

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

**FERNANDO BITTENCOURT ARROYO**

**AVALIAÇÃO INTELIGENTE DE USABILIDADE EM UM LABORATÓRIO REMOTO**  
**UTILIZANDO NEURO-FUZZY**

São Paulo

2024

**FERNANDO BITTENCOURT ARROYO**

**AVALIAÇÃO INTELIGENTE DE USABILIDADE EM UM LABORATÓRIO REMOTO  
UTILIZANDO NEURO-FUZZY**

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

Prof. Orientador: Dr. Peterson A. Belan

São Paulo  
2024

Arroyo, Fernando Bittencourt

Avaliação inteligente de usabilidade em um laboratório remoto utilizando neuro-fuzzy. / Fernando Bittencourt Arroyo. 2024.

203 f.

Tese (Doutorado) - Universidade Nove de Julho - UNINOVE, São Paulo, 2024.

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

1. Laboratório remoto. 2. Avaliação de usabilidade. 3. Avaliação de experiência de usuário. 4. Fuzzy.

I. Belan, Peterson Adriano. 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 FERNANDO BITTENCOURT ARROYO.

Tendo examinado o trabalho apresentado para obtenção do título de "Doutor em Informática e Gestão do Conhecimento", com Tese intitulada AVALIAÇÃO INTELIGENTE DE USABILIDADE EM UM LABORATÓRIO REMOTO UTILIZANDO NEURO-FUZZY, a

Comissão Examinadora considerou o trabalho:

- ☒ **Aprovado**  
☐ **Aprovado condicionalmente**  
☐ **Reprovado com direito a novo exame**  
☐ **Reprovado**

**Examinadores**

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** PETERSON ADRIANO BELAN  
Data: 17/02/2025 15:12:23-0300  
Verifique em <https://validar.jf.gov.br>

Prof. Dr. Peterson Adriano Belan

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** FABIO YTOSHI SHIBAO  
Data: 17/02/2025 12:00:21-0300  
Verifique em <https://validar.jf.gov.br>

Prof. Dr. Fábio Ytoshi Shibao

Prof. Dr. Adriana Aparecida de Lima Terçariol

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** ADRIANA APARECIDA DE LIMA TERÇARIOL  
Data: 17/02/2025 13:49:19-0300  
Verifique em <https://validar.jf.gov.br>

Prof. Dr. Marcos Antônio Gaspar

Documento assinado digitalmente  
**gov.br** MARCOS ANTONIO GASPAR  
Data: 17/02/2025 14:17:39-0300  
Verifique em <https://validar.jf.gov.br>

sexta-feira, 20 de dezembro de 2024

Dedico este trabalho a minha esposa  
Thamires B. P. Leal que sempre apoiou meus  
estudos, esteve a meu lado durante toda a jornada  
com grande paciência e compreensão.

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de agradecer ao Prof. Dr. Peterson A. Belan, que me orientou durante este projeto, sempre me apoiando, buscando melhores caminhos, auxiliando diante de todas as dificuldades e mostrando-se disponível sempre que necessário, com correções e elogios conforme o caso.

Aos professores de todas as disciplinas que cursei no PPGI, por toda a paciência e ensinamentos.

Aos professores que participaram das bancas de Qualificação e Defesa contribuindo muito para a finalização deste trabalho.

A todos os participantes que realizaram os experimentos e contribuíram para que a pesquisa fosse concluída.

A Universidade Nove de Julho pela oportunidade e concessão da bolsa de estudos.

A Capes pelo acesso a conteúdo, periódicos e bases de dados.

E a todos os amigos que fiz no PPGI durante esse período, compartilhando conhecimento, enfrentando dificuldades e obstáculos.

*If you can't explain it simply,  
you don't understand it well enough.*

*Albert Einstein  
(1879-1955)*

## RESUMO

Ao longo da última década, diversos estudos descreveram tentativas de mensuração automatizada da usabilidade com diferentes dados e técnicas. No entanto, até o momento, as propostas não apresentaram conclusões relevantes. Em estudo anterior, foi proposta uma metodologia para mensuração da usabilidade e da experiência do usuário (*UX*) no Laboratório Remoto de Microcontroladores da Uninove (LRM-U9), que obteve resultados promissores, porém de forma onerosa. O LRM-U9 é um laboratório remoto (LR) que permite a realização de experimentos para o aprendizado à distância em Internet das Coisas (*IoT*), viabilizando o envio de comandos para um equipamento real composto por um Raspberry Pi conectado a dois Arduinos, que, por sua vez, possuem componentes como LEDs, sensores, motor de passo e servo motor. O comportamento desses componentes pode ser observado por meio de uma câmera. O presente estudo propôs uma metodologia inteligente para avaliação do LRM-U9, para isso foram convidados desenvolvedores de software e alunos de disciplinas relacionadas à Engenharia Elétrica para realizarem experimentos no LRM-U9. Os participantes seguiram os roteiros preestabelecidos e, ao final, responderam a um questionário que contemplava questões do *System Usability Scale (SUS)*, do *Usability Metrics for User Experience (UMUX)* e perguntas descritivas. Além disso, foi desenvolvido um Sistema Adaptativo *Neuro-Fuzzy (ANFIS)*, no qual as pontuações obtidas pelos questionários foram utilizadas como valores-alvo, enquanto os dados de uso e navegação serviram para o treinamento do modelo *ANFIS*. No total, foram coletadas 39 amostras com 49 atributos, sendo 33 utilizadas para treinamento e 6 para validação. Os resultados obtidos foram considerados satisfatórios: 78% dos respondentes relataram que o LRM-U9 contribuiu para o aprendizado, e 63% destacaram sua utilidade como no ensino/aprendizagem. Os questionários *SUS* e *UMUX* indicaram usabilidade e *UX* pouco acima da média, com pontuações de 72,5 e 76,6, respectivamente. O modelo *ANFIS* apresentou *RMSE (Root Mean Square Error)* de 4,6486, resultando em valores muito próximos aos reais. A metodologia demonstrou potencial para aplicação em outros contextos e públicos.

**Palavras-chave:** Laboratório Remoto. Avaliação de Usabilidade. Avaliação de Experiência do Usuário. *Fuzzy*.



## ABSTRACT

Over the past decade, several studies have described attempts to automate usability measurement using different data and techniques. However, so far, these proposals have not yielded significant conclusions. In a previous study, a methodology was proposed for measuring usability and user experience (UX) in the Laboratório Remoto de Microcontroladores at Uninove (LRM-U9), which obtained promising results, albeit at a high cost. LRM-U9 is a remote laboratory (RL) that enables distance learning experiments in the Internet of Things (IoT) field, allowing users to send commands to real equipment composed of a Raspberry Pi connected to two Arduinos, which, in turn, include components such as LEDs, sensors, a stepper motor, and a servo motor. The behavior of these components can be observed through a camera. The present study proposed an intelligent methodology for evaluating LRM-U9. To achieve this, software developers and students from Electrical Engineering-related disciplines were invited to conduct experiments in LRM-U9. Participants followed predefined scripts and, at the end, answered a questionnaire comprising items from the System Usability Scale (SUS), Usability Metrics for User Experience (UMUX), and descriptive questions. Additionally, an Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS) was developed, where questionnaire scores were used as target values, while usage and navigation data were employed to train the ANFIS model. In total, 39 samples with 49 attributes were collected, with 33 used for training and 6 for validation. The results were considered satisfactory: 78% of respondents reported that LRM-U9 contributed to their learning, and 63% highlighted its usefulness in teaching and learning. The SUS and UMUX questionnaires indicated usability and UX levels slightly above average, with scores of 72.5 and 76.6, respectively. The ANFIS model achieved a Root Mean Square Error (RMSE) of 4.6486, resulting in values very close to the actual ones. The methodology demonstrated potential for application in other contexts and target audiences.

**Keywords:** Remote Lab. Internet of Things. Usability Evaluation. User Experience Evaluation. Fuzzy.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Framework de usabilidade de acordo com a NBR ISO 9241-11. ....	34
Figura 2 - Normas de Ergonomia de Software na análise, projeto e avaliação.....	35
Figura 3 - Proposta consolidada e normativa de análise de usabilidade. ....	36
Figura 4 – Relacionamento entre <i>SUS</i> , componentes e pilares de usabilidade.....	47
Figura 5 - Questões e escala utilizados para avaliação da Experiência do Usuário. ....	49
Figura 6– Estrutura do modelo <i>MELODY</i> .....	60
Figura 7– Esquema geral de um sistema <i>Fuzzy</i> .....	66
Figura 8– Máquina de Inferência <i>Fuzzy</i> de Mandani .....	70
Figura 9– Abordagem de Mamdani.....	70
Figura 10– Defuzzificação utilizando <i>CoA</i> ou <i>CoG</i> .....	72
Figura 11– Defuzzificação utilizando <i>CoM</i> .....	73
Figura 12– Analogia para a defuzzificação pelo <i>CoM</i> .....	74
Figura 13– Defuzzificação utilizando <i>MoM</i> .....	74
Figura 14– Estratégia de Takagi e Sugeno.....	76
Figura 15– Exemplo de Sistema <i>Fuzzy</i> Paramétrico .....	77
Figura 16– Diagrama em blocos da Aprendizagem Supervisionada.....	79
Figura 17– Diagrama em blocos de uma RNA destacando o único neurônio da camada de saída ....	80
Figura 18– Diagrama em blocos de identificação de sistema .....	84
Figura 19– Diagrama em blocos de sistema inverso .....	84
Figura 20 – Estrutura de um Neurônio Artificial .....	85
Figura 21 – Neurônio Artificial .....	86
Figura 22 – Rede neural com 3 camadas .....	86
Figura 23 – Função de ativação sigmoideal .....	88
Figura 24– Arquitetura do LRM-U9 .....	113
Figura 25 – Interface de usuário - Autenticação .....	114
Figura 26 – Interface de usuário - Cadastro .....	115
Figura 27 – Interface de usuário - Apresentação.....	115
Figura 28 – Interface de usuário – <i>No-Code</i> – Editor de Blocos .....	116
Figura 29 – Interface de usuário – Editor de códigos .....	116
Figura 30 – Interface de usuário – Detalhes da compilação e gravação.....	117
Figura 31 – Interface de usuário – Execução do experimento .....	117
Figura 32 – Interface de usuário – Questionário.....	118
Figura 33 – Exemplo de campo utilizado no questionário .....	122
Figura 34– Página inicial do Matomo.....	126
Figura 35– Página de visitas - Matomo.....	127
Figura 36– Página de dispositivos - Matomo .....	128
Figura 37– Página de registro das visitas - Matomo.....	129
Figura 38– Estatísticas das páginas - Matomo .....	130
Figura 39– Informações sobre tempo - Matomo .....	130
Figura 40– Informações sobre transições de página - Matomo.....	131

Figura 41– Métricas calculadas em Tempo Real.....	133
Figura 42– Fluxograma dos dados coletados .....	133
Figura 43– Arquitetura do <i>ANFIS</i> gerada pelo método <i>SC</i> .....	141
Figura 44– Modelo <i>ANFIS</i> .....	142
Figura 45– Exemplo de modelagem das variáveis de entrada usando o método <i>SC</i> .....	142
Figura 46– Exemplo de regras geradas pelo <i>ANFIS</i> .....	143
Figura 47– Resultados do treinamento do <i>ANFIS</i> .....	152
Figura 48– Resultados da validação do <i>ANFIS</i> .....	152

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Normalização da pontuação <i>SUS</i> .....	45
Tabela 2 – Resultados das pesquisas (publicações) .....	94
Tabela 3 – Publicações dos últimos 5 anos obtidas pela <b>CN 1</b> .....	95
Tabela 4 – Publicações dos últimos 5 anos obtidas pela <b>CN 2</b> .....	96
Tabela 5 – Pontuação média dos componentes de qualidade .....	149

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Definições conforme NBR ISO 9241-11 .....	29
Quadro 2 - Definições conforme NBR ISO 9241-11 .....	33
Quadro 3 – Exemplos de medidas de usabilidade conforme NBR ISO 9241-11 .....	33
Quadro 4 - Definições conforme Relatório Técnico NBR-ISO-TR-9241-100:2012 .....	35
Quadro 5 - Questões utilizadas na mensuração de percepção de utilidade. ....	38
Quadro 6 - Questões utilizadas na mensuração da usabilidade .....	39
Quadro 7 - Comparativo entre questionários para mensuração de usabilidade .....	41
Quadro 8 - Questões originais do SUS e exemplo de adequação ao público-alvo .....	42
Quadro 9 - Tradução das declarações SUS .....	43
Quadro 10 – Relação entre questões <i>SUS</i> e componentes de qualidade de Nielsen: .....	45
Quadro 11 - Itens candidatos para questionário de usabilidade usando <i>UMUX</i> .....	48
Quadro 12 - Itens com maior correlação em relação a pontuação da <i>SUS</i> (estudo piloto) .....	48
Quadro 13 - Soluções de usabilidade .....	50
Quadro 14 - As 10 Heurísticas de Nielsen .....	52
Quadro 15 – Componentes de Qualidade da usabilidade .....	53
Quadro 16 – Exemplo de avaliação realizada com modelo <i>MELODY</i> .....	60
Quadro 17 – Regras de inferência <i>Fuzzy</i> .....	68
Quadro 18 – Questões de pesquisa para a Revisão Sistemática da Literatura .....	92
Quadro 19 – Definição dos critérios <i>PICOC</i> .....	92
Quadro 20 – Construtos de termos de busca para pesquisa nas bases de dados .....	93
Quadro 21 – Critérios de seleção das publicações consideradas na CN 3.....	99
Quadro 22 – Critérios de seleção das publicações consideradas na CN 4.....	100
Quadro 23 – Critérios de seleção das publicações consideradas na CN 5.....	101
Quadro 24 – Critérios de seleção das publicações consideradas na CN 6.....	102
Quadro 25 – Autores e conceitos relevantes para os tópicos da pesquisa .....	103
Quadro 26 – Principais autores citados – CN 5 .....	105
Quadro 27 – Tamanho de amostras utilizadas em trabalhos relacionados:.....	111
Quadro 28 - Questionário SUS adaptado ao LRM-U9.....	122
Quadro 29 – Questões <i>UMUX</i> adaptadas ao LRM-U9 .....	123
Quadro 30 – Questões qualitativas .....	124
Quadro 31 – Principais informações sobre as visitas dos usuários.....	128
Quadro 32 – Principais informações sobre as ações dos usuários .....	129
Quadro 33 – Atributos após tratamento e preparo dos dados brutos.....	134
Quadro 34 – Prefixos e agrupamento das variáveis .....	137
Quadro 35 – Principais expressões-chave obtidos nas questões descritivas .....	145

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<i>BIOS</i>	<i>Basic Input/Output System</i> – Sistema básico de entrada e saída
<i>CFA</i>	<i>Confirmatory Factor Analysis</i> – Análise Fatorial Confirmatória
<i>CI</i>	Circuito Integrado
<i>CNC</i>	<i>Computer Numeric Control</i> – Controle Numérico Computadorizado
<i>CPU</i>	<i>Central Processing Unit</i> – Unidade Central de Processamento
<i>CSQ</i>	<i>Client Satisfaction Questionnaire</i> – Questionário de Satisfação do Cliente
<i>DSP</i>	<i>Digital Signal Processor</i> – Processador de Sinais Digitais
<i>EAD</i>	Ensino à distância
<i>e-learning</i>	<i>electronic learning</i> – Aprendizado Eletrônico
<i>FPGA</i>	<i>Field Programmable Gate Array</i> – Matriz de Portas Programáveis em Campo
<i>GND</i>	Graduated Neutral Density – Filtro de Densidade Neutra Graduado
<i>iCTB</i>	<i>Internet-based Cognitive Behavioural</i> – Terapia Cognitivo-Comportamental Baseada na Internet
<i>IA</i>	<i>Inteligência Artificial</i>
<i>IDE</i>	<i>Integrated Development Environment</i> – Ambiente de Desenvolvimento Integrado
<i>IoT</i>	<i>Internet of Things</i> – Internet das Coisas
<i>IIoT</i>	<i>Industrial Internet of Things</i> – Internet Industrial das Coisas
<i>LDR</i>	<i>Light Dependent Resistor</i> - Resistor Dependente de Luz
<i>LED</i>	<i>Light-Emitting Diode</i> - Diodo Emissor de Luz
<i>LMS</i>	<i>Learning Management System</i> – Sistema de Gerenciamento de Aprendizagem
<i>LR</i>	Laboratório Remoto
<i>LRM-U9</i>	Laboratório Remoto de Microcontroladores da Uninove
<i>NASA-TLX</i>	<i>NASA Task Load Index</i> – Índice de Carga de Trabalho da NASA
<i>PWM</i>	<i>Pulse Width Modulation</i> – Modulação por Largura de Pulso
<i>RAM</i>	<i>Random Access Memory</i> – Memória de Acesso Aleatório
<i>ROM</i>	<i>Read-Only Memory</i> – Memória Somente Leitura
<i>SH</i>	<i>Smart House</i> – Casa Inteligente
<i>SO</i>	Sistema Operacional
<i>SUS</i>	<i>System Usability Scale</i> – Escala de Usabilidade do Sistema
<i>TTL</i>	<i>Transistor-Transistor Logic</i> – Lógica Transistor-Transistor
<i>UART</i>	<i>Universal Asynchronous Receiver Transmitter</i> – Transmissor-Receptor Assíncrono Universal
<i>URA</i>	Unidade de Resposta Audível
<i>USART</i>	<i>Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter</i> – Transmissor-Receptor Síncrono/Assíncrono Universal

<i>USB</i>	<i>Universal Serial Bus</i> – Barramento Serial Universal
<i>UI</i>	<i>User Interface</i> – Interface do Usuário
<i>UMUX</i>	<i>Usability Metric for User Experience</i> – Métrica de Usabilidade para Experiência do Usuário
<i>UX</i>	<i>User Experience</i> – Experiência do Usuário
<i>VCC</i>	<i>Voltage Common</i> Collector - Tensão de Coletor Comum
<i>VISIR</i>	<i>Virtual Instrument Systems in Reality</i> – Sistemas de Instrumentos Virtuais em Realidade
<i>XRL</i>	<i>Extended Remote Laboratorie</i> – Laboratório Remoto Extendido

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	18
1.1. OBJETIVOS GERAL E ESPECÍFICOS .....	23
1.2. JUSTIFICATIVA DA PESQUISA.....	24
1.3. DELIMITAÇÃO DA PESQUISA.....	28
1.4. ESTRUTURA DO TRABALHO.....	30
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	31
2.1. USABILIDADE E EXPERIÊNCIA DO USUÁRIO (UX).....	32
2.1.1. Normas Técnicas.....	32
2.1.2. Métodos de Avaliação de Usabilidade e Experiência do Usuário (UX) .....	37
2.1.3. <i>System Usability Scale (SUS)</i> .....	40
2.1.4. <i>Usability Metric for User Experience (UMUX)</i> .....	47
2.1.5. Abordagem de Nielsen .....	50
2.1.6. <i>Web Analytics</i> .....	54
2.2. Laboratórios Remotos (LRS).....	55
2.2.1. MICROCONTROLADORES E IOT .....	61
2.2.2. AVALIAÇÃO DE USABILIDADE EM LRS.....	64
2.3. SISTEMAS INTELIGENTES .....	65
2.3.1. Sistemas de Inferência <i>Fuzzy</i> (SIFs) .....	65
2.3.1.1. Sistemas <i>Fuzzy</i> Baseados em Regras .....	68
2.3.1.2. Abordagem de Mamdani .....	70
2.3.1.3. Abordagem de Takagi e Sugeno.....	75
2.3.2. Aprendizagem de Máquina (ML) .....	78
2.3.2.1. Redes Neurais Artificiais (RNAs) .....	85
2.3.2.2. Sistemas Adaptativos <i>Neuro-Fuzzy (ANFIS)</i> .....	90
3. REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA.....	92
3.1. QUESTÕES DE PESQUISA .....	92
3.2. PROCESSO DE PESQUISA.....	94
3.3. SELEÇÃO DE ESTUDOS .....	95
3.4. EXTRAÇÃO DE DADOS.....	102
3.5. ANÁLISE E RESULTADOS .....	104
3.5.1. Q1 – Quais são as principais metodologias utilizadas para avaliar a Usabilidade e UX (Experiência do Usuário)? .....	104
3.5.2. Q2 – Como avaliar a efetividade de laboratórios remotos (LRs)? .....	105
3.5.3. Q3 - Quais técnicas inteligentes podem ser utilizadas para avaliação de usabilidade? .....	107
3.5.4. Q4 - Quais dados são utilizados para avaliar a usabilidade por meio de técnicas inteligentes? .....	107
4. MÉTODOS E INSTRUMENTOS DE PESQUISA .....	108
4.1. PROPOSTA METODOLÓGICA .....	108
4.2. ARQUITETURA DO LRM-U9.....	113
4.3. INSTRUMENTOS DE PESQUISA .....	118
4.4. TÉCNICAS DE COLETA E TRATAMENTO DE DADOS.....	120



4.4.1.	Conceitos e Definições.....	120
4.4.2.	Questões <i>SUS</i> – <i>System Usability Scale</i> .....	122
4.4.3.	Questões <i>UMUX</i> – <i>Usability Metrics for User Experience</i> .....	123
4.4.4.	Questões Qualitativas .....	124
4.4.5.	Dados Coletados .....	126
4.4.6.	Amostragem .....	134
4.5.	APLICAÇÃO DE TÉCNICAS INTELIGENTES PARA ANÁLISE DOS DADOS .....	138
4.6.	MODELAGEM DO SISTEMA DE INFERÊNCIA <i>NEURO-FUZZY</i> ADAPTATIVO ( <i>ANFIS</i> ).....	140
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	144
5.1.	RESULTADOS QUALITATIVOS .....	144
5.2.	RESULTADOS QUANTITATIVOS .....	148
5.3.	RESULTADOS DO MODELO <i>ANFIS</i> .....	151
5.4.	RESULTADOS CONSOLIDADOS .....	153
6.	CONCLUSÕES .....	155
	REFERÊNCIAS .....	160
	APÊNDICE A – ARTIGO PUBLICADO NA REVISTA ETD .....	172
	APÊNDICE B – QUESTIONÁRIO APLICADO AOS USUÁRIOS .....	173
	APÊNDICE C – ROTEIROS.....	174
	APÊNDICE D – FLUXOGRAMA DOS DADOS COLETADOS .....	201
	ANEXO A – DIAGRAMA DE ENTIDADES DO MATOMO.....	202

## APRESENTAÇÃO

A presente tese é continuação da pesquisa anterior intitulada “Desenvolvimento e avaliação de usabilidade de um Laboratório Remoto para ensino de microcontroladores” (Arroyo, 2020; Arroyo *et al.*, 2024), na qual foi apresentada uma proposta para a avaliação de um Laboratório Remoto como ferramenta de ensino por meio da análise de sua usabilidade e Experiência do Usuário. Este trabalho visa expandir os resultados da pesquisa anterior, implementando a coleta de dados automatizada e a aplicação da técnica *Neuro-Fuzzy* para reconhecimento de padrões. O autor, Analista de Sistemas no Banco do Brasil, possui formação como tecnólogo em Sistemas para a Internet, especialização em Gestão de Pessoas e Mestrado interdisciplinar em Informática e Gestão do Conhecimento. Com mais de 20 anos de experiência na área de desenvolvimento de sistemas, acredita que o usuário deve ser considerado um componente chave em um sistema computacional. Independentemente das funcionalidades e da qualidade de um software, o primeiro passo para o sucesso é sua utilização afinal *softwares* sem uso não cumprem seus objetivos.

## 1. INTRODUÇÃO

O Ensino a Distância (EaD) tem se firmado como alternativa viável, atendendo à crescente demanda por flexibilidade de horário e local, e democratizando o acesso ao conhecimento. Corroborando com essa perspectiva, Landim (1997 *apud* Santos, 2006) salienta a capacidade do EaD em reduzir distâncias geográficas e promover a inclusão educacional. Garcia (1995 *apud* Santos, 2006) complementa, definindo-o como um sistema de comunicação bidirecional que supera a necessidade de contato presencial entre professor e aluno. Petri (1996 *apud* Santos, 2006) descreve o EaD como uma revolução pedagógica que disponibiliza o conhecimento independentemente de limitações geográficas, temporais ou de estruturas físicas de ensino.

Em contrapartida, modalidades de ensino que exigem atividades laboratoriais, como a Engenharia Elétrica, enfrentam desafios adicionais. A necessidade de experimentação prática em laboratório impõe o deslocamento físico até a universidade. Diante desse cenário, os Laboratórios Virtuais e Remotos (LRs) emergem como solução promissora (Fernández-Pacheco; Martin; Castro, 2019; Guerra *et al.*, 2017; Leisenberg; Stepponat, 2019; Parkhomenko *et al.*, 2018).

Introduzidos há cerca de 25 anos, os LRs se destacam como uma das abordagens mais promissoras na área da engenharia (Cuadros *et al.*, 2021). Esses laboratórios combinam recursos de *software* e *hardware* para possibilitar a experimentação prática a distância, oferecendo acesso a equipamentos reais por meio de uma interface *online*, conforme apontado por Rodriguez-Gil *et al.* (2017). Adicionalmente, os LRs proporcionam economia de escala, adaptabilidade ao ritmo individual de aprendizado, eliminação de barreiras geográficas e a possibilidade de repetição de experimentos, como ressaltado por Leisenberg e Stepponat (2019).

Essa modalidade de laboratório oferece vantagens significativas em relação aos modelos convencionais, incluindo acesso flexível, capacidade de atender um grande número de usuários simultaneamente e compatibilidade com diferentes dispositivos. Estudos como os de Hayashi *et al.* (2023), Pavani *et al.* (2023) e outros (Balamuralithara; Woods, 2009; Chacon *et al.*, 2015; Fernández-Pacheco; Martin; Castro, 2019; Leisenberg; Stepponat, 2019; Lima; Viegas; Garcia-Peñalvo, 2019a; Reid; Drysdale, 2024; Rodriguez-Gil *et al.*, 2017; Viegas *et al.*, 2018) evidenciam o

impacto positivo dos LRs no ensino de engenharia, tanto no desempenho acadêmico quanto no engajamento dos alunos.

A aplicação dos LRs em diversas áreas demonstra resultados variados. Por exemplo, na área de desenvolvimento de *software*, usuários geralmente obtêm bom desempenho mesmo no aprendizado à distância, utilizando ferramentas remotamente. Em contrapartida, algumas áreas da engenharia, embora obtenham resultados positivos com o uso complementar de LRs (reduzindo a necessidade de atividades presenciais), ainda necessitam do laboratório tradicional para algumas atividades específicas (Balamuralithara; Woods, 2009; Chacon *et al.*, 2015; Chen; Song; Zhang, 2010; Fernández-Pacheco; Martin; Castro, 2019; Fraile-Ardanuy *et al.*, 2013; Garcia-Zubia *et al.*, 2016; Guerra *et al.*, 2017; Leisenberg; Stepponat, 2019; Lima; Viegas; Garcia-Peñalvo, 2019a; Luthon; Larroque, 2014; Melkonyan *et al.*, 2013; Schwandt; Winzker, 2019; Tsiatsos *et al.*, 2014; Viegas *et al.*, 2018).

Dentre os campos que se beneficiam dos LRs, a Internet das Coisas (*IoT*) se destaca como área estratégica em rápida expansão. A *IoT* inaugurou um novo paradigma para a internet tradicional, transformando-a em uma ferramenta de interação entre dispositivos, sistemas e usuários (Adjih *et al.*, 2015). Essa tecnologia possibilita a comunicação entre diversos dispositivos por meio da internet, abrindo um leque de oportunidades e desafios (Chen, 2012). Dessa forma, a internet transcendeu a função de ambiente de comunicação, tornando-se uma ferramenta de interação entre clientes, dispositivos e outros (Parkhomenko *et al.*, 2018).

Em resposta à crescente demanda por profissionais capacitados para o desenvolvimento de soluções inovadoras (Marletta, 2019), instituições de ensino têm adotado LRs específicos para o ensino de *IoT*, conforme sugerido por Fernández-Pacheco, Martin e Castro (2019).

Apesar dos benefícios demonstrados pelos LRs em diversas áreas de ensino, seus resultados variam de acordo com o contexto educacional, o que evidencia a importância de mensurar sua efetividade como ferramenta de ensino (Cuadros *et al.*, 2021; Fernández-Pacheco; Martin; Castro, 2019).

Diante desse contexto, surge a necessidade de uma metodologia que permita avaliar o uso do LR como ferramenta de ensino para experimentos com dispositivos

*IoT*. Essa tecnologia (*IoT*) engloba conhecimentos de Engenharia Elétrica, desenvolvimento de software e tem como cerne a interação remota de dispositivos.

A problemática da mensuração do aprendizado e da aquisição de conhecimento é ampla e complexa, com discussões aprofundadas nas áreas de educação, psicologia e outras (Santos, 2006). Nesses campos, diversos aspectos podem influenciar a avaliação de uma ferramenta de ensino, como o ambiente, o professor, as condições do usuário, o conteúdo e muitos outros fatores que não são o foco deste trabalho. Dessa forma, torna-se necessário adotar uma abordagem específica para mensurar o uso da ferramenta durante o aprendizado.

Considerando que o LRM-U9 é um sistema computacional com interface *web* destinado à realização de experimentos com dispositivos *IoT*, sua avaliação pode ser realizada por meio de técnicas voltadas à qualidade de software. Ademais, visando analisar o uso da ferramenta, a mensuração da usabilidade e da Experiência do Usuário (UX) podem ser utilizadas como indicadores de seu desempenho (Abran *et al.*, 2003; ISO 9241-11, 2018; NBR ISO 9241-11:2011, 2011; NBR ISO 9241-151:2011, 2011; NBR ISO/IEC 9126-1:2003, 2003).

O presente trabalho buscou mensurar a usabilidade do LRM-U9 como ferramenta de ensino com dispositivos *IoT*. O ensino, por sua vez, depende de diversos fatores, como o conhecimento prévio em outras disciplinas, a qualidade da docência, o empenho dos alunos e até mesmo aspectos psicológicos. No entanto, ao delimitar o uso do LR à realização dos experimentos necessários ao aprendizado, é possível avaliar se a ferramenta atende a esse aspecto específico, bem como em que medida e de que forma o faz.

Em outras palavras, ao definir o objetivo, o contexto de uso e o público-alvo para compreender se a ferramenta é utilizável dentro desse escopo, podemos mensurar sua Eficácia, Eficiência e Satisfação dos Usuários, conforme preconizado pela mensuração de usabilidade (Abran *et al.*, 2003; ISO 9241-11, 2018; Molich; Nielsen, 1990; NBR ISO 9241-11:2011, 2011; NBR ISO 9241-151:2011, 2011; NBR ISO/IEC 9126-1:2003, 2003; Nielsen, 2024, 1994). Existem metodologias descritas na literatura para essa mensuração, bem como os questionários *SUS* (Bangor; Kortum; Miller, 2008; Boucinha; Tarouco, 2013; Riegler; Holzmann, 2018; Sauro, 2011; Tenório *et al.*, 2010) e *UMUX* (Borsci *et al.*, 2015; Finstad, 2010).

Nesse contexto, Arroyo *et al.* (2024) propõem a mensuração da usabilidade sob os pilares de Eficácia, Eficiência e Satisfação do Usuário (ISO 9241-11, 2018; NBR ISO 9241-11:2011, 2011), por meio de um questionário composto por perguntas do *SUS* (System Usability Scale) (Bangor; Kortum; Miller, 2008; Boucinha; Tarouco, 2013; Cuadros *et al.*, 2021; Sauro, 2011; Tenório *et al.*, 2010), *UMUX* (Usability Metric for User Experience) (Finstad, 2010) e perguntas descritivas para avaliar o LRM-U9 (Laboratório Remoto de Microcontroladores da Uninove).

Embora a avaliação de usabilidade (Arroyo *et al.*, 2024) tenha apresentado resultados satisfatórios como método para mensurar a efetividade do LRM-U9 como ferramenta de ensino, a aplicação de questionários demanda grande esforço dos usuários, e a precisão da análise requer diversas iterações (Nielsen, 1993).

Diversos mecanismos e abordagens para análise da usabilidade são apresentados na literatura, como as dez heurísticas de usabilidade (Nielsen, 2024), o *SUS* e o *UMUX*. Estas se destacam por sua ampla utilização e por apresentarem boas relações entre o usuário e o sistema computacional. No entanto, essas abordagens podem ser onerosas, demandando tempo dos usuários para responder questionários, dos especialistas para realizar análises, além da necessidade de reaplicação periódica dos questionários. Adicionalmente, tais métodos podem gerar resultados subjetivos que indicam uma dificuldade sem, contudo, identificá-la precisamente, acarretando na necessidade de novas análises (Bangor; Kortum; Miller, 2008; Borsci *et al.*, 2015; Boucinha; Tarouco, 2013; Garcia-Zubia *et al.*, 2016; Lerro *et al.*, 2014; Sauro, 2011).

Stanca, Lacurezeanu e Felea (2014) argumentam que a usabilidade é uma ação dinâmica cujo grau depende do contexto de uso, e não apenas de suas características intrínsecas (Eficácia, Eficiência e Satisfação do Usuário). Essa complexidade tem levado à adoção de métodos avançados, como Sistemas de Inferência *Fuzzy* (SIFs) e Sistemas Adaptativos *Neuro-Fuzzy* (ANFIS), com o objetivo de reduzir a ambiguidade nos processos de avaliação e aprimorar a precisão dos resultados (Fernández-Pérez *et al.*, 2018; Muhammad *et al.*, 2021).

Nesse contexto, pesquisas propõem o uso de técnicas inteligentes para análise da usabilidade e/ou Experiência do Usuário (UX). Em alguns casos, o uso dessas técnicas em substituição à análise de especialistas apresentou bom desempenho.

Contudo, tais abordagens ainda demandam grande esforço dos usuários, visto que a coleta de dados continua sendo realizada por meio de questionários, com apenas a análise sendo feita por algoritmos.

Em outros trabalhos, houve a tentativa de coletar diferentes dados, como o processamento de linguagem natural em comentários de usuários nas redes sociais (Rausanfita; Rochimah, 2020). No entanto, essa abordagem não resultou em bom desempenho em relação à usabilidade percebida pelos usuários, uma vez que a forma como os usuários se expressam pode sofrer influência de outros fatores, representando emoções não relacionadas ao uso da ferramenta (Bakaev *et al.*, 2017; Bakaev; Khvorostov; Laricheva, 2017; Muhammad *et al.*, 2021; Ponte; Silveira, 2008; Rausanfita; Rochimah, 2020; Sahi, 2018; Stanca; Lacurezeanu; Felea, 2014).

Apesar de uma menor quantidade de trabalhos que buscam mensurar a usabilidade ou a *UX* por meio de técnicas inteligentes em comparação aos trabalhos que utilizam questionários, é possível observar que a principal diferença nesses trabalhos reside na coleta de dados. Diversas pesquisas utilizam as mesmas técnicas, mas os dados analisados diferem entre os estudos. Conforme mencionado anteriormente, os melhores resultados foram obtidos a partir de dados coletados por meio de questionários.

Na área de marketing, há amplo uso da avaliação da usabilidade, com foco na divulgação da marca, de produtos e em campanhas publicitárias. Essa área também utiliza alguns mecanismos empregados na avaliação da qualidade de software, como as heurísticas de usabilidade (Nielsen, 2024). Nela, é comum a coleta de dados de navegação para análise por meio de técnicas de *Web Analytics*, que possibilitam compreender o comportamento do usuário em uma interface *web* e obter conhecimento sobre sua experiência de uso (Fayyadh, 2019; Kumar; Singh; Kaur, 2012; Nakatani; Chuang, 2011; Waisberg; Kauchik, 2009).

A análise em *Web Analytics* é realizada por meio de técnicas como testes A/B, avaliação da jornada do usuário, funil de conversão e mapas de calor. Nelas, o especialista analisa gráficos, dados e componentes visuais para compreender o comportamento do usuário.

Existem ferramentas que realizam a coleta de dados de *Web Analytics* de forma automatizada, como o Matomo (Matomo, 2024). No entanto, esses dados possuem

foco em aspectos de publicidade e marketing, não sendo suficientes para análise em outros contextos de uso. Contudo, ao capturar dados específicos do contexto a ser estudado e enriquecer os dados de *Web Analytics*, é possível obter conhecimento relevante.

Utilizando os dados de *Web Analytics*, o especialista pode realizar análises complexas e trabalhosas, que permitem reconhecer padrões de comportamento dos usuários e identificar pontos críticos, etapas da jornada em que o comportamento do usuário não corresponde à expectativa e em que os objetivos esperados não são atingidos (Fayyadh, 2019; Kumar; Singh; Kaur, 2012; Nakatani; Chuang, 2011; Waisberg; Kauchik, 2009).

Diante do exposto, emerge a seguinte questão de pesquisa: Como avaliar a usabilidade e Experiência do Usuário em um Laboratório Remoto de forma inteligente, utilizando *Neuro-Fuzzy* com dados coletados de forma automatizada, identificando os pontos de dificuldade dos usuários?

Visando responder a essa questão, o presente estudo propõe uma abordagem inovadora para a avaliação da usabilidade do LRM-U9. Diferentemente dos métodos convencionais, que dependem exclusivamente de questionários, a proposta utiliza uma ferramenta integrada que combina coleta de dados automatizada, interface Web e técnicas de Inteligência Artificial aplicadas aos dados de uso e navegação. A integração dessas tecnologias visa a compreensão do comportamento na navegação do usuário, compreendendo dificuldades e fatores que influenciam a usabilidade e a Experiência do Usuário.

Os dados coletados foram submetidos a modelos *Neuro-Fuzzy* para reconhecer padrões em busca da função de aproximação das pontuações obtidas pelos questionários.

### 1.1. OBJETIVOS GERAL E ESPECÍFICOS

O objetivo deste trabalho foi validar uma metodologia para avaliação da usabilidade e Experiência do Usuário em um Laboratório Remoto de forma inteligente utilizando *Neuro-Fuzzy* com dados coletados de forma automatizada. Para alcançar esse objetivo, os seguintes objetivos específicos foram estabelecidos:



- I. Criar uma interface para o usuário interagir com o LRM-U9 proposto nesse trabalho que possibilite a coleta automatizada dos dados;
- II. Utilizar roteiros de estudo com problemas comuns abordados em sala de aula para que os usuários tenham contato com o LRM-U9
- III. Automatizar a coleta de dados com base na utilização e também com uso de *Web Analytics* no LRM-U9
- IV. Aplicar questionário de avaliação da usabilidade e Experiência do Usuário (Arroyo, 2020; Arroyo *et al.*, 2024);
- V. Avaliar o desempenho de diferentes modelos *Neuro-Fuzzy* na tarefa de interpretação dos dados coletados, sendo possível assim determinar o melhor conjunto de dados disponível;
- VI. Comparar resultados do *Neuro-Fuzzy* com os resultados obtidos pelos questionários.

## 1.2. JUSTIFICATIVA DA PESQUISA

A modalidade de ensino à distância potencializa a expansão da qualificação profissional, uma vez que elimina barreiras geográficas e flexibiliza a gestão do tempo dedicado aos estudos (Leisenberg; Stepponat, 2019). A experiência durante a pandemia da COVID-19 evidenciou a necessidade de aprimorar ferramentas para garantir que a experiência remota seja equivalente à presencial, especialmente em situações adversas ou diante de dificuldades de tempo e locomoção. É fundamental, portanto, desenvolver tecnologias que permitam o aprendizado à distância de forma eficaz (Balamuralithara; Woods, 2009; Chacon *et al.*, 2015; Fernández-Pacheco; Martin; Castro, 2019; Hayashi *et al.*, 2023; Leisenberg; Stepponat, 2019; Lima; Viegas; Garcia-Peñalvo, 2019; Pavani *et al.*, 2023; Reid; Drysdale, 2024; Rodriguez-Gil *et al.*, 2017; Viegas *et al.*, 2018).

A formação de profissionais qualificados em engenharia exige experimentação prática em laboratórios (Marletta, 2019), o que constitui um obstáculo para cursos à distância (EaD) (Lerro *et al.*, 2014; Lima; Viegas; Garcia-Peñalvo, 2019; Silva *et al.*, 2023). Para superar essa limitação, têm surgido propostas de laboratórios virtuais e remotos, permitindo a realização de experimentos à distância (Rodriguez-Gil *et al.*, 2017).

Enquanto os Laboratórios Virtuais oferecem resultados aos experimentos com base em modelos matemáticos pré-definidos, os Laboratórios Remotos fornecem resultados empíricos devido ao acesso real a equipamentos físicos (Balamuralithara; Woods, 2009; Chacon *et al.*, 2015; Lima; Viegas; Garcia-Peñalvo, 2019). Mas em ambos os casos, a literatura ressalta a necessidade de mensurar a efetividade dessas ferramentas em diferentes áreas do aprendizado (Arroyo, 2020; Arroyo *et al.*, 2024; Cuadros *et al.*, 2021; Fernández-Pacheco; Martin; Castro, 2019; Leisenberg; Stepponat, 2019; Lima; Viegas; Garcia-Peñalvo, 2019; Luthon; Larroque, 2014; Schwandt; Winzker, 2019; Silva *et al.*, 2023; Viegas *et al.*, 2018). Embora estudos indiquem que, em algumas áreas, essas ferramentas possam ser uma alternativa ao laboratório convencional, em outras, elas apenas atendem como opção complementar (Leisenberg; Stepponat, 2019; Lima; Viegas; Garcia-Peñalvo, 2019; Viegas *et al.*, 2018).

A Internet das Coisas (IoT), temática promissora que representa um novo paradigma e visa revolucionar a internet tradicional (Adjih *et al.*, 2015), apresentando diversas oportunidades e desafios (Chen, 2012). Emprega microcontroladores em suas arquiteturas para captura e comunicação entre dispositivos (Fernández-Pacheco; Martin; Castro, 2019), apresenta um potencial nativo para o aprendizado remoto devido à sua essência que utiliza conexão remota entre dispositivos. No entanto, a efetividade dos Laboratórios Remotos para estudos em IoT ainda requer avaliação. Trabalhos recentes propõem a utilização da métrica de usabilidade, adaptada ao contexto, como indicador principal de avaliação (Arroyo, 2020; Arroyo *et al.*, 2024; Cuadros *et al.*, 2021; Silva *et al.*, 2023).

É importante notar que, embora a IoT seja uma área da Engenharia, sua natureza inerentemente remota sugere que o aprendizado pode ser realizado de forma eficaz por meio de Laboratórios Remotos. Portanto, é fundamental investigar a efetividade desses laboratórios para IoT e identificar as melhores práticas para sua implementação (Arroyo, 2020; Arroyo *et al.*, 2024; Cuadros *et al.*, 2021; Fernández-Pacheco; Martin; Castro, 2019; Leisenberg; Stepponat, 2019; Lima; Viegas; Garcia-Peñalvo, 2019; Luthon; Larroque, 2014; Schwandt; Winzker, 2019; Silva *et al.*, 2023; Viegas *et al.*, 2018).

Os Laboratórios Remotos (LRs) oferecem a possibilidade de experimentos em laboratório de forma remota (Rodriguez-Gil *et al.*, 2017), porém a efetividade de seu uso é diferente em cada área de estudo e no atual estado da arte, avaliar sua efetividade ainda é um desafio (Cuadros *et al.*, 2021; Fernández-Pacheco; Martin; Castro, 2019; Guerra *et al.*, 2017; Parkhomenko *et al.*, 2018).

Lerro *et al.* (2014) apontam que, embora os *Learning Management Systems* (LMS) sejam utilizados no Ensino à Distância (EaD) para acesso a materiais e comunicação entre aluno e professor, é altamente conveniente que os alunos tenham acesso a práticas experimentais reais de forma remota em laboratórios. Por outro lado, Lima, Viegas e Garcia-Peñalvo, (2019) destacam que os recursos online, como laboratórios virtuais e remotos, oferecem novas oportunidades de aprendizado, com vantagens como acessibilidade, disponibilidade e segurança.

Kłoda, Piwiński e Szewczyk (2016) indicam que a introdução de LRs no currículo e um novo modelo de aprendizagem são desafios na educação de engenheiros. Cuadros *et al* (2021) relatam que após a realização de experimentos em um LR, normalmente são aplicados questionários que questionam a experiência do aluno, com o objetivo de saber se a utilização do LR foi fácil e se a atividade de aprendizagem foi uma experiência satisfatória, porém falta uma análise aprofundada dos mesmos e os diferentes grupos da comunidade dos LRs não chegaram a uma definição sobre um método de avaliação.

Vários estudos sobre LRs abordam desafios semelhantes: avaliar sua efetividade como ferramenta de ensino e melhorar a experiência de aprendizagem dos alunos (Arroyo *et al.*, 2024; Cuadros *et al.*, 2021; Fernández-Pacheco; Martin; Castro, 2019; Leisenberg; Stepponat, 2019; Lima; Viegas; Garcia-Peñalvo, 2019a; Luthon; Larroque, 2014; Schwandt; Winzker, 2019; Silva *et al.*, 2023; Viegas *et al.*, 2018).

Conforme detalhado na Revisão Sistemática da Literatura (RSL) (apresentada no Capítulo 3), foram realizadas buscas nas bases *Web of Science*, *IEEE* e *Compendex (Engineering Village)* que foram escolhidas por serem amplamente utilizadas e possuírem um grande número de publicações relacionadas aos temas Laboratórios Remotos, usabilidade, Experiência do Usuário e técnicas inteligentes.

Essas buscas utilizaram diferentes construtos para pesquisar trabalhos que posteriormente foram avaliados por critérios de inclusão e exclusão que resultaram em 46 trabalhos considerados de maior relevância. Esses trabalhos abrangem os diferentes temas abordados na presente pesquisa, sendo categorizados em usabilidade e *UX*, Avaliação de usabilidade em LRs, Laboratórios Remotos (LRs), Microcontroladores e *IoT* e Técnicas Inteligentes.

A literatura evidencia a necessidade de avaliar a efetividade no uso de LRs para o ensino em Engenharias. Embora a metodologia proposta por Arroyo *et al.* (2024) tenha demonstrado resultados promissores ao utilizar a mensuração de usabilidade e Experiência do Usuário para avaliar o LRM-U9 como ferramenta de ensino, a aplicação de questionários para essa análise é uma tarefa onerosa e dependente da disponibilidade dos alunos em respondê-los.

Dentre os trabalhos encontrados na RSL, destacou-se o autor Garcia-Zubia, devido à quantidade de publicações sobre LRs durante a última década. E em trabalhos mais recentes (Cuadros *et al.*, 2021; Silva *et al.*, 2023), passou a investir na avaliação da usabilidade para mensurar a efetividade dos LRs. Outros autores propõem questionários voltados a satisfação e percepção dos alunos, normalmente baseados em conceitos de usabilidade.

As técnicas de mensuração de usabilidade, podem auxiliar nesse desafio, inferindo a efetividade no uso do LR através da mensuração de Eficácia, Eficiência e Satisfação de Usuário (Arroyo *et al.*, 2024). Porém, essa abordagem demanda muito aos usuários e avaliadores em cada iteração com o sistema (Fernández-Pérez *et al.*, 2018) e, para uma análise mais precisa são necessárias diversas interações de cada usuário, buscando assim redução de aspectos externos que podem enviesar os resultados (Nielsen, 1993).

A RSL também destacou as principais metodologias utilizadas para avaliar a usabilidade e *UX*, sendo questionários, entrevistas ou análise heurística seguidos de métodos emergentes como Visão Computacional, *Fuzzy*, *Web Analytics* e outras técnicas inteligentes para classificação, regressão ou agrupamento. Dentre as técnicas inteligentes, destacou-se a utilização de *Fuzzy* seguido de Redes Neurais Artificiais. Em relação aos dados utilizados para avaliação de usabilidade, destacou-

se respostas de questionários em escala *Likert* como por exemplo o *System Usability Scale*.

Fernández-Pérez *et al.* (2018) apontam que a avaliação de usabilidade ainda é um desafio para a Engenharia de *Software*, enquanto Ponte e Silveira (2008) mencionam a falta de metodologias de avaliação de usabilidade em *softwares* para automação industrial. Da mesma forma, a mensuração de usabilidade em LRs é uma lacuna no contexto acadêmico (Arroyo *et al.*, 2024; Cuadros *et al.*, 2021; Silva *et al.*, 2023).

O uso de Inteligência Artificial permite a automação de tarefas onerosas que geram grande demanda aos envolvidos e possibilitam classificação, regressão ou agrupamento utilizando o reconhecimento de padrões, sendo possível reconhecer padrões que geram dificuldades aos usuários e prejudicam a usabilidade.

Diante do contexto de mensurar o LRM-U9 como ferramenta de ensino por meio de sua usabilidade, como sugerido por Cuadros *et al.* (2021), Silva *et al.* (2023) e Arroyo *et al.* (2024), surge a necessidade do uso de técnicas que agilizem o processo e acompanhem a interação dos usuários com o LRM-U9, e por isso a relevância do presente trabalho.

### 1.3. DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

Este estudo buscou validar a metodologia para avaliar a usabilidade e Experiência do Usuário, para isso foi definida a ferramenta LRM-U9 direcionada a um público específico. Sendo assim, restringiu-se à avaliação da usabilidade e Experiência do Usuário exclusivamente relacionadas ao LRM-U9, bem como à participação de profissionais desenvolvedores de software e alunos que estavam cursando disciplinas relacionadas a Engenharia Elétrica. Essa delimitação visa validar a metodologia proposta, concentrando-se em um contexto específico e em uma amostra específica de usuários. A abordagem focada proporciona uma análise significativa dos aspectos de usabilidade e Experiência do Usuário do LRM-U9 como ferramenta de ensino.

A coleta de dados foi realizada por meio da captura de eventos comportamentais (execução de experimentos e navegação) e dados de *Web Analytics*, coletados através da ferramenta Matomo. Tendo como foco da pesquisa

validar a possibilidade de utilização de *Neuro-Fuzzy* com os dados de uso e navegação para aproximação as pontuações obtidas pelo *SUS* e *UMUX* por meio de Regressão Linear.

