emitido automaticamente pelo sistema. O certificado incluirá todos os

detalhes do procedimento de calibração, resultados, desvios e incertezas de medição associadas.

12. Armazenamento e Arquivamento de Documentação

Todos os registros e documentação da calibração serão digitalmente arquivados de forma organizada e segura para conferência futura e auditorias. E este também será disponibilizado digitalmente ao sistema de gestão da qualidade do requisitante do serviço.

13. Comunicação de resultados

Quando encerrar a etapa operacional do processo de calibração, um comunicado será enviado aos envolvidos no processo juntamente com os resultados.

14. Melhoria Contínua

Se aplicável, revisões pós-calibração serão realizadas para identificar oportunidades de melhoria nos procedimentos e processos. Procedimentos podem ser atualizados com base no *feedback* do cliente e experiência adquirida.

15. Encerramento do Projeto de Calibração

O processo de calibração será formalmente encerrado, garantindo que todos os registros estejam completos e arquivados conforme as políticas estabelecidas.

Este guia oferece uma visão geral do processo de calibração 4.0 e orientações para os usuários que desejam entender como utilizar este sistema. É crucial que a execução do processo deva ser realizada por profissionais qualificados e treinados.

Nas figuras a seguir está detalhado uma visão geral do processo de calibração 4.0 apresentando as etapas e os fluxos das atividades, envolvidas desde a contratação do serviço até a geração do certificado de calibração.

Infográfico da Operacionalização da Calibração 4.0 (Parte 1)

PROCEDIMENTO OPERACIONAL PARA A REALIZAÇÃO DA CALIBRAÇÃO 4.0

Solicitação e Inicialização do Processo (Requisitante)



Análise Técnica Inicial e Planejamento (Executor)



Contrato e Negociação (Requisitante + Executor)



Preparação dos Equipamentos/Set-Up (Executor)



Configuração do Ambiente de Calibração e do Processo (Executor)



Verificação dos Dados Pré-Calibração (Executor)



Fonte: Elaborado pelo autor

Infográfico da Operacionalização da Calibração 4.0 (Parte 2)



Fonte: Elaborado pelo Autor