A escolha da ferramenta, público-alvo, disciplina e roteiros atendem a recomendação da NBR ISO 9241-11 (NBR ISO 9241-11:2011, 2011) e ISO 9241-11 (ISO 9241-11:2018) conforme ilustrado no Quadro 1, de forma que a metodologia seja validada de forma controlada, podendo ser expandida a outros contextos em trabalhos futuros.

Quadro 1 - Definições conforme NBR ISO 9241-11

Expressão	Definição da norma sob o contexto do presente trabalho
Eficácia	Exatidão e completude com as quais os usuários alcançam objetivos específicos
Eficiência	Tempo gasto em relação à exatidão e completude com as quais os usuários atingem objetivos
Satisfação	Ausência de desconforto e atitudes positivas em relação ao uso da ferramenta
Contexto de Uso	Realização dos experimentos com dispositivos <i>IoT</i> de forma remota através da interface de usuário
Sistema de Trabalho	Conjunto composto de usuários, professor, dispositivos, roteiros, ferramenta e ambientes físico e virtual, com o propósito de alcançar objetivos específicos
Usuário	Usuário que interage com a ferramenta
Objetivo	Praticar os experimentos para aprendizado
Tarefa	Roteiros pré-definidos
Produto	LRM-U9
Medida	Valor resultante da medição e o processo usado para obter tal valor

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

O presente trabalho, por se tratar de uma abordagem nova utilizando dados ainda não explorados por técnicas inteligentes, limitou-se à utilização de *Fuzzy* devido ser a abordagem mais explorada e com melhores resultados atualmente na literatura. Para melhor construção dos termos linguísticos foi aplicada a técnica *Neuro-Fuzzy* e não foram aplicadas outras técnicas como Redes Neurais Artificiais e Árvores de

Decisão. O escopo também foi limitado à resolução do problema utilizando regressão linear, não foram abordadas outras possibilidades como classificação ou agrupamento.

#### 1.4. ESTRUTURA DO TRABALHO

**Capítulo 1 – Introdução:** apresenta a introdução ao objeto de pesquisa, bem como a questão de pesquisa, problema de pesquisa, justificativa e objetivos.

**Capítulo 2 – Fundamentação Teórica:** apresenta a fundamentação teórica relacionada aos temas Usabilidade e Experiência do Usuário (*UX*), Laboratórios Remotos e Sistemas Inteligentes, incluindo conceitos, aplicações e estado da arte.

**Capítulo 3 – Revisão Sistemática da Literatura:** apresenta a uma revisão detalhada e sistemática sobre publicações relacionadas aos temas de interesse, incluindo definição dos construtos, consultas, questões de pesquisa almejadas durante as buscas, processo de pesquisa, seleção de dados, extração de dados e resultados obtidos.

**Capítulo 4 – Métodos e Instrumentos de pesquisa:** descreve a aplicação prática do presente trabalho, proposta e fundamentação metodológica, arquitetura do Laboratório Remoto (*Hardware* e *Software*), instrumentos de pesquisa, questionários aplicados e método de análise dos dados obtidos, coleta de dados autônoma, descrição e análise dos dados, amostra, aplicação de *Neuro-Fuzzy* e limitações da pesquisa.

**Capítulo 5 – Resultados e discussões:** apresenta os resultados obtidos, publicações derivadas do trabalho, discussão e análise.

**Capítulo 6 – Conclusões:** apresenta as conclusões obtidas, trabalhos futuros, contribuição teórica e considerações finais.

**Apêndices:** apresenta publicações, questionário e roteiros contendo instruções e código e questionário aplicado aos usuários.

**Anexos:** apresenta conteúdo adicional sobre o Matomo.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção são abordadas as definições e conceitos utilizados ao longo do presente trabalho, bem como o estado atual da arte. Para tanto, são elencados temas conforme áreas de estudo:

**Usabilidade e Experiência do Usuário (UX):** abrange conceitos e definições sobre usabilidade e Experiência do Usuário incluindo as seguintes perspectivas:

- **Normas técnicas:** abrange as principais normas *ISO* e *NBR* que tratam da temática de Usabilidade e *UX*;
- **Métodos de avaliação de Usabilidade e UX:** abrange os principais métodos apresentados na literatura para avaliação de usabilidade e *UX*;
- **System Usability Scale (SUS):** descreve o método de avaliação de usabilidade através do questionário mais utilizado na literatura;
- **Usability Metrics for User Experience (UMUX):** descreve o método de avaliação de Experiência do Usuário mais utilizado na literatura;
- **Abordagem de Nielsen:** descreve os métodos e conceitos criados por Jakob Nielsen, como por exemplo as dez heurísticas de usabilidade, componentes de qualidade da usabilidade e soluções de usabilidade;
- **Web Analytics:** abrange conceitos e definições sobre a utilização de dados de navegação e técnicas de análise do comportamento dos usuários durante a utilização de ferramentas *web*.

**Laboratórios Remotos (LRs):** abrange conceitos e definições sobre a utilização de LRs como ferramenta de ensino e sua efetividade, contemplando os seguintes subitens:

- **Microcontroladores e IoT:** apresenta definições e conceitos sobre os dispositivos utilizados no LR do presente trabalho, bem como desafios e oportunidades na utilização desses componentes;
- **Avaliação de Usabilidade em LRs:** destaca os trabalhos que sugerem a avaliação de usabilidade para mensuração da efetividade dos LRs.

**Técnicas Inteligentes:** abrange conceitos e definições sobre técnicas da Inteligência Artificial, destacando **Fuzzy**, **Aprendizagem de Máquina**, **Redes Neurais Artificiais** e **Neuro-Fuzzy**.



## 2.1. USABILIDADE E EXPERIÊNCIA DO USUÁRIO (UX)

A usabilidade e a Experiência do Usuário estão intimamente relacionadas, sendo que a usabilidade é uma métrica da Experiência do Usuário que avalia o nível de facilidade ao utilizar um serviço ou produto. Por outro lado, a Experiência do Usuário refere-se à experiência geral obtida pelo usuário ao longo da jornada ou processo realizado em determinado sistema.

De acordo com o *website* do governo americano *usability.gov* (USA.gov, 2024), usabilidade refere-se à medição da facilidade com que um usuário pode atingir seus objetivos ao utilizar um serviço. Ela é considerada como uma parte do guarda-chuva mais amplo da Experiência do Usuário (UX). Enquanto a UX engloba o design da experiência geral de um produto, a usabilidade concentra-se especificamente na mecânica de garantir que os produtos funcionem da melhor maneira possível para o usuário.

### 2.1.1. Normas Técnicas

A norma técnica NBR ISO/IEC 9126-1 (NBR ISO/IEC 9126-1:2003, 2003) conceitua usabilidade como “conjunto de atributos do *software* que evidenciam o esforço necessário para uso e a avaliação individual desse uso por um conjunto explícito ou implícito de usuários”. Isso implica que o software deve ser de fácil utilização, eficiente e satisfatório para os usuários, levando em conta o contexto de uso e as características do público-alvo. Por sua vez, define qualidade de uso como a “capacidade de um produto de software em permitir que o usuário realize tarefas específicas de forma eficaz, eficiente e satisfatória em um contexto de uso específico”. Esse conceito abrange aspectos como facilidade de aprendizado, eficiência na execução de tarefas, facilidade de memorização, baixa taxa de erros e satisfação do usuário durante a interação com o sistema.”

Enquanto as normas técnicas NBR ISO 9241-11 (NBR ISO 9241-11:2011, 2011) e ISO 9241-11 (ISO 9241-11:2018) definem que usabilidade é a medida em que um produto pode ser usado por usuários específicos para alcançar objetivos específicos com Eficácia, Eficiência e Satisfação em um contexto específico de uso. As definições estabelecidas na norma são ilustradas no Quadro 2:

Quadro 2 - Definições conforme NBR ISO 9241-11

<b>Expressão</b>	<b>Definição da norma</b>
Eficácia	Exatidão e completude com as quais os usuários alcançam objetivos específicos
Eficiência	Recursos gastos em relação à exatidão e completude com as quais os usuários atingem objetivos
Satisfação	Ausência de desconforto e atitudes positivas em relação ao uso do produto
Contexto de Uso	Usuários, tarefas, equipamento ( <i>hardware</i> , <i>software</i> e materiais), e ambientes físico e social nos quais o produto é usado
Sistema de Trabalho	Sistema composto de usuários, equipamentos, tarefas e ambientes físico e social, com o propósito de alcançar objetivos específicos
Usuário	Pessoa que interage com o produto
Objetivo	Resultado pretendido
Tarefa	Ações necessárias para alcançar um objetivo
Produto	Parte do equipamento ( <i>hardware</i> , <i>software</i> e materiais) para o qual a usabilidade é especificada ou avaliada
Medida	Valor resultante da medição e o processo usado para obter tal valor

Fonte: adaptado de NBR ISO 9241-11 (NBR ISO 9241-11:2011, 2011)

Para a mensuração da usabilidade, é possível utilizar diferentes medidas, as quais podem ser adaptadas para atender à necessidade conforme o contexto de uso e os objetivos de mensuração. A norma apresenta alguns exemplos e sugestões, conforme descrito no Quadro 3:

Quadro 3 – Exemplos de medidas de usabilidade conforme NBR ISO 9241-11

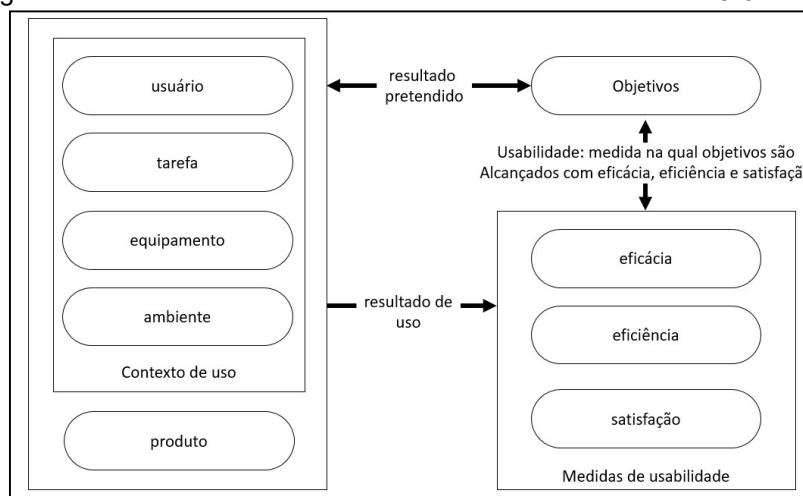
<b>Objetivo de usabilidade</b>	<b>Usabilidade Global</b>
Medidas de eficácia	Porcentagem de objetivos alcançados; Porcentagem de usuários completando a tarefa com sucesso; média de exatidão das tarefas completadas
Medidas de eficiência	Tempo para completar; Tarefas completadas por unidade de tempo; Custo monetário de realização da tarefa

Medidas de satisfação	Escala de satisfação; Frequência de uso discricionário; Frequência de reclamações
-----------------------	---

Fonte: adaptado de NBR ISO 9241-11 (NBR ISO 9241-11:2011, 2011)

A Figura 1 apresenta o Framework de usabilidade sugerido pela norma, na qual é possível compreender o fluxo de medida da usabilidade ao medir a Eficácia, Eficiência e Satisfação ao alcançar determinado objetivo a partir do Contexto de Uso.

Figura 1 - Framework de usabilidade de acordo com a NBR ISO 9241-11.



Fonte: adaptado de NBR ISO 9241-11 (NBR-ISO-9241-11:2011)

A norma técnica NBR ISO 9241-151 (NBR ISO 9241-151:2011), sugere que adaptar o conteúdo e a navegação de uma interface *web* a usuários individuais ou grupos de usuários pode ser um mecanismo útil e tornar mais eficiente o acesso a informações relevantes. Com isso, são sugeridas abordagens como:

- Monitorar o comportamento do usuário e adaptar às metas do usuário inferidas pelo comportamento observado.
- Recomendar informações que são potencialmente mais relevantes ou interessantes para o usuário específico com base no comportamento de todos os usuários ou de um grupo de usuários.

O Relatório Técnico NBR ISO TR 9241-100 (NBR-ISO-TR-9241-100:2012, 2012), descreve que as “Normas de Ergonomia de Software” contém orientações que auxiliam a especificação de requisitos de usuário, projeto e avaliação da interface. Preferencialmente, tais normas fornecem recomendações que devem ser aplicadas de forma a garantir a usabilidade da interface de usuário e evitar projetos que podem

previsivelmente causar problemas de usabilidade aos usuários. O Quadro 4 apresenta as definições conforme o Relatório Técnico:

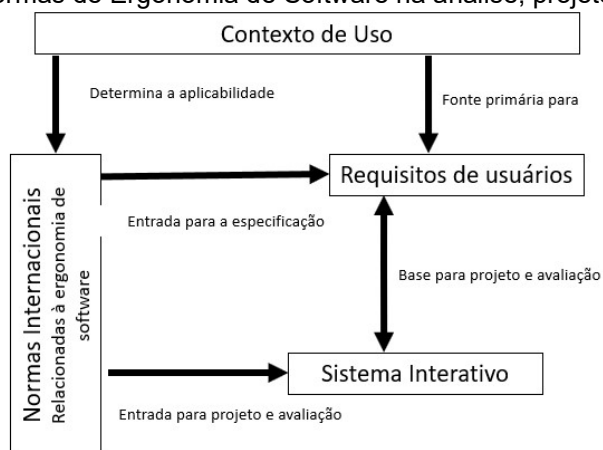
Quadro 4 - Definições conforme Relatório Técnico NBR-ISO-TR-9241-100:2012

Expressão	Definição da norma
Ergonomia. Estudo dos fatores humanos	“Disciplina científica dedicada à compreensão das interações entre seres humanos e outros elementos de um sistema, e a profissão que aplica teoria, princípios, dados e métodos ao projeto com o objetivo de otimizar o bem-estar do ser humano e o desempenho geral dos sistemas”
Sistema Interativo	“Combinação de componentes de <i>hardware</i> e <i>software</i> que recebam entradas de, e comunicam saídas para, um usuário humano, de forma a apoiar o seu desempenho na tarefa”
Interface com o Usuário	“Todos os componentes de um Sistema Interativo (de <i>hardware</i> e/ou <i>software</i> ) que fornecem informações e controles para um usuário realizar tarefas específicas com o Sistema Interativo”
Diálogo	“Interação entre um usuário e um Sistema Interativo, realizada por meio de uma sequência de ações do usuário (entradas) e respostas do sistema (saídas) de forma a alcançar um objetivo”

Fonte: adaptado de NBR ISO TR 9241-100 (NBR-ISO-TR-9241-100:2012, 2012)

A Figura 2 presente no Relatório Técnico NBR ISO TR 9241-100 (NBR-ISO-9241:2012), ilustra o papel das Normas de Ergonomia de Software na análise, projeto e avaliação de um sistema.

Figura 2 - Normas de Ergonomia de Software na análise, projeto e avaliação



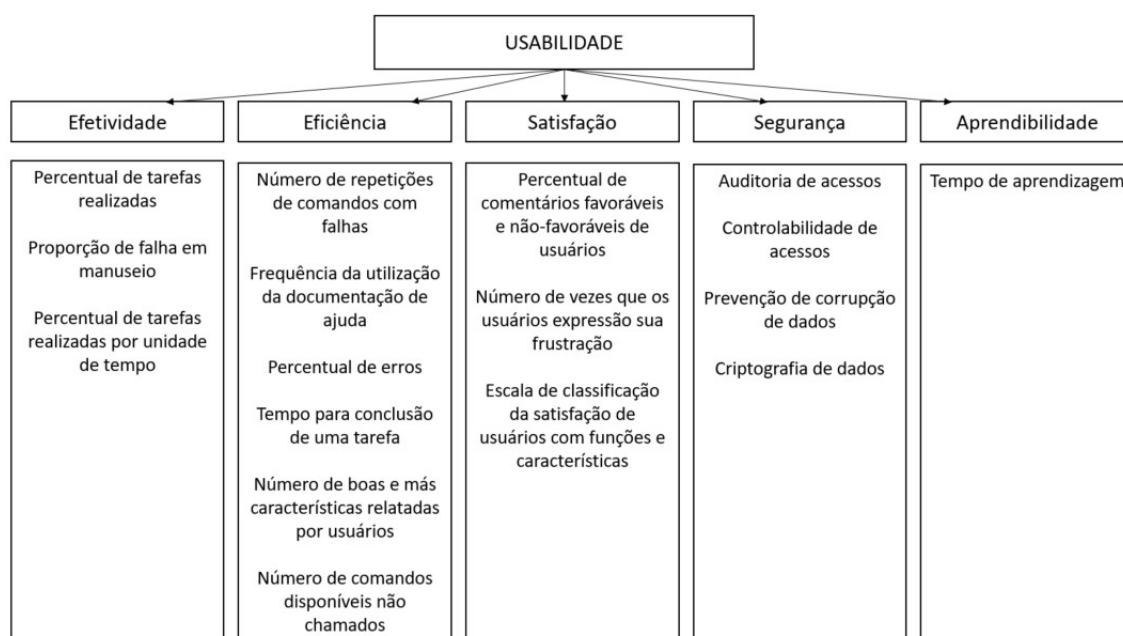
Fonte: adaptado de NBR ISO TR 9241-100 (NBR-ISO-TR-9241-100:2012)

Diversos estudos abordam a mensuração da usabilidade por meio de várias métricas distintas (Abran *et al.*, 2003; Fernández-Pérez *et al.*, 2018). Contudo, as definições estabelecidas pelas normas técnicas são amplamente aceitas na literatura. Embora muitos autores destaquem a ambiguidade na compreensão da usabilidade (Fernández-Pérez *et al.*, 2018; Muhammad *et al.*, 2021), o principal critério na definição das métricas é o contexto de uso.

De acordo com Abran *et al.* (2003), existem definições e normas técnicas que abordam a usabilidade, variando de acordo com o objetivo da análise. Com base principalmente nas normas técnicas ISO 9126 (NBR ISO/IEC 9126-1:2003, 2003) e ISO 9241 (ISO 9241-11, 2018), seu estudo faz um comparativo entre quatro principais definições: Capacidade Organizacional; Qualidade do Processo; Qualidade do Produto e Qualidade em Uso. Esta última foi a abordagem escolhida para a análise da utilização do Laboratório Remoto da Uninove (LRM-U9) como ferramenta de aprendizado.

Abran *et al.* (2003) observam que essas diferentes definições surgem porque foram desenvolvidas a partir de perspectivas distintas, e destacam que não há uma harmonização entre elas. Por isso, os autores propõem uma definição objetiva e consolidada, conforme apresentado na Figura 3:

Figura 3 - Proposta consolidada e normativa de análise de usabilidade.



Fonte: Adaptado de Abran *et al.* (2003)

Os pilares de Eficácia, Eficiência e Satisfação do Usuário podem ser desdobrados em métricas mais específicas, como aprendibilidade, navegabilidade e disponibilidade. Isso implica que a mensuração da usabilidade varia conforme o contexto do sistema ou produto em análise. Por exemplo, a avaliação da usabilidade de um portal de notícias pode empregar métricas diferentes das utilizadas na análise de um sistema industrial. Da mesma forma, um *e-commerce* pode adotar critérios distintos em comparação a um Laboratório Remoto (LR).

A avaliação de usabilidade de um software é um processo oneroso (Agbozo, 2023; Bakaev *et al.*, 2017; Bakaev; Khvorostov; Laricheva, 2017; Gardey *et al.*, 2024; Ponte; Silveira, 2008; Rausanfitá; Rochimah, 2020; Sahi, 2018; Stanca; Lacurezeanu; Felea, 2014), e ao longo das últimas décadas, diversos modelos foram propostos com base nas definições das normas técnicas ISO 9241 (ISO 9241-11:2018; NBR ISO 9241-11:2011; NBR ISO 9241-151:2011) e ISO 9126 (NBR ISO/IEC 9126-1:2003), ou em extensões dessas normas. No entanto, devido à ambiguidade gerada na atribuição de valores numéricos aos parâmetros de mensuração, alguns autores recorrem a métodos alternativos, como Sistemas de Inferência *Fuzzy* (SIFs), métodos de decisão multicritérios, entre outros (Fernández-Pérez *et al.*, 2018).

### **2.1.2. Métodos de Avaliação de Usabilidade e Experiência do Usuário (UX)**

Bangor, Kortum e Miller (2008) ressaltam que o *SUS - System Usability Scale* possui uma pesquisa relativamente rápida e fácil de usar, servindo para avaliar uma ampla gama de tecnologias, como: sites, interfaces, sistemas computacionais, plataformas de hardware. Já Lewis e Sauro (2011, 2017) destacam o *SUS* como questionário mais popular da literatura para avaliação de usabilidade. Uma busca realizada em abril/2024 para o termo “*System Usability Scale*” resultou em 1304 trabalhos na base Compendex e 1470 no Google Acadêmico.

De acordo com Brooke (2013), o *SUS* inicialmente foi desenvolvido para atender algumas necessidades específicas que surgiam na forma como as avaliações de usabilidade eram abordadas, porém hoje é utilizado em uma gama cada vez maior de situações. Para o autor hoje é possível optar pelo *SUS* e ter a certeza de que é uma ferramenta de avaliação válida e confiável, capaz de fazer uma comparação entre

as pontuações alcançadas e alguns padrões normativos descritos na NBR ISO 9241-11 (NBR ISO 9241-11:2011, 2011).

O questionário é composto de 10 questões que alternam entre positivas e negativas em uma escala *likert* de 5 pontos (discordo totalmente à concordo totalmente) e embora o questionário original (Brooke, 1986) tenha sido desenvolvido para medir apenas usabilidade, foi realizado uma análise de consistência onde houve uma maior correlação dos itens 4 e 10 com aprendibilidade enquanto os demais itens tiveram suas maiores correlações com usabilidade de forma a sugerir uma medida bidimensional (Lewis; Sauro, 2009 *apud* Lewis; Sauro, 2017).

Porém Lewis e Sauro (2017) realizaram uma pesquisa mais abrangente devido ao fato de que os resultados da pesquisa anterior não foram generalizados em outros trabalhos, utilizando uma amostra de 9.000 questionários respondidos, foi encontrada certa correlação dos itens 4 e 10 com aprendibilidade porém os resultados não confirmaram a medida bidimensional do questionário, sendo refutada a afirmação anterior com a conclusão dos próprios autores que o questionário deve continuar a ser utilizado para mensuração apenas de usabilidade inclusive nos itens 4 e 10, dessa forma a correlação com aprendibilidade se mostrou incremental à usabilidade e não uma medida independente.

Tirado *et al.* (2015), utilizam-se de questionários adaptados conforme o objetivo do trabalho, com dois tipos de variáveis distintos para avaliar usabilidade e utilidade em busca de mensurar a aceitação dos alunos em relação à utilização de dois tipos de Laboratórios Remotos com dispositivos diferentes (máquinas elétricas e painéis fotovoltaicos), comparando indicadores de usabilidade aos indicadores de percepção de utilidade do laboratório para compreender a aceitação dos alunos (Quadros 5 e 6).

Quadro 5 - Questões utilizadas na mensuração de percepção de utilidade.

<b>Q0</b>	Seu nível em máquinas elétricas/instalações fotovoltaicas é alto?
<b>Q1</b>	Este trabalho de laboratório permite fortalecer os conceitos teóricos?
<b>Q2</b>	O trabalho de Laboratório Remoto facilita o entendimento da prática teórica?
<b>Q3</b>	A avaliação geral do Laboratório Remoto é positiva?

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

No Quadro 5, Tirado *et al.* (2015) buscam de forma objetiva descobrir o nível de conhecimento dos alunos no assunto, utilizando as respostas para mensurar a percepção de utilidade dos alunos em relação ao Laboratório Remoto. Embora a percepção de utilidade seja uma métrica que faz parte da usabilidade e permita mensurar o quanto é útil, a mensuração de usabilidade é mais abrangente pois avalia outros aspectos além da utilidade. Já no Quadro 6, Tirado *et al.* (2015) focam na usabilidade do Laboratório Remoto em um contexto genérico, o qual permite compreender uma macro percepção de uso.

Quadro 6 - Questões utilizadas na mensuração da usabilidade

<b>Q4</b>	A interface permite realizar o exercício da mesma maneira que a aula no laboratório?
<b>Q5</b>	O exercício pode ser realizado sem a supervisão do professor?
<b>Q6</b>	O tempo disponível para concluir os testes é suficiente?
<b>Q7</b>	As informações disponíveis são adequadas para executar o trabalho de laboratório?
<b>Q8</b>	O uso da interface é fácil?
<b>Q9</b>	O acesso ao Laboratório Remoto é fácil?

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

De acordo com Riegler e Holzmann (2018), o *NASA-TLX (Task Load Index - Índice de carga de tarefas)* é uma ferramenta que avalia a carga de trabalho com base nas respostas subjetivas dos participantes, mensurando desempenho, esforço e frustração, bem como demandas mentais, físicas e temporais. Por outro lado, o *SUS* é uma ferramenta para determinar a usabilidade de um sistema com perguntas que devem ser respondidas por meio de uma escala *Likert* entre 1 (discorda totalmente) a 5 (concorda totalmente).

Cuadros *et al.* (2021) destacam que no contexto geral das aplicações informáticas foram realizados muitos esforços para desenvolver um questionário único e validado para avaliar a usabilidade e a Experiência do Usuário, destacando-se os questionários *SUS* (BANGOR; KORTUM; MILLER, 2008) e *UMUX - Usability Metrics for User Experience* (Finstad, 2010), em sua proposta de desenvolver um novo questionário específico para LRs, utilizaram do *SUS* e *UMUX* como base para o *UXQ4RL – User Experience Questionnaire for Remote Labs*.



Esse questionário conseguiu coeficientes razoáveis, mas também foram encontrados pontos de melhoria e aumento da confiabilidade resultando na necessidade de ampliar os estudos e validações. A partir dele, foi gerada uma outra versão *UXQ4OL – User Experience Questionnaire for Online Labs* (Silva et al., 2023), que conseguiu um alto coeficiente de confiabilidade geral, mas embora tenha um resultado melhor em relação ao seu antecessor, ficou com um coeficiente moderado (0,77) na escala de usabilidade resultando em um potencial de melhoria.

Ambos questionários *UXQ4RL* e *UXQ4OL*, não foram utilizados no presente trabalho devido à ainda estarem em validação e com propostas de melhoria da confiabilidade.

Com base na literatura encontrada, é possível constatar que para avaliação da usabilidade (ou percepção do usuário ao utilizar o sistema interativo) podemos utilizar diferentes tipos de perguntas que representem a percepção de Eficácia, Eficiência e Satisfação conforme o contexto de uso e as questões podem ser adaptadas conforme a necessidade, desde que subjetivamente representem estes 3 pilares.

Em um contexto geral que inclui confiabilidade, flexibilidade e principalmente validação na literatura em aplicações semelhantes, o *SUS* foi escolhido como principal questionário para o este trabalho (Bangor, Kortum e Muller, 2008; Finstad, 2010; Boucinha e Tarouco, 2013; Borsci *et al.*, 2015; Riegler e Holzmann, 2018; Mol *et al.*, 2020). Também foi utilizado o *UMUX* (Experiência do Usuário) para resultados com maior foco no Contexto de Uso (Finstad, 2010; Borsci *et al.*, 2015) e complementados por meio de questões qualitativas.

### **2.1.3. System Usability Scale (SUS)**

Segundo Bangor, Kortum e Muller (2008), embora exista uma quantidade de outras excelentes alternativas em questionários para mensuração de usabilidade, o *SUS* (*System Usability Scale*) é uma boa escolha para os profissionais da área por sua avaliação flexível que independe de tecnologia. Sua pesquisa é relativamente rápida e fácil de usar, fornecendo uma pontuação única em uma escala que é facilmente compreendida e não proprietária, o que torna uma ferramenta econômica também. O comparativo entre os questionários é apresentado no Quadro 7.

Quadro 7 - Comparativo entre questionários para mensuração de usabilidade

Abreviação	Desenvolvedor	Questões	Disponibilidade	Plataforma	Confiabilidade
<i>After Scenario Questionnaire System</i>					
ASQ	IBM	3	Livre	Qualquer uma	0.93a
<i>Computer System Usability</i>					
CSUQ	IBM	19	Livre	Sistemas Computacionais	0.95b
<i>Poststudy System Usability</i>					
PSSUQ	IBM	19	Livre	Sistemas Computacionais	0.96b
<i>Software Usability Measurement</i>					
SUMF	HFRG	50	Necessário Licença	Softwares	0.89d
<i>System Usability Scale</i>					
SUS	DEC	10	Livre	Qualquer uma	0.85e
<i>Usefulness, Satisfaction and Ease of Use</i>					
USE	Lund	30	Livre	Qualquer uma	Não reportado
<i>Web Site Analysis and Measurement Inventory</i>					
WAMMI	HFRG	0	Necessário Licença	Interfaces Web	0.96g
<sup>a</sup> Lewis (1995). <sup>b</sup> Lewis (2002). <sup>c</sup> Kirakowski and Corbett (1993). <sup>d</sup> Igbaria and Nachman (1991). <sup>e</sup> Kirakowski (1994). <sup>f</sup> Lund (2001). <sup>g</sup> Kirakowski, Claridge, and Whitehand (1998).					

Fonte: adaptado de Bangor, Kortum e Muller (2008)

No Quadro 8, são apresentadas as declarações *SUS* originais e as questões adaptadas por Bangor, Kortum e Muller (2008) para utilização do questionário para mensuração de usabilidade de Produto, mostrando a flexibilidade de adaptação do questionário.

Quadro 8 - Questões originais do SUS e exemplo de adequação ao público-alvo

DECLARAÇÕES SUS ORIGINAIS	DECLARAÇÕES SUS ADAPTADAS:
Eu acho que gostaria de usar esse sistema frequentemente.	Eu acho que gostaria de usar esse produto frequentemente.
Achei o sistema desnecessariamente complexo.	Achei o produto desnecessariamente complexo.
Eu pensei que o sistema era fácil de usar.	Eu pensei que o produto era fácil de usar.
Eu acho que precisaria do apoio de uma pessoa técnica para poder usar esse sistema.	Eu acho que precisaria do apoio de uma pessoa técnica para poder usar esse produto.
Eu descobri que as várias funções deste sistema estavam bem integradas	Eu descobri que as várias funções deste produto estavam bem integradas.
Eu achei que havia muita inconsistência neste sistema	Eu achei que havia muita inconsistência neste produto.
Imagino que a maioria das pessoas aprenderia a usar esse sistema muito rapidamente	Imagino que a maioria das pessoas aprenderia a usar esse produto muito rapidamente.
Achei o sistema muito complicado de usar	Achei o produto muito complicado de usar.
Eu me senti muito confiante usando o sistema	Eu me senti muito confiante usando o produto.
Eu precisava aprender muitas coisas antes de começar a utilizar esse sistema	Eu precisava aprender muitas coisas antes de começar a usar esse produto.

Fonte: adaptado de Bangor, Kortum e Muller (2008)

Segundo Sauro (2009 *apud* Boucinha; Tarouco, 2013), o *SUS* foi desenvolvido em 1986, por John Brooke, no laboratório da *Digital Equipment Corporation*, no Reino Unido como uma tecnologia independente. Foi testado em *Hardware*, *Software* de consumo, sites, celulares, URAs (Unidade de Resposta Audível) e até nas páginas amarelas, tornando-se um padrão da indústria com referências em mais de 600 publicações.

Tenório *et al.* (2011 *apud* Boucinha; Tarouco, 2013), realizaram um trabalho de tradução de todas as questões para a língua portuguesa. Posteriormente foi traduzido por um tradutor profissional para a língua inglesa que obteve como resultado um texto

muito próximo do original, demonstrando que o significado e estrutura do texto foram preservados na versão em português, chegando na versão apresentada no Quadro 9:

Quadro 9 - Tradução das declarações SUS

DECLARAÇÕES SUS EM INGLÊS	DECLARAÇÕES SUS TRADUZIDAS:
<i>I think that I would like to use this system frequently.</i>	Eu acho que gostaria de utilizar este sistema frequentemente.
<i>I found the system unnecessarily complex.</i>	Eu achei o sistema desnecessariamente complexo.
<i>I thought the system was easy to use.</i>	Eu achei o sistema fácil para usar.
<i>I think that I would need the support of a technical person to be able to use this system.</i>	Eu acho que precisaria do apoio de um suporte técnico para ser possível usar este sistema.
<i>I found the various functions in this system were well integrated.</i>	Eu achei que as diversas funções neste sistema foram bem integradas.
<i>I thought there was too much inconsistency in this system.</i>	Eu achei que houve muita inconsistência neste sistema.
<i>I would imagine that most people would learn to use this system very quickly.</i>	Eu imaginaria que a maioria das pessoas aprenderia a usar esse sistema rapidamente.
<i>I found the system very cumbersome to use.</i>	Eu achei o sistema pesado para uso.
<i>I felt very confident using the system.</i>	Eu me senti muito confiante usando esse sistema.
<i>I needed to learn a lot of things before I could get going with this system.</i>	Eu precisei aprender uma série de coisas novas antes que eu pudesse continuar a utilizar esse sistema.

Fonte: Tenório et al. (2011 apud Boucinha; Tarouco, 2013)

Mol et al. (2020) questionaram a utilização do SUS para avaliação da usabilidade do Comportamento Cognitivo na Internet (iCTB), porém, através da correlação entre os resultados obtidos pelo SUS e um Questionário de Satisfação do Cliente adaptado (CSQ-3) em uma Análise Fatorial Confirmatória (CFA) foi possível obter uma confiabilidade boa e relacionou-se moderadamente com o CSQ-3.

O questionário SUS consiste em 10 questões, avaliadas em uma escala *Likert* de 5 pontos, onde as questões são intercaladas entre aspectos positivos e negativos. A pontuação do SUS é calculada de modo a gerar um resultado entre 0 (indicando a

pior usabilidade) e 100 (indicando a melhor usabilidade). De acordo com a literatura, a pontuação média obtida é de 68 (Brooke, 2013).

Para calcular a pontuação do *SUS*, é necessário que todas as 10 questões sejam classificadas. Caso uma questão não seja respondida, atribui-se a ela a pontuação 3 (intermediária). Nas questões ímpares, subtrai-se 1 da pontuação bruta; nas questões pares, subtrai-se a pontuação bruta de 5. Após esse ajuste, realiza-se a soma das pontuações e multiplica-se o resultado por 2,5 para obter a pontuação final do *SUS*.

As Equações 1, 2 e 3 foram desenvolvidas com base no cálculo descrito por Bangor, Kortum e Miller (2008), e representam o cálculo da pontuação do *SUS*. O vetor *QP* representa as questões positivas, enquanto o vetor *QN* representa as questões negativas:

$$QP = [Q1, Q3, Q5, Q7, Q9] \quad (1)$$

$$QN = [Q2, Q4, Q6, Q8, Q10] \quad (2)$$

$$fsus = \frac{\sum_{U_i=1}^{U_n} 2,5 \left[ \sum_{QP_i=1}^{QP_n} (QP_i - 1) + \sum_{QN_i=1}^{QN_n} (5 - QN_i) \right]}{U_n} \quad (3)$$

Sendo:

<b>QP</b>	= Questões Positivas	<b>QN</b>	= Questões Negativas
<b>QP<sub>n</sub></b>	= Quantidade de Questões Positivas	<b>QN<sub>n</sub></b>	= Quantidade de Questões Negativas
<b>QP<sub>i</sub></b>	= Índice da Questão Positiva	<b>QN<sub>i</sub></b>	= Índice da Questão Negativa
<b>U<sub>n</sub></b>	= Usuários respondentes	<b>U<sub>i</sub></b>	= Índice do Usuário

A Equação 4 apresenta a aplicação do cálculo:

$$SUS_u = 2,5 \left( (Q1 - 1) + (Q3 - 1) + (Q5 - 1) + (Q7 - 1) + (Q9 - 1) + (5 - Q2) + (5 - Q4) + (5 - Q6) + (5 - Q8) + (5 - Q10) \right) \quad (4)$$

Após obtida a pontuação de cada usuário *u* deve-se calcular a média aritmética das pontuações *SUS*, conforme apresentado na Equação 5:

$$SUS = \frac{\sum_{u=1}^n SUS_u}{n} \quad (5)$$

Há uma forma de apresentação dos resultados do *SUS* chamada de normalização, onde são atribuídas notas de F (absolutamente insatisfatório) à A+

(absolutamente satisfatório) que representam o nível de usabilidade conforme Tabela 1:

Tabela 1 – Normalização da pontuação *SUS*

Nota	Início	Fim
F	0	51,7
D	51,8	62,6
C-	62,7	64,9
C	65,0	71,0
C+	71,1	72,5
B-	72,6	74,0
B	74,1	77,1
B+	77,2	78,8
A-	78,9	80,7
A	80,8	84,0
A+	84,1	100

Fonte: adaptado de Sauro e Lewis (2012 *apud* Borsci *et al.*, 2015)

A normalização detalhada na Tabela 1 é complementada por Tenório *et al.* (2010), que destaca a possibilidade de relacionar as questões *SUS* com diversos componentes de qualidade (Nielsen, 2012) , conforme demonstrado no Quadro 10.

Quadro 10 – Relação entre questões *SUS* e componentes de qualidade de Nielsen:

Componente	Questões relacionadas
Facilidade de aprendizagem	<p>Q3 Eu achei o Laboratório Remoto fácil de usar.</p> <p>Q4 Eu acho que precisaria do apoio de uma pessoa técnica para conseguir usar este Laboratório Remoto.</p> <p>Q7 Eu imagino que a maioria das pessoas aprenderia a usar este Laboratório Remoto muito rapidamente.</p> <p>Q10 Eu precisei aprender muitas coisas antes de poder começar a usar este Laboratório Remoto.</p>
Eficiência	<p>Q5 Eu achei que as diversas funções neste Laboratório Remoto estavam bem integradas.</p>

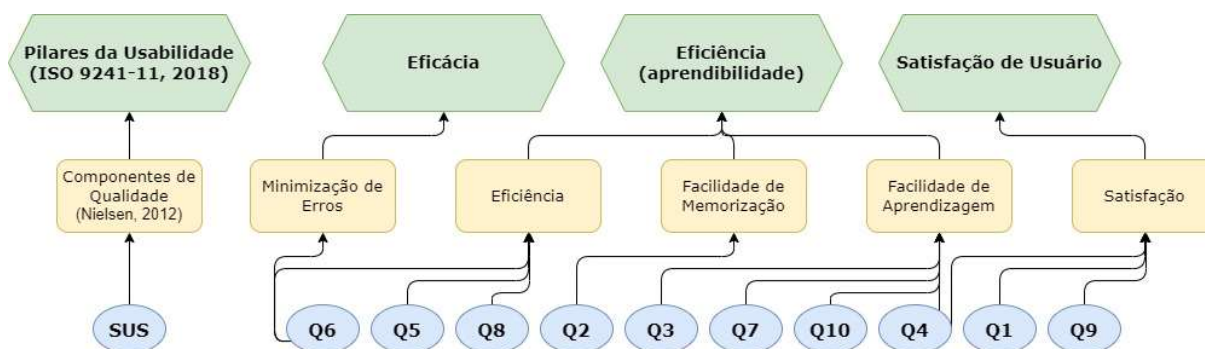
	Q6 Eu achei que havia muita inconsistência neste Laboratório Remoto. Q8 Eu achei o Laboratório Remoto muito complicado de usar.
Facilidade de memorização	Q2 Eu achei o Laboratório Remoto desnecessariamente complexo.
Minimização dos erros	Q6 Eu achei que havia muita inconsistência neste Laboratório Remoto.
Satisfação	Q1 Eu acho que gostaria de usar este Laboratório Remoto frequentemente. Q4 Eu acho que precisaria do apoio de uma pessoa técnica para conseguir usar este Laboratório Remoto. Q9 Eu me senti muito confiante usando o Laboratório Remoto.

Fonte: Adaptado de Tenório *et al.* (2010)

Além disso, Arroyo *et al.* (2024) realizou uma análise detalhada dos resultados obtidos pelo SUS, permitindo a conexão com os componentes de qualidade (Boucinha; Tarouco, 2013; Tenório *et al.*, 2010), bem como com as normas técnicas pertinentes, como ISO 9241-11 (2018), NBR ISO 9241-11:2011 (2011) e NBR ISO 9241-151:2011, 2011).

Para obter a pontuação de acordo com os componentes citados no Quadro 9, Arroyo *et al.* (2024) calcularam a média das pontuações das questões de cada componente multiplicando por 10 (para que fique na mesma escala) antes de aplicar a fórmula da pontuação SUS. Dessa forma, foi possível comparar as pontuações das questões de cada componente com a mesma faixa de pontuação do SUS que utiliza 10 questões. Através do questionário SUS, também foi possível aprofundar a análise de usabilidade, pois as questões correspondem a diferentes métricas de usabilidade. Essas relações são ilustradas na Figura 4.

Figura 4 – Relacionamento entre *SUS*, componentes e pilares de usabilidade



Fonte: adaptado de Arroyo *et al.* (2024)

A Figura 4 foi desenvolvida a partir de conceitos encontrados na literatura para relacionar os componentes de qualidade (Nielsen, 2012) aos pilares de usabilidade - Eficácia, Eficiência e Satisfação do Usuário (ISO 9241-11, 2018), onde que Aprendibilidade (Facilidade de Memorização, Eficiência e Facilidade de Aprendizagem) se relaciona com o pilar de Eficiência (ISO 9241-11, 2018) e Minimização de Erros à Eficácia (ISO 9241-11, 2018). Utilizando o mesmo cálculo para medir a pontuação dos componentes de qualidade e medir a pontuação em relação aos pilares de usabilidade.

#### 2.1.4. Usability Metric for User Experience (UMUX)

De acordo com Finstad (2010), a Métrica de usabilidade para Experiência do Usuário (UMUX) é uma escala *Likert* com quatro questões para avaliação subjetiva da usabilidade percebida de um aplicativo pelo usuário. Foi projetada para obter resultados semelhantes ao *SUS* e é organizada com base na definição de usabilidade da Norma Técnica NBR ISO 9241-11. Em seu trabalho, apresenta um projeto piloto e realiza testes juntamente com a *SUS* e conclui que ambos os questionários se correlacionam bem, são confiáveis e alinham-se em um fator de usabilidade subjacente, e que, por ser uma métrica mais compacta serve como um módulo de usabilidade em uma métrica mais ampla em relação à Experiência do Usuário. O Quadro 11 apresenta os itens candidatos como questões para analisar a usabilidade, o Quadro 12 mostra os itens que mostraram melhor correlação entre *SUS* e *UMUX*, a Figura 5 mostra as questões e escala utilizados para avaliação da usabilidade com foco na Experiência do Usuário, como apresentado no Quadro 11.



Quadro 11 - Itens candidatos para questionário de usabilidade usando *UMUX*

Componente	Item Candidato
Eficiência	[Este sistema] me economiza tempo.
	Eu costumo cometer muitos erros com [este sistema]
	Não costumo cometer muito erros [neste sistema]
	Eu tenho que gastar muito tempo corrigindo as coisas com [este sistema]
Eficácia	[Este sistema] me permite realizar minhas tarefas.
	Eu acho que precisaria de um sistema com mais recursos para minhas tarefas.
	Eu não precisaria suplementar [este sistema] com um adicional
	Os recursos [deste sistema] não atenderiam as minhas necessidades
Satisfação	Estou satisfeito com [este sistema]
	Eu preferiria usar algo diferente [deste sistema]
	Se tivesse uma escolha, eu escolheria [este sistema] em detrimento a outros.
	Usar [este sistema] foi uma experiência frustrante.

Fonte: adaptado de FINSTAD (2010)

Já no Quadro 12, pode-se notar que Finstad (2010) adaptou as questões do *SUS* para uma métrica específica denominada Experiência do Usuário, utilizando-se apenas de 4 questões para demonstrar a experiência percebida pelo usuário durante o uso do sistema.

Quadro 12 - Itens com maior correlação em relação a pontuação da *SUS* (estudo piloto)

Componente	Item candidato <i>UMUX</i>	r
Eficiência	Eu tenho que gastar muito tempo corrigindo as coisas com [este sistema].	-0,48*
Eficácia	Os recursos [deste sistema] não atendem aos meus requisitos.	-0,50*
Satisfação	Usar [este sistema] foi uma experiência frustrante.	-0,76*
Nota: texto entre colchetes pode ser substituído de forma personalizada * $p < 0,05$		

Fonte: traduzido de FINSTAD (2010)

No Quadro 12, Finstad (2010) obteve os itens candidatos que poderiam ter a melhor representação em relação ao *SUS* devido sua melhor correlação para assim conseguir estabelecer uma métrica específica baseada na usabilidade, e elaborou um novo modelo de questionário mais específico que o *SUS* que permite representar a percepção de Experiência do Usuário, como demonstrado na Figura 5:

Figura 5 - Questões e escala utilizados para avaliação da Experiência do Usuário.

<b>1. Os recursos [deste sistema] não atendem aos meus requisitos.</b>						
1	2	3	4	5	6	7
Discordo Totalmente			Concordo Totalmente			
<b>2. Usar [este sistema] foi uma experiência frustrante.</b>						
1	2	3	4	5	6	7
Discordo Totalmente			Concordo Totalmente			
<b>3. [Este sistema] é fácil de usar.</b>						
1	2	3	4	5	6	7
Discordo Totalmente			Concordo Totalmente			
<b>4. Eu tenho que gastar muito tempo corrigindo as coisas com [este sistema].</b>						
1	2	3	4	5	6	7
Discordo Totalmente			Concordo Totalmente			

Fonte: adaptado de FINSTAD (2010)

O método de cálculo do *UMUX* segue a mesma lógica do *SUS*. Deve-se subtrair 1 da pontuação das questões ímpares e subtrair a pontuação das questões pares de 7, para que sejam interpretadas na mesma faixa de pontuação do *SUS* (de 0 a 100). O resultado obtido pela soma das pontuações deve ser dividido por 24 e multiplicado por 100 substituindo assim a multiplicação por 2,5 do *SUS* (Finstad, 2010), conforme a Equação 6:

$$f_{umux} = \frac{\sum_1^{U_n} 100 \left\{ \frac{\sum_1^{QI_n} (QI_i - 1) + \sum_1^{QP_n} (7 - QP_i)}{24} \right\}}{U_n} \quad (6)$$

Sendo:

<b>QI</b>	= Questões Ímpares	<b>QP</b>	= Questões Pares
<b>QI<sub>n</sub></b>	= Total de Questões Ímpares	<b>QP<sub>n</sub></b>	= Total de Questões Pares
<b>QI<sub>i</sub></b>	= Índice da Questão Ímpar	<b>QP<sub>i</sub></b>	= Índice da Questão Par
<b>U<sub>n</sub></b>	= Total de Usuários respondentes	<b>U<sub>i</sub></b>	= Índice do Usuário

A Equação 7 apresenta a aplicação do cálculo:

$$UMUX_a = 100 \frac{((Q1 - 1) + (Q3 - 1) + (7 - Q2) + (7 - Q4))}{24} \quad (7)$$

Após obtida a pontuação de cada usuário deve-se calcular a média aritmética das pontuações *UMUX*:

$$UMUX = \frac{\sum_{u=1}^n UMUX_u}{n} \quad (8)$$

Borsci *et al.* (2015) asseguram que os questionários *SUS*, *UMUX* e *UMUX-LITE* (versão compacta) podem ser utilizados como ferramentas rápidas para medir a Satisfação do Usuário na utilização de *software*. Ressaltam que se deve tomar cuidado com o tempo de utilização, pois usuários com maiores exposições ao *software* costumam ter satisfação maior em relação aos que tiveram as primeiras interações com o *software*. Embora haja alta correlação entre os questionários, sugere-se que seja utilizado o *SUS* com complemento do *UMUX* (ou *UMUX-LITE*) para uma melhor percepção da verdadeira Satisfação de Usuário.

### 2.1.5. Abordagem de Nielsen

Além da avaliação de usabilidade por meio de questionários como apresentado na seção anterior em que a usabilidade é mensurada obrigatoriamente após a interação do usuário. Também existem abordagens com heurísticas e avaliação de componentes de qualidade que podem ser avaliadas antes ou depois da utilização.

Nielsen e Molich (1990) destacaram a melhora do diálogo entre computadores e usuários, classificando problemas de usabilidade em sistemas computacionais em 9 categorias e propondo as respectivas soluções. Essas soluções são apresentadas no Quadro 13:

Quadro 13 - Soluções de usabilidade

Solução	Descrição
Diálogo simples e natural	Refere-se a fornecer informações relevantes de forma clara e compreensível para o usuário.

Falar a língua do usuário	Refere-se a usar terminologia clara e conceitos familiares para os usuários, evitando jargões técnicos desnecessários.
Minimizar a carga do usuário	Refere-se a fornecer instruções de uso simples e diretas, facilitando a interação do usuário com o sistema.
Ser consistente	Refere-se a manter uma interface consistente, para que os usuários não encontrem diferentes termos, situações ou ações para a mesma função.
Fornecer feedbacks ao usuário	Refere-se a manter o usuário informado sobre o que está acontecendo no sistema, fornecendo feedbacks claros e pertinentes.
Fornecer saídas claramente marcadas	Refere-se a garantir que os usuários tenham a liberdade de sair ou mudar de tela quando desejarem, com opções de saída bem visíveis e acessíveis.
Fornecer atalhos	Refere-se a facilitar a navegação e interação do usuário, fornecendo atalhos e métodos eficientes para realizar tarefas comuns.
Fornecer boas mensagens de erro	Refere-se a apresentar mensagens de erro que responsabilizem o sistema, não o usuário, e que forneçam informações precisas e relevantes sobre a causa do erro.
Prevenções de erros	Refere-se a implementar mecanismos que evitem a ocorrência de erros sempre que possível, priorizando a prevenção em vez da correção.

Fonte: adaptado de Molich e Nielsen (1990)

A partir das principais soluções de usabilidade descritas por Molich e Nielsen (1990), posteriormente foram desenvolvidas as 10 heurísticas para avaliação de usabilidade (Quadro 14). Esses problemas foram identificados através das respostas de 77 usuários a um questionário disponibilizado. Embora tenha havido uma análise com ênfase na Qualidade de Software, também foi possível avaliar aspectos de

usabilidade relacionados à utilização do software e à Experiência do Usuário, criando premissas que podem ser aplicadas para a melhoria da usabilidade de software em um contexto geral. Além disso, mostrou-se que é possível aplicar questionários como método para avaliação de usabilidade, direcionando as questões do questionário aos aspectos de interesse da análise.

Quadro 14 - As 10 Heurísticas de Nielsen

Heurística	Descrição
Visibilidade da Situação do Sistema	O sistema deve manter os usuários informados sobre o que está acontecendo, fornecendo feedback adequado dentro de um tempo razoável.
Compatibilidade entre o sistema e o mundo real	O sistema deve utilizar a linguagem e os conceitos familiares aos usuários, seguindo as convenções do mundo real e apresentando informações de forma natural e lógica.
Controle e liberdade para o usuário	Os usuários devem ter a possibilidade de desfazer ações indesejadas e sair de estados indesejados de forma clara e rápida, sem a necessidade de diálogos prolongados.
Consistência e Padronização	Os usuários não devem ter que se perguntar se diferentes termos ou ações significam a mesma coisa; o sistema deve seguir as convenções da plataforma e manter uma interface consistente.
Prevenção de Erros	É preferível prevenir erros a fornecer mensagens de erro, eliminando ou minimizando condições propensas a erros e oferecendo confirmação antes de ações críticas serem executadas.
Reconhecimento em vez de memorização	O sistema deve minimizar a carga de memória do usuário, tornando objetos, ações e opções visíveis e facilmente acessíveis, sem exigir que o usuário se lembre de informações de uma parte do diálogo para outra.
Eficiência e flexibilidade de uso	O sistema deve ser eficiente para usuários tanto inexperientes quanto especialistas, oferecendo aceleradores de interação para usuários experientes e permitindo que os usuários adaptem ações frequentes.

Estética e design minimalista	Os diálogos do sistema não devem conter informações irrelevantes, competindo com as informações relevantes e diminuindo sua visibilidade relativa.
Ajude os usuários a reconhecerem, diagnosticarem e recuperarem-se de erros	Mensagens de erro devem ser expressas de forma clara, indicando precisamente o problema e sugerindo soluções construtivas.
Ajuda e documentação	Embora seja ideal que o sistema seja autoexplicativo, pode ser necessário fornecer ajuda e documentação. Essas informações devem ser fáceis de pesquisar, focadas na tarefa do usuário, apresentando etapas concretas e não sendo excessivamente extensas.

Fonte: Nielsen (1994, 2024)

Para Nielsen (1993), um sistema computacional deve atender às necessidades de trabalho dos usuários e permitir que eles produzam resultados de alta qualidade, já que essa é a razão de existir do sistema. Além disso, o sistema deve ser socialmente aceitável e praticamente viável em termos de custo, manutenção, entre outros aspectos. Em seu trabalho, Nielsen utiliza 4 casos de uso para compreender os problemas de usabilidade enfrentados pelos usuários por meio da observação de suas interações com o sistema. Seu estudo demonstra que a observação direta da utilização do sistema pelos usuários é uma maneira eficaz de identificar as dificuldades que eles enfrentam e, conseqüentemente, de identificar os problemas de usabilidade que são o foco da pesquisa.

Nielsen (2012) define usabilidade como um atributo de qualidade que avalia a facilidade de uso das interfaces de usuário. Além disso, a palavra "usabilidade" refere-se aos métodos utilizados para melhorar essa facilidade de uso durante o processo de design. Ele também destaca que a usabilidade é definida por 5 componentes de qualidade conforme ilustrado no Quadro 15:

Quadro 15 – Componentes de Qualidade da usabilidade

Componente	Descrição
Aprendizagem	Quão fácil é para os usuários realizarem tarefas básicas na primeira vez que encontram o sistema?

Eficiência	Depois que os usuários aprendem o sistema, com que rapidez eles podem executar as tarefas?
Facilidade de memorização	Quando os usuários retornam ao design após um período sem usá-lo, com que facilidade eles podem restabelecer a proficiência?
Minimização dos erros	Quantos erros os usuários cometem, qual a gravidade desses erros e com que facilidade eles podem se recuperar dos erros?
Satisfação	Quão agradável é usar o sistema?

Fonte: Adaptado de Nielsen (2012)

### 2.1.6. *Web Analytics*

*Web Analytics* é uma ciência utilizada para a compreensão do comportamento de usuários em *websites* que utiliza dados de navegação para compreender a forma com que as páginas são acessadas e utilizadas (Waisberg; Kauchik, 2009), essa ciência é muito utilizada nas áreas de publicidade e marketing (Kumar; Singh; Kaur, 2012) para a melhoria de interfaces de usuário e também criação de campanhas publicitárias. O LRM-U9 utiliza de uma interface *web* que permite a realização dos experimentos por meio de um *website*, dessa forma é possível aplicar as técnicas de coleta de dados de *Web Analytics* sendo necessário apenas adaptar o contexto de uso durante a análise dos dados.

Waisberg e Kauchik (2009), definem *Web Analytics* como ciência e arte de melhorar sites para aumentar sua rentabilidade, impulsionar experiência do cliente e complementam dizendo que é ciência por usar estatísticas, técnicas de mineração de dados e um processo metodológico, porém também é arte pois melhorar sites requer um nível profundo de criatividade, equilibrando *design* centrado no usuário, promoções, conteúdo, imagens e muito mais. E ressaltam ainda que o objetivo dessa ciência é entender e melhorar a experiência dos clientes online que dentre outras técnicas, pode ser feito através do estudo da maneira como esses clientes navegam em um *website*.

De acordo com Nakatani e Chuang (2011), as ferramentas de *Web Analytics* coletam dados do fluxo de cliques, rastreiam caminhos de navegação dos usuários, processam e apresentam esses dados como informações significativas, e essa análise é utilizada para compreender os clientes *online* e seus comportamentos,

projetar ações influentes para eles e promover comportamentos benéficos aos negócios e ao objetivo de uso do *website*.

Para Kumar, Singh e Kaur (2012), o *Web Analytics* trata dos métodos de medição, coleta de dados, análise de dados e fornecimento de *feedbacks* para entender o comportamento do cliente ao utilizar o site, e através da análise do comportamento do usuário é possível gerar inteligência de *marketing* bem como: Garantia – ao medir o desempenho do site em relação aos objetivos; *Insights* (percepções) - ao obter clareza sobre os comportamentos e necessidades do usuário, e como essas necessidades estão sendo atendidas; e Otimização – devido a capacidade de tomar ações adequadas para melhoria com base nos resultados.

Fayyadh (2019) descreve que os dados básicos de *Web Analytics* (como fluxo de cliques, páginas visitadas, caminho percorrido pelo usuário, tempo de navegação, entre outros) possibilitam a compreensão da navegação e do comportamento do usuário, permitindo análises que auxiliem na conversão de dados em *insights*.

Para Palomino, Paz e Moquillaza (2021), a Experiência do Usuário (UX) é um conceito essencial na qualidade de software, com as equipes de desenvolvimento focadas em garantir que seus produtos digitais proporcionem uma experiência satisfatória. Apesar da existência de vários métodos de avaliação da UX, poucos utilizam a análise de dados para essa finalidade. Muitas empresas coletam dados sobre o uso de seus sites, mas não os empregam de forma eficaz para melhorar o design das interfaces. Em seu estudo relatam que há uma tendência crescente em utilizar *Web Analytics* para identificar problemas de design e usabilidade, além da proposta de metodologias e métricas que podem oferecer insights valiosos sobre a facilidade de uso dos sites. E concluem que a análise de dados se revela uma ferramenta promissora para aprimorar o processo de avaliação da Experiência do Usuário.

## 2.2. LABORATÓRIOS REMOTOS (LRS)

Os LRs emergiram como uma alternativa aos laboratórios convencionais, conforme observado por Balamuralithara e Woods (2009) . Um LR para aprendizagem é um sistema que permite aos alunos acessarem equipamentos reais em laboratório,



permitindo-lhes enviar comandos a serem executados em um ambiente físico, com equipamentos reais.

Fraile-Ardanuy *et al.* (2013) desenvolveram um Laboratório Remoto para experimentos de partida de motores de indução. Nesse sistema, os alunos estudaram a teoria e realizaram testes em um Laboratório Virtual, para, posteriormente, realizarem os experimentos com equipamentos reais por meio de acesso remoto. No entanto, foram identificadas necessidades de melhorias, especialmente em relação à simplicidade e facilidade de uso da interface.

Melkonyan *et al.* (2013) propuseram uma arquitetura híbrida para um Laboratório Remoto que facilita a conectividade entre alunos, instrutores e experimentos. O feedback dos estudantes de graduação e pós-graduação indicou aceitação da experimentação remota como uma alternativa aos laboratórios convencionais. Contudo, os autores destacam a necessidade de evolução contínua para aprimorar a Experiência do Usuário (UX).

Tsiatsos *et al.* (2014) enfatizaram a importância da adoção de Laboratórios Virtuais e Remotos no ensino de Engenharia. Os autores propuseram um plano de avaliação de uma rede de Laboratórios Remotos com base em cinco aspectos principais: utilidade, satisfação e facilidade de uso; atitude dos alunos em relação ao uso de Laboratórios Remotos; avaliação técnica da operação dos laboratórios; análise do conteúdo de *e-learning*; e resultados de aprendizagem.

Os avanços na tecnologia educacional têm impulsionado o desenvolvimento de novas abordagens de ensino, especialmente no campo da Engenharia. De acordo com Lerro *et al.* (2014), os sistemas de gestão de aprendizagem (LMS) têm sido fundamentais para fornecer acesso a materiais e atividades educacionais, assim como facilitar a comunicação entre alunos e professores no Ensino à Distância (EaD). No entanto, como Chacon *et al.* (2015) apontam, há uma necessidade crescente de integrar práticas experimentais reais nos cursos de Engenharia.

Luthon e Larroque (2014) desenvolveram um Laboratório Remoto gamificado, no qual os alunos constroem circuitos controlando remotamente um braço robótico. Os resultados indicaram que a percepção de eficiência e o uso de assistência online estavam diretamente associados ao sucesso na aprendizagem. Além disso, o aspecto competitivo do ambiente ajudou a aumentar a motivação dos estudantes.

Chacon *et al.* (2015) propuseram uma arquitetura de Laboratório Remoto voltada para educadores sem expertise em programação, oferecendo uma curva de aprendizado reduzida devido à utilização de ferramentas gráficas intuitivas.

Adjih *et al.* (2015) apresentaram o *IoT-LAB*, uma plataforma online que possibilita a realização de experimentos com dispositivos *IoT* diferentes em cada nó. Esse sistema se mostrou útil para projetar, avaliar e contribuir para a padronização de dispositivos *IoT*.

Martinez, Garcia-Zubia e Martinez-Pieper (2015) desenvolveram um Laboratório Remoto para experimentos com um elevador industrial, permitindo sessões práticas de alto nível com grandes grupos de alunos. Os autores destacaram que o uso de sistemas embarcados, em que os estudantes desenvolvem *firmware* em seus próprios computadores, reduz o tempo necessário para validar os experimentos.

Garcia-Zubia *et al.* (2016) investigaram o impacto do uso do Laboratório Remoto VISIR no processo de aprendizagem, concluindo que o sucesso nas atividades não estava condicionado ao conhecimento prévio dos alunos. Isso evidenciou que os Laboratórios Remotos beneficiam tanto alunos com níveis de conhecimento mais baixos quanto os mais avançados.

Os LRs emergiram como uma solução promissora, combinando software e *hardware* para permitir que usuários acessem equipamentos reais através da internet. Rodriguez-Gil *et al.* (2017) projetaram uma plataforma de código aberto para transmissão ao vivo (*streaming*) em LRs, proporcionando uma interação em tempo real com os equipamentos do laboratório.

Parkhomenko *et al.* (2018) apresentaram abordagens voltadas para boas práticas no processo educacional de futuros profissionais de Tecnologia da Informação, propondo uma arquitetura que permite aos alunos adquirirem conhecimento e habilidades práticas em tecnologias *IoT*, por meio de experimentos remotos no laboratório *Smart House & IoT*.

Viegas *et al.* (2018) investigaram a aprendizagem experimental em tópicos elétricos e eletrônicos utilizando o Laboratório Remoto VISIR. Embora tenha sido positivo na percepção dos alunos, destacaram que a interface precisa ser modernizada. Além disso, o laboratório mostrou-se mais eficaz em cursos básicos do

que em cursos avançados, evidenciando o papel essencial dos LRs no ensino contemporâneo, especialmente na área de Engenharia.

Esses laboratórios não só implementam uma economia de escala, permitindo o compartilhamento de custos entre instituições de ensino, como também oferecem flexibilidade de acesso e eliminam restrições geográficas, como observado por Leisenberg e Stepponat (2019). Além disso, proporcionam a melhoria na qualidade dos experimentos, especialmente em áreas como *IoT*, ao possibilitar a repetição de procedimentos várias vezes.

Schwandt e Winzker (2019) desenvolveram um Laboratório Remoto para o curso de *Design Digital*, com o objetivo de alcançar o mesmo nível de aceitação observado em laboratórios de Engenharia. Apesar do sucesso inicial, os feedbacks dos alunos indicaram a necessidade de reformulação no design do laboratório.

Segundo Lima, Viegas e Garcia-Peñalvo, (2019), os LRs oferecem uma abordagem alternativa e complementar aos laboratórios convencionais, permitindo a aplicação prática de conceitos em um ambiente virtual. Essa modalidade de laboratório traz vantagens em termos de acessibilidade, disponibilidade e segurança, promovendo a construção e consolidação de conhecimentos e competências por meio da manipulação de instrumentos, equipamentos e dados.

Fernández-Pacheco, Martin e Castro (2019) destacaram a relevância da criação de um Laboratório Remoto para estudos de *IoT* e propuseram uma arquitetura que possibilita a realização de experimentos de forma remota. Os autores também mencionaram o interesse da Comissão Europeia em fomentar investimentos em *IoT*, enfatizando que o uso de LRs em programas de ensino online pode garantir uma assimilação eficaz de competências necessárias aos alunos.

Leisenberg e Stepponat (2019) desenvolveram uma arquitetura de Laboratório Remoto focada na educação a distância, com ênfase na análise de dados em *IoT*. Apesar dos resultados bem-sucedidos, os autores reconheceram a necessidade de melhorias em alguns aspectos técnicos.

A principal diferença entre Laboratórios Virtuais e Remotos reside no fato de que, nos Laboratórios Virtuais, as simulações são realizadas em modelos computacionais, enquanto nos LRs há acesso remoto a equipamentos físicos reais

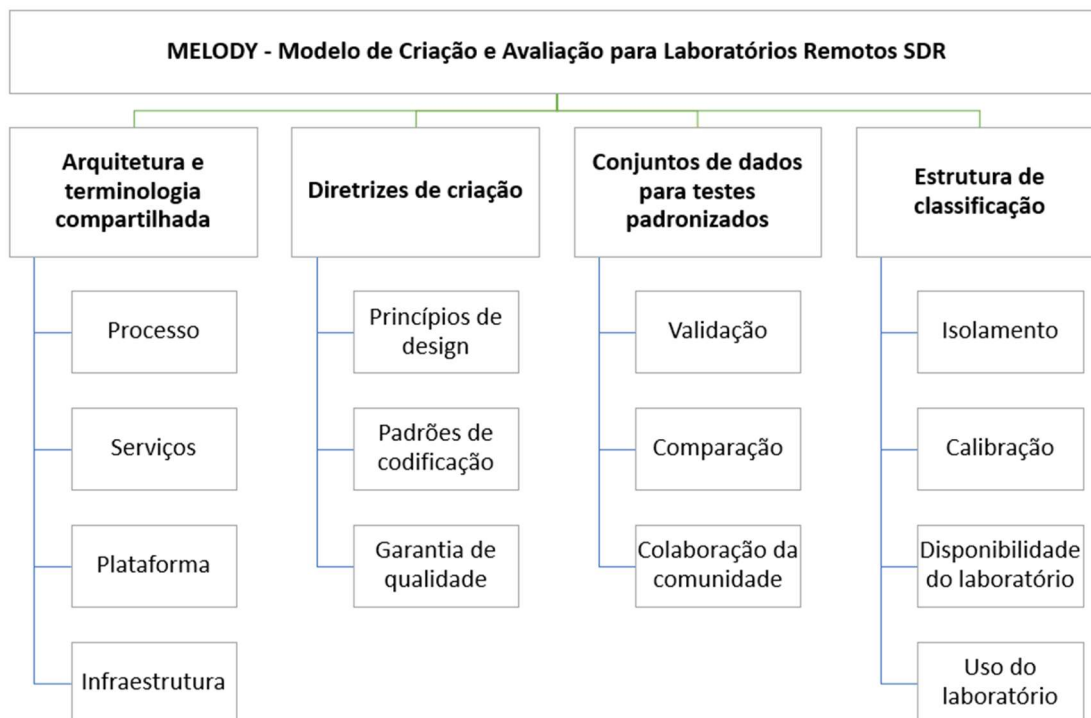
que fornecem resultados empíricos (Balamuralithara; Woods, 2009; Chacon *et al.*, 2015; Lima; Viegas; Garcia-Peñalvo, 2019a).

A utilização de um Laboratório Remoto oferece diversas vantagens em comparação ao modelo de laboratório convencional. Fernández-Pacheco, Martin e Castro (2019) e Leisenberg e Stepponat (2019) apontam que os LRs permitem acesso sem restrições de horário ou localidade, podem atender a um número maior de usuários simultaneamente e são acessíveis por meio de diferentes plataformas, como computadores, *tablets* e *smartphones*.

Schwandt e Winzker (2019) reforçam que os LRs para experimentos no ensino de Engenharia estão disponíveis há vários anos. Contudo, para garantir a aceitação pelos alunos, é fundamental adotar uma abordagem pedagógica adequada e projetar uma interface de usuário estimulante. Os autores destacam que o design dos LRs deve ser centrado nas necessidades dos alunos.

Estudos mais recentes, como o de Hayashi *et al.* (2023) demonstram o impacto positivo do uso dos LRs no desempenho acadêmico e no engajamento dos alunos. Pavani *et al.* (2023) ressaltam a sustentabilidade e o engajamento contínuo de projetos como o VISIR+ no ensino de Engenharia Elétrica. Além disso, iniciativas como o modelo *MELODY*, desenvolvido por Inonan e Hussein (2023), promovem a criação, padronização e avaliação de laboratórios remotos SDR (*Software Defined Radio*), oferecendo flexibilidade e integração de diversas tecnologias.

O *MELODY* é um modelo tecnologicamente agnóstico, baseado em software de código aberto, destinado ao desenvolvimento de laboratórios remotos SDR. Caracteriza-se por sua capacidade de construir aplicações e soluções independentes de plataformas e frameworks específicos (Inonan; Hussein, 2023). Trata-se de uma estrutura para criar e avaliar Laboratórios Remotos SDR. Sua estrutura é apresentada na Figura 6:

Figura 6– Estrutura do modelo *MELODY*

Fonte: adaptado de Inonan e Hussein (2023)

Essa abordagem tem como foco a qualidade da construção e implementação de Laboratórios Remotos *SDR* (direcionado à Engenharia de Comunicações e áreas relacionadas), utilizando de premissas de qualidade para avaliar a arquitetura e funcionalidades, sendo que a avaliação é realizada com foco na qualidade de software ao invés do uso, percepção dos alunos ou aprendizagem. Um exemplo dos resultados dessa abordagem é apresentado no Quadro 16:

Quadro 16 – Exemplo de avaliação realizada com modelo *MELODY*

Item avaliado	Nota	Descrição
Isolamento	0/5	Não foi projetado para ser escalável e não possui isolamento
Escalabilidade	1/5	Um dispositivo por usuário, não escalável
Calibração	5/5	Utiliza ADALM-PLUTO SDR, calibrado pelo fabricante <i>Analog Devices</i>
Disponibilidade	4/5	O sistema pode ser acessado através do GRC.
Uso do Laboratório	2/5	Os alunos precisam esperar até que outros concluam a utilização antes de acessar o laboratório

Fonte: adaptado de Inonan e Hussein (2023)

Reid e Drysdale (2024) desenvolveram um painel de feedback para acompanhar o desempenho dos alunos em trabalhos práticos realizados em LRs. Os resultados demonstraram uma melhoria no desempenho dos alunos que utilizaram essa ferramenta, em comparação com os painéis convencionais. Esses estudos destacam a crescente importância dos LRs no ensino de Engenharia e sua contribuição para a formação de profissionais qualificados e competentes.

Os estudos revisados sobre LRs evidenciam desafios comuns, como a necessidade de mensurar sua efetividade como ferramenta de ensino e a melhoria da experiência de aprendizagem dos alunos. Nesse contexto, o presente trabalho propõe uma análise da usabilidade e da Experiência do Usuário no Laboratório Remoto da Uninove (LRM-U9), utilizado para estudos em Microcontroladores e *IoT*.

### **2.2.1. MICROCONTROLADORES E *IoT***

O crescente avanço tecnológico demanda por processos mais rápidos e simplificados, impulsionando investimentos e estudos em microcontroladores, dispositivos eletrônicos versáteis amplamente utilizados para automatizar uma variedade de sistemas modernos. Segundo Souza (2005), um microcontrolador é um componente eletrônico dotado de memória programável, utilizado no controle de processos lógicos, encapsulado em silício e contendo todos os componentes necessários para execução de um processo. Zanco (2005) complementa essa definição, descrevendo o microcontrolador como uma *CPU* de pequeno porte capaz de executar um conjunto de tarefas ou instruções de processador, com memória de programa e de dados, portas de entrada e saída, *timers*, contadores, comunicação serial, *PWM (Pulse Width Modulation)*, conversores analógico-digitais, entre outros, todos integrados internamente sem a necessidade de periféricos externos.

Os primeiros conceitos sobre microcontroladores surgiram com o desenvolvimento de microprocessadores no final da década de 1960. A empresa japonesa BUSICOM iniciou estudos visando criar uma calculadora eletrônica por meio de processamento eletromecânico, culminando na Calculadora BUSICOM HL-21 (CORTELLETTI, 2006). No entanto, os microprocessadores não atendiam completamente às necessidades de sistemas embarcados, como celulares, aparelhos de som e controle de motores. Em 1971, dois engenheiros da *Texas Instruments*, Gary

Boone e Michael Cochran, desenvolveram o primeiro microcontrolador, o TMS1000, com 4 bits e memórias *ROM* e *RAM* incorporadas ao chip. Inicialmente destinado ao uso interno na fabricação de calculadoras eletrônicas, o TMS1000 foi disponibilizado para a comercialização em 1974, após diversas iterações e configurações (ZANCO, 2005).

A plataforma de hardware/software Arduino, iniciada em 2005, oferece uma abordagem de código aberto para o desenvolvimento de sistemas baseados em microcontroladores, como mencionado por Martínez-Santos, Acevedo-Patino e Contreras-Ortiz (2017). Os autores descrevem sua utilização no ensino de Microcontroladores, adaptando o curso para superar as dificuldades enfrentadas em cursos anteriores. Bolanakis (2019) destaca a diferença entre microcontroladores e microprocessadores, enfatizando que os microcontroladores utilizam sistemas embarcados em vez de sistemas operacionais. E ressalta os desafios específicos da programação para microcontroladores, que envolve o controle de baixo nível em hardware, geralmente oculto nos sistemas operacionais.

Os microcontroladores são amplamente empregados na indústria devido à sua capacidade de realizar processos lógicos com rapidez, precisão e qualidade. Sua principal vantagem é a programabilidade, o que os torna adaptáveis às diversas finalidades exigidas, permitindo ajustes de acordo com tarefas específicas.

A programação dos microcontroladores é realizada em microcomputadores, utilizando ferramentas como o Arduino IDE para enviar o código ao dispositivo. Com diversos fabricantes de microcontroladores, esses dispositivos tornaram-se amplamente acessíveis. A linguagem C é uma das mais utilizadas para a programação de microcontroladores, devido à sua capacidade de trabalhar em nível de máquina (Bolanakis, 2019).

Os microcontroladores possuem um consumo de energia relativamente baixo, geralmente em torno de miliwatts, e têm a capacidade de entrar no modo de espera (*Wait* ou *Sleep*), aguardando uma interrupção ou evento externo para se tornarem ativos novamente, como uma tecla pressionada ou um sinal recebido por uma interface de dados, entre outros. No modo de espera, o consumo de energia pode

alcançar a casa dos *nanowatts*, tornando os microcontroladores ideais para sistemas e aplicações que demandam baixo consumo energético.

De acordo com Ahmed e Fayed (2020), as unidades microcontroladoras (MCUs) são essenciais em diversas aplicações eletrônicas, desde a indústria automotiva até sistemas de comunicação, enfrentando uma variedade de condições operacionais. Para lidar com essa diversidade, a fonte de alimentação interna das MCUs deve suportar uma ampla faixa de tensões de entrada e saída, bem como diferentes demandas de corrente de carga, variando de algumas dezenas a centenas de miliamperes nos modos ativos e tão baixo quanto 10  $\mu\text{A}$  nos modos inativos. Além disso, deve ser capaz de acomodar uma variedade de valores de componentes passivos, como indutores e capacitores, considerando as restrições específicas de tamanho e custo de cada aplicação.

As vantagens e facilidades proporcionadas pelos microcontroladores dependem da programação inserida em sua memória. A programação é essencialmente uma forma de "interação", permitindo que um sistema compreenda o que deve ser feito por meio de comandos implementados de acordo com os princípios da lógica de programação. O programa fonte desenvolvido pelo programador é processado por um compilador, que o transforma em linguagem binária.

Há uma variedade de fabricantes de microcontroladores, o que torna esses dispositivos amplamente acessíveis. Alguns dos principais fabricantes incluem *Intel*, *Microchip Technology*, *Texas Instruments*, *Western Digital Center*, *Atmel*, *NEC* e *Parallax*.

Atualmente, aproximadamente metade dos microcontroladores vendidos são considerados padrão, ou seja, não possuem componentes específicos para tarefas especializadas, como Processamento de Sinais Digitais (DSPs). No entanto, os DSPs ainda representam cerca de 20% das vendas totais de microcontroladores. Esses dispositivos estão presentes na maioria dos dispositivos eletrônicos digitais, como televisores, relógios de pulso, rádios-relógios, máquinas de lavar roupas, geladeiras, fornos de micro-ondas, entre outros. Os microcontroladores desempenham um papel crucial na evolução dos equipamentos eletrônicos, possibilitando avanços em áreas como motores a combustão, fotografia digital e muitas outras.



Enquanto a programação para microprocessadores conta com o suporte de um Sistema Operacional e a configuração do hardware é controlada pela *BIOS (Basic Input/Output System)*, a programação para microcontroladores exige uma abordagem mais abrangente, incluindo a configuração do hardware.

De acordo com Xhonneux, Louveaux e Bol (2023), a última década testemunhou um aumento significativo de dispositivos e serviços de Internet das Coisas (*IoT*), especialmente na indústria. A *IoT Industrial (IIoT)* é um paradigma emergente que busca aumentar a inteligência dos sistemas físicos existentes, como máquinas ou ambientes de produção, por meio da implementação de microcontroladores de baixo custo e recursos limitados, equipados com sensores de detecção. Os autores destacam que esses sensores são conectados sem fio à nuvem, e os dados que eles fornecem são utilizados para aprimorar o monitoramento e a eficiência dos processos industriais. A conectividade sem fio dos microcontroladores é uma funcionalidade fundamental das aplicações *IIoT*. Especificamente, devido à limitação de energia dos dispositivos sem fio, houve o desenvolvimento de uma nova geração de tecnologias de redes de área ampla de baixo consumo de energia.

### **2.2.2. AVALIAÇÃO DE USABILIDADE EM LRS**

Arroyo *et al.* (2024) desenvolveram um LR para ensino de microcontroladores utilizando dispositivos *IoT*. E propõe a utilização dos questionários *SUS (System Usability Scale)* (Brooke, 1986), *UMUX (Finstad, 2010) (Usability Metrics for User Experience)*, além de questões qualitativas, de forma complementar. Esses questionários são relacionados de modo que as resposta de um questionário validem as respostas do outro.

Cuadros *et al.* (2021) desenvolveram um questionário para mensuração de usabilidade de LRs a partir dos questionários *SUS*, *UMUX* e *E-learning Usability Questionnaire*, sendo 9 questões em uma escala *likert* de 7 itens que contemplam os temas usabilidade, Utilidade e Imersão. Foram utilizados coeficientes alfa de Cronbach e ômega de McDonald para avaliar a confiabilidade e a matriz de correção por EFA e CFA para validação do construto, porém de acordo com os próprios autores, são necessárias mais investigações para validar a aplicação do questionário em

aplicação real e diferentes contextos de experimentação remota. Sendo assim, esse questionário não foi utilizado no presente trabalho.

Silva *et al.* (2023) desenvolveram a arquitetura Deusto *XRL*, um Laboratório Remoto estendido (*XRL - Extended Remote Laboratories*) que utiliza recursos de realidade estendida para aumentar a interação e envolvimento dos alunos ao realizarem experimentos no LR, foi realizado experimento com 150 alunos e avaliado com a utilização de um questionário adaptado a este projeto, com base no questionário de Cuadros *et al.* (2021). O estudo alcançou bons resultados, porém ressalta que ainda são necessárias validações, principalmente no que diz respeito ao uso de realidade aumentada e realidade virtual.

## 2.3. SISTEMAS INTELIGENTES

Conforme Simões e Shaw (2007), “Sistemas Inteligentes” são aqueles que fornecem respostas adequadas para a solução de problemas, adaptando-se a situações específicos, mesmo quando essas situações são novas ou inesperadas, o que confere a esses sistemas um comportamento único ou, em certos casos, criativo. A operação de Sistemas Inteligentes é frequentemente comparada a sistemas biológicos, uma vez que lidam com informações vagas, imprecisas e qualitativas, além de apresentarem capacidade de aprendizado e formulação de estratégias de tomada de decisão, características inerentes ao comportamento humano. Por essa razão, a teoria *fuzzy*, redes neurais e *Neuro-Fuzzy* são técnicas consideradas inteligentes, devido à sua capacidade de reproduzir aspectos da inteligência humana.

Um sistema inteligente ideal possibilitaria o desenvolvimento de sistemas autônomos, capazes de realizar tarefas complexas de controle sob diferentes condições operacionais, mesmo na presença de falhas, sem a necessidade de supervisão ou intervenção de operadores externos (Simões; Shaw, 2007).

### 2.3.1. Sistemas de Inferência *Fuzzy* (SIFs)

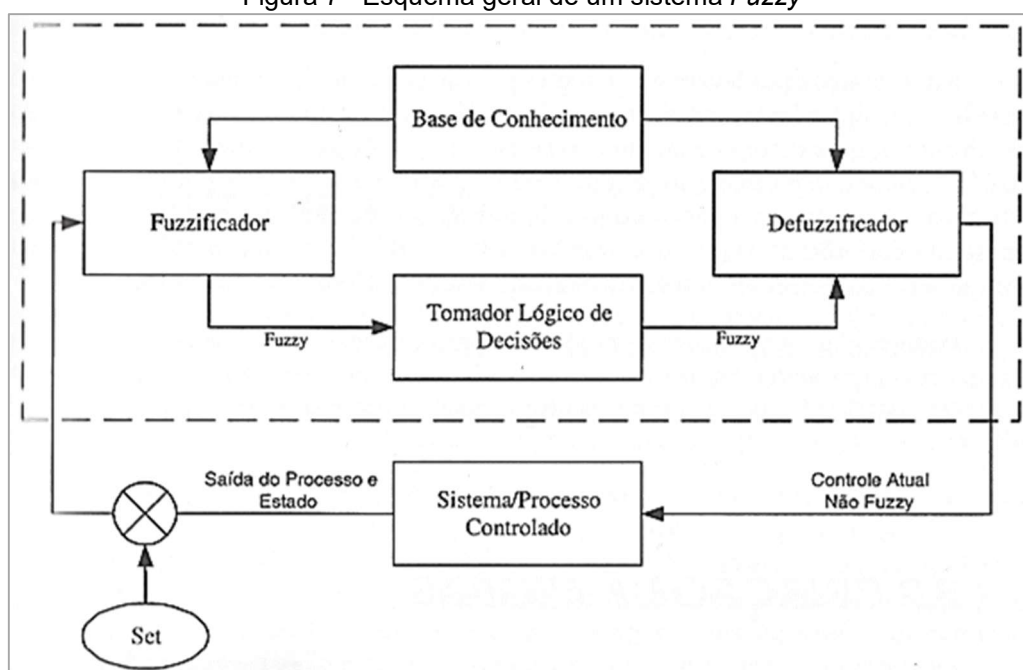
A Lógica *Fuzzy* é uma lógica que incorpora a forma humana de pensar em um sistema de controle e representa uma abordagem para o tratamento de informações imprecisas, fornecendo um método para traduzir expressões verbais vagas,

qualitativas, típicas da comunicação humana, em valores numéricos. Essa tecnologia possui imenso valor prático, permitindo a incorporação da experiência de operadores humanos, que controlam processos e plantas industriais, em controladores computadorizados. Além disso, possibilita a formulação de estratégias de tomada de decisão em problemas complexos (Simões; Shaw, 2007).

A teoria de conjuntos *Fuzzy* desenvolvida por Zadeh (1965), utiliza classes de objetos com uma série contínua de graus de pertinência (conjuntos *Fuzzy*), que podem classificar informações imprecisas em conjuntos matemáticos por meio de uma função de pertinência. Esses graus são determinados com valores entre 0 e 1.

A lógica *Fuzzy* se diferencia da lógica tradicional que segue o princípio da bivalência (álgebra booleana) proposta por Aristóteles (384 a.C.-322 a.C), onde um objeto pode ser classificado em apenas uma classe 0 ou 1. A teoria de conjuntos *Fuzzy* se propõe a compreender situações ambíguas (Weber; Klein, 2003), onde algo não pode ser classificado apenas em uma classe ou outra, mas pode ser classificado quanto a seu pertencimento em uma classe ou outra utilizando multivalência (probabilidade de pertencimento a uma classe e outra). A Figura 7 apresenta o esquema genérico de um controlador *Fuzzy*:

Figura 7– Esquema geral de um sistema *Fuzzy*



Fonte: adaptado de Weber e Klein (2003)

De acordo com Mitra e Hayashi (2000), os sistemas de inferência *Fuzzy* podem ser amplamente categorizados em duas classes principais. A primeira é o modelo de Mandani, que inclui modelos linguísticos baseados em coleções de regras SE-ENTÃO, onde tanto os antecedentes quanto os consequentes utilizam valores *Fuzzy*. Esse modelo emprega o raciocínio *Fuzzy*, permitindo descrever o comportamento do sistema de inferência em termos naturais. A segunda classe é o modelo de Sugeno (Takagi; Sugeno, 1983), que utiliza uma estrutura de regras contendo partes *Fuzzy* nos antecedentes e consequentes funcionais. Essa abordagem visa aproximar um sistema não linear por meio da combinação de vários sistemas lineares, dividindo todo o espaço de entrada em vários espaços *Fuzzy* parciais e representando cada espaço de saída com uma equação linear.

Weber e Klein (2003) definem fuzzificação como a transformação de dados para um conjunto *Fuzzy* correspondente e ressaltam que antes que os dados sejam fuzzificados, devem ser normalizados para enquadrarem-se nos limites adequados ao universo de discurso da entrada do controlador. Enquanto Simões e Shaw (2007) complementam que fuzzificação é um mapeamento do domínio de números reais (geralmente discretos) para o domínio *Fuzzy* e também a atribuição de valores linguísticos, descrições vagas ou qualitativas, definidas por funções de pertinência às variáveis de entrada. Trata-se de um pré-processamento de categorias ou classes dos sinais de entrada, de modo a reproduzir em grande medida o número de valores a serem processados.

Já a defuzzificação consiste em traduzir o valor da variável linguística de saída em um valor discreto, sendo seu objetivo obter um único valor numérico discreto que melhor represente os valores *Fuzzy* inferidos da variável linguística de saída, ou seja, a distribuição de possibilidades. Sendo assim, a defuzzificação é a transformação inversa que traduz a saída do domínio *Fuzzy* para o domínio discreto (Simões; Shaw, 2007). Weber e Klein (2003) complementam existem diversos métodos de defuzzificação, porém aproximadamente apenas 6 são práticos e que algumas vezes, após a defuzzificação, um procedimento de normalização é necessário para aplicação prática.

### 2.3.1.1. Sistemas *Fuzzy* Baseados em Regras

Os sistemas *Fuzzy* baseados em regras utilizam dois tipos principais de implicações ou inferências, conhecidas como o *modus ponens* (modo afirmativo) e *modus tollens* (modo negativo). Ambos operam a partir de premissas ou condições que levam a uma determinada consequência (Simões; Shaw, 2007). Esses modos são exemplificados no Quadro 17:

Quadro 17 – Regras de inferência *Fuzzy*

Regra	Premissas	Tipo de inferência
<b><i>Modus ponens</i></b> (Afirmativo)	Premissa 1: $u = A$	Inferência Progressiva
	Premissa 2: se $u = A$ então $y = B$	
	Consequência: $y = B$	
<b><i>Modus tollens</i></b> (Negativo)	Premissa 1: $y = \text{não-}B$	Inferência Regressiva
	Premissa 2: se $u = A$ então $y = B$	
	Consequência: $u = \text{não-}A$	

Fonte: adaptado de Simões e Shaw (2007)

De acordo com Simões e Shaw (2007), sistemas especialistas que utilizam inferência progressiva (*forward-chained inference*), geralmente operam com variáveis discretas ou simbólicas que são convertidas em números discretos. Esses sistemas tendem a lidar com uma grande quantidade de regras, possuindo bases de conhecimento que podem ter centenas ou até milhares de regras, muito mais do que um típico sistema *Fuzzy*, que normalmente utiliza entre 20 e 100 regras. Nos sistemas especialistas, as regras são ativadas em série, e não em paralelo, com o objetivo de conduzir diagnósticos, atuar como conselheiros ou fornecer sugestões.

Uma regra ou inferência *Fuzzy* estabelece uma relação entre conjuntos *Fuzzy* utilizando ***modus ponens*** da seguinte forma: **SE  $X = A$  ENTÃO  $Y = B$** , onde  **$A \subset X$  e  $B \subset Y$** . Em um controlador *Fuzzy*, há muitas destas inferências e todas são ativadas em paralelo, ou seja, simultaneamente. Esse funcionamento permite que um controlador *Fuzzy* realize inferências de forma associativa e paralela, o que contribui para sua eficiência (Simões; Shaw, 2007).

Quando uma entrada é fornecida, o controlador *Fuzzy* dispara cada regra em paralelo, com diferentes graus de ativação, dependendo de um fator chamado grau de suporte. Esse grau de suporte é um número no intervalo entre 0 e 1, associado a cada regra, que reflete a intensidade com que a regra participa no processo de inferência para gerar um resultado ou saída.

Essa operação paralela é o que garante a alta velocidade de processamento dos controladores *Fuzzy*. Além disso, os sistemas *Fuzzy* realizam inferências com conjuntos linguísticos, em vez de proposições lógicas bivalentes. A forma geral de uma regra *Fuzzy* é: **SE <condições> ENTÃO <conclusão>**, ou **SE <antecedente> ENTÃO <consequente>** (Simões; Shaw, 2007).

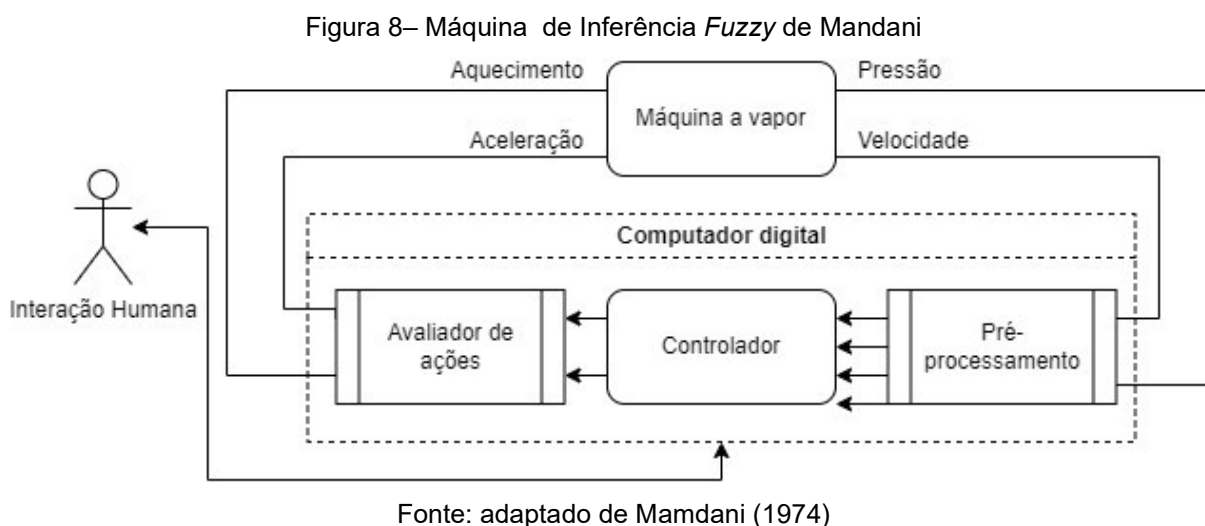
De acordo com Simões e Shaw (2007), qualquer sistema físico, químico ou biológico pode ser visto como um estimador de funções, no sentido de esses sistemas respondem a estímulos e associam essas respostas aos estímulos recebidos., Em outras palavras, realizam o mapeamento de estímulos (entradas) em respostas (saídas), caracterizando a transformação que ocorre entre esses dois estados. Essa transformação é representada pela função de entrada/saída  $f: U \Rightarrow Y$ , que mapeia o universo de discurso de entrada  $U$  ao universo de discurso de saída  $Y$ .

Para cada elemento  $u \in U$ , a função  $f$  atribui unicamente um elemento  $y \in Y$ , sem essa correspondência expressa pela notação  $y = f(u)$ . Assim, a forma como qualquer sistema processa e transforma entradas em saídas define a sua função de operação. Dessa maneira, um sistema pode ser identificado pelo modo como transforma de entrada em suas respectivas saídas (Simões; Shaw, 2007).

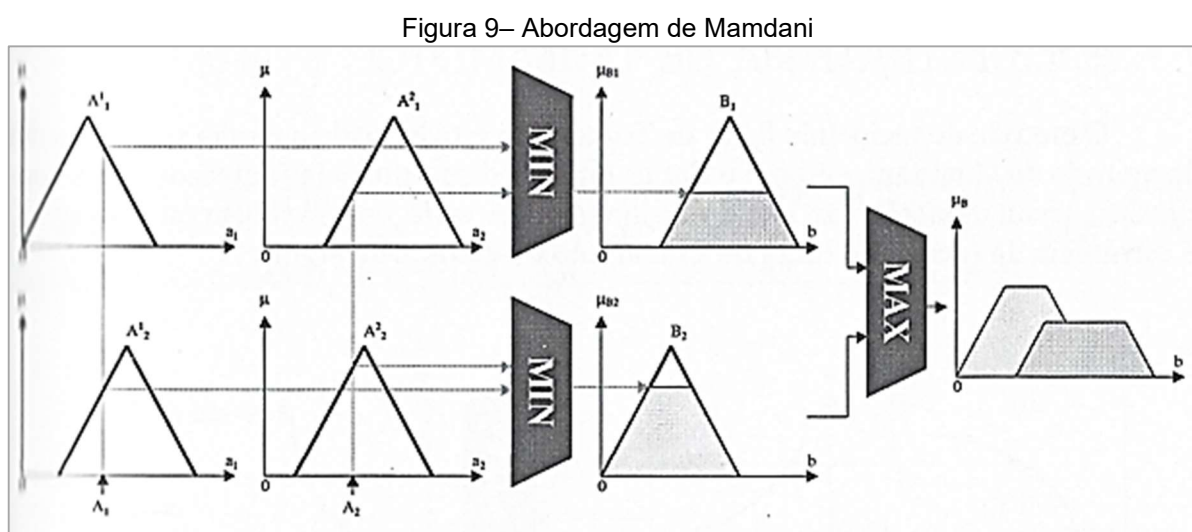
Os sistemas *Fuzzy* também podem estimar funções de entrada e saída por técnicas heurísticas, onde um especialista humano pode auxiliar a formular o conjunto de regras *Fuzzy*, articulando associações de entradas e saídas linguísticas. Assim, os sistemas *Fuzzy* podem produzir estimativas de um sistema não-linear complexo sem recorrer a modelos matemáticos sendo: **variável de entrada  $\Rightarrow$  inferência *Fuzzy*(regras)  $\Rightarrow$  variável de saída**. Nesse escopo, a metodologia *Fuzzy* é um método de estimação de entrada e saída livre de modelos matemáticos (Simões; Shaw, 2007).

### 2.3.1.2. Abordagem de Mamdani

O primeiro sistema *Fuzzy* foi publicado por Mamdani (1974) que conseguiu controlar uma máquina a vapor com base em controladores *Fuzzy* (Figura 8). Utilizando algoritmos de controle para medir e ajustar o erro em relação a configuração de calor da máquina. Neste método criou um sistema de inferência no qual é possível defuzzificar os números *Fuzzy* através do cálculo de áreas geométricas. Esse sistema (Figura 8) expandiu a utilização dos conjuntos *Fuzzy* e permitiu a generalização do método para diferentes tipos de problema.



A abordagem *Fuzzy* de Mamdani é baseado em operadores de inferência **MAX-MIN**, essa estratégia é ilustrada na Figura 9:



Nessa abordagem, são utilizadas regras baseadas no **Modus Ponens**, onde antecedente e consequente são valores de variáveis linguísticas, expressos por meio de conjuntos *Fuzzy*. Os valores de entrada *Fuzzy* (conjuntos de pertinência) são combinados utilizando operador **MIN** que corresponde ao conectivo **E** de acordo com as regras da intersecção *Fuzzy* e essa operação é chamada de agregação. A agregação é aplicada a cada uma das regras da variável de entrada e o final é realizada a operação de composição (Silva, 2011; Simões; Shaw, 2007).

No processo de composição em sistemas *Fuzzy*, todos os subconjuntos *Fuzzy* relacionados a cada variável antecedente são combinados para formar um único subconjunto *Fuzzy* correspondente a essa variável. Isso é necessário porque múltiplas regras *Fuzzy* podem ser ativadas simultaneamente, cada uma gerando um subconjunto *Fuzzy* para a variável. Para consolidar essas saídas parciais em uma única resposta, são utilizados operadores como **MAX** ou **SOMA** (Simões; Shaw, 2007; Weber; Klein, 2003).

No caso do operador **MAX**, o subconjunto de saída é construído selecionando os valores máximos de cada ponto pertencente aos subconjuntos *Fuzzy* resultantes das regras de inferência (Weber; Klein, 2003). O resultado será a união dos subconjuntos gerados pelos mínimos conforme apresentado na Figura 9. O resultado obtido é então submetido ao processo de defuzzificação para gerar os valores de saída.

Nos parágrafos a seguir são apresentados os principais métodos de defuzzificação:

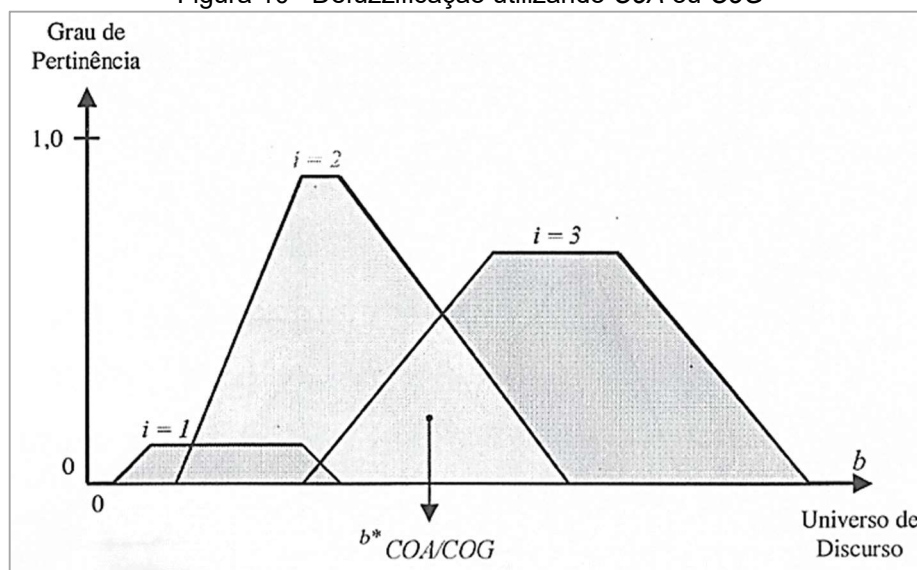
**Centro da área (CoA – Center of the Area):** o método de defuzzificação conhecido como Centro da Área (COA), é amplamente utilizado em sistemas *Fuzzy* para determinar um valor de saída nítido a partir de um conjunto de funções de pertinência *Fuzzy*. Esse método consiste em identificar o ponto no eixo horizontal que divide a área total sob a curva da função de pertinência em duas partes de mesma área (Weber; Klein, 2003).

Na maioria dos casos, o Centro da Área (COA) está na mesma posição do Centro de Gravidade (COG); sendo que estes nomes frequentemente denotam o mesmo método (Weber; Klein, 2003). A Figura 10 ilustra o processo de defuzzificação com base no COA em um sistema *Fuzzy* com uma entrada simples e uma saída



simples (*SISO – single input/single output*), que combina as funções de pertinência geradas por três regras, resultando em um único valor de saída.

Figura 10– Defuzzificação utilizando CoA ou CoG



Fonte: adaptado de Weber e Klein (2003)

O ponto é determinado calculando a média dos graus de pertinência nesta reta. A Equação 9 apresenta o cálculo do centróide conforme método de defuzzificação COA:

$$u^* = \frac{\sum_{i=1}^N u_i \mu_{OUT}(u_i)}{\sum_{i=1}^N \mu_{OUT}(u_i)} \quad (9)$$

Onde:

- $\mu_{OUT}(u_i)$  é a área de uma função de pertinência modificada pelo resultado da inferência *Fuzzy*
- $u_i$  é a posição do centróide da função de pertinência individual: essa equação calcula o centróide composto, para o qual contribuem duas funções de pertinência indicadas.

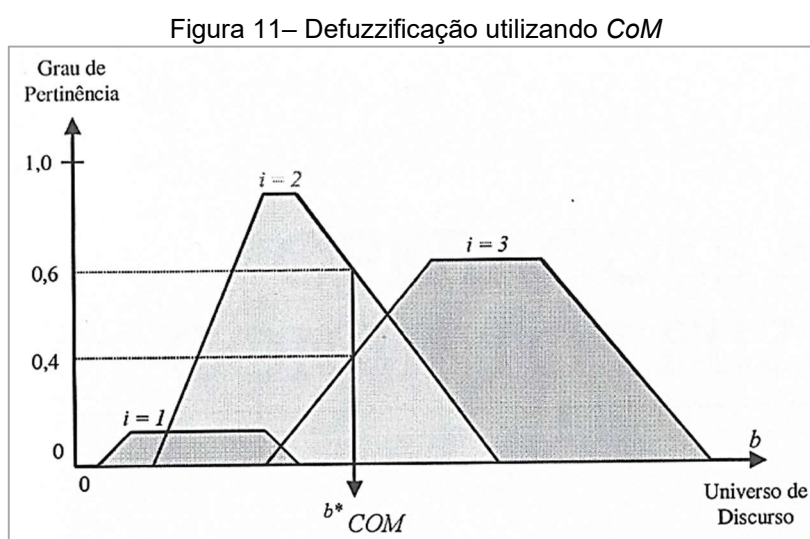
Esse método de defuzzificação pode apresentar algumas limitações, como por exemplo quando as funções de pertinência não possuem sobreposição, nesse caso o centro geométrico da figura na realidade não deveria ter significado físico claro. Além disso, quando múltiplas regras produzem a mesma saída *Fuzzy*, ocorre uma

sobreposição de áreas que não é devidamente contabilizada no cálculo, o que pode acarretar em distorções nos resultados (Simões; Shaw, 2007).

**Centro de Gravidade (CoG – Center of Gravity):** o método de defuzzificação conhecido como COG é amplamente aplicado em sistemas *Fuzzy* para determinar o valor da saída a partir de várias funções de pertinência (Figura 10). O COG calcula a média ponderada das áreas sob as curvas das funções de pertinência que resulta da inferência *Fuzzy*. O ponto de saída final corresponde ao ponto de equilíbrio ou centróide dessas áreas (Weber; Klein, 2003).

Embora esse método seja considerado o mais complexo em termos de cálculo, também é o mais preciso. Sua complexidade advém do fato de que todas as áreas devem ser ponderadas e processadas para calcular o ponto de equilíbrio exato (Weber; Klein, 2003).

**Centro do Máximo (CoM – Center of Maximum):** o método de defuzzificação conhecido como COM gera uma ação de controle obtida pelo valor ponderado de todas as ações de controle locais. Ao contrário do método do Centro de Gravidade (COG), que leva em conta toda a área sob as funções de pertinência, o COM considera apenas os picos (máximos) dessas funções. Esses picos são os pontos onde o grau de pertinência atinge seu valor máximo no universo de discurso da variável de saída como ilustrado na Figura 11 (Weber; Klein, 2003).

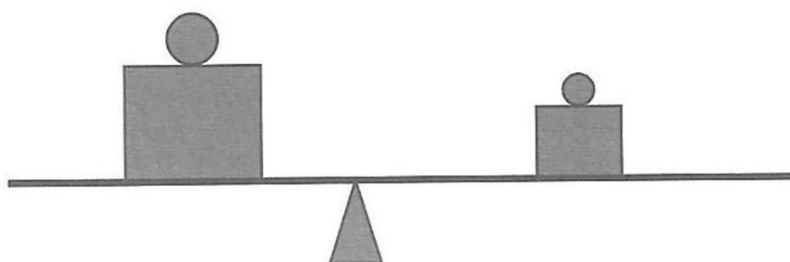


Fonte: adaptado de Weber e Klein (2003)

Os valores não-nulos do vetor de possibilidades de saída são posicionados nos correspondentes picos das funções de pertinência, assumindo que representam

pesos. O valor defuzzificado discreto é determinado ao identificar o ponto de equilíbrio dos pesos, ou seja, o ponto de apoio onde os pesos se equilibram (Simões; Shaw, 2007). Nesse processo, apenas os valores máximos das funções de pertinência são utilizados (pertinências *singleton*) e a saída discreta é calculada como uma média ponderada desses máximos (Simões; Shaw, 2007), sendo que os pesos são os resultados da inferência, conforme ilustrado na Figura 12:

Figura 12– Analogia para a defuzzificação pelo *CoM*



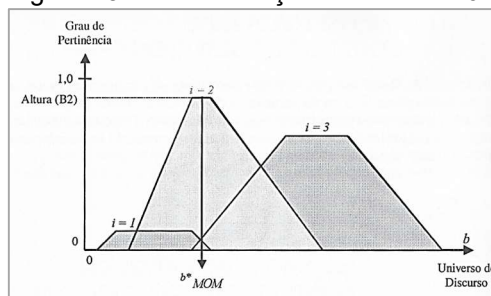
Fonte: adaptado de Simões e Shaw (2007)

O cálculo do valor defuzzificado é realizado de acordo com a Equação 10, onde  $\mu_k(u_i)$  indicam os pontos em que ocorrem os máximos das funções de pertinência de saída. Esse método também é conhecido como defuzzificação pelas alturas (Simões; Shaw, 2007).

$$u^* = \frac{\sum_{i=1}^N u_i \cdot \sum_{k=1}^N \mu_{OUT}(u_i)}{\sum_{i=1}^N \sum_{k=1}^N \mu_{OUT}(u_i)} \quad (10)$$

**Média dos Máximos (*MoM – Mean of Maxima*):** o método de defuzzificação conhecido como Mais Significativo dos Máximos (Figura 13), escolhe o valor mais plausível entre os obtidos e descarta os demais, porém esse método não é muito utilizado (Weber; Klein, 2003).

Figura 13– Defuzzificação utilizando *MoM*



Fonte: adaptado de Weber e Klein (2003)

Embora a abordagem de selecionar a saída cujo valor tenha o maior grau de pertinência possa ser interessante, ela se torna inadequada quando a função de pertinência apresenta mais de um máximo. Nesse caso, o método *MoM*, assim como o método do *CoM*, pode não oferecer bons resultados devido à necessidade de escolher entre vários máximos. Para lidar com essa situação, é possível utilizar a média de todos os máximos, conforme a equação:  $u^* = \sum_{m=1}^M \frac{u_m}{M}$ , onde  $u_m$  representa o  $m$ -ésimo elemento do universo de discurso, e a função  $\mu_{OUT}(u_i)$  possui um máximo, sendo  $M$  o número total desses máximos (Simões; Shaw, 2007).

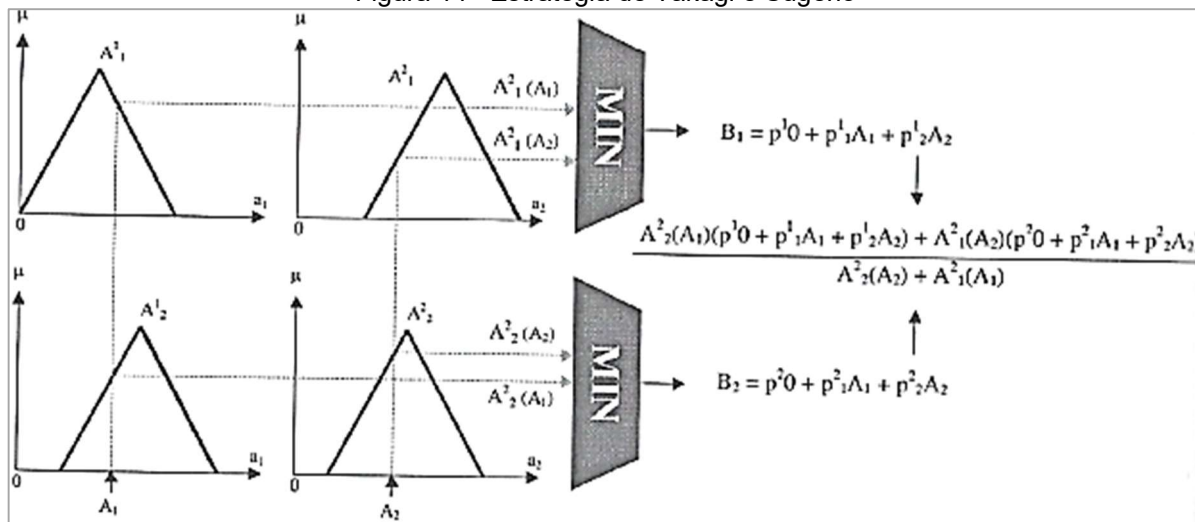
Os métodos de defuzzificação apresentados são amplamente utilizados no motor de inferência de Mamdani (1974). A defuzzificação é necessária apenas quando a saída do controlador precisa ser interpretada como uma ação de controle discreta. No entanto, em alguns sistemas, a defuzzificação não é necessária, pois a saída *Fuzzy* pode ser interpretada de modo qualitativo (Simões; Shaw, 2007). Embora existam diversos outros métodos de defuzzificação com aplicações interessantes, eles não foram abordados no presente trabalho, pois estão fora do escopo. Mas podem ser considerados em trabalhos futuros.

#### 2.3.1.3. Abordagem de Takagi e Sugeno

Ao contrário do motor de inferência de Mamdani (1974), em que os antecedentes e os consequentes das regras são valores de variáveis linguísticas, expressos por meio de conjuntos *Fuzzy*. O mecanismo de inferência proposto por Takagi e Sugeno (1983), simplifica a tomada de decisão pois somente o antecedente das regras é formado por variáveis linguísticas, enquanto o consequente das regras é expresso por uma função linear dos valores obtidos das variáveis de entrada.

Para Weber e Klein (2003), no método de Takagi e Sugeno, as variáveis de controle são expressas por meio de funções das variáveis de entrada. Ou seja, o raciocínio *Fuzzy* utiliza regras do tipo SE-ENTÃO, mas as saídas são determinadas por funções lineares ou não-lineares das variáveis de entrada e não por conjuntos *Fuzzy* como em outros modelos. A Figura 14 ilustra a estratégia de Takagi e Sugeno.

Figura 14– Estratégia de Takagi e Sugeno



Fonte: adaptado de Weber e Klein (2003)

As regras do sistema podem ser expressas da seguinte maneira: Se  $A_1$  é  $A_1^1$  e  $A_2$  é  $A_2^2$  e  $A_K$  é  $A_K^k$ , então  $B_1$  é uma função  $f_1(A_1, A_2, \dots, A_K)$  e  $B_2$  é uma função  $f_2(A_1, A_2, \dots, A_K)$ .

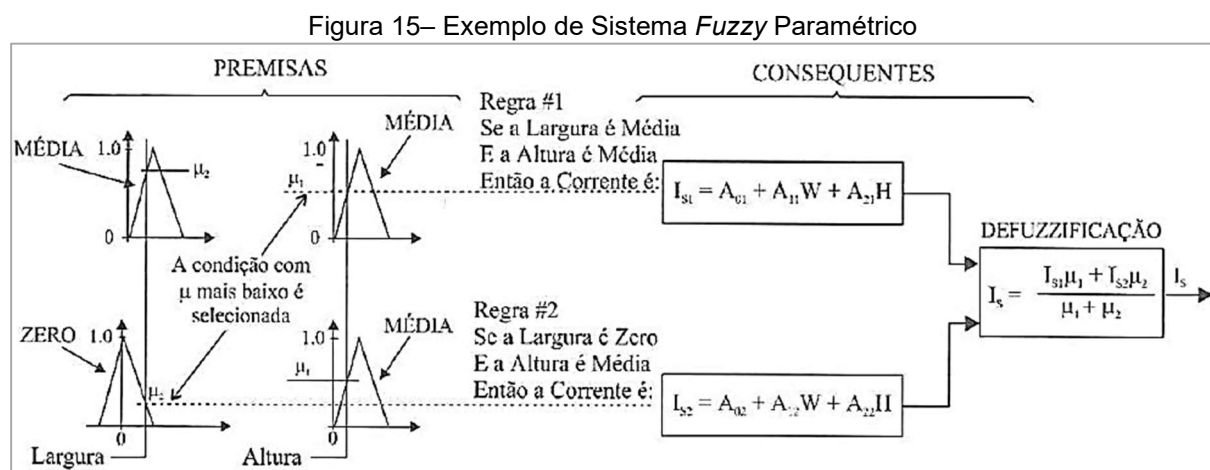
Neste caso, as funções  $f_1, f_2, \dots, f_n$  são equações que modelam o comportamento do sistema para diferentes condições das variáveis de entrada  $A_1, A_2, \dots, A_K$ . Esse modelo se destaca devido ao fato de que as regras não produzem diretamente uma variável *Fuzzy* como saída, mas sim um valor exato ou uma função matemática que descreve a saída.

De acordo com Simões e Shaw (2007), a abordagem de **Sistemas Fuzzy Paramétricos** combina o raciocínio baseado em regras de sistemas *Fuzzy* com aproximações lineares locais por meio de modelos de **Regressão Linear**. Em outras palavras, essa abordagem híbrida utiliza um método *Fuzzy* para descrever o comportamento global do sistema e um método matemático (linear) para tratar trechos específicos da entrada e saída do sistema.

Os **antecedentes** nas regras *Fuzzy* definem as regiões ou trechos que apresentam sobreposição nas entradas e saídas do sistema enquanto os **consequentes** das regras *Fuzzy*, por outro lado, geram as aproximações lineares específicas para cada região ou trecho (Simões; Shaw, 2007).

Na Figura 15 é ilustrado um exemplo de Sistema *Fuzzy* Paramétrico, onde os consequentes das regras são funções lineares das variáveis de entrada  $W$  e  $H$ . Os coeficientes representados como  $A_{ij}$ , são determinados por uma **Regressão Linear**.

Esse processo estatístico permite calcular os valores de  $A_{ij}$  de maneira objetiva, utilizando um modelo matemático de relação entre as variáveis (Simões; Shaw, 2007).



Fonte: adaptado de Simões e Shaw (2007)

Os coeficientes da equação linear  $A_{ij}$ , são treinados por dados de exemplos, semelhante à fase de aprendizagem de uma rede neural, onde os dados de entrada e a saída desejada são apresentados à rede de modo a estabelecer os pesos sinápticos. Esse ajuste possibilita alinhar os valores dos parâmetros  $A_{ij}$  ao comportamento desejado no sistema *Fuzzy*, levando em conta as particularidades das variáveis e a necessidade de precisão. Esse método combina a utilização de técnicas estatísticas e de simulação para aprimorar os coeficientes da equação linear associada aos consequentes das regras, fortalecendo a capacidade do sistema em modelar com precisão relações complexas entre as variáveis de entrada e saída (Simões; Shaw, 2007).

Li, Liu e Feng (2017) destacam que em diversos métodos de controle baseados em modelos, os SIF-TS não lineares são representados por um conjunto de modelos lineares locais, e então os controladores *Fuzzy* são projetados. Normalmente, os controladores *Fuzzy* globais podem ser sintetizados a partir dos controladores *Fuzzy* locais correspondentes. Dessa forma, os modelos SIF-TS fornecem abordagens sistemáticas e eficazes para lidar com sistemas não lineares complexos, tendo em vista sua capacidade de aproximação da função universal e a poderosa teoria de controle convencional.

### 2.3.2. Aprendizagem de Máquina (ML)

De acordo com Haykin (1999), a principal característica de uma rede neural é sua habilidade de aprender com o ambiente e melhorar seu desempenho por meio desse aprendizado. Esse processo de melhoria ocorre ao longo do tempo, conforme uma medida de desempenho pré-estabelecida. Uma rede neural aprende com seu ambiente por meio de um processo iterativo de ajustes aplicados aos pesos sinápticos e aos níveis de bias. Assim, a rede se torna progressivamente mais informada sobre o ambiente a cada iteração do processo de aprendizado.

O conceito de “aprendizado” abrange muitas atividades e possui diversas definições, o que dificulta o estabelecimento de uma definição única e precisa. Na psicologia, por exemplo, o aprendizado em sala de aula possui uma conotação distinta (Haykin, 1999). Dessa forma, no contexto de redes neurais, podemos adotar a definição proposta por Mendel e McClaren (1970 *apud* Haykin, 1999) que define o aprendizado como: “Um processo pelo qual os parâmetros livres de uma rede neural são adaptados por meio de um processo de estimulação pelo ambiente no qual a rede está inserida, e o tipo de aprendizagem é determinado pela maneira que a modificação dos parâmetros ocorre”.

Essa definição implica uma sequência de três etapas no processo de aprendizado (Haykin, 1999):

1. A rede neural recebe estímulos do ambiente.
2. Os parâmetros livres da rede são modificados como resposta a esses estímulos.
3. A rede responde de forma diferente ao ambiente, devido às mudanças ocorridas em sua estrutura interna.

Esses passos descrevem o ciclo de adaptação contínua das redes neurais, que ajustam seus parâmetros internos com base nas interações ambientais, aprimorando gradualmente seu desempenho.

Um algoritmo de aprendizado é definido como um conjunto pré-determinado de regras bem definidas para resolver um problema de aprendizado. Como não existe um algoritmo de aprendizado universal para redes neurais, utiliza-se um “conjunto de ferramentas” que consiste em uma variedade de algoritmos, cada um com vantagens

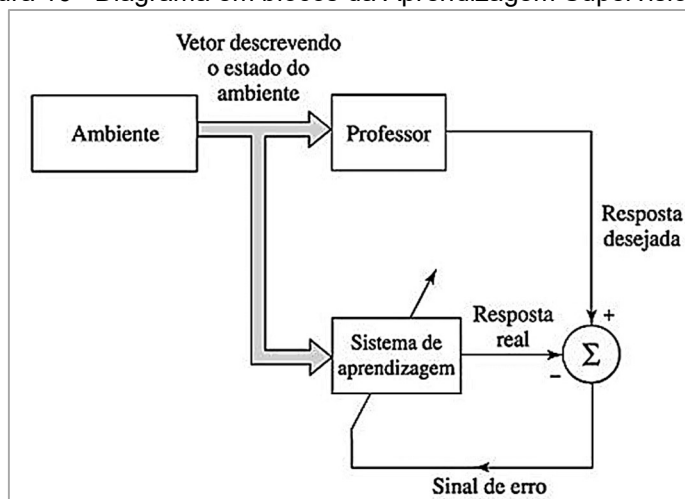
específicas. Esses algoritmos de aprendizado diferem principalmente na forma como ajustam o peso sináptico de um neurônio. Outro aspecto importante é como a rede neural, formada por um conjunto de neurônios interconectados, interage com seu ambiente. Nesse contexto, o termo paradigma de aprendizado se refere a um modelo do ambiente no qual a rede neural opera.

Conforme descrito por Haykin (1999), o paradigma de aprendizagem supervisionada envolve a interação entre um professor e uma rede neural. Conceitualmente, o professor possui conhecimento prévio sobre o ambiente, representado por um conjunto de exemplos de entrada-saída. No entanto, a rede neural não possui conhecimento sobre o ambiente. Ao serem expostos a um vetor de treinamento extraído do ambiente, o professor fornece à rede neural uma resposta desejada, correspondendo à ação ótima a ser realizada.

Os parâmetros da rede são ajustados iterativamente, com base na combinação do vetor de treinamento e do sinal de erro, definido como a diferença entre a resposta desejada e a resposta real da rede. O objetivo é que a rede neural simule o comportamento do professor de forma ótima, em um sentido estatístico (Haykin, 1999).

Por meio do treinamento, o conhecimento do ambiente é transferido do professor para a rede neural de forma abrangente. Uma vez alcançada essa condição, a rede neural pode operar independentemente, lidando com o ambiente sem a necessidade do professor (Haykin, 1999). A Figura 16 ilustra esse aprendizado:

Figura 16– Diagrama em blocos da Aprendizagem Supervisionada



Fonte: adaptado de Haykin (1999)



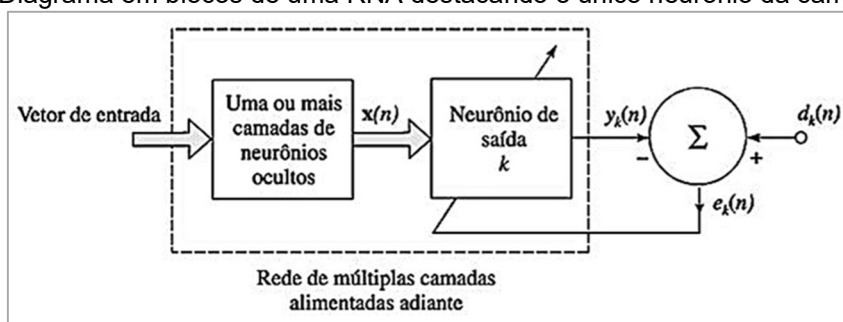
De acordo com Haykin (1999) a aprendizagem supervisionada, uma forma de aprendizagem por correção de erro, é caracterizada por um sistema realimentado de laço fechado. Nesse contexto, a medida de desempenho é frequentemente definida em termos do erro médio quadrado ou da soma de erros quadrados sobre a amostra de treinamento, expressa como uma função dos parâmetros livres do sistema. Essa função pode ser visualizada como uma superfície multidimensional de desempenho de erro .

Haykin (1999) descreve que para o sistema aprender e melhorar seu desempenho ao longo do tempo, é necessário minimizar a superfície de erro, movendo-se em direção a um mínimo local ou global. Isso é alcançado utilizando-se a informação sobre o gradiente da superfície de erro, que indica a direção da descida mais íngreme .

Na aprendizagem supervisionada por exemplos, o sistema estima o vetor gradiente instantâneo e realiza uma "caminhada aleatória" sobre a superfície de erro. Contudo, com um algoritmo adequado, um conjunto representativo de exemplos de entrada-saída e tempo suficiente de treinamento, os sistemas de aprendizagem supervisionada podem efetuar tarefas complexas, como classificação de padrões e aproximação de funções (Haykin, 1999).

Para exemplificar a aplicação desse método, Haykin (1999) considera o caso de um neurônio específico  $k$ , único nó na camada de saída de uma rede neural alimentada adiante. Esse neurônio é ativado por um vetor de sinais de entrada  $x(n)$ , gerado por uma ou mais camadas de neurônios ocultos, que, por sua vez, são ativadas por sinais de entrada aplicados na camada de entrada da rede. O processo descrito é ilustrado pela Figura 17:

Figura 17– Diagrama em blocos de uma RNA destacando o único neurônio da camada de saída



Fonte: adaptado de Haykin (1999)

Nesse contexto, o sinal de saída  $y_k(n)$  do neurônio  $k$  é comparado com uma resposta desejada  $d_k(n)$ , produzindo o sinal de erro  $e_k(n)$ , definido pela diferença  $e_k(n) = d_k(n) - y_k(n)$ . Esse sinal de erro aciona um mecanismo de controle que ajusta iterativamente os pesos sinápticos do neurônio  $k$  com o objetivo de minimizar uma função de custo  $\mathcal{E}(n)$  utilizando  $\mathcal{E}(n) = \frac{1}{2} e_k^2(n)$ , dessa forma  $\mathcal{E}(n)$  representa o valor instantâneo da energia do erro (Haykin, 1999).

O processo de ajuste continua até que o sistema alcance um estado estável, no qual os pesos sinápticos se estabilizam, encerrando o processo de aprendizado. A minimização da função de custo  $\mathcal{E}(n)$  resulta na regra de aprendizagem normalmente referida como **Regra Delta**, ou **Regra de Widrow-Hoff** (Widrow e Holf, 1960 *apud* Haykin, 1999), em homenagem aos seus criadores. Nesta abordagem, o ajuste de um peso sináptico  $w_{kj}$  é proporcional ao produto do sinal de erro pelo sinal de entrada na sinapse correspondente, sendo influenciado por uma constante positiva  $\eta$ , denominada **taxa de aprendizado** (Haykin, 1999). Na regra delta, o ajuste  $\Delta w_{kj}(n)$  aplicado ao peso sináptico  $w_{kj}$  no passo de tempo  $n$  é definido por  $\Delta w_{kj}(n) = \eta e_k(n) x_j(n)$ .

Após o cálculo do ajuste sináptico  $\Delta w_{kj}(n)$ , o valor atualizado do peso sináptico  $w_{kj}$  é determinado por  $w_{kj}(n+1) = w_{kj}(n) + \Delta w_{kj}(n)$ , sendo que  $w_{kj}(n)$  e  $w_{kj}(n+1)$  podem ser vistos como os valores antigo e novo do peso sináptico  $w_{kj}$  respectivamente. Em termos computacionais também podemos utilizar  $w_{kj}(n) = z^{-1}[w_{kj}(n+1)]$ , sendo que  $z^{-1}$  é o operador de atraso unitário, ou seja, representa um elemento de armazenamento. Assim, a correção de erro é local, atuando especificamente nos pesos em torno do neurônio  $k$ , permitindo que o neurônio se aproxime da resposta desejada fornecida pelo ambiente (Haykin, 1999).

A escolha de um algoritmo de aprendizagem em particular é influenciada pela tarefa de aprendizagem que uma rede neural deve executar. Nesse contexto, foram selecionadas as três principais tarefas de aprendizagem descritas por Haykin (1999) que se aplicam ao uso de redes neurais de uma forma ou de outra, sendo:

**Associação de Padrões:** A memória associativa é um tipo de memória distribuída, inspirada no funcionamento do cérebro, que aprende por meio da

associação de informações. Essa característica da associação é fundamental na memória humana e tem sido observada desde Aristóteles. Nos modelos de cognição, a associação desempenha um papel central, sendo utilizada como uma operação básica para a construção do conhecimento e a recuperação de informações. A ideia é que memórias ou informações armazenadas sejam acessadas ou evocadas com base em estímulos ou associações relacionadas, permitindo um aprendizado eficiente e adaptativo (Haykin, 1999).

A associação em redes neurais pode ocorrer de duas formas principais: **auto-associação** e **heteroassociação**.

Na **auto-associação**, a rede neural é treinada para armazenar um conjunto de padrões (representados por vetores), que são apresentados repetidamente. Posteriormente, ao receber uma versão parcial ou distorcida de um desses padrões, a rede deve ser capaz de recuperar o padrão completo original. Esse tipo de associação utiliza **aprendizagem não-supervisionada**, onde a rede aprende a partir dos dados sem receber respostas corretas para cada exemplo (Haykin, 1999).

Por outro lado, a **heteroassociação** envolve a associação entre dois conjuntos distintos de padrões, utilizando **aprendizagem supervisionada**. Nesse caso, a rede recebe pares de entrada e saída durante o treinamento, o que permite aprender uma relação direta entre um padrão de entrada e o padrão associado de saída (Haykin, 1999).

**Reconhecimento de Padrões:** é definido como o processo pelo qual um padrão ou sinal recebido é classificado em uma das categorias de um conjunto previamente estabelecido. Para que uma rede neural possa realizar essa tarefa, ela passa inicialmente por uma fase de treinamento, na qual é repetidamente exposta a um conjunto de padrões de entrada associados às respectivas categorias. Após esse treinamento, a rede é capaz de classificar novos padrões, ainda que estes não tenham sido previamente apresentados, mas pertençam a mesma população dos padrões utilizados no treinamento. Essa capacidade resulta das informações extraídas dos dados durante o treinamento, permitindo que a rede identifique a classe dos novos padrões apresentados. Esse reconhecimento possui natureza estatística, em que os padrões são representados por pontos em um espaço de decisão multidimensional (Haykin, 1999).

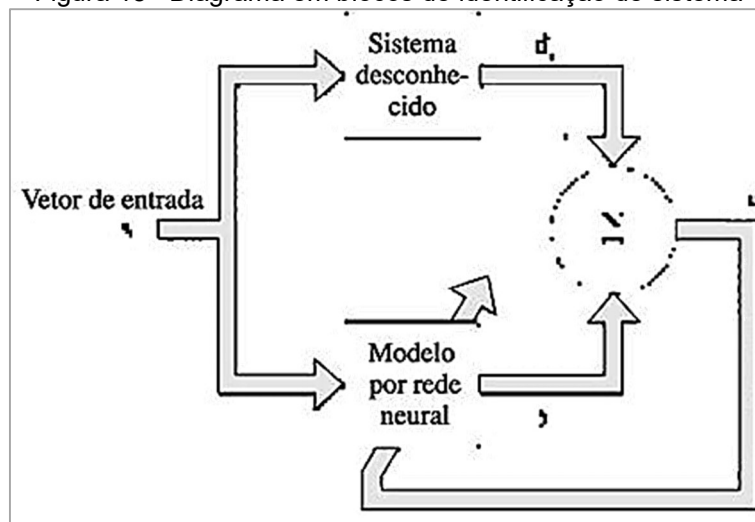
**Aproximação de funções:** Haykin (1999) descreve o processo de **aprendizagem supervisionada** como uma tarefa de aproximação de um mapeamento não-linear de entrada-saída, formalizado pela relação  $d = f(x)$ , onde  $x$  representa o vetor de entrada e  $d$ , o vetor de saída. Assume-se que a função vetorial  $f(.)$  é desconhecida. Para compensar essa ausência de conhecimento, utiliza-se um conjunto de exemplos rotulados  $T = \{(x_i, d_i)\}_{i=1}^N$ . O objetivo é desenvolver uma rede neural que aproxime adequadamente a função  $f(.)$ , de forma que a função  $F(.)$ , que representa o mapeamento de entrada-saída aprendido pela rede, seja próxima de  $f(.)$  em termos euclidianos para todas as entradas, ou seja,  $\|F(x) - f(x)\| < \epsilon$  para todo  $x$ , com  $\epsilon$  sendo um valor positivo pequeno.

Para atingir essa aproximação, é necessário que o conjunto de treinamento  $N$  seja suficientemente grande e que a rede possua um número adequado de parâmetros livres. Assim, o erro de aproximação  $\epsilon$  pode ser reduzido a um nível aceitável para a tarefa. Esse problema de aproximação ilustra bem o conceito de aprendizagem supervisionada, onde  $x_i$  atua como vetor de entrada e  $d_i$ , como a resposta desejada (Haykin, 1999).

De acordo com Haykin (1999), a habilidade de uma rede neural em aproximar um mapeamento desconhecido de entrada-saída pode ser aplicada de duas maneiras principais: **identificação de sistema** e **modelagem de sistema inverso**.

**Identificação de sistema** (Figura 18): Considerando um sistema *MIMO* (múltiplas entradas e múltiplas saídas) sem memória, descrito pela relação  $d = f(x)$ , onde  $x$  é o vetor de entrada e  $d$  o vetor de saída. Nesse contexto, podemos utilizar um conjunto de exemplos rotulados  $T = \{(x_i, d_i)\}_{i=1}^N$  para treinar uma rede neural a fim de modelar o sistema. Após o treinamento, ao apresentar um vetor  $x$  à rede, ela produzirá uma saída  $y$  que deve aproximar  $d$ . A diferença entre  $d_i$  e  $y_i$  gera um vetor de sinal de erro  $\epsilon_i$ , usado para ajustar os parâmetros da rede neural. Esse ajuste é feito para minimizar, em um sentido estatístico, o erro quadrático entre a saída do sistema e a saída da rede neural, calculado sobre o conjunto de treinamento (Haykin, 1999).

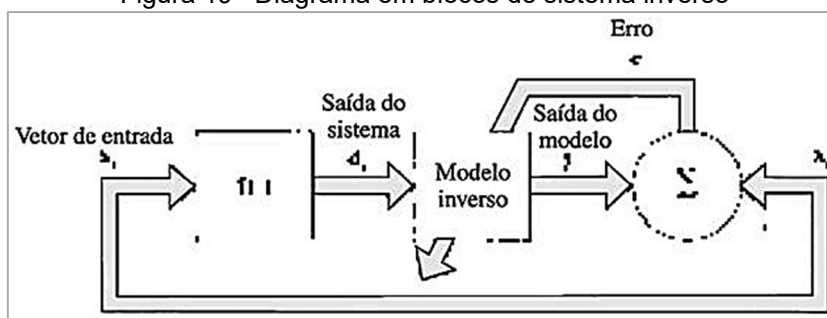
Figura 18– Diagrama em blocos de identificação de sistema



Fonte: adaptado de Haykin (1999)

**Sistema inverso:** Nesse caso, ao considerarmos um sistema *MIMO* conhecido, sem memória, descrito por  $d = f(x)$ , com o objetivo de construir um sistema inverso que seja capaz de gerar o vetor de entrada  $x$  em resposta a um vetor de saída  $d$ . Em outras palavras, queremos encontrar uma função inversa  $x = f^{-1}(d)$ , onde  $f^{-1}(\cdot)$  representa o mapeamento inverso de  $f(\cdot)$ . Na prática, a função  $f(\cdot)$  muitas vezes é complexa demais para se formular diretamente sua inversa  $f^{-1}(\cdot)$ . Para contornar essa dificuldade, podemos utilizar uma rede neural e o conjunto de exemplos  $T = \{(x_i, d_i)\}_{i=1}^N$  para aproximar  $f^{-1}(\cdot)$ , treinando a rede para que a entrada seja  $d_i$  e a resposta desejada seja  $x_i$ . Assim como no problema de identificação de sistemas, o sinal de erro  $\epsilon_i$ , que representa a diferença entre  $x_i$  e a saída  $y_i$  da rede neural, é utilizado para ajustar os parâmetros da rede de modo a minimizar o erro quadrático entre o sistema inverso e a rede neural (Haykin, 1999). Esse sistema é ilustrado na Figura 19:

Figura 19– Diagrama em blocos de sistema inverso



Fonte: adaptado de Haykin (1999)

Em ambos os casos, a rede neural é treinada com base no erro calculado sobre o conjunto de treinamento, ajustando seus parâmetros para melhorar a aproximação do mapeamento desejado (Haykin, 1999).

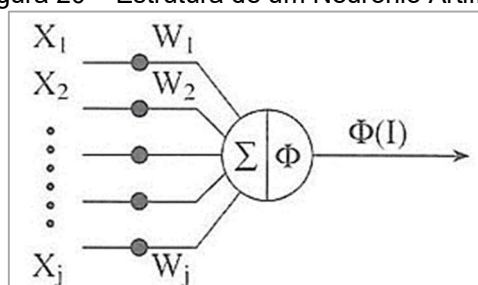
#### 2.3.2.1. Redes Neurais Artificiais (RNAs)

Segundo Haykin (1999), uma rede neural é um processador amplamente distribuído e paralelo, constituído de unidades de processamento simples, com uma tendência natural para armazenar conhecimento experimental e disponibilizá-lo uso posterior. De maneira geral, uma rede neural pode ser descrita como uma máquina projetada para modelar a forma como o cérebro realiza tarefas específicas ou funções de interesse. Além disso, as redes neurais compartilham dois aspectos fundamentais ao cérebro humano:

- O conhecimento é adquirido pela rede a partir de seu ambiente por meio um processo de aprendizagem.
- As forças de conexão entre os neurônios, conhecidas como pesos sinápticos, são responsáveis por armazenar o conhecimento adquirido.

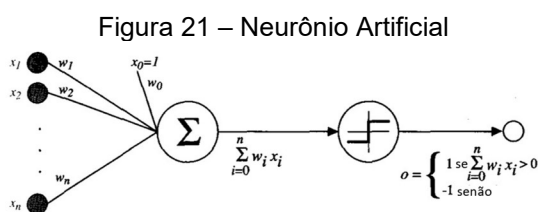
Para Simões e Shaw (2007), as redes neurais, por meio de algoritmos apropriados, constituem estruturas computacionais capazes de realizar o treinamento, ou aprendizado, de relações entre dados de entrada e saída, reconhecimento de padrões e correlações, entre outras aplicações. As Redes Neurais Artificiais (RNA) assemelham-se a suas contrapartes biológicas. Diferentemente das unidades computacionais tradicionais, que utilizam processadores complexos, as RNAs consistem em um grande número de unidades computacionais simples, denominadas neurônios artificiais (Figura 20), que estão interconectadas por meio de diversas vias de comunicação.

Figura 20 – Estrutura de um Neurônio Artificial



Fonte: Adaptado de Simões e Shaw (2007)

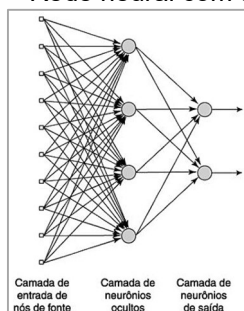
Um neurônio artificial é uma unidade de processamento fundamental dentro de uma rede neural, inspirado por analogias neurobiológicas (Haykin, 1999). De acordo com Rosenblatt (1958), sistemas como o *Perceptron* permitem a compreensão das leis fundamentais dos sistemas de manipulação de informações. O *Perceptron* foi o primeiro algoritmo desenvolvido para redes neurais, inspirado em neurônios humanos e baseado em equações. Ele é capaz de reconhecer padrões por meio de aprendizado que envolve tentativas e erros, resultando em sequências ordenadas de respostas. A Figura 21 ilustra um neurônio *Perceptron*, onde as variáveis de entrada ( $x$ ) e seus respectivos pesos ( $w$ ) são somadas e submetidas a uma função de limiar, gerando uma saída.



Fonte: Adaptado de Mitchell (1997)

Embora o *Perceptron* tenha alcançado bons resultados em problemas lineares, sua incapacidade de resolver questões não lineares limitou sua aplicabilidade. Somente com o desenvolvimento do algoritmo *backpropagation* foi possível superar essas limitações, permitindo o uso de múltiplas camadas de neurônios *Perceptron* para classificar problemas não lineares (Figura 22). Esse avanço permitiu a criação de redes neurais com, no mínimo, três camadas: entrada, oculta e saída. Nestas redes, os pesos dos neurônios podem ser ajustados para reduzir o erro entre as classificações obtidas e as corretas, utilizando o método do gradiente descendente (Mitchell, 1997).

Figura 22 – Rede neural com 3 camadas



Fonte: adaptado de Haykin (1999)

Existem diversos tipos de redes neurais, e todas compartilham a característica essencial de mapear funções que conectam um vetor de entrada a um vetor de saída. Conforme Simões e Shaw (2007), as redes neurais *feedforward* com o algoritmo *backpropagation* se destacaram devido à sua capacidade de resolver a maioria dos problemas de reconhecimento de padrões, além de sua aplicação em sistemas de controle.

De acordo com Simões e Shaw (2007), as redes neurais possuem características inteligentes altamente relevantes, tais como: aprendizado, adaptação, tolerância a falhas e generalização. Ressalta-se que o principal benefício da utilização de redes neurais está na sua capacidade de reconhecer padrões, caracteres e formas, além de possibilitar a estimação de funções não lineares, previsões financeiras e controle de processos. No entanto, os autores destacam também algumas limitações que devem ser consideradas:

- Não é possível determinar com precisão o processo pelo qual uma rede neural chega a uma solução específica. Nesse sentido, as redes neurais assemelham-se a muitos especialistas humanos, que podem expressar uma opinião sem ter uma explicação plausível para tal.
- A análise das conexões e pesos de uma rede neural não permite a interpretação das causas de um comportamento particular, nem é possível ajustar manualmente sua estrutura para obter o comportamento desejado.
- A maioria dos métodos de treinamento não é totalmente compreendida, uma vez que, além de dependerem de um enfoque baseado em tentativa e erro, existem poucas regras formais de projeto. Por exemplo, a definição do número de neurônios ou a escolha de uma faixa específica de convergência são geralmente determinadas por meio da experimentação com os dados.
- O tempo de treinamento é imprevisível e, em alguns casos, pode ser excessivamente longo. Por essa razão, o retreinamento "on-line", comumente necessário para sistemas de autoajuste, só é viável para sistemas com dinâmica muito lenta.

O tempo de execução é diretamente influenciado pelo número de conexões, sendo aproximadamente proporcional ao quadrado do número de neurônios



utilizados. Isso implica que a adição de poucos neurônios pode aumentar significativamente o tempo de execução.

Em projetos baseados em controle inteligente, as soluções mais promissoras são aquelas que combinam as características da lógica *Fuzzy* com redes neurais. Os sistemas *Neuro-Fuzzy* consistem em redes neurais que, de alguma forma, são capazes de gerar as regras e/ou funções de pertinência para os sistemas *Fuzzy*. Em contrapartida, também existem as Redes *Fuzzy* Neurais (RFN), que utilizam princípios da lógica *Fuzzy* dentro da rede neural. Um exemplo dessa combinação é a fuzzificação dos dados de entrada da RNA (Simões; Shaw, 2007).

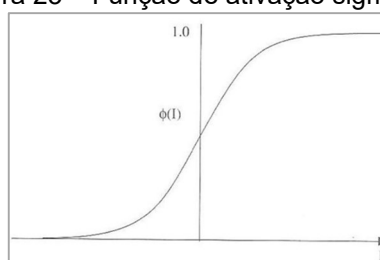
O algoritmo *backpropagation* possibilita o treinamento de redes neurais compostas por camadas de entrada, ocultas e de saída. Durante o treinamento, um padrão de entrada é apresentado à inicial, propagando-se a atividade pelos neurônios até que se obtenha o padrão de saída. Dado que a saída desejada é previamente conhecida, o processo caracteriza-se como **aprendizado supervisionado**. O erro entre o padrão de saída gerado e o esperado é então calculado e retropropagado pelas camadas anteriores, resultando no ajuste dos pesos das conexões entre os neurônios (Simões; Shaw, 2007).

Um neurônio típico possui diversas entradas ( $x_i$ ), sendo cada uma ponderada pelos seus respectivos pesos ( $w_i$ ), conforme apresentado na Equação 11. O somatório das entradas ponderadas é então submetido a uma função de ativação, geralmente não linear, como a função sigmoide, ilustrada na Equação 12 e na Figura 23:

$$I = \sum_{i=1}^n w_i x_i \quad (11)$$

$$\phi(I) = \frac{1}{1 + e^{-I}} \quad (12)$$

Figura 23 – Função de ativação sigmoide



Fonte: adaptado de Simões e Shaw (2007)

O objetivo do *backpropagation* é estimar e reduzir o erro através do ajuste dos pesos das sinapses (conexões entre os neurônios). Esse processo busca minimizar a função de erro por meio do método dos mínimos quadrados, ou seja, ajustando o vetor de pesos na direção em que a derivada parcial do erro em relação a cada peso é negativa. Ao encontrar o ponto onde o gradiente é zero, pode-se determinar um mínimo, mas que nem sempre é o mínimo global, porém existem métodos que permitem continuar a busca, mesmo após encontrar mínimos locais (Simões; Shaw, 2007).

A regra delta generalizada do *backpropagation* é descrita pela Equação 13:

$$\Delta\omega_{ij} = -\beta \frac{\partial E}{\partial \omega_{ij}} \quad (13)$$

Nessa equação,  $\omega_{ij}$  representa o peso  $\omega$  da entrada  $x_j$ , e  $\Delta\omega$  é a variação incremental desse peso. O coeficiente de aprendizado é representado por  $\beta$ , e  $E$  é a função de erro em relação ao peso modificado. A Equação 14 expressa o gradiente descendente entre as camadas oculta e de saída:

$$\Delta\omega_j = \beta E_j \phi(I) = \beta (y_j^{\text{esperado}} - y_j^{\text{obtido}}) \phi(I) \quad (14)$$

A diferença entre o valor obtido e o esperado determina a modificação dos pesos. No caso das conexões entre a camada de entrada e a oculta, um processo mais complexo é necessário, envolvendo a derivada da função sigmoideal (Equação 15), como ilustrado na Equação 16:

$$\frac{d\phi(I)}{dI} = \phi(I) \cdot [1 - \phi(I)] \quad (15)$$

$$\Delta\omega_{ij} = \beta \phi_k(I) [1 - \phi_k(I)] \sum_{k=1}^n \omega_{jk} E_k^{\text{saida}} \phi_k(I) \quad (16)$$

A Equação 16 descreve a relação entre o erro da saída e o peso envolvido. Quando o coeficiente de aprendizado  $\beta$  é muito baixo, o gradiente descendente pode ser lento. Por outro lado, se for muito alto, pode resultar em oscilações. A inclusão de um termo de momento  $\alpha$  pode melhorar o desempenho, proporcionando uma inércia

nas atualizações dos pesos. A Equação 17 apresenta a alteração da regra delta para incluir esse comportamento.

$$\Delta\omega_{ij} = -\beta \frac{\partial E}{\partial \omega_{ij}} + \alpha(\Delta\omega_{ij})_{anterior} \quad (17)$$

#### 2.3.2.2. Sistemas Adaptativos *Neuro-Fuzzy* (ANFIS)

A lógica *Fuzzy* pode ser integrada às redes neurais, formando os chamados sistemas *Neuro-Fuzzy*, que ampliam a capacidade de aprendizado ao interagir com dados numéricos. Esses sistemas têm obtido reconhecimento global em uma ampla variedade de aplicações, incluindo processos industriais, manufatura, interfaces de comunicação homem-máquina e sistemas de tomada de decisão (Simões; Shaw, 2007).

O *Neuro-Fuzzy* é uma variação das técnicas de *Fuzzy*, onde as funções de pertinência são definidas através do uso de rede neural em um aprendizado supervisionado, em outras palavras a rede neural é treinada sobre um conjunto de dados rotulados e sua saída é o conjunto de regras e/ou funções de pertinência que serão utilizados no sistema de inferência *Fuzzy*. Através do algoritmo *backpropagation*, os parâmetros são ajustados para aproximar o resultado obtido do resultado esperado (Jang, 1993).

O *Neuro-Fuzzy* representa uma integração criteriosa dos méritos das abordagens neurais e *Fuzzy*, possibilitando a construção de sistemas de tomada de decisão mais inteligentes. Esta integração incorpora as vantagens genéricas das redes neurais artificiais, tais como o paralelismo massivo, robustez e aprendizado em ambientes ricos em dados, juntamente com a capacidade de modelar o conhecimento impreciso, qualitativo e transmitir a incerteza, por meio da lógica *Fuzzy*. Adicionalmente, além dessas vantagens genéricas, é possível obter vantagens específicas da aplicação correspondente (Mitra; Hayashi, 2000).

Cervantes *et al.* (2017) enfatizam que o *Neuro-Fuzzy* é uma fusão entre a lógica *Fuzzy* e as redes neurais artificiais (RNA), com aplicações na modelagem e controle. Esses métodos exploram as capacidades de aprendizado e eficiência computacional das redes neurais em implementações paralelas, além da estrutura que oferece

Sistemas de Inferência *Fuzzy* (SIFs) para representação de conhecimento especializado. Os autores também destacam que a motivação para combinar esses dois esquemas reside na superação das principais desvantagens de cada abordagem individualmente, como o comportamento de "caixa-preta" das RNAs e o desafio de encontrar valores de associação adequados para os SIFs. O *Neuro-Fuzzy* é especialmente adequado para aplicações que exigem a interação do usuário no projeto ou interpretação do modelo. Essa classe de controle *Fuzzy* oferece uma nova abordagem para resolver problemas de controle que envolvem modelos matemáticos complexos ou situações de incerteza no modelo.

De acordo com Feng e Chen (2020), a integração do estilo de raciocínio humano, fundamentado em um conjunto de regras *Fuzzy* do tipo SE-ENTÃO, com a estrutura de aprendizagem e conexão com rede neural artificial, resulta em um sistema híbrido denominado modelo *Neuro-Fuzzy*. Esta abordagem detém o potencial de mitigar, em certa medida, os principais desafios enfrentados tanto por redes neurais quanto por sistemas *Fuzzy*. Tais desafios incluem a limitação das redes neurais em explicar o conhecimento adquirido e a dependência da expertise de especialistas na definição das bases de regras *Fuzzy*.

### 3. REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

Para o presente trabalho foi realizada revisão sistemática da literatura para identificar estudos relacionados ao objeto de pesquisa. A metodologia utilizada segue os princípios propostos por Kitchenham (2007), amplamente aplicada na área de Engenharia de Software. Esse método propõe a **identificação**, **avaliação** e **interpretação** de todos os estudos primários pertinentes ao tema de interesse, garantindo um levantamento sistemático e rigoroso.

#### 3.1. QUESTÕES DE PESQUISA

A fim de alcançar o objetivo desta revisão, foram formuladas quatro questões de pesquisa que abordam tanto métodos convencionais quanto métodos mais avançados, conforme mostrado no Quadro 18:

Quadro 18 – Questões de pesquisa para a Revisão Sistemática da Literatura

Identificação	Questão de pesquisa
Q1	Quais são as principais metodologias utilizadas para avaliar a usabilidade e Experiência do Usuário?
Q2	Como avaliar a efetividade de Laboratórios Remotos?
Q3	Quais técnicas inteligentes podem ser utilizadas para avaliação de usabilidade?
Q4	Quais dados são utilizados para avaliar a usabilidade por meio de técnicas inteligentes?

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Para identificar conceitos relevantes abordados na revisão, foram aplicados os critérios *PICOC* (População, Intervenção, Comparação, Resultados e Contexto) que define critérios essenciais para guiar a coleta e análise dos estudos. Esses critérios foram adotados conforme abordagem de Kitchenham (2007), como descrito no Quadro 19:

Quadro 19 – Definição dos critérios *PICOC*

Critério	Descrição
População	Ferramentas <i>web</i>

<b>Intervenção</b>	Mensuração de usabilidade e Experiência do Usuário
<b>Comparação</b>	Dados coletados e análise utilizada
<b>Resultados</b>	Estudos em que são aplicadas metodologias para mensuração de usabilidade e Experiência do Usuário em ferramentas <i>web</i> (priorizando laboratórios remotos)
<b>Contexto</b>	Acadêmico

Fonte: Adaptado de Kitchenham (2007)

O Quadro 19 apresenta os critérios *PICOC*, que orientam a seleção dos estudos para a presente revisão sistemática. O objetivo foi identificar trabalhos que aplicaram metodologias (resultados) para mensuração de usabilidade e Experiência do Usuário (intervenção) em ferramentas web (população), priorizando estudos em laboratórios remotos. Esses estudos foram analisados dentro de um contexto acadêmico (contexto), buscando realizar comparações entre os dados coletados e a análise aplicada (comparação).

Após a definição das questões e critérios de pesquisa, foram estabelecidos os construtos de termos de busca para consulta nas bases de dados. Esses termos foram definidos para cobrir os tópicos de interesse, conforme ilustrado no Quadro 20.

Quadro 20 – Construtos de termos de busca para pesquisa nas bases de dados

<b>Construto de pesquisa</b>	<b>Termos em português</b>	<b>Termos em inglês</b>
<b>C1</b> – usabilidade e UX	“usabilidade” OU “Experiência do Usuário”	<i>“usability” OR “user experience” OR “ux”</i>
<b>C2</b> – Laboratórios Remotos	“Laboratório Remoto”	<i>“remote lab”</i>
<b>C3</b> – Técnicas Inteligentes	“rede neural artificial” OU “árvores de decisão” OU “fuzzy” OU “aprendizagem de máquina”	<i>“artificial neural network” OR “decision tree” OR “fuzzy” OR “machine learning”</i>
<b>C4</b> – Web Analytics	“Web Analytics”	<i>“Web Analytics”</i>
<b>C5</b> – Avaliação e mensuração	“mensuração” OU “avaliação”	<i>“measurement” OR “evaluation”</i>

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

A utilização dos termos de busca definidos no Quadro 20 permitiu uma ampla consulta nas bases de dados, cobrindo as principais áreas de interesse relacionadas à usabilidade, Experiência do Usuário, laboratórios remotos e técnicas inteligentes. Esses termos possibilitaram a identificação de um conjunto relevante de estudos que respondem às questões de pesquisa propostas.

### 3.2. PROCESSO DE PESQUISA

Foram realizadas pesquisas nas bases *Web of Science*, *IEEE* e *Compendex (Engineering Village)*, escolhidas por serem amplamente utilizadas e possuírem um grande número de publicações relacionadas aos temas laboratórios remotos, usabilidade, Experiência do Usuário e técnicas inteligentes, especialmente as aplicadas em regressão e classificação (Redes neurais artificiais, Aprendizado de máquina, Árvores de decisão e *Fuzzy*).

As pesquisas iniciais que combinaram todos os termos de interesse não obtiveram resultados. Diante disso, optou-se por fragmentar os termos de busca e realizar múltiplas consultas, relacionando-as por seus aspectos em comum. As pesquisas foram realizadas no período de 2021 a 2024, com os dados bibliométricos atualizados em setembro de 2024, conforme demonstrado na Tabela 2.

Tabela 2 – Resultados das pesquisas (publicações)

Consulta	Construtos	Compendex		Web of Science		IEEE	
		Total	Journals	Total	Journals	Total	Journals
<b>CN 1</b>	C1	392.988	116.838	106.503	57.407	91.840	12.406
<b>CN 2</b>	C1 AND C3	6.399	1.731	4.500	2.589	6.469	959
<b>CN 3</b>	C1 AND C3 AND C5	5.368	1.665	1.165	716	3.044	572
<b>CN 4</b>	C1 AND C3 AND C5 AND C4	2	1	3	2	2	1
<b>CN 5</b>	C1 AND C2 AND C5	23	10	17	9	70	16
<b>CN 6</b>	C1 AND C4 AND C5	31	4	25	11	11	0
<b>CN 7</b>	C1 AND C2 AND C3	0	0	0	0	0	0
<b>CN 8</b>	C1 AND C2 AND C5 AND C4	0	0	0	0	0	0

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

As pesquisas começaram com consultas de maior abrangência, como CN 1, CN 2 e CN 3, que incluíram conceitos gerais de usabilidade e Experiência do Usuário. Posteriormente, foram aplicados termos mais específicos para refinar os resultados, focando no objeto de pesquisa principal.

Analisando os resultados da Tabela 2, observa-se que os temas usabilidade e Experiência do Usuário são amplamente explorados em várias publicações. Entretanto, ao acrescentar termos relacionados a laboratórios remotos e técnicas inteligentes, nota-se que esses são nichos mais restritos e emergentes, com menos publicações encontradas. Isso evidencia que o campo de estudo ainda tem potencial para novas pesquisas e desenvolvimento, especialmente nas interseções entre esses temas.

### 3.3. SELEÇÃO DE ESTUDOS

A consulta CN1 revela um aumento contínuo de publicações sobre usabilidade e Experiência do Usuário, demonstrando a relevância e evolução do tema ao longo dos anos. A Tabela 3 reflete o interesse crescente na área, especialmente nos últimos cinco anos, corroborando com a proposta deste estudo.

Tabela 3 – Publicações dos últimos 5 anos obtidas pela **CN 1**

Ano	<i>Compendex</i>		<i>Web of Science</i>		<i>IEEE</i>	
	Total	Journals	Total	Journals	Total	Journals
<b>2024</b>	21.710	7.971	5.646	4.732	5.963	1.303
<b>2023</b>	31.746	9.906	9.277	6.668	9.701	1.384
<b>2022</b>	27.246	9.543	9.875	6.662	7.034	1.232
<b>2021</b>	25.150	8.472	9.278	6.025	6.378	1.085
<b>2020</b>	24.201	7.635	8.222	5.231	5.667	1.091

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

A consulta CN 2, que abrange usabilidade, Experiência do Usuário e técnicas inteligente, também apresentou uma quantidade significativa de publicações, validando a pertinência do tema no contexto acadêmico.

A Tabela 4 mostra uma tendência crescente de publicações relacionadas à usabilidade, Experiência do Usuário e técnicas inteligentes (CN 2) nos últimos cinco anos. Embora o tema tenha relevância, observou-se que muitos estudos mencionam



usabilidade, porém não aplicam métodos de mensuração. A inclusão do construto C5 filtrou os estudos que efetivamente aplicaram métodos de avaliação de usabilidade, resultando na consulta CN 3.

Tabela 4 – Publicações dos últimos 5 anos obtidas pela CN 2

Ano	Compendex		Web of Science		IEEE	
	Total	Journals	Total	Journals	Total	Journals
2024	1.020	328	425	342	965	206
2023	1.249	332	642	455	1332	140
2022	994	308	660	431	735	140
2021	844	263	566	358	613	106
2020	752	165	469	284	530	106

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Ao analisar as publicações resultantes da consulta CN 3, muitas focam na usabilidade de técnicas inteligentes, como Aggarwal e Tiwari (2016) e Güzel e Çolak (2022), ou em abordagens de visão computacional e análise de expressões faciais, consideradas fora do escopo deste estudo.

Alguns estudos analisaram as respostas de questionários utilizando o método de decisão multicritério com o suporte do *Fuzzy*, como observado em Fernández-Pérez *et al.* (2018) e Muhammad *et al.* (2021). Embora tais abordagens tenham sido consideradas fora do escopo principal desta pesquisa devido a necessidade de coleta manual dos dados, dois trabalhos foram incluídos. O estudo de Fernández-Pérez *et al.* (2018) foi incorporado por ser uma revisão bibliométrica que amplia as aplicações do método *Fuzzy* em diversos trabalhos, enquanto Muhammad *et al.* (2021) apresentou detalhes sobre o uso do *Fuzzy* que foram relevantes para este estudo. Outros trabalhos foram descartados por não apresentarem um detalhamento relevante ao presente trabalho na aplicação do *Fuzzy* para mensuração de usabilidade.

A análise das abordagens demonstrou que o campo de mensuração de usabilidade utilizando técnicas inteligentes ainda carece de maior desenvolvimento e especificidade. Embora a consulta tenha gerado um grande número de resultados, muitos dos trabalhos apresentavam o contexto diretamente no título, o que permitiu a exclusão de grande parte. Nos casos em que o título indicava proximidade ou não

deixava claro o contexto, os resumos foram avaliados, e, quando estes sugeriram relevância, os artigos foram analisados quanto à metodologia e conclusões.

Durante a seleção, foram encontrados alguns estudos que propuseram alternativas para a avaliação automatizada de usabilidade com o uso de técnicas inteligentes, aproximando-se da proposta deste trabalho (Agbozo, 2023; Bakaev *et al.*, 2017; Bakaev; Khvorostov; Laricheva, 2017; Ponte; Silveira, 2008; Rausanfita; Rochimah, 2020; Sahi, 2018; Stanca; Lacurezeanu; Felea, 2014). Contudo, esses estudos utilizaram diferentes fontes de dados, como, por exemplo, comentários da rede social *Stack Overflow* (Rausanfita; Rochimah, 2020).

As pesquisas consideraram publicações dos últimos cinco anos (a partir de 2016) em *journals*, mas apenas um estudo relevante foi encontrado (Bakaev; Khvorostov; Laricheva, 2017). Para garantir a inclusão de trabalhos relevantes, mesmo fora desse período, foram incluídos estudos de congressos com grande proximidade ao tema, como o de Ponte e Silveira (2008), que, apesar de ter sido publicado antes do período estipulado, possui relevância significativa. Essa flexibilidade foi necessária para garantir que estudos fundamentais não fossem negligenciados, ainda que fora do escopo temporal.

Ponte e Silveira (2008), propõem um sistema especialista utilizando RNA (Redes Neurais Artificiais – aprendizagem supervisionada) com *MLP (Multilayer Perceptron)* e o algoritmo *backpropagation* para avaliação de usabilidade baseado em heurísticas onde os usuários respondem um questionário e as respostas são utilizadas como entradas a esse sistema. Resultando em uma escala de 0 a 100% para a usabilidade onde até 33% é inaceitável, até 51% é o mínimo aceitável e até 81% é o objetivo e valores maiores são acima da expectativa, essa proposta foi realizada em busca de preencher a lacuna no contexto acadêmico causada pela carência de metodologias de avaliação da usabilidade aplicada a software de automação industrial.

Stanca, Lacurezeanu e Felea (2014) utilizaram *RBF* (Função de Bases Radial), *LNN* (Rede Neural Linear), *PNN* (Rede Neural Probabilística), *MLP-4 (Multilayer Perceptron com 4 camadas – aprendizagem supervisionada)*, *K-Means* (aprendizagem não supervisionada) e técnicas estatísticas para analisar dados da avaliação de usabilidade com 16 especialistas que realizaram 2 iterações em cada um

dos websites de 5 principais empresas de turismo romanas, tendo como objetivo avaliar sob a teoria das decisões dinâmicas se haveria mudança na tomada de decisão em relação a usabilidade de uma iteração para a outra, tendo como resultado a divisão dos especialistas em dois grupos (aqueles que mantiveram a primeira opinião e aqueles que se tornaram mais exigentes na segunda iteração).

Bakaev *et al.* (2017), propõem um modelo de RNA (aprendizagem supervisionada) para comparação de similaridade quando ocorre o redesenho do software para evitar que o usuário necessite reaprender a utilizar o software e prejudique sua usabilidade, essa proposta não conseguiu resultados significativos e os autores relatam a necessidade de uma análise mais profunda nas métricas e coleta de um conjunto mais completo de avaliações, deixando a proposta pendente para trabalhos futuros.

Enquanto Bakaev, Khvorostov e Laricheva (2017) ressaltam que a avaliação da qualidade da interação na web é amplamente realizada com métodos tradicionais de esforço humano intensivo, principalmente devido à inevitável associação da usabilidade com contextos específicos de uso, público-alvo e tarefas. Por isso implementaram uma RNA (aprendizagem supervisionada) para predição da usabilidade de 21 sites de universidades, utilizando como entradas as respostas de um questionário com escala *likert* de 7 elementos para os seguintes aspectos: bonito, evidente, divertido confiável e utilizável e também com os dados pessoais dos participantes (gênero, nível acadêmico, idade e idioma). Esse estudo conseguiu desempenho melhor que um estudo anterior utilizando fuzzy, porém ainda resultou em um alto erro médio relativo (0,737) sendo que apenas os aspectos de senso comum (bonito e divertido) alcançaram uma melhor performance.

Sahi (2018), aplicou RNA com o algoritmo *backpropagation* (aprendizagem supervisionada) para analisar dados obtidos por meio de questionários de mensuração de usabilidade em sites de comércio eletrônico, com a utilização de 4 variáveis de entrada e 3 neurônios na camada oculta foi possível prever a utilidade percebida com erro médio quadrático de 0,066 demonstrando a possibilidade de prever métricas de usabilidade com uso de RNAs.

Rausanfita e Rochimah (2020), utilizam-se de mineração de texto e aplicação de técnicas inteligentes como: *Naive Bayes*, *SVM (Support Vector Machine)*, *Random*

*Forest*, Redes Neurais e Regressão Logística (aprendizagem supervisionada) para analisar a usabilidade na rede social *Stack Overflow* através da classificação dos comentários postados, por meio desse estudo conseguiram obter 20 aspectos da usabilidade, esses aspectos não foram detalhados e também não há comparação com outras técnicas de avaliação de usabilidade.

Muhammad *et al.* (2021), consideram a avaliação de usabilidade um problema de tomada de decisão multicritério (MCDM) e desenvolveram um estudo da interface de usuários para avaliar sites de instituições de ensino, após a aplicação de questionários é utilizada a metodologia FAHP (processo de hierarquia analítica *Fuzzy*) definindo pesos aos critérios mensurados, esse estudo utilizou análise e decisão multicritério para compreender as métricas que impactavam na usabilidade resultando em um *framework* para melhoria do design desses sites que contribua em sua usabilidade.

Agbozo (2023) utilizou o algoritmo *K-means* (aprendizagem não-supervisionada) para agrupar usuários de uma plataforma web utilizando os seguintes atributos: pontuação obtida pelo questionário *SUS*, tempo de uso do sistema e uma pontuação de revisão do sistema que foi obtida por meio de um modelo de PNL para análise de sentimentos. Esse trabalho gerou dois clusters, sendo que o valor obtido pela pontuação de revisão teve maior relação com a pontuação *SUS* que o tempo de uso da ferramenta. Esse estudo foi um piloto com a intenção de aplicar clusterização a partir da pontuação *SUS*.

Os estudos analisados utilizaram diferentes tipos de dados para suas análises, e nenhum deles aplicou dados de *Web Analytics* como variáveis de entrada para técnicas inteligentes. Entre os trabalhos analisados, nenhum método resultou em uma avaliação de usabilidade satisfatória (conforme conclusões dos trabalhos). Os Quadros 21, 22, 23 e 24 apresentam os critérios de inclusão e exclusão utilizados nas consultas 3, 4, 5 e 6, respectivamente, com flexibilizações em alguns casos devido ao baixo número de resultados relevantes.

Quadro 21 – Critérios de seleção das publicações consideradas na CN 3

Consulta	Seleção	Critérios de seleção	Descrição do critério
CN 3	Excluído	Fora do escopo	Falta de método para sua mensuração

<b>CN 3</b>	<b>Excluído</b>	Fora do escopo	Usabilidade em técnicas inteligentes
<b>CN 3</b>	<b>Excluído</b>	Fora do escopo	Análise automatizada com dados coletados manualmente
<b>CN 3</b>	<b>Excluído</b>	Fora do escopo	Visão computacional para avaliar usabilidade por meio de expressões faciais
<b>CN 3</b>	<b>Incluído</b>	<i>Journals</i>	Artigos revisados por pares, em journals duplo-cego
<b>CN 3</b>	<b>Incluído</b>	Artigos de congresso	Relevância e proximidade com o tema, citados em <i>journals</i>

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

A consulta CN 4 introduziu o conceito de *Web Analytics* na pesquisa, mas gerou poucos resultados relevantes. O número limitado de publicações sugere que a combinação de *Web Analytics* com técnicas inteligentes para mensuração de usabilidade ainda é um nicho pouco explorado. A pesquisa realizada em três bases resultou em cinco publicações, das quais uma foi retratada e desconsiderada. Três publicações apresentaram proximidade com o presente trabalho e foram incluídas (Gardey *et al.*, 2024; Kumar *et al.*, 2023; Sakas *et al.*, 2022), enquanto uma foi descartada por não possuir proximidade com o contexto. Devido à baixa quantidade de publicações obtidas nesta consulta, o escopo foi ampliado para incluir artigos de congresso.

Quadro 22 – Critérios de seleção das publicações consideradas na CN 4

<b>Consulta</b>	<b>Seleção</b>	<b>Critérios de seleção</b>	<b>Descrição do critério</b>
<b>CN 4</b>	<b>Excluído</b>	Não vigente	Artigo retratado
<b>CN 4</b>	<b>Excluído</b>	Fora de escopo	Artigos que utilizam técnicas inteligentes para <i>Web Analytics</i> ao invés de mensuração de usabilidade
<b>CN 4</b>	<b>Incluído</b>	<i>Journals</i>	Artigos que passaram por revisão por pares duplo-cega

<b>CN 4</b>	<b>Incluído</b>	Artigos de congresso	Artigos de congresso relevantes, com proximidade e que utilizam referências de journals
-------------	-----------------	----------------------	---

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

A consulta CN 5 foi elaborada para ampliar a quantidade de publicações analisadas, removendo o termo *Web Analytics* e focando em trabalhos relacionados à avaliação de usabilidade em Laboratórios Remotos, conforme a proposta do presente trabalho. Devido ao baixo número de publicações relevantes, foi necessária a flexibilização dos critérios de inclusão, permitindo a consideração de artigos anteriores ao período estabelecido e de publicações em congressos, como Chacon *et al.* (2015), Luthon e Larroque (2014) e Martinez, Garcia-Zubia e Martinez-Pieper (2015). As publicações encontradas foram avaliadas conforme contexto e critérios estabelecidos, priorizando *journals* com revisão por pares duplo-cega. No entanto, alguns artigos de congressos foram incluídos por terem sido citados nos *journals* e por sua relevância ao presente trabalho.

Quadro 23 – Critérios de seleção das publicações consideradas na CN 5

<b>Consulta</b>	<b>Seleção</b>	<b>Critérios de seleção</b>	<b>Descrição do critério</b>
<b>CN 5</b>	<b>Excluído</b>	Não vigente	Artigo retratado
<b>CN 5</b>	<b>Excluído</b>	Fora de escopo	Artigos que utilizam técnicas inteligentes para <i>Web Analytics</i> ao invés de mensuração de usabilidade.
<b>CN 5</b>	<b>Excluído</b>	Artigos de congresso	Artigos que não passaram por revisão por pares duplo-cega
<b>CN 5</b>	<b>Excluído</b>	Fora de escopo	Artigos que não descrevem o método utilizado para avaliação
<b>CN 5</b>	<b>Incluído</b>	<i>Journals</i>	Artigos que passaram por revisão por pares duplo-cega
<b>CN 5</b>	<b>Incluído</b>	Artigos de congresso citados por trabalhos incluídos	Artigos de congresso citados em <i>journals</i> selecionados

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

A consulta CN 6 foi realizada para identificar a aplicação de *Web Analytics* na mensuração de usabilidade ou Experiência do Usuário. A maioria dos resultados obtidos mencionava usabilidade ou Experiência do Usuário, mas poucos utilizavam *Web Analytics* para mensuração. Devido à proximidade com a proposta deste trabalho, três estudos foram selecionados: *Web Analytics for User Experience: A Systematic Literature Review* (Palomino; Paz; Moquillaza, 2021), *UX-Analyzer: Visualizing the interaction effort for Web Analytics* (Gardey et al., 2024) e *E-Commerce Website Usability Analysis Using the Association Rule Mining and Machine Learning Algorithm* (Kumar et al., 2023).

Quadro 24 – Critérios de seleção das publicações consideradas na CN 6

Consulta	Seleção	Critérios de seleção	Descrição do critério
CN 6	Excluído	Fora de escopo	Artigos que não descrevem o método utilizado para avaliação
CN 6	Incluído	<i>Journals</i>	Artigos que passaram por revisão por pares duplo-cega
CN 6	Incluído	Artigos de congresso	Artigos de congresso relevantes, com proximidade e que utilizam referências de <i>journals</i>

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

As consultas CN 7 e CN 8 demonstraram as pesquisas iniciais que relacionam os temas abordados na metodologia proposta. Nenhuma publicação relevante foi encontrada, o que destaca o ineditismo do objeto de estudo.

### 3.4. EXTRAÇÃO DE DADOS

Após a realização das consultas, os artigos incluídos foram analisados detalhadamente. Além dos artigos inicialmente identificados, também foram incluídos trabalhos relevantes mencionados nas referências desses artigos. Esse processo resultou em 46 trabalhos considerados de maior relevância, conforme demonstrado no Quadro 25.

Quadro 25 – Autores e conceitos relevantes para os tópicos da pesquisa

<b>Tópico</b>	<b>Conceito</b>	<b>Principais autores</b>
Usabilidade e <i>UX</i>	Avaliação de usabilidade e <i>UX</i> utilizando questionários	Brooke (1986, 2013); Sauro (2011); Sauro e Lewis (2011) Lewis; Sauro, (2017) Bangor, Kortum e Miller (2008); Finstad (2010); Borsci <i>et al.</i> (2015)
	Avaliação de usabilidade por meio de Heurísticas	Molich e Nielsen (1990); Nielsen (1993, 2024, 1994, 2012)
	Avaliação de Experiência do Usuário por meio de <i>Web Analytics</i>	Palomino, Paz e Moquillaza (2021)
	Utilização de técnicas inteligentes para avaliação de usabilidade	Ponte e Silveira (2008); Stanca, Lacurezeanu e Felea (2014); Bakaev <i>et al.</i> (2017); Bakaev, Khvorostov e Laricheva (2017); Sahi (2018); Rausanfitia e Rochimah (2020); Muhammad <i>et al.</i> (2021); Agbozo (2023); Fernández-Pérez <i>et al.</i> (2018)
Avaliação de Usabilidade em LRs	Aplicação de métodos para avaliação de usabilidade em LRs	Cuadros <i>et al.</i> (2021); Silva <i>et al.</i> (2023)
Laboratórios Remotos (LRs)	Desenvolvimento de Laboratórios Remotos e aplicação como ferramenta de ensino	Balamuralithara e Woods (2009); (Lima; Viegas; Garcia-Peñalvo, 2019a; Pavani <i>et al.</i> , 2023; Viegas <i>et al.</i> , 2018); Garcia-Zubia <i>et al.</i> (2016); Martinez, Garcia-Zubia e Martinez-Pieper (2015); Rodriguez-Gil <i>et al.</i> (2017); Fernández-Pacheco, Martin e Castro (2019); Chacon <i>et al.</i> (2015); Luthon e Larroque (2014)
Microcontroladores e <i>IoT</i>	Utilização de Microcontroladores e <i>IoT</i>	Bolanakis (2019); Ahmed e Fayed (2020); Xhonneux, Louveaux e Bol (2023); Chen (2012); Adjih <i>et al.</i> (2015); Shahroz <i>et al.</i> (2020); Jabbar <i>et al.</i> (2019)



Técnicas Inteligentes	Conceitos e aplicações de técnicas inteligentes	Cervantes <i>et al.</i> (2017); Feng e Chen (2020); Mamdani (1974); Takagi e Sugeno, (1983); Jang (1993); Russell, Norvig e Davis (2010); Haykin (1999); Mitchell T. (1997)
-----------------------	---	---

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Os trabalhos apresentados no Quadro 25 são de relevância para os diversos temas envolvidos na presente pesquisa, possibilitando uma compreensão aprofundada da relação entre esses temas e contribuindo para o embasamento da proposta.

### 3.5. ANÁLISE E RESULTADOS

Após a análise dos artigos selecionados, foi possível estabelecer os direcionamentos para as questões de pesquisa desta Revisão Sistemática da Literatura, conforme descrito nos tópicos a seguir.

#### 3.5.1. Q1 – Quais são as principais metodologias utilizadas para avaliar a Usabilidade e UX (Experiência do Usuário)?

De acordo com a consulta CN 1, as principais metodologias para avaliação de usabilidade e UX são:

- **Questionários e entrevistas:** Amplamente utilizados por autores como Bangor; Kortum; Miller, (2008); Brooke (1986); Finstad (2010); Sauro (2011); Sauro J; Lewis J, (2011); Brooke (2013); Lewis; Sauro, (2017).
- **Análise heurística:** Método também aplicado antes do lançamento de ferramentas, conforme Molich e Nielsen (1990) e Nielsen (1993, 1994, 2012, 2024).

Métodos emergentes incluem:

- **Visão computacional** para avaliar expressões de usuários.
- **Fuzzy** para análise de resultados de questionários (Fernández-Pérez *et al.*, 2018; Muhammad *et al.*, 2021).
- **Web Analytics** para avaliar a navegação do usuário (Palomino; Paz; Moquillaza, 2021).

- **Técnicas inteligentes** como classificação, regressão, e agrupamento (Agbozo, 2023; Bakaev *et al.*, 2017; Bakaev; Khvorostov; Laricheva, 2017; Ponte; Silveira, 2008; Rausanfita; Rochimah, 2020; Sahi, 2018; Stanca; Lacurezeanu; Felea, 2014).

### 3.5.2. Q2 – Como avaliar a efetividade de laboratórios remotos (LRs)?

Os principais autores e métodos selecionados para responder essa questão são apresentados no Quadro 26. A seleção considerou a quantidade de trabalhos e citações para destacar a relevância das publicações sobre a avaliação de usabilidade em LRs e métodos de ensino em Laboratórios Remotos.

Quadro 26 – Principais autores citados – CN 5

Autor	Conceito	Trabalhos Citados na presente pesquisa
Javier Garcia-Zubia	Avaliação de usabilidade e efetividade de laboratórios remotos como ferramenta de ensino.	<i>Remote Experimentation Using a Didactical Elevator (2015); Empirical analysis of the use of the VISIR remote lab in teaching analog electronics (2016); An open and scalable web-based interactive live-streaming architecture: The WILSP platform (2017); Design and Evaluation of a User Experience Questionnaire for Remote Labs (2021)</i>
Manuel Castro	Implementação de Laboratório Remoto como ferramenta de ensino.	<i>Implementation of an Arduino remote laboratory with raspberry Pi (2019)</i>
Pablo Orduna	Avaliação de usabilidade e efetividade de laboratórios remotos como ferramenta de ensino.	<i>Empirical analysis of the use of the VISIR remote lab in teaching analog electronics (2016)</i>
Gustavo R. Alves	Avaliação da efetividade de Laboratório Remoto ao longo do tempo.	<i>VISIR+ Project Follow-up after four years: Educational and research impact (2023)</i>

Luis Rodriguez-Gil	Desenvolvimento de Laboratório Remoto com arquitetura para experimentos com dados em tempo real.	<i>An open and scalable web-based interactive live-streaming architecture: The WILSP platform (2017)</i>
Sebastian Dormido	Desenvolvimento de arquitetura para desenvolvimento de laboratórios remotos.	<i>Ejs, jil server, and labvina: An architecture for rapid development of remote labs (2015)</i>
Maria Clara Viegas	Estudo dos impactos do uso de Laboratório Remoto como ferramenta de ensino.	<i>Impact of a remote lab on teaching practices and student learning (2018); VISIR+ Project Follow-up after four years: Educational and research impact (2023); Different didactical approaches using a remote lab: Identification of impact factors (2019)</i>
Jesus Chacon	Desenvolvimento de arquitetura para desenvolvimento de laboratórios remotos.	<i>Ejs, jil server, and labnaew: An architecture for rapid development of remote labs (2015)</i>
Anzhelika Parkhomenko	Desenvolvimento de Laboratório Remoto para ensino de IoT.	<i>Integrated complex for IoT technologies study (2018)</i>
Franck Luthon	Desenvolvimento de Laboratório Remoto <i>gamificado</i> para treinamento em eletrônica.	<i>A remote laboratory for game-like training in electronics (2014)</i>
Marco Winzker	Avaliação de usabilidade e efetividade de laboratórios remotos como ferramenta de ensino.	<i>Make it open-Improving usability and availability of an FPGA remote lab (2019)</i>
Rania Hussein	Desenvolvimento de modelo para construção e avaliação de laboratórios remotos para tecnologias de rádio.	<i>MELODY: A Platform-Agnostic Model for Building and Evaluating Remote Labs of Software-Defined Radio Technology (2023)</i>

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Os trabalhos da CN 5 destacam a usabilidade como métrica principal para medir a efetividade de LRs. Javier Garcia-Zubia é o autor com mais publicações e citações, seguido por Pablo Orduna. O uso de questionários para avaliação de

usabilidade é o método mais comum encontrado na literatura (Cuadros *et al.*, 2021; Schwandt; Winzker, 2019; Silva *et al.*, 2023).

### 3.5.3. Q3 - Quais técnicas inteligentes podem ser utilizadas para avaliação de usabilidade?

A partir da consulta **CN 3**, as principais técnicas inteligentes identificadas para avaliação de usabilidade são:

- **Fuzzy**: Utilizado para suporte em Análises de decisão multicritério e análise de respostas de questionários ou entrevistas (Fernández-Pérez *et al.*, 2018; Muhammad *et al.*, 2021).
- **Redes neurais artificiais**: Aplicadas para classificação ou regressão dos dados de usabilidade (Bakaev *et al.*, 2017; Bakaev; Khvorostov; Laricheva, 2017; Ponte; Silveira, 2008; Rausanfita; Rochimah, 2020; Sahi, 2018; Stanca; Lacurezeanu; Felea, 2014).

### 3.5.4. Q4 - Quais dados são utilizados para avaliar a usabilidade por meio de técnicas inteligentes?

Os principais dados utilizados em técnicas inteligentes para mensuração de usabilidade são:

- **Respostas de questionários** em escala *Likert*, como o **System Usability Scale – SUS** (Fernández-Pérez *et al.*, 2018; Muhammad *et al.*, 2021).

A Revisão Sistemática da Literatura abordou questões sobre o estado da arte, estruturando as temáticas conforme a relevância dos estudos, fornecendo suporte ao desenvolvimento do presente trabalho.

#### 4. MÉTODOS E INSTRUMENTOS DE PESQUISA

Visto a lacuna de avaliar a efetividade de Laboratórios Remotos para ensino *IoT* destacada na literatura e aderência a proposta metodológica do presente trabalho em avaliar a usabilidade e Experiência do Usuário de forma inteligente. Foi desenvolvido o LRM-U9 que contempla arquitetura utilizando dispositivos *IoT* e interface de usuário que possibilitam a realizam dos experimentos para validação da proposta.

No presente trabalho buscamos avaliar a usabilidade do LRM-U9 com coleta de dados automatizada em uma nova interface de usuário que registra informações sobre as interações dos usuários durante a realização dos experimentos e submete esses dados à análise por técnica inteligente (*Neuro-Fuzzy*).

Os usuários recebem acesso ao LRM-U9 por meio de sua interface de usuário, onde podem programar os roteiros disponíveis a partir de um editor de códigos da própria página ou da interface *No-Code* e visualizar o comportamento dos componentes por meio de uma câmera.

##### 4.1. PROPOSTA METODOLÓGICA

De acordo com Newman e Benz (1998 *apud* Creswell, 2009), as abordagens qualitativa e quantitativa não devem ser vistas como opostos polares ou dicotomias, em vez disso, elas representam extremos opostos de um contínuo. Um estudo tende a ser mais qualitativo do que quantitativo ou ao contrário e a pesquisa de métodos mistos reside em um ponto no meio deste contínuo, pois incorpora elementos de ambas abordagens (Creswell, 2009).

Para Kumar (2011), os estudos quantitativos são específicos, bem estruturados, foram testados quanto à sua validade e confiabilidade, e podem ser explicitamente definidos ou reconhecidos, por outro lado, os estudos em pesquisa qualitativa não possuem esses atributos ou possuem em menor grau, são menos específicos, menos precisos e não possuem a mesma profundidade estrutural.

Frequentemente, a distinção entre pesquisa qualitativa e quantitativa é apresentada em termos de uso de palavras (qualitativa) ao invés de números (quantitativa), ou uso de perguntas fechadas (hipóteses quantitativas) ao invés de

perguntas abertas (entrevistas qualitativas) (Creswell, 2009). As diferenças nas perspectivas filosóficas de cada paradigma, combinadas com os objetivos de um estudo, determinam em grande medida o foco, a abordagem e o modo de investigação, que por sua vez determinam os aspectos estruturais de um estudo (Kumar, 2011).

A pesquisa qualitativa como um meio para explorar e entender o significado que indivíduos ou grupos atribuem a um problema social ou humano, sendo que o processo de pesquisa utiliza questões emergentes e procedimentos, bem como dados tipicamente coletados no ambiente do participante, análise de dados com lógica indutiva e interpretação do significado dos dados (Creswell, 2009; Kumar, 2011). Os resultados são apresentados de forma mais flexível, com foco no significado individual e na importância de ilustrar a complexidade de uma situação (Creswell, 2009). Dessa forma, esses estudos são frequentemente não lineares e não sequenciais em sua operacionalização (Kumar, 2011).

Por outro lado, a pesquisa quantitativa é um meio para testar teorias objetivas examinando a relação entre variáveis. Essas variáveis, por sua vez, podem ser medidas, para que dados numerados possam ser analisados por meio de procedimentos estatísticos, tendo a análise baseada em lógica dedutiva. Os resultados são apresentados em uma estrutura bem definida, utilizando proteções contra viés, controle de explicações alternativas e capacidade de generalização e reprodução (Creswell, 2009). Os requisitos de medida e classificação da informação coletada exigem que os estudos sejam mais estruturados, rígidos, fixos e predeterminados para garantir a precisão na medida e classificação (Kumar, 2011).

Cada paradigma é apropriado para encontrar objetivos distintos. As pesquisas qualitativas são mais apropriadas para explorar a variação e diversidade em qualquer aspecto da vida social, enquanto a pesquisa quantitativa é mais adequada para obter a extensão dessa variação e diversidade (Kumar, 2011).

Conforme Kumar (2011) não é recomendável ficar restrito a um dos paradigmas (quantitativo ou qualitativo), sendo que o propósito do estudo que deve determinar a escolha. O autor destaca também que em muitos casos é necessário utilizar métodos que estejam no domínio de ambos paradigmas, Creswell (2009) descreve a pesquisa com métodos mistos como uma abordagem de investigação que combina ou associa

paradigmas qualitativos e quantitativos, envolvendo pressupostos filosóficos com uso de ambas abordagens e a combinação entre elas no estudo. Kumar (2011) destaca uma abordagem qualitativa-quantitativa-qualitativa por ser abrangente e complementar, trata-se de iniciar o estudo com métodos qualitativos para determinar a extensão da diversidade, utilizar métodos quantitativos para quantificar a extensão e depois retornar ao qualitativo para explicar os padrões observados.

De acordo com Kumar (2011), existem quatro categorias principais para a perspectiva de objetivos, sendo descritivo, correlacional, explicativo e exploratório. Dentre estes, podemos destacar o objetivo descritivo que é utilizado na abordagem qualitativa do presente trabalho, sendo que nessa perspectiva de objetivos busca-se descrever sistematicamente uma situação, problema, serviço ou programa. Tendo como principal objetivo de tais estudos, descrever o que prevalece em relação à questão ou problema em estudo.

O presente trabalho se caracteriza como pesquisa aplicada de natureza experimental, pois aplica técnicas e métodos de pesquisa para coletar informações sobre um problema ou fenômeno específico, bem como possui um ambiente controlado (o Laboratório Remoto) com a intervenção do pesquisador (interface de usuário e roteiros) (Kumar, 2011) que estimula a variável independente “navegação” para análise da causalidade na variável dependente “usabilidade”, utilizando uma abordagem em ambos paradigmas quantitativo e qualitativo, sendo que o estudo foi elaborado para ser predominantemente quantitativo com a utilização de abordagem qualitativa para compreender e validar os valores quantificados obtidos.

Devido ao trabalho atual ser uma expansão do trabalho anterior (Arroyo, 2020; Arroyo *et al.*, 2024), podemos considerar que o desenho experimental pode ser caracterizado como ***before-and-after experimental design*** (Kumar, 2011), ou seja, é possível medir o efeito da intervenção (interface de usuário) na utilização do Laboratório Remoto, pois no estudo anterior o acesso era realizado por meio de acesso remoto diretamente ao *Raspberry*.

Questões abertas e dados de navegação que não representam quantidade compreendem o paradigma qualitativo, enquanto questionários em escala *likert* e dados quantificados de navegação, compreendem o paradigma quantitativo. Sendo assim o presente trabalho buscou mensurar a usabilidade e Experiência do Usuário

de forma quantitativa atuando na compreensão dos resultados por meio de abordagem qualitativa.

A amostra foi obtida por usuários convidados a realizar o experimento que faziam parte de dois perfis, sendo profissionais desenvolvedores de software e alunos que estavam cursando disciplinas relacionadas a Engenharia Elétrica. O público selecionado se caracterizava em dois grupos, sendo:

- Usuários que possuem proximidade com os roteiros e dispositivos disponíveis na ferramenta, mas não possuem profundo conhecimento em programação;
- Usuários que possuem amplo conhecimento em programação, mas não possuem amplo conhecimento nos dispositivos.

Dentre os profissionais desenvolvedores de software também houve diversidade em níveis de formação, embora todos possuíam experiência com desenvolvimento de software, o grupo selecionado contemplou desde estudantes universitários à mestres e doutores, incluindo professores universitários de áreas relacionadas à Engenharia Elétrica e desenvolvimento de software. Permitindo assim que a ferramenta fosse avaliada por diferentes perspectivas.

Devido à intuitividade da ferramenta e proximidade do público em conhecimentos relacionados não houve necessidade de uma grande imersão dos usuários na ferramenta para conseguirem realizar os experimentos, porém houve uma curva de aprendizagem para ambos os perfis, formando um público diversificado com potencial para a realização dos experimentos, mas também com lacunas de conhecimento nos temas, fazendo com que o Laboratório Remoto haja como uma ferramenta de aprendizado.

O tamanho da amostra necessária foi obtido através dos padrões encontrados na literatura, em trabalhos que avaliam métodos ou uma combinação de métodos para mensuração de usabilidade conforme Quadro 27:

Quadro 27 – Tamanho de amostras utilizadas em trabalhos relacionados:

<b>Autor</b>	<b>Objetivo do trabalho</b>	<b>Amostra</b>
Nielsen e Molich (1990)	Classificação de problemas de usabilidade	77 pessoas



Tullis e Stetson (2006)	Realizaram avaliação de usabilidade entre dois <i>sites</i> semelhantes utilizando os questionários <i>SUS</i> , <i>QUIS</i> , <i>CSUQ</i> , uma variação do <i>Microsoft's Product Reaction Cards</i> e um questionário próprio já utilizado a alguns anos.	19 pessoas para cada questionário
Jin <i>et al.</i> (2009)	Construção de Modelo de avaliação de usabilidade baseado na sensação do cliente utilizando “ <i>Quality Function Deployment</i> ” (QFD).	30 pessoas
Komogortsev <i>et al.</i> (2009)	Construção de Modelo de avaliação de usabilidade baseado em esforço.	20 pessoas
Boucinha; Tarouco (2013)	Avaliar a usabilidade de um sistema.	155 pessoas
Borsci <i>et al.</i> (2015)	Avaliação de usabilidade de uma plataforma de e-learning e comparativo entre os questionários <i>SUS</i> , <i>UMUX</i> e <i>UMUX-LITE</i>	186 e 93 pessoas
Riegler e Holzmann (2018)	Construção de Modelo de avaliação de complexidade da interface visual em aplicativos para celular	12 pessoas
Cuadros <i>et al.</i> (2021)	Desenvolveram um questionário com o intuito de generalizar a avaliação de LRs com base em 3 escalas: usabilidade, utilidade e imersão.	191 pessoas
Agbozo (2023)	Utilização de clusterização para agrupamento de usuários por nível de satisfação com usabilidade/ <i>ux</i>	18 pessoas
Silva <i>et al.</i> (2023)	Desenvolveram um LR com recursos de realidade estendida – XRL e avaliaram sua usabilidade por meio de um questionário desenvolvido para o projeto.	150 pessoas

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Porém Tullis e Stetson (2006) subdividiram as amostras aleatoriamente em pequenos grupos menores para compreender o impacto do tamanho da amostra na precisão da avaliação de usabilidade, sendo que uma amostra de 6 pessoas resultou em uma precisão de 30 a 40% em relação à amostragem total, mas no questionário *SUS* a precisão alcançou em torno de 75% com apenas 8 pessoas como amostragem

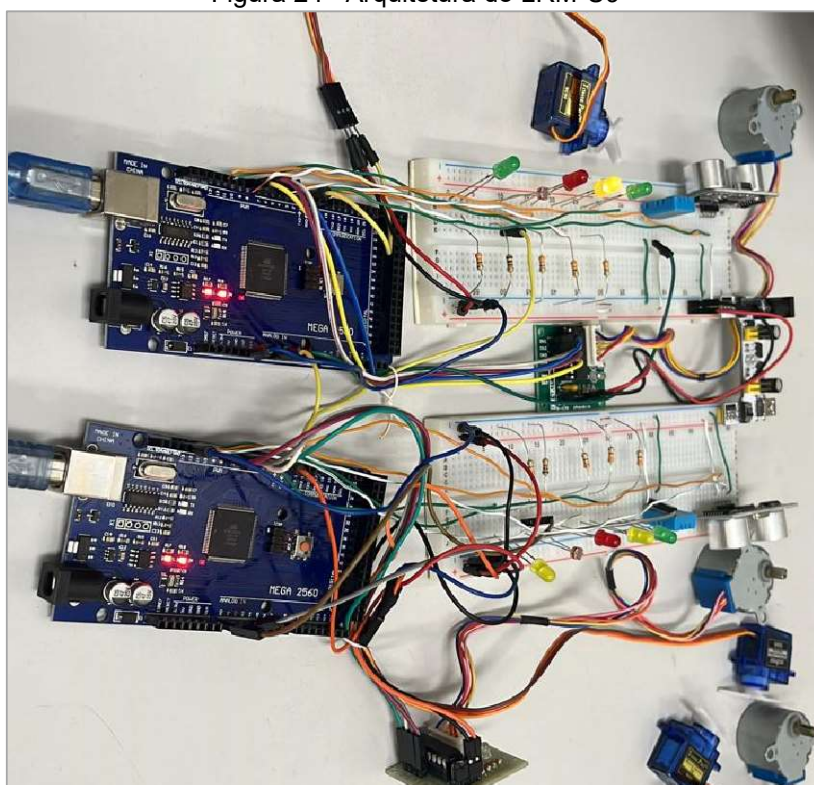
chegando à faixa de 90 a 100% de precisão em amostragens com 14 pessoas. Sendo assim sugerem que seja utilizada uma amostragem mínima de 12 a 14 participantes.

Ao comparar diferentes amostragens nos trabalhos foi possível perceber uma relação em que amostras menores possuem um público mais específico, sendo muitas vezes utilizada para apuração de um novo método ou modelo de avaliação, enquanto trabalhos com amostras maiores normalmente originam subamostras para aprofundamento em subtemas dentro do objetivo principal.

#### 4.2. ARQUITETURA DO LRM-U9

O LRM-U9, apresentado em Arroyo *et al.* (2024), foi adaptado para novos roteiros e utiliza uma arquitetura distribuída com dois Arduinos Mega conectados a um Raspberry Pi (Figura 24). Essa configuração visa otimizar a carga de acessos dos alunos, onde o Raspberry recebe o acesso e redireciona para o Arduino disponível. Ambos Arduinos estão equipados com sensores, LEDs e componentes IoT, como Servo Motor e Motor de Passo com o mesmo padrão de pinagem.

Figura 24– Arquitetura do LRM-U9



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

O Raspberry foi configurado com Arduino IDE e Arduino-cli, permitindo a gravação e execução de códigos nas placas Arduino através da interface de usuário. Além disso, o Raspberry opera com sistema operacional Linux e possui o servidor APACHE configurado que está exposto para a internet através da porta 8080, habilitando assim a utilização da interface web com PHP e MySQL.

A interface de usuário foi desenvolvida utilizando tecnologias web contemporâneas, incluindo HTML5, CSS3, Javascript e PHP, com banco de dados MySQL. Componentes como Bootstrap e jQuery foram empregados para melhorar a Experiência do Usuário.

O processo de acesso inicia com a solicitação de credenciais (Figura 25), oferecendo opção de cadastro para novos usuários. Após autenticação bem-sucedida, o aluno é direcionado para uma página de apresentação (Figura 27), seguida dos roteiros e, por fim, do questionário de pesquisa adaptado de Arroyo *et al.* (2024).

Figura 25 – Interface de usuário - Autenticação



Insira as credenciais para acessar:

Usuário: Digite seu nome de Usuário

Senha: Digite sua senha

Acessar Cadastro

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Ao acessar pela primeira vez é necessário realizar um pequeno cadastro para criação de usuário e senha de acesso devido à necessidade de rastrear a navegação de cada usuário, porém não são coletados dados de identificação do participante. O formulário solicita informações como instituição, curso e nível conforme apresentado na Figura 26.

Figura 26 – Interface de usuário - Cadastro

The image shows a user registration form titled 'Cadastro:'. It contains five input fields: 'Área' (set to 'Engenharia Elétrica'), 'Nível' (set to 'Estudante'), 'Usuário' (placeholder: 'Digite seu nome de Usuário'), 'Senha' (placeholder: 'Digite sua senha'), and 'Confirmação' (placeholder: 'Digite sua senha novamente'). At the bottom are 'Salvar' and 'Cancelar' buttons.

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Os roteiros consistem em textos explicativos (APÊNDICE C), oferecendo duas formas de geração de código: code e No-code. A criação de códigos pode ser realizada por meio de blocos ou da forma tradicional.

Figura 27 – Interface de usuário - Apresentação

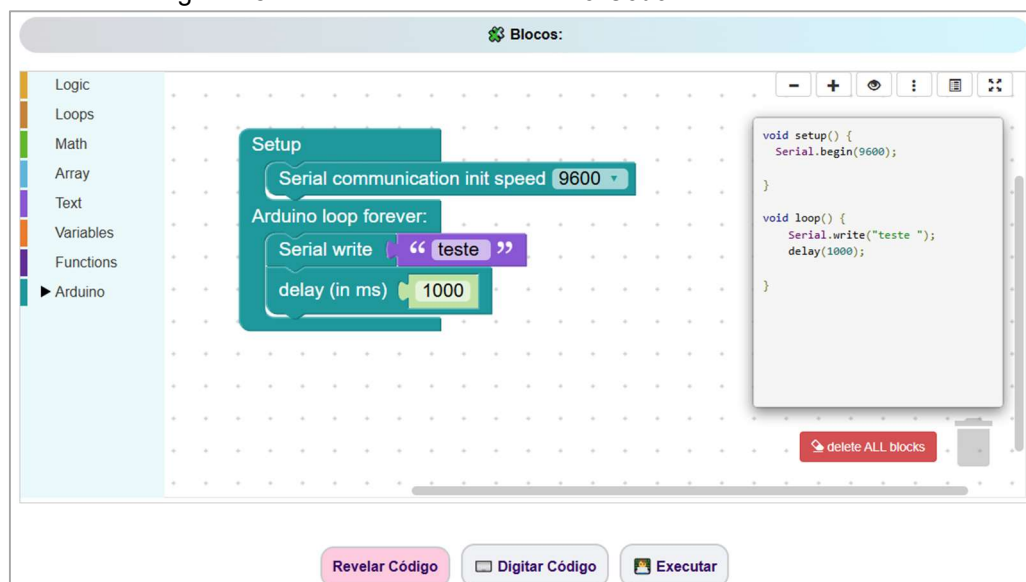
The image shows a user presentation interface. The header includes 'LRM-U9 :: Laboratório Remoto da Uninove' and a 'Roteiros:' dropdown menu. Below the header, it says 'Dispositivo: Arduino Mega 01' and a 'Desconectar' button. The main content area is titled 'Apresentação' and contains the following text: 'Olá, Seja bem-vindo ao LRM-U9!', 'Esta ferramenta foi desenvolvida para a realização de experimentos com dispositivos IoT de forma remota.', 'Vou te explicar como ele funciona:', 'Roteiros: Existem oito roteiros disponíveis, cada roteiro possui uma explicação sobre os experimentos e dispositivos utilizados.', 'Blocos: Abaixo da explicação a um campo para criação dos códigos através de blocos (semelhante ao ThinkerCad), onde você consegue criar os scripts sem precisar digitar os códigos.'

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

O ambiente *No-Code* utiliza o *framework* Blockly (Pasternak; Fenichel; Marshall, 2017), adaptado para Arduino através dos projetos BlocklyDuino e Blockly@rduino. O framework Blockly é amplamente utilizado em plataformas de

desenvolvimento no-code, incluindo aplicativos educacionais no *MIT (Massachusetts Institute of Technology)*, *Berkeley University (CA-EUA)*, *Microsoft*, entre outros (Google, 2022).

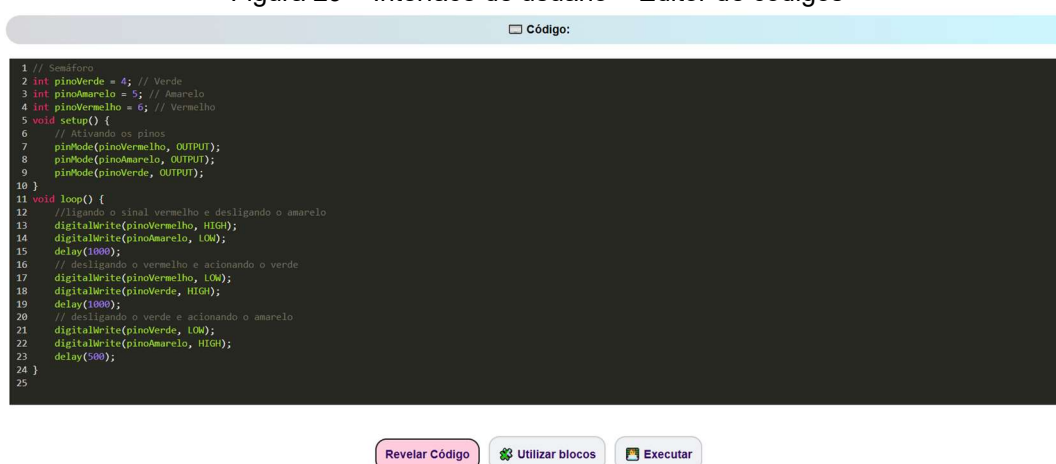
Figura 28 – Interface de usuário – *No-Code* – Editor de Blocos



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

A interface de usuário apresenta inicialmente a interface *No-Code*, porém também está disponível um editor de códigos para os usuários que preferam digitar diretamente o código ao invés de montar os blocos. Ao clicar no botão “Digitar código”, é solicitada a confirmação de alteração do editor e ao confirmar, o editor de blocos é substituído pelo editor de códigos baseado no *framework CodeMirror* (CodeMirror, 2024), conforme ilustrado na Figura 29.

Figura 29 – Interface de usuário – Editor de códigos



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Após a digitação do código ou montagem dos blocos, o aluno deve clicar no botão Executar, que irá salvar o código gerado para compilação via linha de comando utilizando o Arduino-cli, após a compilação, o código é gravado no Arduino Mega vinculado à sessão atual, e então a execução é iniciada. Os resultados são apresentados na tela, com a possibilidade de visualização dos logs de compilação e gravação respectivamente Figura 30.

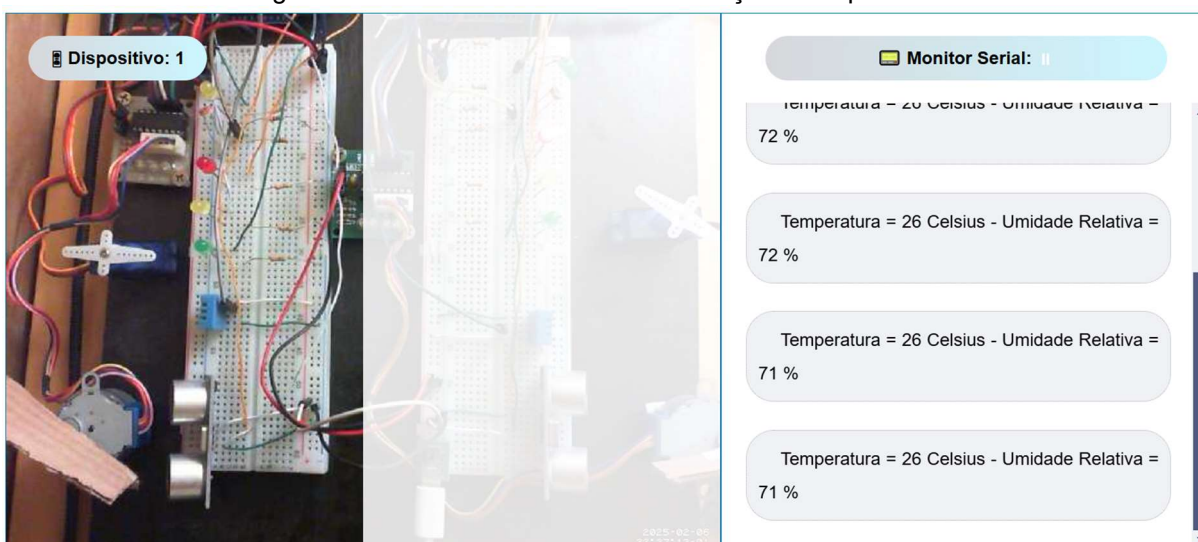
Figura 30 – Interface de usuário – Detalhes da compilação e gravação



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Caso o código seja compilado e gravado com sucesso (Figura 31), a execução se inicia e na interface de usuário é apresentada a visualização da câmera para que o aluno acompanhe o comportamento de dispositivos, *LEDs* e sensores, bem como a possibilidade de visualização de mensagens obtidas por meio de comunicação serial com o Arduino.

Figura 31 – Interface de usuário – Execução do experimento



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

O LRM-U9 possui um fluxo sequencial que se inicia na página de apresentação, seguida por oito roteiros para a realização de experimentos, após os roteiros definidos



há uma página para exploração livre, em que o aluno pode realizar experimentos livremente sem orientação, e por fim, na última página (Figura 32) é disponibilizado o questionário da pesquisa, contendo as questões *SUS*, *UMUX* e qualitativas.

Figura 32 – Interface de usuário – Questionário

**Pesquisa sobre o LRM-U9**

Este questionário tem por finalidade coletar dados sobre o Laboratório Remoto utilizado. Serão avaliados aspectos relacionados às condições necessárias à aprendizagem, usabilidade e experiência de usuário. As respostas serão utilizadas para uma pesquisa científica com a finalidade de analisar o uso desta ferramenta para aprendizagem dos alunos. Para isso, a sua opinião é fundamental. Não deixe questões sem resposta. Ao respondê-las, considere as experiências que você vivenciou durante os experimentos.

A seguir, você encontrará uma série de afirmações sobre a utilização do Laboratório Remoto. Pense nas experiências vivenciadas durante sua utilização e utilize a escala abaixo para registrar sua percepção. Quanto mais próximo de DISCORDO TOTALMENTE irá representar que a afirmação NÃO REFLETE SUA PERCEPÇÃO e quanto mais próximo de CONCORDO TOTALMENTE irá representar que a afirmação está DE ACORDO COM SUA PERCEPÇÃO.

Após as afirmações, encontram-se questões abertas para que possa expressar/explicar a experiência obtida com suas próprias palavras.

**Utilizaria este Laboratório Remoto com frequência.**

Discordo totalmente 

▶

 Concordo totalmente

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

O banco de dados é composto por duas categorias de tabelas: prefixo lab\_ (laboratório) e prefixo mtm\_ (Matomo). As tabelas do laboratório foram criadas especificamente para este projeto, armazenando dados de acesso, roteiros, códigos, questionário e demais informações do sistema. As tabelas do Matomo (ANEXO A) são utilizadas pela ferramenta de coleta de dados, os dados coletados são apresentados na seção de coleta de dados.

#### 4.3. INSTRUMENTOS DE PESQUISA

De acordo com Kumar (2011), independentemente do método de coleta de dados quantitativos, a informação coletada é chamada de dados brutos ou simplesmente dados. O primeiro passo no processamento dos dados é garantir que eles estejam livres de inconsistências e incompletudes, sendo esse processo de “limpeza” chamado de edição.

A edição é adequada apenas em dados quantitativos e consiste em examinar os instrumentos de pesquisa concluídos para identificar e minimizar, na medida do possível, erros, incompletudes, classificações incorretas e lacunas nas informações obtidas dos respondentes. Para mitigar diversos problemas em respostas de questionários, podemos simplesmente realizar a verificação do conteúdo quanto à

completude e verificação das respostas quanto a consistência interna para conseguir bons resultados. Uma das principais formas de realizar essa verificação é por inferência, onde algumas perguntas podem estar relacionadas à outras sendo possível obter a resposta de uma pergunta a partir da resposta da outra (Kumar, 2011). Esse processo de inferência é implementado ao presente trabalho para identificar possíveis erros nos dados, sendo que as respostas das questões qualitativas permitem a identificação de inconsistências nos dados quantitativos.

Após a edição dos dados, é necessário utilizar o método de codificação em que devem ser verificadas duas considerações: a maneira como uma variável foi medida em seu instrumento de pesquisa e a maneira como será a comunicação das descobertas nos resultados (Kumar, 2011). O primeiro nível de distinção é a natureza dos dados (qualitativa ou quantitativa), no presente trabalho os dados quantitativos são mensurados por meio de metodologia específica (*SUS* e *UMUX*) que gera uma pontuação para quantificar a usabilidade, já as questões qualitativas possuem natureza descritiva refletindo descrições dos alunos sobre a usabilidade percebida, e também são atribuídos procedimentos estatísticos na utilização de *Neuro-Fuzzy*.

As respostas quantitativas precisam passar por um processo que visa principalmente transformar as informações em valores numéricos, chamados códigos, para que as informações possam ser facilmente analisadas (Kumar, 2011), conforme ocorre com as pontuações do *SUS* e *UMUX* utilizados no presente trabalho. Enquanto as informações descritivas (perguntas abertas) devem passar por um processo chamado análise de conteúdo, no qual são identificados os principais temas que emergem das respostas obtidas (Kumar, 2011), sendo essa interpretação utilizada no presente trabalho para uma validação cruzada em relação às pontuações obtidas dos questionários *SUS* e *UMUX* e resultados obtidos pela técnica inteligente.

Após a identificação dos principais temas, existem três formas de apresentá-los nos resultados da pesquisa (Kumar, 2011): (1) examinar as respostas verbais e integrá-las ao texto de resultados para apoiar ou contradizer um argumento; (2) atribuir um código a cada tema e quantificar a frequência que apareceu; ou (3) combinar ambos os métodos para comunicar os resultados. Sendo que a escolha deve ser focada na clareza de divulgação dos resultados, para o presente trabalho foi utilizada a primeira forma pois permite maior clareza da interpretação obtida.



#### 4.4. TÉCNICAS DE COLETA E TRATAMENTO DE DADOS

Nos capítulos anteriores, foram apresentados conceitos e métodos para avaliação de usabilidade e Experiência do Usuário, a aplicação destes métodos será descrita nas seções a seguir conforme a seguinte estrutura:

**Conceitos e definições:** abrange conceitos e definições relacionando a proposta metodológica ao contexto presente trabalho;

**Questões SUS:** apresenta a adaptação do questionário para o contexto do presente trabalho;

**Questões SUS:** apresenta a adaptação do questionário para o contexto do presente trabalho;

**Questões UMUX:** apresenta a adaptação do questionário para o contexto do presente trabalho;

**Questões Qualitativas:** descreve as questões utilizadas no presente trabalho;

**Dados coletados:** detalha os dados brutos coletados através do Matomo e da Interface de Usuário;

**Amostragem:** demonstra o tratamento dos dados brutos para utilização na modelagem do Sistema Neuro-*Fuzzy*;

##### 4.4.1. Conceitos e Definições

De acordo com Kumar (2011), imagens, percepções ou conceitos que podem ser medidos e, portanto, assumir diferentes valores podem ser chamados de variáveis. Segundo Kerlinger (1986 *apud* Kumar, 2011), uma variável é uma propriedade que assume diferentes valores. Uma variável é um símbolo ao qual são atribuídos números ou valores. Para Black e Champion (1976 *apud* Kumar, 2011), uma variável é uma unidade racional de análise que pode assumir qualquer valor em um conjunto designado de valores.

Para Kumar (2011), a mensurabilidade é a principal diferença entre um conceito e uma variável, sendo conceitos descritos pelo autor como imagens mentais ou percepções, os quais possuem significados que variam de indivíduo para indivíduo. Por outro lado, variáveis são mensuráveis, embora, com diferentes graus de precisão. Um Conceito não pode ser medido, enquanto uma variável pode ser submetida à

medição por unidades de medidas cruas/refinadas ou subjetivas/objetivas. Conceitos são impressões subjetivas que, se medidas como tal, causariam divergências na comparação de respostas obtidas de diferentes respondentes.

De acordo com Young (1966 *apud* Kumar, 2011), cada colaborador deve ter o mesmo entendimento dos conceitos para que os dados colaborativos sejam classificados de maneira semelhante e os resultados sejam agrupados e testados ou reproduzidos. A classificação e a comparação exigem definições uniformes e precisas de categorias expressas em conceitos.

Dessa forma, foram definidos os conceitos de usabilidade e Experiência do Usuário (*UX*) no capítulo de fundamentação teórica, bem como foram apresentados os questionários *SUS* e *UMUX* que geram variáveis de pontuação para medir esses conceitos. Como ilustrado por Kumar (2011), o conceito de "rico" (indivíduo que possui riqueza) pode ser representado por indicadores e convertidos em variáveis. Por exemplo, ao definir a renda como um indicador de riqueza, torna-se possível mensurar essa variável.

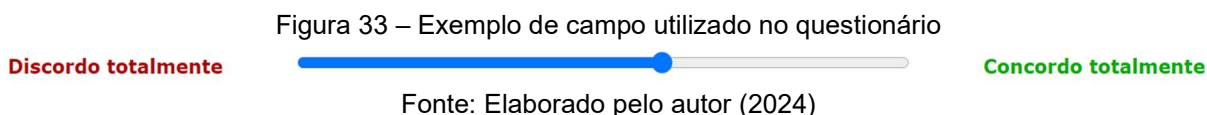
Sendo assim, podemos estabelecer uma relação entre os dados de navegação (variáveis independentes) em relação às pontuações obtidas dos questionários *SUS* e *UMUX* (variáveis dependentes), que representam a medida dos conceitos de usabilidade e *UX* respectivamente.

O método proposto para o presente trabalho tem por base analisar dados de uso e navegação do LRM-U9 em busca de uma correlação com a avaliação de usabilidade realizada através do questionário. De acordo com Komogortsev *et al.* (2009), o registro de eventos de interação como cliques com botões do mouse e pressionamento de teclas fornecem uma grande quantidade de informações úteis para avaliar a usabilidade de interfaces de usuário.

Foram utilizadas técnicas de *Web Analytics* na coleta automatizada de dados de navegação e uso dos usuários, para validação dos dados também foi utilizado o questionário proposto por Arroyo *et al.* (2024) com questões *SUS*, *UMUX* e descritivas disponibilizado na interface do LRM-U9.

O questionário proposto por Arroyo *et al.* (2024) foi adaptado para receber respostas com valores decimais para aumentar o universo de respostas possíveis, porém mantendo o cálculo e definições originais, sendo que ao invés de utilizar

escalas *likert* de 5 itens (*SUS*) e 7 itens (*UMUX*), foram adaptados campos de seleção dos valores por rolagem (Figura 33), permitindo valores decimais no intervalo de 0,10 entre 1 e 5 (*SUS*) ou 1 e 7 (*UMUX*).



Ao final dos roteiros foi incluída uma página com o questionário sugerido por Arroyo *et al.* (2024), com 20 questões e 3 objetivos:

- Mensuração da Usabilidade - questões *SUS* (Brooke, 1986);
- Mensuração da Experiência do Usuário – questões *UMUX* (Finstad, 2010);
- Questões Qualitativas – Respostas descritivas dos usuários (Arroyo, 2020; Arroyo *et al.*, 2024).

As questões do *SUS*, *UMUX* e qualitativas estão inter-relacionadas, possibilitando que uma resposta seja corroborada e compreendida por meio da outra. Nas seções a seguir, os cálculos e apuração dos questionários serão detalhados.

#### 4.4.2. Questões *SUS* – *System Usability Scale*

O questionário *SUS* (Brooke, 1986) foi adaptado ao presente trabalho conforme Quadro 28:

Quadro 28 - Questionário *SUS* adaptado ao LRM-U9

DECLARAÇÕES <i>SUS</i> ORIGINAIS	DECLARAÇÕES <i>SUS</i> ADAPTADAS PARA O LRM-U9:
Eu acho que gostaria de utilizar este sistema frequentemente.	Utilizaria este Laboratório Remoto com frequência
Eu achei o sistema desnecessariamente complexo.	Este Laboratório Remoto é desnecessariamente complexo.
Eu achei o sistema fácil para usar.	Este Laboratório Remoto fácil de usar.
Eu acho que precisaria do apoio de um suporte técnico para ser possível usar este sistema.	É necessário o apoio de uma pessoa técnica para usar este Laboratório Remoto.

Eu achei que as diversas funções neste sistema foram bem integradas.	As funções deste Laboratório Remoto estão bem integradas.
Eu achei que houve muita inconsistência neste sistema.	Há muita inconsistência neste Laboratório Remoto.
Eu imagino que a maioria das pessoas aprenderia a usar esse sistema rapidamente.	Acredito que a maioria dos alunos aprenderia a utilizar este Laboratório Remoto rapidamente.
Eu achei o sistema pesado para uso.	Este Laboratório Remoto é complicado de usar.
Eu me senti muito confiante usando esse sistema.	Sinto-me confiante ao utilizar este Laboratório Remoto.
Eu precisei aprender uma série de coisas novas antes que eu pudesse continuar a utilizar esse sistema.	Preciso aprender muitas coisas antes de começar a utilizar este Laboratório Remoto.

Fonte: Adaptado de Brooke (1986)

#### 4.4.3. Questões *UMUX* – *Usability Metrics for User Experience*

O questionário *UMUX* (Finstad, 2010) também foi adaptado ao presente trabalho conforme Quadro 29:

Quadro 29 – Questões *UMUX* adaptadas ao LRM-U9

DECLARAÇÕES UMUX ORIGINAIS	DECLARAÇÕES UMUX ADAPTADAS PARA O LRM-U9:
Os recursos [deste sistema] atendem aos meus requisitos	Os recursos deste Laboratório Remoto atendem às minhas necessidades.
Usar [este sistema] foi uma experiência frustrante.	Usar este Laboratório Remoto foi uma experiência frustrante.
[Este sistema] é fácil de usar	Este Laboratório Remoto fácil de usar.
Eu tenho que gastar muito tempo corrigindo as coisas com [este sistema]	Preciso gastar muito tempo corrigindo problemas ao usar este Laboratório Remoto.

Fonte: Adaptado de Finstad (2010)

Ao adaptar as questões do *UMUX* para este estudo, uma questão que já existe nas questões do *SUS* foi removida. Portanto, a questão "Este Laboratório Remoto foi

fácil de usar?" foi respondida apenas uma vez, e sua pontuação foi recalculada no padrão *UMUX*.

Adicionalmente foi incluída uma questão quantitativa que não faz parte dos questionários *SUS* e *UMUX*, para compreensão da quantidade de experimentos realizados sob a perspectiva dos usuários: "Conseguir realizar uma quantidade satisfatória de exercícios neste Laboratório Remoto.", sendo utilizada posteriormente para compreender a percepção dos usuários em relação à quantidade e dificuldade dos experimentos.

A pontuação da questão utilizada na escala do *SUS* (escala *Likert* de 5 pontos) foi convertida para a escala do *UMUX* (escala *Likert* de 7 pontos) utilizando a equação linear apresentada em Equação 18:

$$UMUX = 1,5sus - 0,5 \quad (18)$$

#### 4.4.4. Questões Qualitativas

As questões qualitativas apresentadas no Quadro 30 visam explorar a percepção dos usuários em relação ao LRM-U9 de forma descritiva, identificando possíveis pontos a serem aprimorados e complementando os questionários *SUS* e *UMUX* na compreensão da usabilidade e Experiência do Usuário.

Quadro 30 – Questões qualitativas

Questão	Descrição
Houve dificuldades para compreender/realizar os roteiros dos exercícios? Quais?	Esta questão busca identificar quaisquer obstáculos encontrados pelos usuários ao compreender e executar os roteiros dos exercícios propostos no LRM-U9. As respostas podem fornecer <i>insights</i> sobre áreas específicas que necessitam de melhorias na clareza das instruções ou na apresentação dos conteúdos.
O uso do Laboratório Remoto contribuiu efetivamente para o aprendizado/aprimoramento? Como?	Essa pergunta visa entender se os usuários percebem o LRM-U9 como uma ferramenta eficaz no processo de aprendizado e aprimoramento. As respostas podem destacar aspectos positivos da utilização do LRM-U9,

	como a aplicação prática dos conceitos teóricos e a oportunidade de experimentação em um ambiente controlado.
Houve dificuldades na utilização do Laboratório Remoto? Quais?	Similar à primeira pergunta, esta questão busca identificar eventuais desafios enfrentados pelos usuários durante a utilização do LRM-U9. As respostas podem indicar problemas relacionados à interface do usuário, funcionalidades técnicas ou dificuldades de navegação.
Quais foram as vantagens e/ou desvantagens observadas?	Esta pergunta permite aos usuários compartilharem suas percepções sobre as vantagens e desvantagens do LRM-U9. As respostas podem abordar aspectos positivos, como conveniência e acessibilidade, bem como desafios percebidos, como limitações técnicas ou falta de recursos.
Alguma sugestão para melhoria do uso do Laboratório Remoto?	Por fim, esta questão convida os usuários a oferecerem sugestões para aprimorar a experiência de uso do LRM-U9. As respostas podem incluir recomendações para melhorias na interface do usuário, adição de funcionalidades específicas ou ajustes nos procedimentos de utilização.
Qual a percepção geral ao utilizar este Laboratório Remoto como ferramenta de ensino para experimentos?	Esta questão busca obter uma avaliação global da experiência dos usuários ao utilizar o LRM-U9 como ferramenta de ensino para experimentos. As respostas podem fornecer uma visão ampla sobre a eficácia do LRM-U9 em atender às necessidades educacionais dos usuários e seu impacto no processo de aprendizado.

Fonte: Adaptado de Arroyo (2020) e Arroyo *et al.* (2024)

Ao analisar as respostas a essas questões é possível obter uma compreensão mais abrangente da Experiência do Usuário dos usuários sobre o Laboratório Remoto,

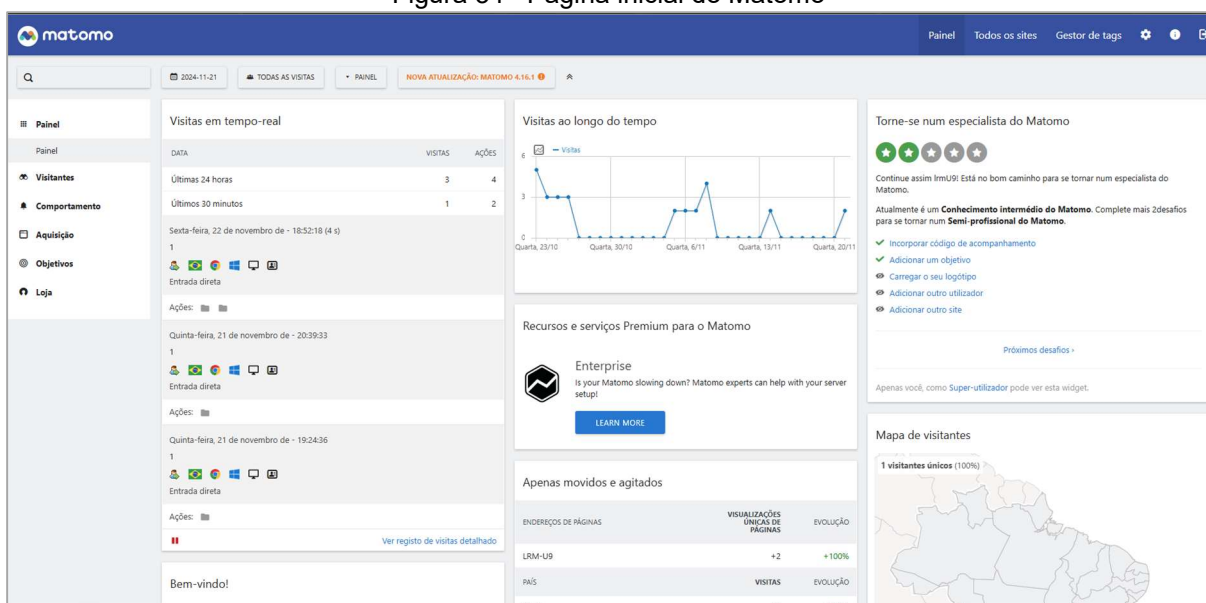
complementando as informações quantitativas obtidas por meio dos questionários *SUS* e *UMUX*. Isso permite identificar áreas específicas de melhoria e orientar o desenvolvimento futuro do LRM-U9 para melhor atender às necessidades dos usuários.

#### 4.4.5. Dados Coletados

Os dados coletados contêm informações sobre a navegação e uso da ferramenta e também as respostas do questionário. Existem 3 origens para os dados conforme sua finalidade, sendo que os dados de navegação são coletados através da ferramenta Matomo, os dados de uso são coletados por meio de implementações no próprio código da interface de usuário e os dados do questionário são coletados por meio de formulário apropriado implementado na interface de usuário.

O Matomo é uma plataforma abrangente de análise web que oferece aos usuários total controle sobre seus dados (Figura 34). É possível hospedar o Matomo em seus próprios servidores, mantendo a propriedade dos dados. A plataforma também permite a personalização e adaptação conforme às necessidades de cada projeto e possui uma interface intuitiva e amigável que provê facilidade na análise dos dados. Além de possuir uma ampla gama de possíveis integrações com outras ferramentas (Matomo, 2024).

Figura 34– Página inicial do Matomo



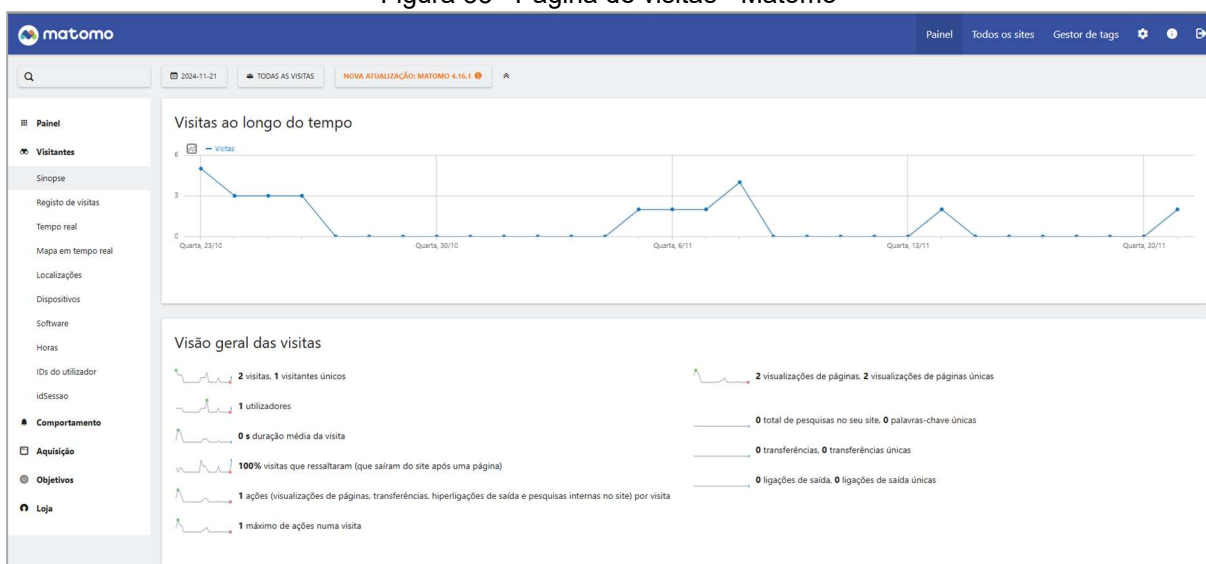
Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

A integração do Matomo ao LRM-U9 possibilitou a coleta automatizada de dados detalhados sobre a utilização da interface, incluindo informações sobre: páginas visitadas, tempo de permanência, origem do tráfego, cliques, rolagem das páginas, configurações do navegador, equipamento utilizado, entre outros. A maioria dos dados coletados pelo Matomo é estática, sendo adicionada ao conjunto sem atualizações posteriores, com exceção dos registros de visitas, que são atualizados a cada nova interação do usuário.

O Matomo armazena dois tipos principais de dados: **Dados Brutos**, que contemplam os dados originais coletados pelo rastreador e **Dados Analíticos**, que contemplam informações processadas e resumidas para a geração de relatórios. No presente estudo, o Matomo foi integrado com a configuração padrão, não foram realizadas personalizações para capturas específicas. Sendo possível implementar rastreamentos para coleta de dados personalizados em estudos futuros.

**Dados da visita:** Os registros das visitas são atualizados enquanto as visitas permanecem ativas até que a visita termine (Figura 35). Os principais dados referentes ao registro das visitas são armazenados na tabela *log\_visit* e são apresentados no Quadro 31.

Figura 35– Página de visitas - Matomo



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

A Figura 35 ilustra o resumo das visitas ao longo do tempo, apresentando uma visão geral dos acessos ao Laboratório Remoto.



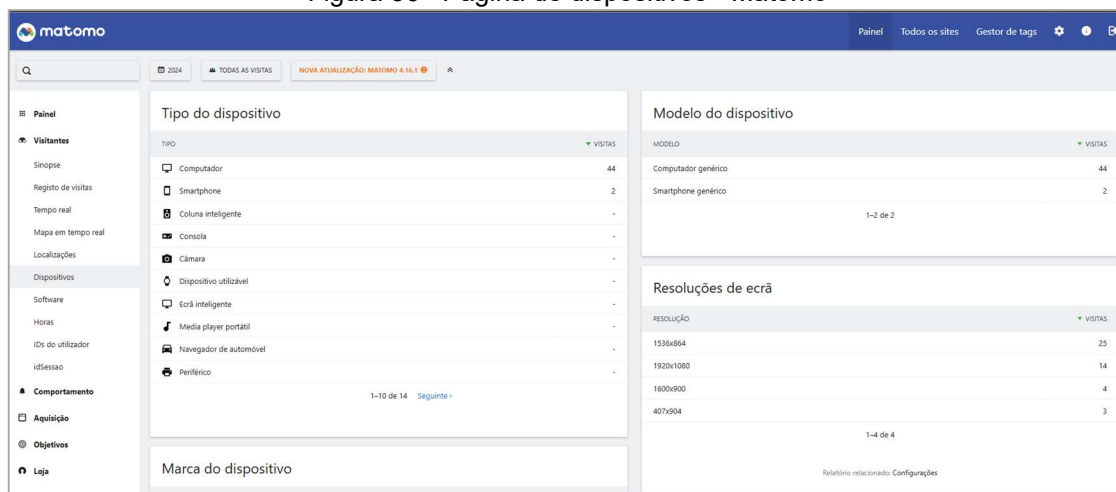
Quadro 31 – Principais informações sobre as visitas dos usuários

Categoria	Descrição
Tempo	Dados relacionados à data, hora e tempo. Nessa categoria estão inclusos: data/hora de início/término da visita, data desde primeiro/última visita/ação, tempo total da visita.
Configuração	Dados relacionados ao equipamento utilizado pelo usuário. Nessa categoria estão inclusos: Sistema Operacional, Navegador, Versão do Navegador, Resolução da Tela, Plugins ativos/inativos no navegador, Habilitação de cookies
Geolocalização	Dados relacionados à localidade. Nessa categoria estão inclusos: Endereço IP do usuário, idioma do navegador, país, região/estado, cidade, latitude, longitude.
Quantidades	Dados que quantificam a navegação do usuário. Nessa categoria estão inclusos: Quantidade de visitas, Quantidade de ações, quantidade de pesquisas, quantidade de eventos, quantidade de objetivos alcançados.

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

A Figura 36 apresenta os dispositivos, sistemas operacionais, resoluções e outros dados relacionados aos dispositivos utilizados para acesso ao Laboratório Remoto, assim é possível identificar usabilidade ou Experiência do Usuário causada por dispositivos ou configurações específicas.

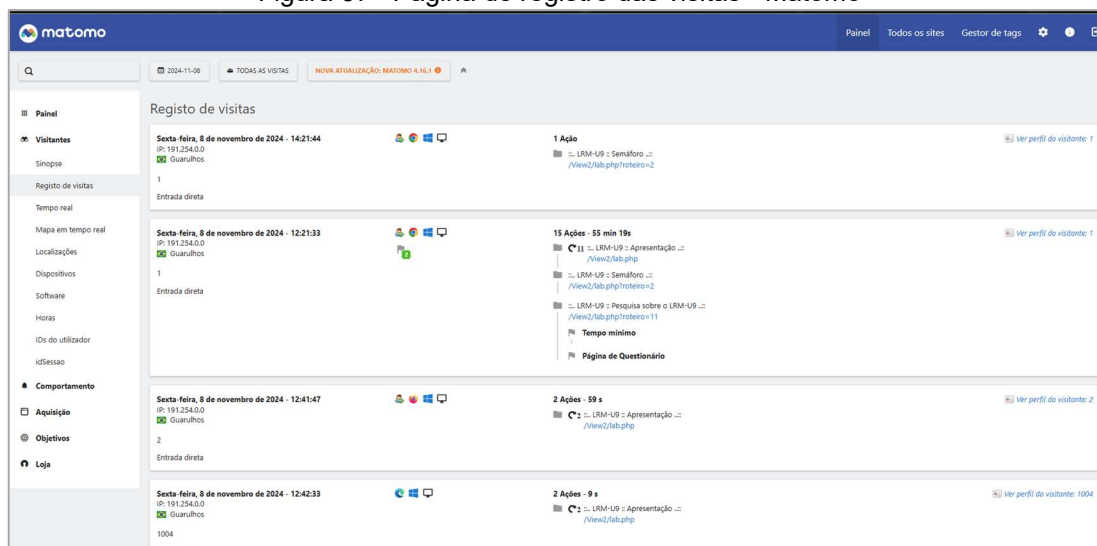
Figura 36– Página de dispositivos - Matomo



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

**Dados das ações da visita:** As visitas possuem uma lista de ações (Figura 37), sendo uma para cada ação que o usuário realizou durante a utilização da ferramenta. Esses registros são armazenados na tabela *log\_link\_visit\_action* e são apresentados no Quadro 32:

Figura 37– Página de registro das visitas - Matomo



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Na Figura 37 são ilustradas as visitas, contendo ações e demais informações sobre a navegação realizada, são apresentadas informações individuais de cada visita para que seja possível avaliar a navegação realizada durante a visita e compreender o comportamento do usuário.

Quadro 32 – Principais informações sobre as ações dos usuários

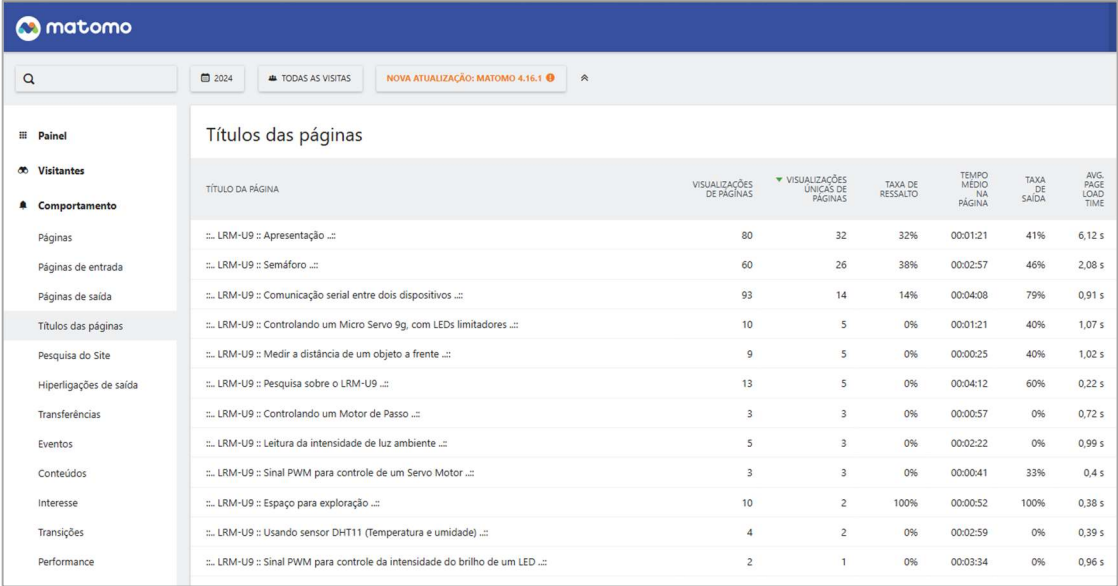
Categoria	Descrição
Tempo	Dados relacionados à data, hora e tempo. Nessa categoria estão inclusos: data/hora que a ação foi capturada, tempo gasto na execução da ação anterior, tempo gasto na execução da ação atual
Ordenação	Dados relacionados a ordem de realização da ação em relação a todas as ações da visita.

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

A Figura 38 demonstra dados sobre as páginas visitadas, como quantidade de visualizações, visualizações únicas (número de visitas que acessaram essa página), taxa de ressaltos (visitas que iniciaram nessa página e saíram logo a seguir), tempo

médio que os visitantes ficaram nessa página, taxa de usuários que saíram após visualizar essa página e tempo médio de carregamento da página.

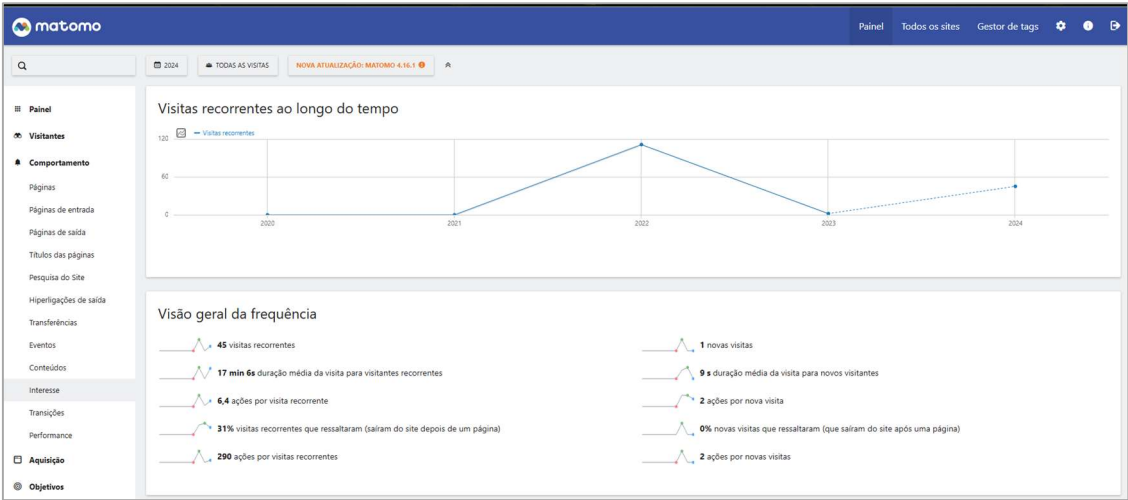
Figura 38– Estatísticas das páginas - Matomo



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

A Figura 39 apresenta informações relacionadas ao interesse dos usuários em relação ao Laboratório Remoto, demonstrando visitas recorrentes, duração média das visitas, média de ações por visita, entre outros dados relacionados a recorrência e duração das visitas.

Figura 39– Informações sobre tempo - Matomo



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

O Matomo emprega uma estratégia de armazenamento de dados otimizada para lidar com grade quantidade de métricas e relatórios que podem ser gerados por

*Web Analytics*. Essa estratégia ocorre na geração dos **Dados Analíticos**, ou dados de arquivo em que são armazenados os dados consolidados de um período para otimizar a consulta e armazenamento.

Os **Dados Analíticos**, denominados dados de arquivo na base de dados, por armazenarem dados que já foram processados e são utilizados apenas para consulta sob dimensões já definidas (Matomo, 2024). Esses dados são organizados em tabelas particionadas mensalmente e possuem duas categorias principais:

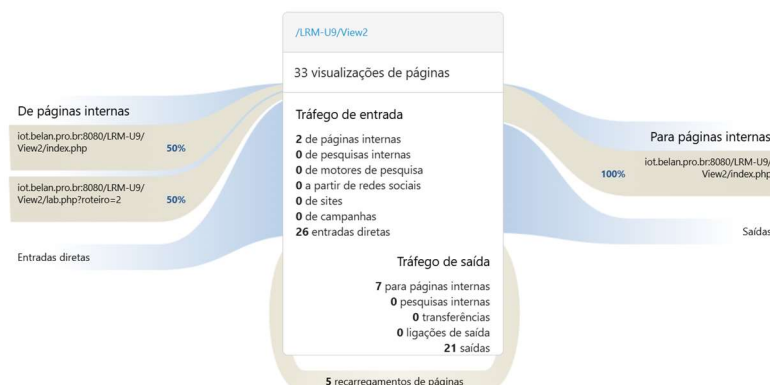
**Métricas** que contemplam valores numéricos que representam medidas quantitativas, como o número de visitas, páginas visualizadas, tempo médio por sessão, entre outros;

**Relatórios** que contemplam conjuntos de dados mais complexos, armazenados em formato binário, compactado e utilizados para visualizações e análises mais elaboradas.

Embora os **Dados Analíticos** sejam muito úteis na construção de relatórios de *Web Analytics* para compreensão de tendências dos usuários, efetividade de campanhas publicitárias, promoções, entre outras dimensões muito importante para gestão de lojas virtuais principalmente. Grande parte desses dados agrupam uma grande quantidade de usuários e visitas conforme o período, apresentando uma visualização dos resultados como um todo.

A Figura 40 demonstra um exemplo de informações sobre as transições realizadas entre outras páginas e a página do questionário, ilustrando assim o comportamento dos usuários em relação a essa página, demonstrando a página acessada anteriormente e posteriormente ao acesso ao questionário.

Figura 40– Informações sobre transições de página - Matomo



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Para a proposta do presente trabalho, foram utilizados os **Dados Brutos**, pois o processamento foi realizado com foco nos usuários, consolidando os dados por usuário ao invés de período. E assim, comparar os dados de navegação do usuário com a pontuação resultante do questionário.

Além dos dados coletados pelo Matomo, também são coletados dados específicos do uso, como é o caso dos dados de execução dos experimentos e dados de acesso aos roteiros, que foram vinculados aos dados do Matomo para obtenção de novos conhecimentos, como por exemplo o tempo médio de navegação e quantidade média de acessos até a conclusão com sucesso de um experimento.

E por fim, temos os dados referentes aos questionários *SUS*, *UMUX* e questões qualitativas que são norteadores da experiência obtida pelos usuários. Enquanto os dados de uso refletem o atingimento dos objetivos (tratando principalmente dos pilares de eficácia e eficiência da usabilidade), os dados do questionário apresentam a percepção dos usuários em todos os pilares e inclui o desdobramento para métricas de um nível mais detalhado sobre a percepção dos usuários.

Além dos dados armazenados no banco de dados, são realizados cálculos em tempo real para mensuração das métricas adicionais (componentes de qualidade da usabilidade) (Arroyo *et al.*, 2024; Boucinha; Tarouco, 2013; Nielsen, 2012), essas métricas são calculadas a partir das pontuações dos questionários com base na metodologia proposta por Arroyo *et al.* (2024), sendo: facilidade de aprendizagem, eficiência, memorização, minimização de erros e satisfação, a cada uma é atribuído um conceito de A+ (melhor nota) a F (pior nota) (Borsci *et al.*, 2015).

A Figura 41 apresenta os dados de entrada e as saídas obtidas, sendo as questões quantitativas Q1 a Q13 utilizadas como entradas para cálculo das pontuações *SUS*, *UMUX* e dos componentes de qualidade da usabilidade descritos por Nielsen (2012). Os valores numéricos obtidos por essas métricas são utilizados como valores alvo no treinamento da Regressão Linear através do *Neuro-Fuzzy*.



salvar código, executar código, exibir editor de blocos, exibir editor de códigos, revelar código resposta, ir para roteiro anterior e ir para próximo roteiro.

Nos dados coletados pelo Matomo há duas categorias principais, sendo Visitas e Ações. A visita pode conter diversas ações e possui como principais dados: data e hora, indicador de primeira visita, total de visitas do usuário, tempo passado desde a última visita, tempo passado desde a primeira visita, data e hora da primeira ação, data e hora da última ação, total de ações realizadas, tempo de duração da visita, sistema operacional utilizado, navegador, versão do navegador, resolução da tela, endereço IP, idioma e localidade. Cada página navegada é capturada como uma ação, para cada ação são coletados: data e hora da ação, tipo de ação, ordem da ação durante a visita, tempo gasto na ação, tempo gasto na ação anterior e URL/nome da página. Para complementar foram criados dois objetivos, sendo acesso ao questionário e permanência na visita durante mais de 30 minutos, caso um desses objetivos seja alcançado foi contabilizado também nos dados da ação

#### 4.4.6. Amostragem

A partir dos dados armazenados no banco de dados, foram realizados tratamentos para formatá-los e prepará-los para serem utilizados pela técnica selecionada. Esses tratamentos incluem a unificação de alguns dados em uma única informação que corresponda ao conhecimento armazenado nos mesmos. Por exemplo, os dados de diversas visitas de um mesmo usuário foram consolidados em um único registro, representando o total de ações ou a soma das ações por visita.

Foram obtidas 39 amostras contendo dados de navegação e resposta aos questionários. Os dados foram tratados e preparados resultando em 49 atributos apresentados no Quadro 33:

Quadro 33 – Atributos após tratamento e preparo dos dados brutos

Atributo	Descrição
ERROS_ANTES_PRIMEIRO_ACERTO	Quantidade de erros antes do primeiro acerto.
VISITAS_ANTES_PRIMEIRO_ACERTO	Quantidade de visitas antes do primeiro acerto.

TOTAL_EXECUCOES_SUCESSO	Total de execuções realizadas com sucesso.
TOTAL_ROTEIROS_SUCESSO	Total de roteiros executados com sucesso.
TOTAL_EXECUCOES_ERRO	Total de execuções que resultaram em erro.
TOTAL_ROTEIROS_ERRO	Total de roteiros que resultaram em erro.
NAV_DESCONECTAR	Total de vezes que o usuário clicou em desconectar.
NAV_DETALHES	Total de vezes que o usuário visualizou os detalhes da compilação ou gravação.
NAV_EXECUTAR_ARQUIVO	Total de vezes que o usuário executou experimentos.
NAV_EXIBIR_BLOCOS	Total de vezes que o usuário exibiu o editor de blocos.
NAV_EXIBIR_EDITOR_DE_CODIGOS	Total de vezes que o usuário exibiu o editor de códigos.
NAV_FORMULARIO_DE_CADASTRO	Total de vezes que o usuário acessou o formulário de cadastro.
NAV_IRPARA	Total de vezes que o usuário navegou pelos botões avançar ou voltar.
NAV_LER_ARQUIVO_TEMPORARIO	Total de vezes que o laboratório leu o código armazenado durante transição entre os editores de código e blocos.
NAV_LOGIN	Total de vezes que o usuário realizou o login
NAV_QUESTIONARIO	Total de vezes que o usuário acessou o questionário
NAV_REVELAR_CODIGO	Total de vezes que o usuário clicou em revelar código
NAV_SALVAR_ARQUIVO	Total de vezes que o laboratório salvou uma cópia do código
NAV_SALVAR_DADOS_CADASTRAIS	Total de vezes que o cadastro foi salvo



NAV_SELECT_ROTEIRO	Total de vezes que o usuário navegou para um roteiro específico pelo menu
NAV_VOLTAR	Total de vezes que o usuário clicou em cancelar
MTM_TOTAL_VISITAS	Total de visitas realizadas pelo usuário
MTM_TOTAL_ACOES	Total de ações realizadas pelo usuário nas visitas
MTM_NAVEGADOR_CH MTM_NAVEGADOR_PS MTM_NAVEGADOR_CM MTM_NAVEGADOR_FF MTM_NAVEGADOR_CI MTM_NAVEGADOR_VERSAO	Identificação do último navegador utilizado
MTM_COMPUTADOR MTM_SMARTPHONE	Identificação do último dispositivo utilizado
MTM_SO_WIN MTM_SO_AND MTM_SO_LIN MTM_SO_COS MTM_SO_IOS MTM_SO_VERSAO	Identificação do último sistema operacional utilizado
MTM_MAIOR_INTERVALO_VISITA	Maior intervalo entre as visitas
MTM_RESOLUCAO_ALTA MTM_RESOLUCAO_MEDIA MTM_RESOLUCAO_BAIXA	Identificação da última resolução utilizada
MTM_TEMPO_TOTAL_NAVEGACAO	Tempo total de navegação em todas as visitas
ALVO_APRENDIBILIDADE	Pontuação obtida pelo questionário resultante para o componente aprendibilidade.

ALVO_EFICIENCIA	Pontuação obtida pelo questionário resultante para o componente eficiência
ALVO_MEMORIZACAO	Pontuação obtida pelo questionário resultante para o componente memorização
ALVO_MINIMIZACAO_ERROS	Pontuação obtida pelo questionário resultante para o componente minimização de erros
ALVO_SATISFACAO	Pontuação obtida pelo questionário resultante para o componente satisfação
ALVO_SUS	Pontuação obtida pelo questionário resultante do questionário <i>SUS</i>
ALVO_UMUX	Pontuação obtida pelo questionário resultante do questionário <i>UMUX</i>
ALVO_MEDIA_SUS_UMUX	Pontuação média final dos questionários <i>SUS</i> e <i>UMUX</i>

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

As variáveis foram agrupadas por prefixo conforme a origem da coleta conforme apresentado no Quadro 34.

Quadro 34 – Prefixos e agrupamento das variáveis

Prefixo	Descrição
NAV_	Variáveis obtidas por captura criada na interface de usuário
MTM_	Variáveis obtidas por captura através do Matomo
ALVO_	Variáveis calculadas a partir das pontuações obtidas do questionário, podendo ser utilizadas como valor alvo do treinamento.

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Essas amostras foram separadas em conjunto de treino (~80%) e conjunto de validação (~20%) mantendo balanceamento proporcional entre usabilidade boa ou

ruim em ambos os conjuntos (Haykin, 1999; Mitchell, 1997), após a separação, os conjuntos foram submetidos à experimentos utilizando *Neuro-Fuzzy* em que foi possível identificar e selecionar as variáveis que possuíam impacto relevante aos resultados do modelo, as variáveis selecionadas são descritas na seção 4.5 a seguir. As variáveis que não possuem os prefixos apresentados no Quadro 34 foram criadas para o treinamento do modelo, não sendo valores diretamente coletados, mas sim valores resultantes de cálculos com os dados coletados.

#### 4.5. APLICAÇÃO DE TÉCNICAS INTELIGENTES PARA ANÁLISE DOS DADOS

Os dados coletados foram submetidos a diferentes modelos *Neuro-Fuzzy* visando o reconhecimento de padrões associados aos aspectos de usabilidade e Experiência do Usuário e função de aproximação das pontuações obtidas. Essa técnica inteligente inclui a utilização do algoritmo de retropropagação de erro (*Backpropagation*) na geração das funções de pertinência do Sistema de Inferência Fuzzy (SIF).

O objetivo foi extrair informações valiosas dos dados para compreender melhor como os usuários interagem com o sistema e identificar áreas de melhoria na usabilidade e na Experiência do Usuário. Para o presente trabalho, sendo uma primeira versão, optamos por utilizar exclusivamente *Neuro-Fuzzy* para analisar os dados coletados. A aplicação dessa técnica inteligente, proporcionou uma compreensão mais profunda dos padrões subjacentes nos dados coletados, o que pôde fornecer *insights* significativos para otimizar a interface e o desempenho do sistema LRM-U9.

Tendo em vista o atual estado da arte em relação à utilização de técnicas inteligentes para mensuração de usabilidade, sendo que os melhores resultados relatados foram obtidos utilizando *Fuzzy* (Fernández-Pérez *et al.*, 2018; Muhammad *et al.*, 2021), optamos pela utilização de *Neuro-Fuzzy* no presente trabalho devido às vantagens relacionadas à utilização de redes neurais para geração dos termos linguísticos do SIF (Cervantes *et al.*, 2017; Feng; Chen, 2020; Jang, 1993; Mitra; Hayashi, 2000; Simões; Shaw, 2007).

A partir dos dados obtidos nas respostas do questionário proposto por Arroyo *et al.* (2024) foi possível estabelecer a variável alvo de registros para o treinamento

do modelo, utilizando a média da pontuação das metodologias *SUS* e *UMUX*, juntamente com as variáveis derivadas da navegação correspondente ao uso que gerou as respostas. Neste estudo, foram conduzidos experimentos com *Neuro-Fuzzy* para examinar sua performance com base nos dados coletados. Esses experimentos envolveram diferentes atributos e tratamentos de dados, visando analisar a eficácia do *Neuro-Fuzzy* para resolver o problema em questão. Especificamente, foi avaliada a qualidade das regressões com *Neuro-Fuzzy* para o problema de avaliação da usabilidade e Experiência do Usuário no contexto do LRM-U9.

Após a realização dos experimentos foi identificado que para a amostra utilizada, alguns atributos não causavam impacto significativo nos resultados. Dessa forma, foram utilizados apenas 10 atributos para o treinamento final do modelo sendo: **TOTAL\_EXECUCOES\_SUCESSO, TOTAL\_ROTEIROS\_SUCESSO, TOTAL\_EXECUCOES\_ERRO, TOTAL\_ROTEIROS\_ERRO, NAV\_EXECUTAR\_ARQUIVO, NAV\_EXIBIR\_BLOCOS, NAV\_EXIBIR\_EDITOR\_DE\_CODIGOS, NAV\_QUESTIONARIO, NAV\_REVELAR\_CODIGO, NAV\_SALVAR\_ARQUIVO** e o valor alvo **ALVO\_MEDIA\_SUS\_UMUX**.

Dessa forma, os dados coletados pelo Matomo não tiveram variação significativa na amostra obtida e foram descartados do treinamento por não causarem impacto relevante nos resultados do treinamento.

Dentre as variáveis contendo valor alvo para treinamento, foi selecionada a média entre a pontuação do *SUS* e *UMUX* que reflete uma pontuação consolidada e mais generalista dos componentes de Usabilidade e Experiência do Usuário. Foi identificado que para a avaliação dos componentes de usabilidade individualmente, seria necessário a criação de um modelo para cada variável alvo sendo que a amostra obtida não mostrou variação suficiente para a criação de modelos para cada componente individualmente pois seria necessário a utilização de variáveis correlacionadas a aspectos específicos dos componentes e não houve variação significativa dessas variáveis na presente amostra.

Os dados obtidos permitiram o treinamento de um sistema de inferência, que resultou em funções de pertinência derivadas da variável alvo previamente atribuída pelas metodologias baseadas nos questionários *SUS* e *UMUX*. Este processo de treinamento possibilitou que o sistema de inferência aprenda padrões a partir dos

dados coletados e, assim, fosse capaz de estimar a pontuação em novos casos com base nas características extraídas da navegação e uso do LRM-U9.

#### 4.6. MODELAGEM DO SISTEMA DE INFERÊNCIA *NEURO-FUZZY* ADAPTATIVO (*ANFIS*)

Os *ANFIS* representam uma mistura potente da capacidade preditiva das redes neurais com a interpretabilidade dos sistemas *Fuzzy*. Eles encontraram aplicações extensas em vários campos, devido à sua capacidade de modelar relações complexas e não lineares em dados (Amaral *et al.*, 2020). Esses sistemas operam com base no princípio da lógica difusa (Zadeh, 1965) combinada com a aprendizagem adaptativa. Os parâmetros de entrada do sistema são inicialmente modelados usando um conjunto de rótulos linguísticos definidos por funções de associação difusa (Jang, 1993). O aspecto adaptativo do *ANFIS* vem de sua integração com algoritmos de aprendizado de redes neurais. As funções de associação difusa podem ser ajustadas durante o processo de aprendizado, permitindo que o sistema aprenda com os dados e melhore suas previsões. Essencialmente, o *ANFIS* usa os pontos fortes das redes neurais para otimizar os parâmetros do sistema difuso (Jang, 1993).

A aplicação do *ANFIS* em diversas áreas apresenta resultados promissores para predição. Ao incorporar diferentes fatores, o sistema pode prever resultados com uma compreensão das relações não lineares entre esses fatores (Amaral *et al.*, 2020).

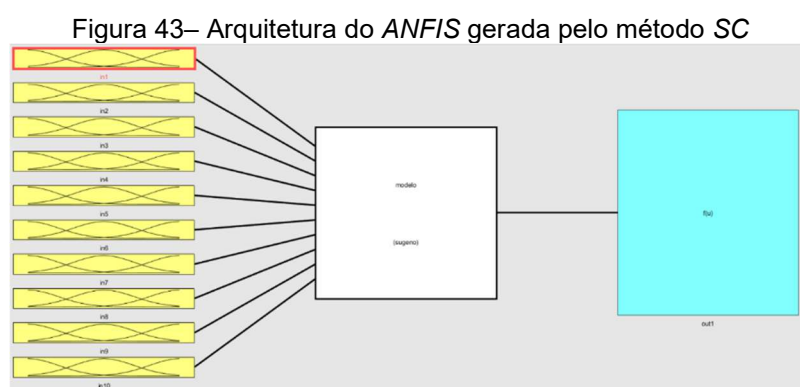
Como entrada do sistema *ANFIS* foram utilizados os dados de navegação coletados pela interface de usuário do LRM-U9 durante a realização dos experimentos, e como saída foi utilizado para validação o resultado *ALVO\_MEDIA\_SUS\_UMUX*, que é a composição da média dos questionários aplicados ao final dos experimentos pelos usuários.

A criação do *ANFIS* a partir do *MATLAB* (MathWorks, 2024b) permitiu a validação de vários modelos diferentes com o uso de *Grid Partitioning (GP)* e *Subtractive Clustering (SC)* (MathWorks, 2024a), variando o número de variáveis, termos linguísticos, funções de associação e regras.

Nos experimentos, o método *GP* foi inicialmente considerado para gerar as regras, contudo este método gera o máximo de regras possíveis para o problema, sendo uma conta exponencial, onde o número de termos linguísticos é elevado ao

número de variáveis de entrada, portanto, se usarmos 3 termos linguísticos para dez variáveis de entrada, um total de 59.049 regras ( $3^{10}$ ) serão geradas. O mesmo *ANFIS* com cinco termos linguísticos, por exemplo, contempla 9.765.625 regras ( $5^{10}$ ). Assim, ao tentar executar os experimentos houve grande esforço computacional e o computador não conseguia realizar o treinamento devido a limitação do hardware utilizado para os experimentos: Intel® Core™ i5-1135G7 - processador de 4,20 GHz com 4 núcleos e 8GB de memória RAM.

Para contornar o problema do número exponencial de regras geradas pelo *GP*, a alternativa foi o uso do método *SC*, que por sua vez combina regras mais próximas, gerando um conjunto muito pequeno de regras. Uma vantagem deste método foi a possibilidade de trabalhar com todas as variáveis de entrada. Esse método apresentou bons resultados e rodou sem causar problemas de travamento nem estouro de memória como o método *GP*, e o *ANFIS* gerado por ele, mostrado na Figura 43, está descrito a seguir. Nesta figura, fornecida pela ferramenta *Fuzzy Toolbox* do *MATLAB*, "*in1, in2, ..., in10*" correspondem às variáveis de entrada (elementos em amarelo), a caixa branca denominada "*sugeno*" indica o tipo de inferência *Fuzzy* que foi adotada e *f(u)* (caixa azul) é a saída do modelo, sendo representada pela função de saída do modelo *Fuzzy*.



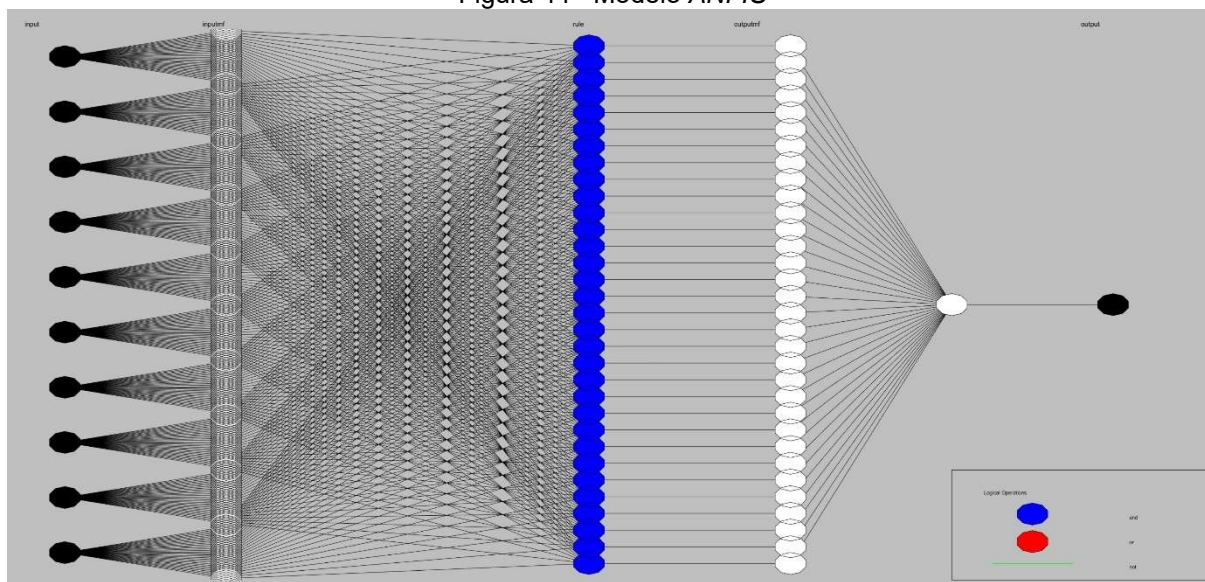
Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

O papel da rede neural no modelo é criar um conjunto de regras e ajustar as funções de associação associadas às variáveis de entrada e saída do *ANFIS*, a fim de minimizar seu erro de saída. Uma característica do *ANFIS* gerado pelo *SC* é sua composição utilizando funções de pertinência gaussianas em todos os termos

linguísticos (*in1cluster1* a *in10cluster32*). O modelo *ANFIS* completo é apresentado na Figura 44.

A primeira camada (*input*) indica as variáveis de entrada do problema, a segunda camada (*inputmf*) representam as 32 funções de pertinência para cada uma das entradas; na terceira camada (*rules*) tem-se a agregação das 32 regras geradas; a quarta camada (*outputmf*) é uma função de associação de saída, especificada como uma matriz de regras de entrada pelas amostras das funções de associação de saída; e por último, uma saída (*output*).

Figura 44– Modelo *ANFIS*



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Conforme apresentado na Figura 45, para cada variável de entrada foram gerados 32 termos linguísticos, o que demonstra a complexidade do ajuste dos conjuntos *Fuzzy*, sendo que cada uma das linhas representa as funções de pertinência para a variável, corroborando com a importância de utilização da rede neural.

Figura 45– Exemplo de modelagem das variáveis de entrada usando o método SC



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Um componente essencial do *ANFIS* é o conjunto de regras difusas, que modelam a relação entre entradas e saídas de maneira não linear e intuitiva. A Figura 46 apresenta alguns exemplos dessas regras, nas quais *out1cluster* representa a variável de saída.

Figura 46– Exemplo de regras geradas pelo *ANFIS*

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

As relações entre variáveis de entrada e saída podem ser descritas por uma função que representa o mecanismo de inferência *Fuzzy*. Em outras palavras, a saída ( $O$ ) é calculada em função dos valores coletados durante o uso do Laboratório Remoto, conforme indicado na Equação 19.

$$O = f(v1, v2, v3, v4, v5, v6, v7, v8, v9, v10) \quad (19)$$

sendo  $f$  representando o mapeamento não linear aprendido pelo *ANFIS*.

O *Root Mean Square Error (RMSE)*, ou raiz do erro médio quadrático, é apresentado na Equação 20 e foi a métrica utilizada para avaliar os resultados alcançados. É uma métrica amplamente utilizada em modelagem estatística e aprendizado de máquina para quantificar a diferença entre os valores previstos por um modelo e os valores reais do ambiente que está sendo modelado. Ela fornece uma medida clara da precisão com que um modelo prevê os resultados observados, com um *RMSE* mais baixo indicando um melhor ajuste entre os valores previstos e reais.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (20)$$

sendo  $n$  é o número de observações,  $y_i$  o valor real  $i$  e  $\hat{y}_i$  o valor previsto  $i$ .



## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção, são apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir das três abordagens analisadas e a consolidação final destas. Para melhor organização, a seção está estruturada da seguinte forma:

**RESULTADOS QUALITATIVOS:** contempla as respostas descritivas fornecidas pelos usuários, analisadas sob a perspectiva da pesquisa descritiva (Kumar, 2011), que busca descrever sistematicamente uma situação, problema, serviço ou programa. O principal objetivo dessa abordagem é identificar e relatar os aspectos predominantes relacionados à questão ou problema em estudo.

**RESULTADOS QUANTITATIVOS:** apresenta as pontuações obtidas a partir das questões dos questionários *System Usability Scale (SUS)* (Brooke, 1986, 2013) e *Usability Metrics for User Experience (UMUX)* (Finstad, 2010), cujas metodologias de cálculo foram descritas no Capítulo 2. Também são interpretados os resultados e consolidadas as pontuações dos componentes de usabilidade, conforme (Arroyo *et al.*, 2024).

**RESULTADOS DO MODELO ANFIS:** expõe os resultados obtidos pelo modelo *Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS)*, incluindo sua configuração e os parâmetros utilizados. As métricas empregadas foram o erro médio quadrático (*MSE*) para o treinamento, realizado com 33 amostras, e a raiz do erro médio quadrático (*RMSE*) para a validação, realizada com 6 amostras.

**RESULTADOS CONSOLIDADOS:** nesta subseção, são estabelecidas relações entre as três abordagens analisadas, permitindo a integração e interpretação dos resultados da pesquisa, além da apresentação das análises finais.

### 5.1. RESULTADOS QUALITATIVOS

Conforme descrito no capítulo 4, a abordagem qualitativa do presente trabalho tem o objetivo de descrever a experiência obtida pelos usuários através dos termos-chave relatados nas perguntas descritivas (Kumar, 2011). As perguntas descritivas não eram obrigatórias, para que a manifestação dos participantes fosse voluntária e evitasse respostas forçadas. O Quadro 35 demonstra as principais expressões-chave obtidos nas questões descritivas.

Quadro 35 – Principais expressões-chave obtidos nas questões descritivas

Questão	Expressões-chave
Houve dificuldades para compreender/realizar os roteiros dos exercícios? Quais?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dificuldade em compreender a utilização dos blocos</li> <li>• Inclusão de experiência lúdica</li> <li>• Digitar o código foi mais tranquilo</li> </ul>
O uso do Laboratório Remoto contribuiu efetivamente para o aprendizado/aprimoramento? Como?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dificuldades com os blocos de programação</li> <li>• Visualização da câmera atende às expectativas</li> <li>• Ajuda bastante devido a ferramenta ser intuitiva</li> <li>• É instrutivo mesmo sem acesso ao equipamento físico</li> <li>• Apresenta recursos para o aluno desenvolver habilidades em um ambiente <i>IoT</i></li> </ul>
Houve dificuldades na utilização do Laboratório Remoto? Quais?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dificuldades com os blocos de programação</li> <li>• Falta de afinidade com Arduino, porém facilmente sanada</li> <li>• Necessidade de conhecimento em eletrônica</li> </ul>
Quais foram as vantagens e/ou desvantagens observadas?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Agilidade na verificação de código</li> <li>• Dificuldades com os blocos de programação</li> <li>• Login descomplicado</li> <li>• Possibilidade de uma pessoa leiga programar em uma placa Arduino sem complicações</li> <li>• Fácil execução dos códigos</li> <li>• Dificuldade na visualização dos resultados</li> <li>• Permite uma boa experiência para quem não tem acesso físico a um Arduino</li> <li>• Simplicidade da ferramenta</li> <li>• Visualização em tempo real através da câmera</li> </ul>
Alguma sugestão para melhoria do uso do Laboratório Remoto?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tutorial para utilizar os blocos</li> <li>• Mais funções</li> <li>• Mais atividades</li> <li>• Manual e exemplos de montagem das placas</li> <li>• Funcionalidades cumprem o papel</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mais experimentos e hardware com balanceamento de carga</li> </ul>
Qual a percepção geral ao utilizar este Laboratório Remoto como ferramenta de ensino para experimentos ?	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dificuldades com os blocos de programação</li> <li>• Interface amigável e intuitiva</li> <li>• Pode ultrapassar a experiência de ensino e levar aprendizado ao público em geral</li> <li>• Uma forma interessante de ensino</li> <li>• Gostaria de utilizar com meus discentes</li> <li>• Ótima escolha para primeira aproximação com o Arduino</li> <li>• Ideia muito interessante e prática</li> <li>• Diferencial no ensino/aprendizagem para alunos com pouca ou nenhuma experiência em <i>IoT</i></li> </ul>

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

As expressões-chave mencionadas no Quadro 35 contemplam expressões mais frequentes e também expressões consideradas mais relevantes no contexto do presente trabalho. A proposta da análise qualitativa demonstra que as questões se completam e se confirmam, tendo em vista que o objetivo é compreender as dificuldades e facilidades na utilização da ferramenta. Algumas respostas se repetiram em mais de uma pergunta, fortalecendo afirmações de facilidades e dificuldades enquanto em outros casos as respostas se complementam para um melhor entendimento da experiência obtida.

Em trabalho anterior (Arroyo, 2020; Arroyo *et al.*, 2024), os roteiros e códigos eram fornecidos aos alunos e eles deveriam digitar o código na ferramenta Arduino IDE para realizar os experimentos, porém dois alunos tiveram dificuldade devido à falta de conhecimento prévio em programação o que gerou uma experiência ruim na realização dos experimentos. Para o presente trabalho, foi implementada a criação dos códigos através dos blocos (Pasternak; Fenichel; Marshall, 2017) com o intuito de facilitar a criação de códigos, porém pela análise qualitativa é possível compreender que esse intuito não se concretizou, pois houve diversos relatos de dificuldade na compreensão para utilização dos blocos.

A dificuldade na utilização dos blocos sem conhecimento prévio e o fato dos blocos aparecerem como primeira opção para geração dos códigos, prejudicou a

experiência inicial de alguns participantes. Porém também foi relatado que após algumas interações com os blocos foi possível compreender sua utilização e a experiência melhorou. Através das respostas foi possível identificar que a implementação dos blocos para criação dos códigos exige documentação pois sua utilização não foi intuitiva no primeiro contato da maioria dos participantes.

Houve um participante que relatou não ter conseguido visualizar a câmera em tempo real, sendo possivelmente um problema técnico momentâneo que prejudicou a experiência, porém o participante relata ter sido uma experiência interessante mesmo que prejudicada pela ausência da câmera.

Em relação à compreensão e realização dos roteiros, 33% dos participantes não responderam, 25% dos respondentes relataram ter dificuldades, 33% relataram não ter dificuldades e 33% sugeriram alguma melhoria embora tenham relatado não ter dificuldades. Para 78% dos respondentes o Laboratório Remoto contribuiu efetivamente para aprendizado ou aprimoramento, 22% relataram que não contribuiu e 25% dos participantes não responderam.

Dentre os participantes, 25% não responderam sobre dificuldades, 22% dos respondentes relataram dificuldades na utilização do Laboratório Remoto apenas no início para entender o funcionamento dos blocos ou devido ao primeiro contato com o Arduino, 33% relataram não ter nenhuma dificuldade. Em relação às vantagens, 75% dos participantes responderam, sendo que 56% dos respondentes relataram simplicidade e facilidade, 25% relataram possibilidade de acesso a um Arduino ou redução de custos com hardware. E como desvantagens, 25% relataram dificuldades de visualização na câmera e 11% relataram falta de conhecimento prévio para utilização dos blocos.

Houve manifestação de 17% que não haviam sugestões e que a ferramenta cumpre o objetivo proposto, 25% não se manifestaram e 58% dos participantes forneceram sugestões de melhoria, dentre estes destaca-se que 57% sugerem a expansão de roteiros ou atividades e 29% sugerem criação de documentação, manuais ou exemplos de montagem para redução da curva de aprendizagem.

Em uma visão geral da utilização do Laboratório Remoto, houve manifestação de 67% dos participantes, em que 100% dos respondentes relataram aspectos positivos, sendo que 63% destacam a utilização do Laboratório Remoto como

ferramenta de ensino/aprendizado e 37% se referem à ferramenta como intuitiva, amigável, interessante ou prática.

Um aspecto interessante observado nas respostas é que, embora o Laboratório Remoto tenha sido desenvolvido para atuar como ferramenta de ensino, seguindo outros trabalhos na literatura (Balamuralithara; Woods, 2009; Chacon *et al.*, 2015; Fernández-Pacheco; Martin; Castro, 2019; Garcia-Zubia *et al.*, 2016; Lima; Viegas; Garcia-Peñalvo, 2019b; Luthon; Larroque, 2014; Martinez; Garcia-Zubia; Martinez-Pieper, 2015; Pavani *et al.*, 2023; Rodriguez-Gil *et al.*, 2017; Viegas *et al.*, 2018), devido à diversidade da amostragem que embora tenha sido um público relacionado ao contexto possui diferentes perspectivas sobre o tema, 25% dos participantes se referem à aprendizagem ao invés de ensino remetendo que à possibilidade de que a ferramenta não apenas seja utilizada em cursos com acompanhamento de um professor ou orientador, mas que também seja possível a aprendizagem de forma autônoma, aberta para públicos que inclusive não possuam formação em áreas diretamente relacionadas ao contexto.

Algumas das respostas obtidas sustentam o argumento de expansão do Laboratório Remoto para ferramenta de aprendizagem ao invés de ferramenta de ensino, tais como:

- “Acho que pode ir além de uma experiência de ensino, pode ultrapassar o ensino e levar ao público geral que possam programar”
- “Acredito ser um diferencial no ensino/aprendizagem para alunos com nenhuma ou pouca experiência em IoT.”
- “Assim uma pessoa leiga consegue programar uma placa Arduino sem complicações, com uma interface intuitiva com blocos.”
- “Como dito anteriormente, pra quem não tem acesso a um Arduino, esse lab proporciona uma experiência boa”.

## 5.2. RESULTADOS QUANTITATIVOS

Conforme descrito no capítulo 2 e também em Arroyo *et al.* (2024), os questionários SUS (Brooke, 1986, 2013) e UMUX (Finstad, 2010) possuem uma metodologia em que as questões quantitativas resultam em uma pontuação entre 0 e

100 que refletem à mensuração de usabilidade e Experiência do Usuário respectivamente.

No capítulo 2, é apresentado o questionário *SUS* bem como sua metodologia de cálculo (Brooke, 2013) e a normalização das pontuações em notas de F a A+ (Sauro e Lewis, 2012 *apud* Borsci *et al.*, 2015). Sendo que pontuações abaixo de 51,7 correspondem a pior usabilidade e pontuação acima de 68 é considerada usabilidade acima da média, enquanto pontuação acima de 84,1 é considerada a melhor usabilidade possível (Brooke, 2013).

As amostras obtidas abrangem pontuações no intervalo entre 42,6 e 98,2, representando as faixas de pior usabilidade a melhor usabilidade possível. As pontuações ficaram em 58% para valores acima da média (68 pontos) e 42% para valores abaixo da média (68 pontos). A pontuação média obtida foi 72,5 representando a nota C+ conforme normalização, essa pontuação representa uma usabilidade pouco acima da média.

Como descrito em Arroyo *et al.* (2024) e Tenório *et al.* (2010), a partir das pontuações obtidas pelo *SUS* é possível determinar pontuações para os componentes de qualidade da usabilidade (Boucinha; Tarouco, 2013; Nielsen, 2012; Tenório *et al.*, 2010) e com as normas técnicas pertinentes, como ISO 9241-11 (2018), NBR ISO 9241-11:2011 (2011) e NBR ISO 9241-151:2011, 2011). Na Tabela 5 são demonstradas as pontuações médias desses componentes .

Tabela 5 – Pontuação média dos componentes de qualidade

Componente	Nota	Média	Mínimo	Máximo
<b>Aprendibilidade</b>	D	61,3	29	96,5
<b>Eficiência</b>	A-	80	46,7	98,6
<b>Memorização</b>	C	70	0	100
<b>Minimização de Erros</b>	A	81,7	40	100
<b>Satisfação</b>	B+	72,2	46	99,3

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Dentre os componentes de qualidade podemos verificar uma grande variação de pontuações, variando entre as notas D e A reforçando que houve diferentes experiências na amostra obtida bem como a discrepância entre as experiências, como podemos verificar na variação entre valores mínimos e máximos.

O componente de aprendibilidade se refere à facilidade de que os usuários realizem tarefas básicas na primeira vez que acessam o sistema (Nielsen, 2012), a nota D corrobora com as respostas das questões descritivas que relataram a dificuldade de compreender a utilização do editor de blocos prejudicando o início da experiência no LRM-U9. Em contrapartida, o componente eficiência (Nielsen, 2012) que se referem a rapidez para executar tarefas após ter aprendido o sistema obteve nota A-, reforçando o fato que após a compreensão da utilização da ferramenta se tornou uma experiência agradável conforme resultados qualitativos. O resultado desses componentes nos indica que na maioria dos casos houve uma usabilidade ruim no início, até a compreensão do uso dos blocos, porém essa usabilidade se tornou melhor após algumas interações.

O componente de memorização que se refere à facilidade com que os usuários podem reestabelecer sua proficiência na utilização da ferramenta após um período de tempo sem utilizá-lo (Nielsen, 2012), a pontuação foi intermediária correspondendo aos dados de navegação pois os usuários realizaram os experimentos majoritariamente em uma única visita de forma que a amostra não tenha sido suficiente para diversidade de respostas nesse aspecto.

Enquanto o componente de aprendibilidade se refere à facilidade no primeiro uso da ferramenta, o componente de minimização de erros remete à quantos erros os usuários cometem, qual a gravidade destes erros e com que facilidade se recuperam (Nielsen, 2012), nesse sentido foi obtida uma nota A que corresponde a uma avaliação ótima e também corrobora com os resultados qualitativos que indicaram que a ferramenta possui interface intuitiva e amigável mesmo que no primeiro contato tenha sido uma experiência ruim devido à dificuldade de compreensão do editor de blocos.

O componente de satisfação remete a quanto é agradável utilizar o sistema (Nielsen, 2012) e resultou em uma nota B+ que representa uma avaliação levemente acima da média, em conformidade com os resultados qualitativos que indicaram dificuldades, porém indicaram que a ferramenta como um todo atende o propósito, é intuitiva, amigável e contribuiu com o aprendizado/aprimoramento dos participantes.

Ao aprofundar a análise ao nível dos componentes de qualidade da usabilidade (Nielsen, 2012), foi possível fortalecer os resultados da abordagem qualitativa e

também reduzir a subjetividade da avaliação de usabilidade descrita por Fernández-Pérez *et al.* (2018).

A pontuação obtida pelo questionário *UMUX* (Experiência do Usuário) apresentou resultados um pouco melhores que o *SUS* (usabilidade) correspondendo a uma pontuação média de 76,6 que corresponde a nota B na normalização, sendo uma pontuação 5,3% maior que a pontuação *SUS*. É comum o *UMUX* resultar uma pontuação média pouco maior que o *SUS*, por representar uma perspectiva mais generalizada da experiência obtida, porém isso não significa que em todos os casos a pontuação *UMUX* seja maior que *SUS*. De acordo com as amostras obtidas, em 25% dos casos a pontuação do *SUS* foi maior que a pontuação *UMUX*.

Para unificar as pontuações obtidas em uma única métrica, foi calculada a média entre a pontuação *SUS* e *UMUX* de cada participante, resultando na pontuação mínima de 41,7 e máxima de 99,9. A média entre todas as amostras ficou em 74,1 que corresponde a uma nota final unificada B mantendo a avaliação geral um pouco acima da média, isso demonstra que o Laboratório Remoto possui bastante espaço para melhorias e que foram encontradas dificuldades em sua utilização. O fato de o Laboratório Remoto ter apresentado pontos negativos e pontos positivos contribui para a validação da metodologia por representar diferentes percepções de usabilidade.

### 5.3. RESULTADOS DO MODELO ANFIS

Um modelo *ANFIS* foi treinado para prever a usabilidade do usuário com base nos dados de navegação do Laboratório Remoto. O objetivo foi avaliar a usabilidade da ferramenta de forma inteligente, utilizando como resposta a média dos valores de pontuações *SUS* (*System Usability Scale*) e *UMUX* (*Usability Metric for User Experience*). Esses valores foram coletados a partir de um formulário final respondido pelos usuários.

A configuração do modelo *ANFIS* no *MATLAB* apresentou a seguinte estrutura:

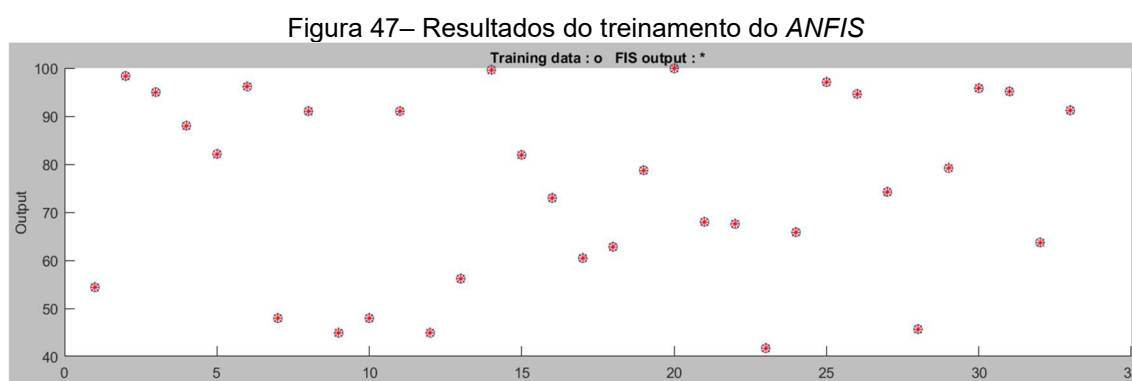
- **Número de nós:** 717
- **Número de parâmetros lineares:** 352
- **Número de parâmetros não lineares:** 640
- **Total de parâmetros:** 992



- **Número de pares de dados para treinamento:** 33
- **Número de pares de dados para validação:** 6
- **Número de regras *Fuzzy*:** 32

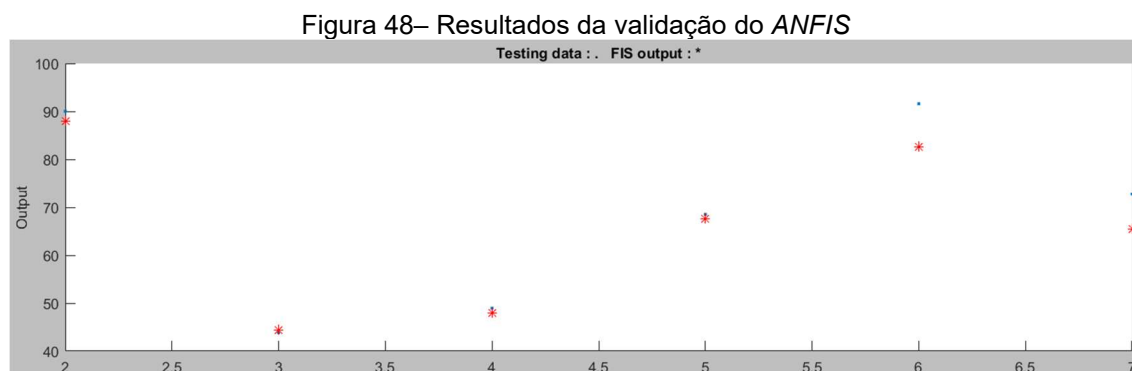
O processo de treinamento do modelo foi realizado utilizando a métrica *Mean Squared Error (MSE)* como critério de otimização. O treinamento convergiu rapidamente, finalizando em apenas 2 épocas, com baixos valores de erro, isso pode ser observado na Figura 47:

1. Época 1:  $MSE = 4,95945e-05$
2. Época 2:  $MSE = 6,65537e-05$



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Após o treinamento, o modelo foi validado utilizando o conjunto de dados de validação. A raiz do erro médio quadrático (*RMSE*) calculado sobre os dados de validação foi de 4,6486, sendo que os valores da resposta variam entre 1 e 100. Esse resultado indica que a precisão da previsão do modelo é alta, dado que um erro de 4,6 representa uma pequena fração do intervalo total da variável resposta (Haykin, 1999; Mitchell, 1997), conforme apresentado na Figura 48.



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Os resultados obtidos com o modelo *ANFIS* reforçaram a viabilidade da utilização da técnica para a previsão da usabilidade dos usuários no Laboratório Remoto, com alta precisão e convergência rápida no treinamento. A validação realizada demonstrou a capacidade de generalização e potencial para aplicação em cenários reais.

#### 5.4. RESULTADOS CONSOLIDADOS

Após o levantamento dos resultados das abordagens qualitativa, quantitativa e do modelo *ANFIS* podemos analisar os resultados obtidos pelo presente trabalho relacionando essas abordagens. Ao consolidar os dados foi possível reconhecer aspectos semelhantes de uso e navegação dos usuários.

No estudo anterior (Arroyo, 2020; Arroyo *et al.*, 2024) foram encontrados problemas de conhecimento prévio em programação e dificuldades de acesso, esses problemas não foram relatados no presente trabalho devido a criação da interface de usuário. Porém um outro problema foi relatado devido a implementação do editor de blocos.

De acordo com a abordagem qualitativa, muitos usuários relataram dificuldades de compreensão da utilização dos blocos, informando que o início da jornada foi prejudicado por não compreender o funcionamento, mas que após algumas interações e utilizando a possibilidade de digitação de código a jornada melhorou. É possível observar que os usuários que relataram essa dificuldade, de acordo com os dados de navegação alternaram mais vezes entre o editor de código e blocos, bem como acionaram mais vezes o armazenamento temporário que a ferramenta realiza quando o editor perde o foco e também mudaram de roteiro diversas vezes sem realizar o experimento de fato. Isso indica que não interagiram de forma contínua com o editor, mas sim entraram e saíram dele diversas vezes. O que corrobora com os resultados qualitativos e resulta em uma pontuação final de 48, sendo uma das pontuações mais baixas obtidas e demonstra uma usabilidade muito ruim.

Por outro lado, um outro usuário que também relatou o mesmo problema, porém relatou ter ocorrido apenas inicialmente pois logo encontrou o editor de códigos e não insistiu em utilizar o editor de blocos, obteve uma pontuação final de 88,02 sendo uma usabilidade entre as melhores possíveis. A diferença entre os casos pode

ser percebida nos dados de navegação que revelam que o primeiro caso trocou o editor e o roteiro várias vezes sem realizar a execução do experimento em uma única visita enquanto no segundo caso foram realizadas 3 visitas, executou experimentos mais vezes e trocou o editor ou roteiro menos vezes. Em ambos os casos o modelo *ANFIS* conseguiu compreender o comportamento e resultou em uma pontuação muito próxima.

Outro caso em que resultou em uma das pontuações mais baixas foi o usuário que não conseguiu visualizar os resultados pela câmera, esse caso foi um dos que conseguiram realizar mais experimentos com sucesso e sem ter obtido erros na execução, porém teve a sua experiência prejudicada devido a falha na câmera.

A maioria das amostras que tiveram pontuações altas utilizaram o recurso de “revelar o código do experimento”, mudaram de editor poucas vezes, utilizaram prioritariamente o editor de códigos e trocaram de roteiros uma quantidade média em relação às demais amostras. Embora o *RMSE* tenha resultado em um valor baixo, ainda há um pequeno erro a ser considerado, mas foi possível identificar que na maioria dos casos o erro gera uma pontuação um pouco inferior a pontuação real, ou seja, as predições podem indicar uma usabilidade ligeiramente inferior à usabilidade real, porém no caso em que o erro gere uma pontuação maior, o valor é muito pequeno, normalmente imperceptível (por exemplo 0,02 em uma escala de 0 a 100).

O presente trabalho resultou na elaboração de um artigo intitulado "Avaliação da Efetividade de LRs na Educação de Microcontroladores e *IoT*: Um Estudo de Usabilidade" (APÊNDICE A), o qual foi publicado na revista "ETD – Educação Temática Digital" (Classificação Qualis Capes A1 / 2017-2020).

## 6. CONCLUSÕES

Tendo em vista a relevância dos temas *IoT* e *LRs* que evidenciam a necessidade de metodologias para avaliação de seu uso e a necessidade de otimização em processos de análise de usabilidade, bem como o crescente (embora ainda limitado) uso de técnicas inteligentes nessa avaliação e ausência de análise inteligente com dados de *Web Analytics*. O presente trabalho apresentou uma nova abordagem, adaptando o uso de diferentes temas encontrados na literatura para que se relacionem com o objetivo de contemplar uma metodologia ainda não explorada para análise de usabilidade e *UX*.

Foi apresentada uma metodologia inteligente de avaliação de usabilidade e *UX* utilizando dados de *Web Analytics* e dados complementares ao contexto, que foram analisados por meio de um modelo *ANFIS* para reconhecer o padrão de usuários que relataram usabilidade/*UX* boa ou ruim. Questionários foram aplicados e utilizados para treinamento do modelo *ANFIS* bem como validação dos resultados obtidos.

Sistema *Neuro-Fuzzy Adaptativo (ANFIS)* foi utilizado, os dados receberam tratamento para possibilitar seu uso através da técnica, algumas informações foram agrupadas (como por exemplo tempo total da visita). As pontuações obtidas através dos questionários *SUS* e *UMUX* foram utilizadas como variável alvo do treinamento.

Três abordagens foram utilizadas no presente trabalho, sendo estudo qualitativo, estudo quantitativo e sistema inteligente *ANFIS*. A abordagem qualitativa, através das questões descritivas possibilitou compreender a experiência dos usuários através dos relatos e identificar pontos de melhoria no *LR*, como por exemplo a dificuldade dos usuários em compreenderem o funcionamento do editor de blocos, bem como dificuldades relacionadas a visualização em tempo real pela câmera.

A segunda abordagem analisada foi a metodologia quantitativa utilizando os questionários *SUS* e *UMUX* que resultam em uma pontuação final entre 0 e 100, a pontuação obtida pelo do *SUS* também pode ser convertida para pontuações de componentes de usabilidade como aprendibilidade, eficiência, memorização, minimização de erros e satisfação. Permitindo assim uma avaliação aprofundada da usabilidade.

Diante da presente amostra, não foi possível criar modelos mais específicos para cada um dos componentes, sendo criado apenas um modelo para avaliação geral do laboratório. As pontuações obtidas entre o *SUS* e *UMUX* tendem a possuir uma pequena diferença, para unificá-las em uma métrica para treinamento do modelo foi calculada a média entre ambas. Essa métrica foi utilizada para treinamento do modelo *ANFIS*.

O modelo utilizou inicialmente o método *Grid Partitioning (GP)* para geração de regras que depois foi substituído pelo *Subtractive Clustering (SC)* (MathWorks, 2024a) com o intuito de otimização dos recursos computacionais, foram utilizadas 33 amostras para treinamento e gerados 32 termos linguísticos para cada variável de entrada. O método de defuzzificação utilizado foi Takagi-Sugeno com treinamento em duas épocas que resultaram em um valor MSE de 4,95945e-05 na primeira época e 6,65537e-05 na segunda época. Para validação do modelo foram utilizadas 6 amostras que resultaram em RMSE de 4,6486, um resultado bastante satisfatório.

Os resultados obtidos reforçam a hipótese central deste estudo: os dados de uso e navegação podem ser um preditor confiável da usabilidade e Experiência do Usuário. O baixo valor de *RMSE* sugere que o modelo *ANFIS* foi capaz de captar a relação entre os padrões de navegação no LR e os valores do *SUS* e *UMUX* relatados pelos usuários. Isso indica que o sistema desenvolvido pode auxiliar na identificação de dificuldades da utilização da ferramenta durante o aprendizado e potencialmente adaptar a experiência do usuário para melhorar a eficácia do ensino baseado em laboratórios remotos.

O presente trabalho realizou a análise apenas no LRM-U9, mas há indícios que essa abordagem poderia ser explorada em trabalhos futuros a outras ferramentas *web* ajustando os dados complementares ao contexto de uso de tal ferramenta.

Embora a avaliação do LR tenha sido satisfatória devido a pontuação ter ficado acima da média, o presente trabalho tinha o propósito de validar a metodologia de avaliação da usabilidade e *UX*. Para garantir o nível de usabilidade do LRM-U9 seria necessária uma amostra maior e mais específica. Os resultados obtidos também demonstraram aspectos de melhoria, assim como foram identificados na pesquisa anterior, os padrões encontrados refletiram problemas comuns aos usuários que podem ser solucionados para uma melhor experiência.

Ressalta-se que na literatura existem poucos trabalhos sobre a mensuração/análise de usabilidade ou *UX* utilizando técnicas inteligentes, a maioria dos trabalhos com essa abordagem não conseguiram bons resultados e também não chegaram a serem publicados em revistas científicas (apenas em congressos), porém a relevância do assunto se mostra evidente devido ao fato de muitas revistas publicarem atualmente sobre a mensuração de usabilidade e *UX* em diferentes tipos de sistemas, bem como a relevância de indicadores de efetividade para LRs e também o aumento de pesquisas buscando a mensuração de usabilidade e *UX* de forma menos onerosa que o uso dos métodos tradicionais.

Os temas apresentados como LRs e *IoT*, usabilidade e *UX*, *Web Analytics* e uso de técnicas inteligentes não costumam ter relação na literatura, em alguns trabalhos foi encontrada relação entre dois desses temas mas não entre todos, bem como apenas foram encontradas relações parciais da proposta do presente trabalho, como por exemplo uso de técnicas inteligentes para mensurar usabilidade em sistemas computacionais a partir de respostas coletadas em questionários ou mensuração de usabilidade e *UX* por meio de análise manual de relatórios em ferramentas de *Web Analytics*.

Diante desse contexto, foi possível apresentar uma metodologia que direciona novos estudos para preenchimento das lacunas e necessidades existentes, o presente estudo apresentou uma nova abordagem que utiliza uma junção inédita de técnicas já aplicadas em outros contextos e também foi possível observar que os trabalhos atuais possuem bastante distinção em relação aos dados utilizados, sendo novidade o uso de dados de uso e navegação como base para treino.

Destacamos que o presente estudo se limitou à utilização apenas de *Neuro-Fuzzy*, utilizando dados de uso e navegação conforme o contexto apresentado. Outras técnicas, amostras maiores, diferentes contextos ou públicos podem expandir a pesquisa e demonstrar novos resultados.

Para trabalhos futuros, sugere-se a ampliação do conjunto de dados para incluir diferentes perfis de usuários, exploração de métodos híbridos que combinem técnicas *Neuro-Fuzzy* com redes neurais profundas para um refinamento ainda maior das previsões e também é possível a criação de Laboratórios Remotos para outros temas de aprendizado.

Técnicas de otimização podem ser aplicadas, como por exemplo reordenar os roteiros a partir de técnicas de busca utilizando o tempo de realização dos experimentos como medida de custo afim de direcionar roteiros com menor complexidade para serem realizados antes dos roteiros de maior complexidade.

Uma outra possibilidade é a utilização dos padrões encontrados para melhorias no LRM-U9, como por exemplo, comparação dos padrões dos roteiros em relação aos dados coletados para reconhecer características dos roteiros que os usuários concluem menos e com isso rever estes roteiros, ou reconhecer padrões dos usuários ao realizarem roteiros mais simples, que possuem maior dificuldade na realização de roteiros mais complexos, e aplicar técnicas de otimização que incluam outros roteiros simples complementares para uma maior jornada de aprendizado desses usuários antes de realizar os experimentos mais complexos, entre outras possibilidades.

A presente pesquisa fornece contribuição teórica aos seguintes temas:

- **IoT:** Desenvolvimento de LR para aprendizado e avaliação de seu desempenho como ferramenta de ensino com uso de equipamentos reais, e não apenas simulados;
- **LRs:** Construção de metodologia de avaliação de usabilidade e UXs com coleta automatizada de informações por meio de técnicas de *Web Analytics* e dados personalizados sobre os estudos;
- **Usabilidade e UX:** Análise inteligente a partir de coleta de dados automatizada com dados de *Web Analytics* e dados específicos ao contexto de uso;
- **Web Analytics:** aplicação de técnicas originalmente utilizadas nas áreas de publicidade e marketing através do complemento de dados específicos ao contexto de uso para compreensão do comportamento do usuário em relação ao processo de realização de tarefas em uma ferramenta web;
- **Técnicas Inteligentes:** aplicação prática para aquisição de conhecimento a partir de dados utilizados em técnicas de *Web Analytics* e possibilidade de análise de usabilidade e UX.

As contribuições teóricas do presente trabalho originam-se de lacunas e soluções encontradas em diferentes temas que não possuem relação direta na

literatura e para que o escopo de relacionar diferentes temas com diferentes perspectivas não se torne complexo ou subjetivo demais, é importante que a delimitação e objetivo de relacionar estes temas sejam muito bem definidos, assim como qual técnica ou procedimento de cada tema será aplicado, em que contexto e com qual objetivo.

O presente trabalho também apresenta contribuições práticas para o aprendizado em *IoT*, através do LR que permite a realização de experimentos à distância, sem a necessidade de comparecimento à universidade. Profissionais em áreas relacionadas ao desenvolvimento de *software* ou Engenharia Elétrica podem aprimorar seus conhecimentos, sem a necessidade de construir um ambiente para desenvolvimento. Desenvolvedores de *software* podem utilizar a metodologia apresentada para avaliação constante da usabilidade e Experiência do Usuário sem a necessidade de ficar enviando questionários aos usuários, sendo que após o treinamento do modelo é possível inferir a usabilidade e Experiência do Usuário sem a necessidade de responderem os questionários.

O Laboratório Remoto apresentado foi um protótipo construído para validação da metodologia, porém diante dos resultados obtidos, é possível aprimorar a arquitetura e funcionalidades para expandir seu uso e democratizar o aprendizado. Tendo em vista que os resultados indicaram a possibilidade de aprendizagem autônoma e não apenas no contexto de ensino, a ferramenta pode se tornar bastante promissora não apenas para instituições de ensino, como talvez, para a sociedade em geral.



## REFERÊNCIAS

ABRAN, Alain *et al.* Usability meanings and interpretations in ISO standards. **Software quality journal**, [s. l.], v. 11, n. 4, p. 325–338, 2003.

ADJIH, C *et al.* FIT IoT-LAB: A large scale open experimental IoT testbed. *In:* , 2015. **2015 IEEE 2nd World Forum on Internet of Things (WF-IoT)**. [S. l.: s. n.], 2015. p. 459–464.

AGBOZO, Ebenezer. Web Usability Segmentation - Applying K-Means Clustering to the System Usability Scale. *In:* , 2023. **Proceedings - 2023 IEEE Ural-Siberian Conference on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology, USBEREIT 2023**. [S. l.]: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2023. p. 206–209.

AGGARWAL, Mukul; TIWARI, Amod Kumar. Usability of KSOM and classical set in information retrieval. *In:* , 2016. **2016 3rd International Conference on Computing for Sustainable Global Development (INDIACom)**. [S. l.: s. n.], 2016. p. 165–168.

AHMED, Muhammad Swilam; FAYED, Ayman A. A current-mode delay-based hysteretic buck regulator with enhanced efficiency at ultra-light loads for low-power microcontrollers. **IEEE Transactions on Power Electronics**, [s. l.], v. 35, n. 1, p. 471–483, 2020.

AMARAL, Jorge L.M. *et al.* Differential diagnosis of asthma and restrictive respiratory diseases by combining forced oscillation measurements, machine learning and neuro-fuzzy classifiers. **Medical and Biological Engineering and Computing**, [s. l.], v. 58, n. 10, p. 2455–2473, 2020.

ARROYO, Fernando Bittencourt *et al.* Avaliando a efetividade de laboratórios remotos na educação de microcontroladores e IoT. **ETD - Educação Temática Digital**, [s. l.], v. 26, p. e024047, 2024. Disponível em: <https://periodicos.sbu.unicamp.br/ojs/index.php/etd/article/view/8673644>.

ARROYO, Fernando Bittencourt. **Desenvolvimento e avaliação de usabilidade de um laboratório remoto para ensino de microcontroladores**. 2020. Dissertação - Dissertação (Mestrado em Informática e Gestão do Conhecimento) – Universidade Nove de Julho, São Paulo, 2020.

BAKAEV, Maxim *et al.* Evaluation of user-subjective web interface similarity with Kansei engineering-based ANN. *In: , 2017. **Proceedings - 2017 IEEE 25th International Requirements Engineering Conference Workshops, REW 2017.*** [S. l.]: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2017. p. 125–131.

BAKAEV, Maxim; KHVOROSTOV, Vladimir; LARICHEVA, Tatiana. Assessing Subjective Quality of Web Interaction with Neural Network as Context of Use Model. *In: , 2017. **Communications in Computer and Information Science.*** [S. l.]: Springer Verlag, 2017. p. 185–195.

BALAMURALITHARA, Balakrishnan; WOODS, Peter Charles. Virtual laboratories in engineering education: The simulation lab and remote lab. **Computer Applications in Engineering Education**, [s. l.], v. 17, n. 1, p. 108–118, 2009.

BANGOR, Aaron; KORTUM, Philip T; MILLER, James T. An empirical evaluation of the system usability scale. **Intl. Journal of Human--Computer Interaction**, [s. l.], v. 24, n. 6, p. 574–594, 2008.

BOLANAKIS, DImosthenis E. **A Survey of Research in Microcontroller Education.** [S. l.]: Education Society of IEEE (Spanish Chapter), 2019.

BORSCI, Simone *et al.* Assessing user satisfaction in the era of user experience: comparison of the SUS, UMUX, and UMUX-LITE as a function of product experience. **International journal of human-computer interaction**, [s. l.], v. 31, n. 8, p. 484–495, 2015.

BOUCINHA, Rafael Marimon; TAROUCO, Liane Margarida Rockenbach. Avaliação de ambiente virtual de aprendizagem com o uso do sus-system usability scale. **RENOTE**, [s. l.], v. 11, n. 3, 2013.

BROOKE, John. **SUS: A quick and dirty usability scale.** [S. l.: s. n.], 1986. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/228593520>.

BROOKE, John. **SUS: A Retrospective.** [S. l.: s. n.], 2013.

CERVANTES, Jorge *et al.* Takagi-Sugeno Dynamic Neuro-Fuzzy Controller of Uncertain Nonlinear Systems. **IEEE Transactions on Fuzzy Systems**, [s. l.], v. 25, n. 6, p. 1601–1615, 2017.

CHACON, Jesus *et al.* Ejs, jil server, and labview: An architecture for rapid development of remote labs. **IEEE Transactions on Learning Technologies**, [s. l.], v. 8, n. 4, p. 393–401, 2015.

CHEN, Y K. Challenges and opportunities of internet of things. *In:* , 2012. **17th Asia and South Pacific design automation conference**. [S. l.: s. n.], 2012. p. 383–388.

CHEN, Xuemin; SONG, Gangbing; ZHANG, Yongpeng. Virtual and remote laboratory development: A review. *In:* , 2010. **Proceedings of the 12th International Conference on Engineering, Science, Construction, and Operations in Challenging Environments - Earth and Space 2010**. [S. l.: s. n.], 2010. p. 3843–3852.

CODEMIRROR. [S. l.], 2024. Disponível em: <https://codemirror.net/>. Acesso em: 7 nov. 2024.

CORTELLETI, DANIEL. **Dossiê Técnico: Introdução à programação de microcontroladores Microchip PIC**. [S. l.]: Centro Tecnológico de Mecatrônica. SENAI - RS, 2006.

CRESWELL, J W. **Research Design: Qualitative, Quantitative, and Mixed Methods Approaches**. 3. ed. [S. l.]: Sage Publications Limited, 2009.

CUADROS, Jordi *et al.* Design and Evaluation of a User Experience Questionnaire for Remote Labs. **IEEE Access**, [s. l.], v. 9, p. 50222–50230, 2021.

FAYYADH, Muna. London Journals Press Enhancing the Customer's Centricity through Web Analytics 2.0 Enhancing the Customer's Centricity through Web Analytics 2.0. **ABSTRACT London Journal of Research in Computer Science and Technology**, [s. l.], v. 19, 2019.

FENG, Shuang; CHEN, C. L. Fuzzy Broad Learning System: A Novel Neuro-Fuzzy Model for Regression and Classification. **IEEE Transactions on Cybernetics**, [s. l.], v. 50, n. 2, p. 414–424, 2020.

FERNÁNDEZ-PACHECO, Atilano; MARTIN, Sergio; CASTRO, Manuel. Implementation of an Arduino remote laboratory with raspberry Pi. *In:* , 2019. **2019 IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON)**. [S. l.: s. n.], 2019. p. 1415–1418.

FERNÁNDEZ-PÉREZ, Yamilis *et al.* Fuzzy multi-criteria decision making methods applied to usability software assessment: An annotated bibliography. *In:* STUDIES IN SYSTEMS, DECISION AND CONTROL. [S. l.]: Springer International Publishing, 2018. v. 125, p. 165–189.

FINSTAD, K. The usability metric for user experience. **Interacting with Computers**, [s. l.], v. 22, n. 5, p. 323–327, 2010.

FRAILE-ARDANUY, Jesús *et al.* Development of an integrated virtual-remote lab for teaching induction motor starting methods. **IEEE Revista Iberoamericana de Tecnologías del Aprendizaje**, [s. l.], p. 77–81, 2013.

GARCIA-ZUBIA, Javier *et al.* Empirical analysis of the use of the VISIR remote lab in teaching analog electronics. **IEEE Transactions on Education**, [s. l.], v. 60, n. 2, p. 149–156, 2016.

GARDEY, Juan Cruz *et al.* UX-Analyzer: Visualizing the interaction effort for web analytics. *In:* , 2024. **Proceedings of the ACM Symposium on Applied Computing**. [S. l.]: Association for Computing Machinery, 2024. p. 1774–1780.

GUERRA, Hélia *et al.* An IoT remote lab for seismic monitoring in a programming course. *In:* , 2017. **2017 4th Experiment@ International Conference (exp. at'17)**. [S. l.: s. n.], 2017. p. 129–130.

GÜZEL, Tamer; ÇOLAK, Andaç Batur. Investigation of the usability of machine learning algorithms in determining the specific electrical parameters of Schottky diodes. **Materials Today Communications**, [s. l.], v. 33, p. 104175, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352492822010261>.

HAYASHI, V. *et al.* Implementation of PjBL With Remote Lab Enhances the Professional Skills of Engineering Students. **IEEE Transactions on Education**, [s. l.], v. 66, n. 4, p. 369–378, 2023.

HAYKIN, Simon. **Neural Networks**. [S. l.: s. n.], 1999. v. 2

INONAN, Marcos; HUSSEIN, Rania. MELODY: A Platform-Agnostic Model for Building and Evaluating Remote Labs of Software-Defined Radio Technology. **IEEE Access**, [s. l.], v. 11, p. 127550–127566, 2023.

ISO 9241-11. **Ergonomics of human-system interaction Usability: Definitions and concepts-Requirements with guidance for use**. Concessão: 2018.

JABBAR, Waheb A. *et al.* Design and Fabrication of Smart Home with Internet of Things Enabled Automation System. **IEEE Access**, [s. l.], v. 7, 2019.

JANG, J-S. R. **ANFIS : Adaptive-Ne twork-Based Fuzzy Inference System**. [S. l.: s. n.], 1993.

JIN, Beom Suk *et al.* Development of a usability evaluation framework with quality function deployment: From customer sensibility to product design. **Human Factors and Ergonomics In Manufacturing**, [s. l.], v. 19, n. 2, p. 177–194, 2009.

KITCHENHAM, Barbara. **Guidelines for performing Systematic Literature Reviews in Software Engineering**. [S. l.: s. n.], 2007. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/302924724>. .

KŁODA, Rafał; PIWIŃSKI, Jan; SZEWCZYK, Roman. E2LP Remote Laboratory: Introduction Course and Evaluation at Warsaw University of Technology. *In*: [S. l.: s. n.], 2016. p. 133–138.

KOMOGORTSEV, Oleg V *et al.* **An Effort Based Model of Software Usability**. [S. l.: s. n.], 2009.

KUMAR, Biresb *et al.* E-Commerce Website Usability Analysis Using the Association Rule Mining and Machine Learning Algorithm. **Mathematics**, [s. l.], v. 11, n. 1, 2023.

KUMAR, Rankit. **Research Methodology: a step-by-step guide for beginners**. 3. ed. [S. l.]: Sage Publications Limited, 2011. Disponible en: [www.sagepublications.com](http://www.sagepublications.com).

KUMAR, Lakhwinder; SINGH, Hardeep; KAUR, Ramandeep. **Web Analytics and Metrics: A Survey**. [S. l.: s. n.], 2012.

LEISENBERG, Manfred; STEPPONAT, Madeleine. Internet of Things Remote Labs: Experiences with Data Analysis Experiments for Students Education. *In:* , 2019. **2019 IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON)**. [S. l.: s. n.], 2019. p. 22–27.

LERRO, Federico *et al.* Performing real experiments from a remote learning management system. **IEEE Revista Iberoamericana de Tecnologías del Aprendizaje**, [s. l.], v. 9, n. 1, p. 23–27, 2014.

LEWIS, James; SAURO, Jeff. **Revisiting the Factor Structure of the System Usability Scale** *Journal of Usability Studies*. [S. l.: s. n.], 2017.

LI, Yue; LIU, Lu; FENG, Gang. Adaptive Finite-Time Controller Design for T-S Fuzzy Systems. **IEEE Transactions on Cybernetics**, [s. l.], v. 47, n. 9, p. 2425–2436, 2017.

LIMA, Natércia; VIEGAS, Clara; GARCIA-PEÑALVO, Francisco José. Different didactical approaches using a remote lab: Identification of impact factors. **IEEE Revista Iberoamericana de Tecnologías del Aprendizaje**, [s. l.], v. 14, n. 3, p. 76–86, 2019a.

LIMA, Natércia; VIEGAS, Clara; GARCIA-PEÑALVO, Francisco José. Different didactical approaches using a remote lab: Identification of impact factors. **IEEE Revista Iberoamericana de Tecnologías del Aprendizaje**, [s. l.], v. 14, n. 3, p. 76–86, 2019b.

LUTHON, Franck; LARROQUE, Benoit. LaboREM—A remote laboratory for game-like training in electronics. **IEEE Transactions on learning technologies**, [s. l.], v. 8, n. 3, p. 311–321, 2014.

MAMDANI, E H. **Control & Science Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant**. [S. l.: s. n.], 1974.

MARLETTA, Vincenzo. **IEEE Instrumentation & Measurement Magazine**. [S. l.: s. n.], 2019. Disponível em: <https://www.forbes.com/sites/>. .

MARTINEZ, Ignacio Angulo; GARCIA-ZUBIA, Javier; MARTINEZ-PIEPER, Gabriel. Remote Experimentation Using a Didactical Elevator. **Revista Iberoamericana de Tecnologías del Aprendizaje**, [s. l.], v. 10, n. 4, p. 319–323, 2015.

MARTÍNEZ-SANTOS, Juan Carlos; ACEVEDO-PATINO, Oscar; CONTRERAS-ORTIZ, Sonia H. Influence of Arduino on the Development of Advanced Microcontrollers Courses. **Revista Iberoamericana de Tecnologías del Aprendizaje**, [s. l.], v. 12, n. 4, p. 208–217, 2017.

MATHWORKS. **Genfis**. [S. l.], 2024a. Disponível em: <https://www.mathworks.com/help/fuzzy/genfis.html>. Acesso em: 14 dez. 2024.

MATHWORKS. **MATLAB**. [S. l.], 2024b. Disponível em: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>. Acesso em: 14 dez. 2024.

MATOMO. [S. l.], 2024. Disponível em: <https://matomo.org/>. Acesso em: 6 nov. 2024.

MELKONYAN, Arsen *et al.* Facilitating remote laboratory deployments using a relay gateway server architecture. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, [s. l.], n. 1, p. 477–485, 2013.

MITCHELL, Tom. **Machine Learning**. [S. l.]: McGraw-Hill Science/Engineering/Math, 1997.

MITRA, Sushmita; HAYASHI, Yoichi. **Neuro-Fuzzy Rule Generation: Survey in Soft Computing Framework** **IEEE TRANSACTIONS ON NEURAL NETWORKS**. [S. l.: s. n.], 2000.

MOLICH, Rolf; NIELSEN, Jakob. Heuristic evaluation of user interfaces. *In:* , 1990, Seattle. **ACM CHI'90 Conf**. Seattle: [s. n.], 1990.

MUHAMMAD, Abdul Hafeez *et al.* Evaluating usability of academic websites through a fuzzy analytical hierarchical process. **Sustainability (Switzerland)**, [s. l.], v. 13, n. 4, p. 1–22, 2021.

NAKATANI, Kazuo; CHUANG, Ta Tao. A web analytics tool selection method: An analytical hierarchy process approach. **Internet Research**, [s. l.], v. 21, n. 2, p. 171–186, 2011.

NBR ISO 9241-11:2011. **Requisitos ergonômicos para o trabalho com dispositivos de interação visual. Parte 11: Orientações sobre usabilidade.** Concessão: 2011.

NBR ISO 9241-151:2011. **Ergonomia da interação humano-sistema. Parte 151: Orientações para interfaces de usuários da World Wide Web.** Concessão: 2011.

NBR ISO/IEC 9126-1:2003. **Engenharia de Software – Qualidade de Produto. Parte 1: Modelo de Qualidade.** Concessão: 2003.

NBR-ISO-TR-9241-100:2012. **Ergonomia da interação humano-sistema. Parte 100: Introdução às normas relacionadas à ergonomia de software.** Concessão: 2012.

NIELSEN, J. **10 Usability Heuristics for User Interface Design**. [S. l.], 2024. Disponível em: <https://www.nngroup.com/articles/ten-usability-heuristics/>. Acesso em: 17 abr. 2024.

NIELSEN, Jakob. Enhancing the Explanatory Power of Usability Heuristics. *In*: , 1994, Boston. **ACM CHI'94 Conf**. Boston: [s. n.], 1994.

NIELSEN, J. Iterative user-interface design. **Computer**, [s. l.], v. 26, n. 11, p. 32–41, 1993.

NIELSEN, Jakob. **Usability 101: Introduction to Usability**. [S. l.], 2012. Disponível em: <https://www.nngroup.com/articles/usability-101-introduction-to-usability/>. Acesso em: 17 abr. 2024.



PALOMINO, Fryda; PAZ, Freddy; MOQUILLAZA, Arturo. Web Analytics for User Experience: A Systematic Literature Review. *In:* , 2021. **Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)**. [S. l.]: Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, 2021. p. 312–326.

PARKHOMENKO, Anzhelika *et al.* Integrated complex for IoT technologies study. *In:*  ONLINE ENGINEERING & INTERNET OF THINGS. [S. l.]: Springer, 2018. p. 322–330.

PASTERNAK, Erik; FENICHEL, Rachel; MARSHALL, Andrew N. Tips for Creating a Block Language with Blockly. *In:* , 2017. **IEEE Blocks and Beyond Workshop**. [S. l.: s. n.], 2017.

PAVANI, Ana M.B. *et al.* VISIR+ Project Follow-up after four years: Educational and research impact. *In:* , 2023. **Proceedings - Frontiers in Education Conference, FIE**. [S. l.]: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2023.

PONTE, Márcio José Ponte Moutinho; SILVEIRA, Antonio Morais. A methodology for evaluation the usability of software for industrial automation using artificial neural networks: Case study - Eletrobrás. *In:* , 2008. **2008 International Conference on Computational Intelligence for Modelling Control and Automation, CIMCA 2008**. [S. l.: s. n.], 2008. p. 430–435.

RAUSANFITA, Alqis; ROCHIMAH, Siti. Automated identification and classification of usability aspect of stack overflow constraints. *In:* , 2020. **EECCIS 2020 - 2020 10th Electrical Power, Electronics, Communications, Controls, and Informatics Seminar**. [S. l.]: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2020. p. 269–272.

REID, David P.; DRYSDALE, Timothy D. Student-facing learning analytics dashboard for remote lab practical work. **IEEE Transactions on Learning Technologies**, [s. l.], 2024.

RIEGLER, Andreas; HOLZMANN, Clemens. Measuring visual user interface complexity of mobile applications with metrics. **Interacting with Computers**, [s. l.], v. 30, n. 3, p. 207–223, 2018.

RODRIGUEZ-GIL, Luis *et al.* An open and scalable web-based interactive live-streaming architecture: The WILSP platform. **IEEE Access**, [s. l.], v. 5, p. 9842–9856, 2017.

ROSENBLATT, F. **THE PERCEPTRON: A PROBABILISTIC MODEL FOR INFORMATION STORAGE AND ORGANIZATION IN THE BRAIN** 1. 6. ed. [S. l.]: Psychological Review, 1958. v. 65

RUSSELL, Stuart J. (Stuart Jonathan); NORVIG, Peter; DAVIS, Ernest. **Artificial intelligence : a modern approach**. [S. l.]: Pearson, 2010.

SAHI, Geetanjali. Performance Evaluation of Artificial Neural Network for Usability Assessment of E-commerce Websites. *In:* , 2018. **2018 3rd International Conference for Convergence in Technology (I2CT)**. [S. l.: s. n.], 2018.

SAKAS, Damianos P. *et al.* Innovative Cryptocurrency Trade Websites- Marketing Strategy Refinement, via Digital Behavior. **IEEE Access**, [s. l.], v. 10, p. 63163–63176, 2022.

SANTOS, João Francisco Severo. **Avaliação no Ensino a Distância**. [S. l.: s. n.], 2006.

SAURO, J. **Measuring usability with the System Usability Scale (SUS)**. [S. l.], 2011. Disponível em: <https://measuringu.com/sus/>. Acesso em: 19 set. 2021.

SAURO J; LEWIS J. When Designing Usability Questionnaires, Does It Hurt to Be Positive?. *In:* , 2011. **29th Annual CHI conference on human factors in computing systems**. [S. l.: s. n.], 2011. p. 3478.

SCHWANDT, Andrea; WINZKER, Marco. Make it open-Improving usability and availability of an FPGA remote lab. *In:* , 2019. **2019 IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON)**. [S. l.: s. n.], 2019. p. 232–236.

SHAHROZ, Mobeen *et al.* IoT-Based Smart Shopping Cart Using Radio Frequency Identification. **IEEE Access**, [s. l.], v. 8, p. 68426–68438, 2020.

SILVA, Isabela Nardi da *et al.* Design, Implementation and Evaluation of Deusto XRL, a Reference Architecture for Extended Remote Laboratories (XRLs). **Electronics (Switzerland)**, [s. l.], v. 12, n. 23, 2023.

SILVA, Flavio Fernandes Barbosa. **Desvendando a Lógica Fuzzy**. 2011. [s. l.], 2011.

SIMÕES, Marcelo Godoy; SHAW, Ian S. **Controle e modelagem fuzzy**. 2. ed. [S. l.]: Editora Blucher, 2007.

SOUZA, DAVID JOSÉ DE. **Desbravando o PIC: Ampliado e Atualizado para PIC 16F628A**. [S. l.]: SARAIVA EDUCAÇÃO SA, 2005.

STANCA, Liana; LACUREZEANU, Ramona; FELEA, Cristina. Learning in dynamic decision making: The usability process. *In:* , 2014. **Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks**. [S. l.]: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2014. p. 4259–4265.

TAKAGI, Tomohiro; SUGENO, Michio. **Multi-Dimensional Fuzzy Reasoning**. [S. l.: s. n.], 1983.

TENÓRIO, Josceli Maria *et al.* Desenvolvimento e avaliação de um protocolo eletrônico para atendimento e monitoramento do paciente com doença celíaca. **Revista de Informática teórica e aplicada**, [s. l.], v. 17, n. 2, p. 210–220, 2010.

TSIATSOS, T *et al.* Evaluation plan of a network of remote labs in the Maghreb countries. *In:* , 2014. **11th International Conference on Remote Engineering and Virtual Instrumentation (REV)**. [S. l.: s. n.], 2014. p. 200–203.

TULLIS, Thomas; STETSON, Jacqueline. **A Comparison of Questionnaires for Assessing Website Usability**. [S. l.: s. n.], 2006. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/228609327>. .

USA.GOV. **Usability.gov**. [S. l.], 2024. Disponível em: <https://www.usability.gov>. Acesso em: 28 mar. 2024.

VIEGAS, Clara *et al.* Impact of a remote lab on teaching practices and student learning. **Computers & Education**, [s. l.], v. 126, p. 201–216, 2018.

WAISBERG, Daniel; KAUCHIK, Avinash. Web Analytics 2.0: Empowering Customer Centricity. **SEMJ.org**, [s. l.], v. 2, 2009.

WEBER, L.; KLEIN, P. A. T. **Aplicação da Lógica Fuzzy em Software e Hardware**. [S. l.: s. n.], 2003.

XHONNEUX, Mathieu; LOUVEAUX, Jérôme; BOL, David. A Sub-mW Cortex-M4 Microcontroller Design for IoT Software-Defined Radios. **IEEE Open Journal of Circuits and Systems**, [s. l.], v. 4, p. 165–175, 2023.

ZADEH, L A. Fuzzy Sets. **INFORMATION AND CONTROL**, [s. l.], v. 8, p. 338–353, 1965.

ZANCO, W. S. **Microcontroladores PIC 16F628A/648A: Uma Abordagem Prática e Objetiva**. 1º eded. São Paulo: Érica, 2005.

## APÊNDICE A – ARTIGO PUBLICADO NA REVISTA ETD



ARTIGO

DOI 10.20396/etd.v26i00.8673844

## AVALIANDO A EFETIVIDADE DE LABORATÓRIOS REMOTOS NA EDUCAÇÃO DE MICROCONTROLADORES E IOT: UM ESTUDO DE USABILIDADE

EVALUATING THE EFFECTIVENESS OF REMOTE LABORATORIES IN  
MICROCONTROLLER AND IOT EDUCATION: A USABILITY STUDY

EVALUANDO LA EFECTIVIDAD DE LOS LABORATORIOS REMOTOS EN LA  
EDUCACIÓN DE MICROCONTROLADORES Y IOT: UN ESTUDIO DE USABILIDAD

*Fernando Bittencourt Arroyo<sup>1</sup>, Rafael de Souza Oliveira<sup>2</sup>,  
Marcos Antônio Gaspar<sup>3</sup>, Peterson Adriano Belan<sup>4</sup>*

### RESUMO

A crescente demanda por ensino digital impulsiona a necessidade de desenvolver ferramentas eficazes e envolventes para estudantes e professores, notadamente em disciplinas técnicas. O presente estudo buscou validar a aplicabilidade e usabilidade da solução Laboratório Remoto de Microcontroladores (LRM) como uma ferramenta de ensino prático na área da educação em engenharia e mecatrônica. Para tanto, foi realizada pesquisa aplicada experimental com a aplicação de três técnicas de análise: questionário *System Usability Scale* (SUS), *User Experience Questionnaire* (UMUX) e análise qualitativa das respostas, buscando-se assim obter uma visão abrangente das características e dificuldades associadas à utilização do LRM. Os resultados obtidos mostraram uma pontuação média de usabilidade elevada, com 84,81 no SUS e 85,90 no UMUX, indicando que a ampla maioria dos alunos participantes teve facilidade ao utilizar o LRM como ferramenta de estudo. Em complemento, as respostas qualitativas demonstraram a satisfação dos alunos e a viabilidade do LRM em um ambiente real de ensino. Em conclusão, o estudo ressalta a importância e relevância de laboratórios remotos no contexto educacional atual, mostrando a viabilidade e o potencial como ferramenta de ensino. A solução ora validada, bem como a metodologia desenvolvida neste estudo, contribui para o avanço do conhecimento na área e abrem caminho para futuras pesquisas e aprimoramentos no campo dos laboratórios remotos e das tecnologias educacionais em geral.

**PALAVRAS-CHAVE:** Laboratório remoto, UMUX, SUS, Aplicabilidade, Usabilidade.

<sup>1</sup> Doutorando em Informática e Gestão do Conhecimento pela Universidade Nove de Julho. Analista de TI do Banco do Brasil S.A. São Paulo, SP - Brasil. E-mail: [web.arroyo.fernando@gmail.com](mailto:web.arroyo.fernando@gmail.com)

<sup>2</sup> Mestrando em Informática e Gestão do Conhecimento pela Universidade Nove de Julho. Professor de Ensino Médio e Técnico no Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza. Santana de Parnaíba, SP - Brasil. E-mail: [web.arroyo.fernando@gmail.com](mailto:web.arroyo.fernando@gmail.com)

<sup>3</sup> Doutor em Administração pela Universidade de São Paulo. Docente permanente e pesquisador na Universidade Nove de Julho. São Paulo, SP - Brasil. E-mail: [marcos.antonio@un9.pro.br](mailto:marcos.antonio@un9.pro.br)

<sup>4</sup> Doutor em Informática pela Universidade Nove de Julho. Docente permanente e pesquisador da Universidade Nove de Julho. São Paulo, SP - Brasil. E-mail: [belan@un9.pro.br](mailto:belan@un9.pro.br)

Submetido em: 30/05/2023 - Aceito em: 14/03/2024 - Publicado em: 29/08/2024

## APÊNDICE B – QUESTIONÁRIO APLICADO AOS USUÁRIOS

Nº	Questão
Q1	Utilizaria este Laboratório Remoto com frequência
Q2	Este Laboratório Remoto é desnecessariamente complexo.
Q3	Este Laboratório Remoto fácil de usar.
Q4	É necessário o apoio de uma pessoa técnica para usar este Laboratório Remoto.
Q5	As funções deste Laboratório Remoto estão bem integradas.
Q6	Há muita inconsistência neste Laboratório Remoto.
Q7	Acredito que a maioria dos alunos aprenderia a utilizar este Laboratório Remoto rapidamente.
Q8	Este Laboratório Remoto é complicado de usar.
Q9	Sinto-me confiante ao utilizar este Laboratório Remoto.
Q10	Preciso aprender muitas coisas antes de começar a utilizar este Laboratório Remoto.
Q11	Os recursos deste Laboratório Remoto atendem às minhas necessidades.
Q12	Usar este Laboratório Remoto foi uma experiência frustrante.
Q13	Preciso gastar muito tempo corrigindo problemas ao usar este Laboratório Remoto.
Q14	Consegui realizar uma quantidade satisfatória de exercícios neste Laboratório Remoto.
Q15	Houve dificuldades para compreender/realizar os roteiros dos exercícios? Quais?
Q16	O uso do Laboratório Remoto contribuiu efetivamente para o aprendizado/aprimoramento? Como?
Q17	Houve dificuldades na utilização do Laboratório Remoto? Quais?
Q18	Quais foram as vantagens e/ou desvantagens observadas?
Q19	Alguma sugestão para melhoria do uso do Laboratório Remoto?
Q20	Qual a percepção geral ao utilizar este Laboratório Remoto como ferramenta de ensino para experimentos?

## APÊNDICE C – ROTEIROS

### Roteiro 1 - Semáforo

#### 1. Material

01 Arduino Mega  
01 Protoboard  
Jumpers coloridos  
03 Resistores de 150  $\Omega$   
03 LEDs

#### 2. Referencial (código)

##### - **pinMode()**

A função `pinMode()`, permite configurar um PINO em entrada (INPUT) ou saída (OUTPUT), como por exemplo: `pinMode(10, OUTPUT)`. Esse comando configura o pino 10 do Arduino para saída.

##### - **digitalWrite();**

A função `digitalWrite()`, escreve um valor HIGH (alto) ou LOW (baixo) em um pino digital que tenha sido configurado como OUTPUT (saída). O valor HIGH equivale a uma tensão de 5V (ou 3,3V em algumas placas), e o valor LOW, a uma tensão elétrica de 0V.

#### 3. Importante

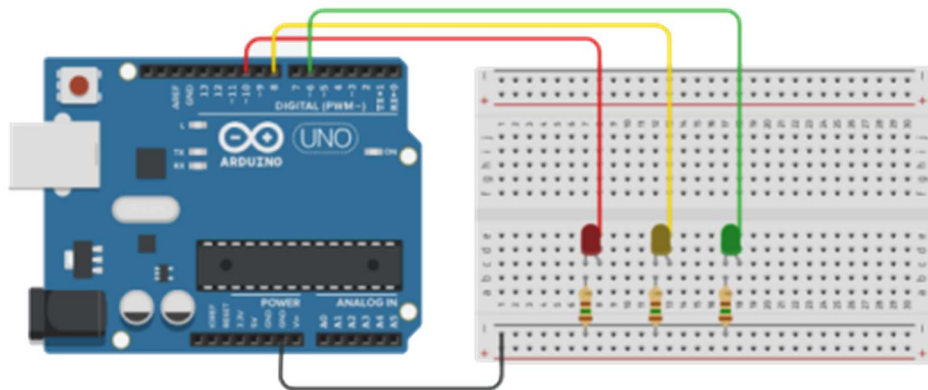
- Ligar LED, catodo(-) na base do resistor e anodo(+) no 5v (pino)

#### 4. Modelo eletrônico

**LED verde** = pino 4

**LED Amarelo** = pino 5

**LED Vermelho** = pino 6



## 5. Código

```
// Semáforo
int pinoVerde = 4; // Verde
int pinoAmarelo = 5; // Amarelo
int pinoVermelho = 6; // Vermelho
void setup() {
    // Ativando os pinos
    pinMode(pinoVermelho, OUTPUT);
    pinMode(pinoAmarelo, OUTPUT);
    pinMode(pinoVerde, OUTPUT);
}
void loop() {
    //ligando o sinal vermelho e desligando o amarelo
    digitalWrite(pinoVermelho, HIGH);
    digitalWrite(pinoAmarelo, LOW);
    delay(1000);
    // desligando o vermelho e acionando o verde
    digitalWrite(pinoVermelho, LOW);
    digitalWrite(pinoVerde, HIGH);
    delay(1000);
    // desligando o verde e acionando o amarelo
    digitalWrite(pinoVerde, LOW);
    digitalWrite(pinoAmarelo, HIGH);
```



```
delay(500);}
```

## Roteiro 2 - Controlando um Micro Servo 9g, com LED limitadores.

### 1. Material

- 01 Arduino Mega
- 01 Protoboard
- Jumpers coloridos
- 01 Micro Servo 9g
- 02 LEDs
- 02 Resistores de 150  $\Omega$

### 2. Importante

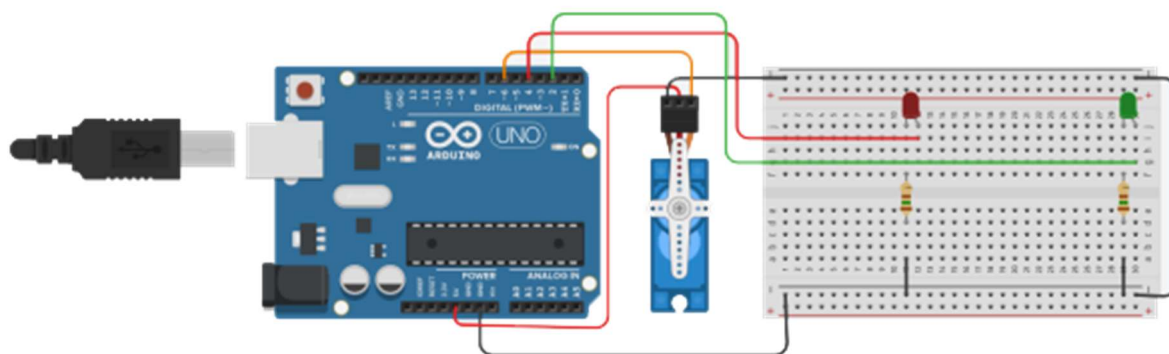
Incluir a biblioteca , observar a ligação do LED

### 3. Modelo eletrônico

**Servo motor** = pino 3

**LED verde** = pino 4

**LED Vermelho** = pino 6



#### 4. Código

```
int pos;
#include <Servo.h>
Servo servo_;
void setup() {
    servo_.attach();
    pinMode(4, OUTPUT);
    pinMode(2, OUTPUT);
    servo_.write(0);
    delay(1000);
}
void loop() {
    pos = 0;
    for (pos = 0; pos <= 179; pos=pos+1) {
        servo_.write(pos);
        delay(15);
        digitalWrite(4, HIGH);
        digitalWrite(2, LOW);
    }
    delay(1000);
    for (pos = 180; pos >= 0; pos=pos-1) {
        servo_.write(pos);
        delay(15);
        digitalWrite(4, LOW);
        digitalWrite(2, HIGH);
    }
}
```

### Roteiro 3 - Usando sensor DHT11 (Temperatura e umidade)

#### 1. Material

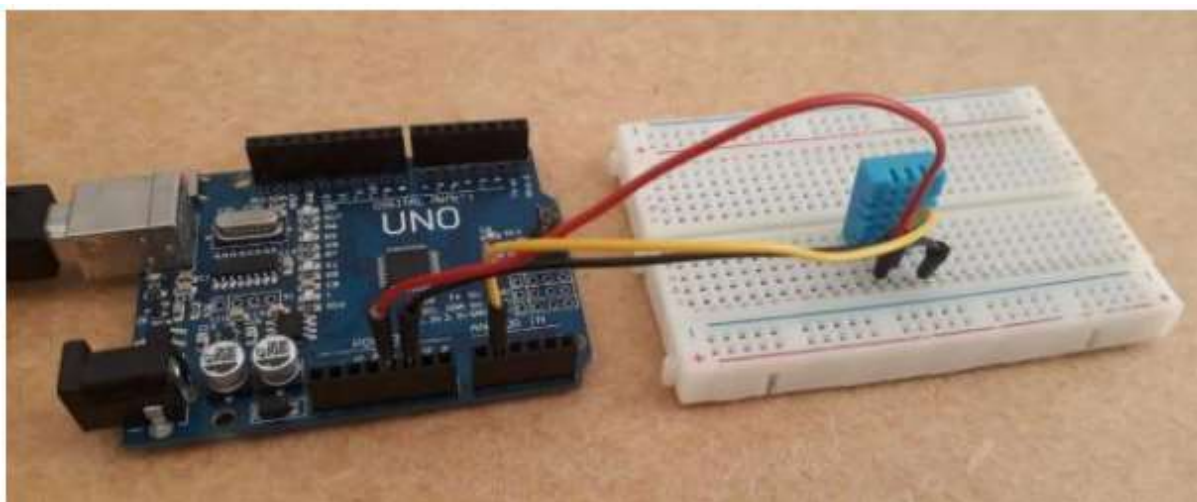
- 01 Arduino Mega
- 01 Protoboard
- Jumpers coloridos
- 01 Sensor DHT11

#### 2. Importante

Adicionar a biblioteca na aplicação e iniciar o Monitor Serial.

#### 3. Modelo eletrônico

DHT11 = pino A1



## 4. Código

```
//Temperatura
#include <DHT11.h>
//Inicializa o sensor
DHT11 dht11(A1);
int temperatura;
int umidade;
void setup()
{
    Serial.begin(9600);
}
void loop()
{
    temperatura = dht11.readTemperature();
    Serial.print("Temperatura = ");
    Serial.print(temperatura);
    Serial.print(" Celsius ");
    delay(1000); // tempo de leitura ideal - 2seg
    umidade = dht11.readHumidity();
    Serial.print(" - Umidade Relativa = ");
    Serial.print(umidade);
    Serial.println(" % ");
    delay(1000); // tempo de leitura ideal - 2seg
}
```

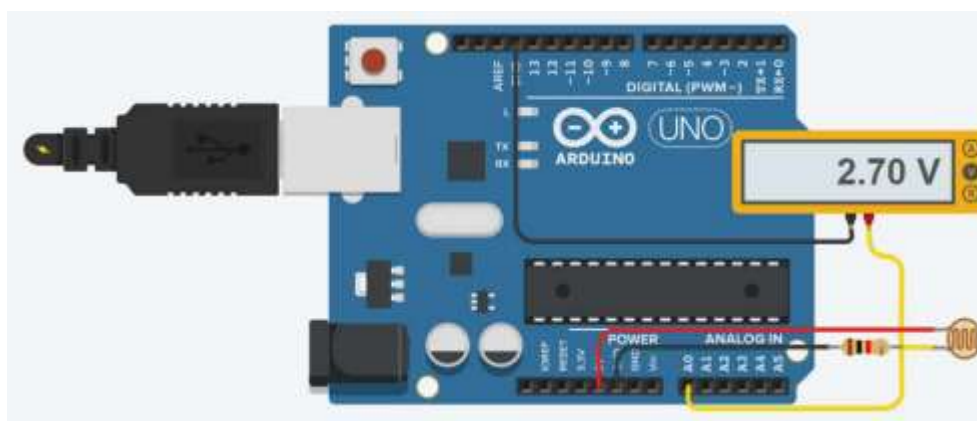
#### Roteiro 4 - Comunicação serial:

Para leitura da intensidade de luz em um ambiente pode ser realizada de várias formas, dentre elas o uso de um LDR (Light Dependent Resistor ou Resistor sensível a luz), fototransistor ou qualquer outro sensor que tenha capacidade de ler a luminosidade do ambiente.

Neste experimento será utilizado um LDR para ler a intensidade de luz do ambiente, este conectado a uma porta analógica de um microcontrolador, no caso um Arduino Uno. Para demonstrar se a leitura está sendo realizada de forma correta, uma mensagem no terminal serial deve exibir a intensidade de luz medida pelo sensor.

Essa aplicação por mais simples que possa parecer, é a mesma utilizada por exemplo, no acionamento das lâmpadas para iluminação pública, onde são acesas de acordo com a luminosidade do dia e não mais pelo horário.

Para entendimento do esquema de ligação do dispositivo que se encontra no laboratório remoto, a Figura apresenta como estes componentes estão conectados. Lembrando que os mesmos experimentos podem ser realizados em plataformas de simulação totalmente on-line, sem a necessidade do uso de componentes de forma física.



A Figura mostra a ligação do sensor LDR, no caso este resistor tem a variação de sua resistência dado a luminosidade recebida, assim a ligação representa na realidade o funcionamento de um divisor de tensão com uso de resistores. Assim, ao pino 5V do Arduino está conectado um dos lados do resistor e do outro lado está ligado um resistor ( $1k\Omega$ ) ao GND do Arduino e entre o resistor e o LDR ao pino A0 do Arduino.

Outro ponto importante para esta ligação é a escolha do resistor ideal para uso com o LDR, pois se o resistor possuir valor muito alto ou baixo, ele terá

comportamentos diferentes, alterando as fases de transição entre o máximo e o mínimo de saída do sensor. Com o uso do resistor de  $1k\Omega$  por exemplo, a saída do fototransistor será dentro do intervalo de 0V a 2,30V.

### Código:

```
//LDR

void setup(){
    Serial.begin(9600);
    pinMode(11, OUTPUT);
}

void loop(){
    int LDR = 0;
    for (int i=0; i<=255; i++) {
        analogWrite(11, i);
        LDR = analogRead(A0);
        Serial.println("LDR: " + String(LDR));
        delay(25);
    }

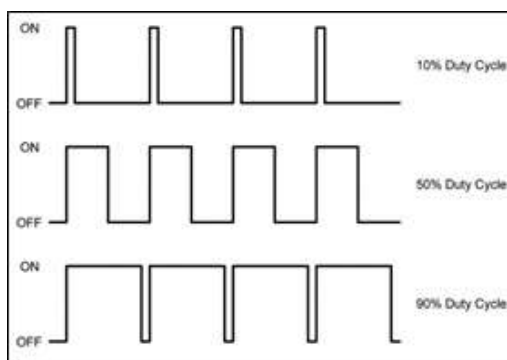
    delay(1000);

    for (int i=255; i>=0; i--) {
        analogWrite(11, i);
        LDR = analogRead(A0);
        Serial.println("LDR: " + String(LDR));
        delay(25);
    }

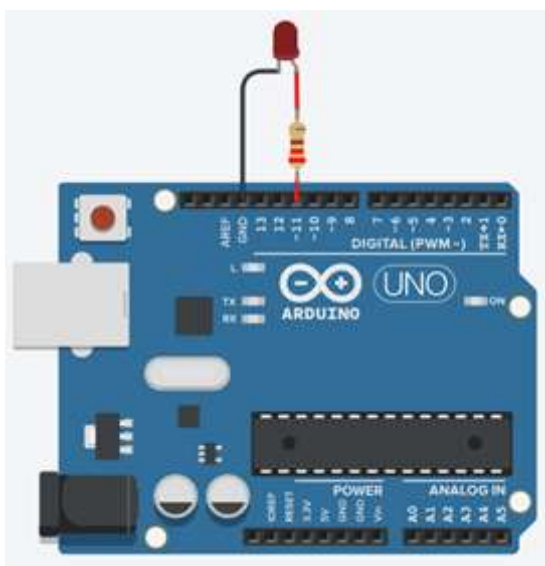
    delay(1000);
}
```

### Roteiro 5 - Sinal PWM para controle da intensidade do brilho de um LED

Neste experimento será mostrado como utilizar a saída digital com recurso PWM (Pulse Width Modulation) do Arduino para controlar o fluxo de luminosidade de um LED, fazendo com que o LED inicie apagado e vá acendendo de forma gradual até atingir a sua intensidade luminosa máxima e depois fazer o caminho contrário, apagando até ficar totalmente apagado. O Sinal PWM como pode ser visto na Figura, altera a largura do pulso, simulando assim um sinal analógico, ou seja, um sinal de 50% de Duty Cycle representaria 50% da tensão (2,5V) na porta que for utilizado. A Figura apresenta três exemplos de como é representado um sinal PWM com 10%, 50% e 90% de Duty Cycle.



Para isso utilizaremos um LED conectado na porta 11 (DIGITAL) do Arduino, que possui o recurso PWM identificado pelo sinal “~” ao lado do número da porta, um resistor de  $220\Omega$  conectado no pino catodo do LED e ao GND do Arduino, representado na Figura.



**Código:**

```
//PWM
void setup() {
    pinMode(11, OUTPUT);
}

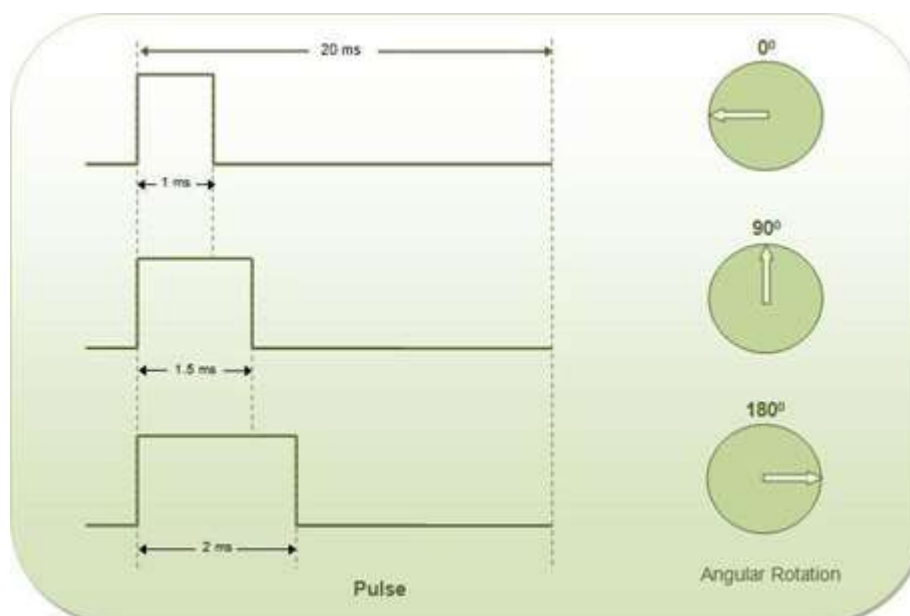
void loop(){
    for (int i=0; i<=255; i++) {
        analogWrite(11, i);
        delay(10);
    }

    for (int i=255; i>=0; i--) {
        analogWrite(11, i);
        delay(10);
    }
}
```



## Roteiro 6 - Sinal PWM para controle de um Servo Motor

Um servo motor é um componente eletromecânico utilizado para posicionamento, mantendo um objeto parado em uma determinada posição. No seu funcionamento, o sinal PWM recebido é comparado pelo circuito interno a posição atual e ajusta o ângulo do seu eixo caso necessário. De forma geral o sinal PWM dos servos é padrão, operando com um ciclo de 20ms. Sendo que quando a largura do pulso estiver em 1ms significa que o ângulo de posicionamento do eixo será em  $0^\circ$ , 1,5ms  $90^\circ$  e 2ms  $180^\circ$ , como mostrado na Figura :

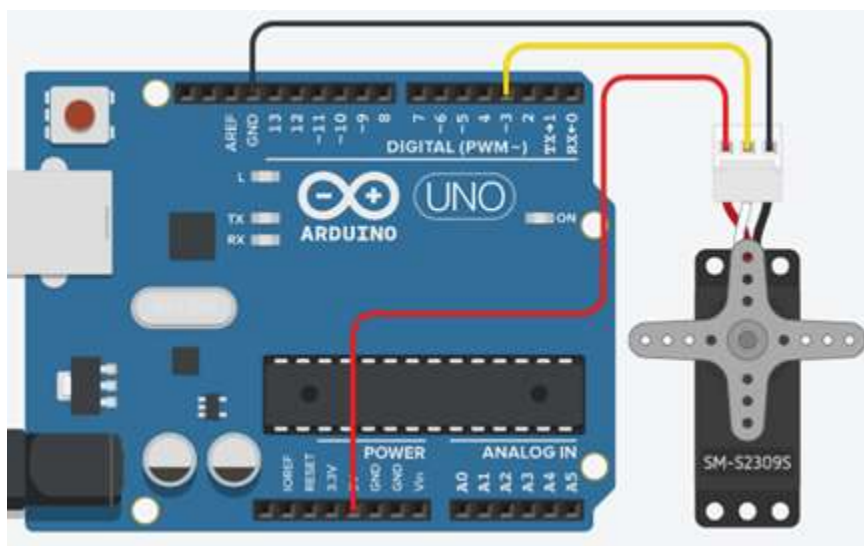


Como apresentado pela Figura, o ângulo do eixo é proporcional a largura de pulso do sinal PWM, sendo que neste caso a faixa de ativação (pulso ativo) é de no máximo 2ms dentro do ciclo de 20ms.

Uma grande diferença entre o servo motor dos demais motores, como o motor de corrente contínua ou ainda o motor de passo é o fato que este tipo de motor possui limitação de rotação de  $180^\circ$ , não sendo possível então rotacionar infinitamente como os outros motores. Contudo vale ressaltar que existem motores do tipo servo motores que possuem tal característica, porém são para aplicações específicas que não serão abordadas nesse experimento.

Os servos motores possuem normalmente 3 pinos, sendo eles a alimentação positiva (vermelho) (5V), terra (Preto ou Marrom) (GND) e o (Amarelo, Laranja ou Branco) de sinal, onde recebe o sinal PWM gerado pelo microcontrolado.

Para o controle do servo de uma forma mais precisa, é recomendado o uso da biblioteca “Servo.h” disponível dentro da IDE de programação do Arduino, isso porque nesta biblioteca já encontra-se configurado o ciclo de 20ms para o sinal PWM necessário para a operação do servo, bem como a tratativa para receber um valor em graus diretamente e converte-lo para a largura de pulso necessária, como mostrado anteriormente. Neste experimento o valor de ângulo será gerado por um laço e ele irá enviar este valor para o servo, lembrando que está valor deve ser entre 0° e 180°.



### Código:

```
// Micro Servo
#include <Servo.h>

Servo servo;

int pos;

int pinoVerde = 4; // Verde
int pinoVermelho = 6; // Vermelho
int pinoServo = 3; // Servo Motor

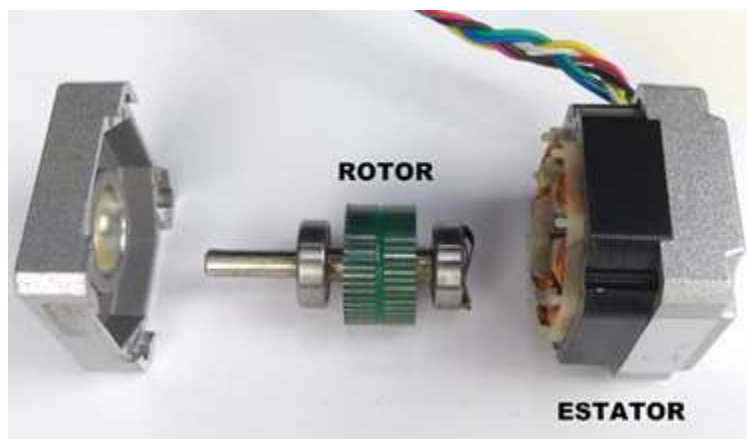
void setup (){
```

```
servo.attach(pinoServo);
servo.write(0);
pinMode(pinoVerde, OUTPUT);
pinMode(pinoVermelho, OUTPUT);
delay(1000);
}
void loop(){
  for(pos = 0; pos < 180; pos++){
    servo.write(pos);
    delay(30);
    digitalWrite(pinoVerde, HIGH);
    digitalWrite(pinoVermelho, LOW);
  }
  delay(1000);
  for(pos = 180; pos >= 0; pos--){
    servo.write(pos);
    delay(30);
    digitalWrite(pinoVerde, LOW);
    digitalWrite(pinoVermelho, HIGH);
  }
}
```

## Roteiro 7 - Controlando um Motor de Passo

Esse motor é utilizado em projetos onde se necessita precisão nos movimentos, como por exemplo máquinas CNCs, impressoras 3D, sistemas de deslocamento controlado, entre outros. A principal diferença entre os motores de passo é a quantidade de polos que eles possuem. Essa diferença está ligada diretamente a sensibilidade de movimento, ou seja, nesse tipo de motor representa o número de passos que é utilizado para realizar uma volta em seu eixo.

A Figura abaixo mostra as duas partes principais de um motor de passo, que é o seu rotor e seu estator:

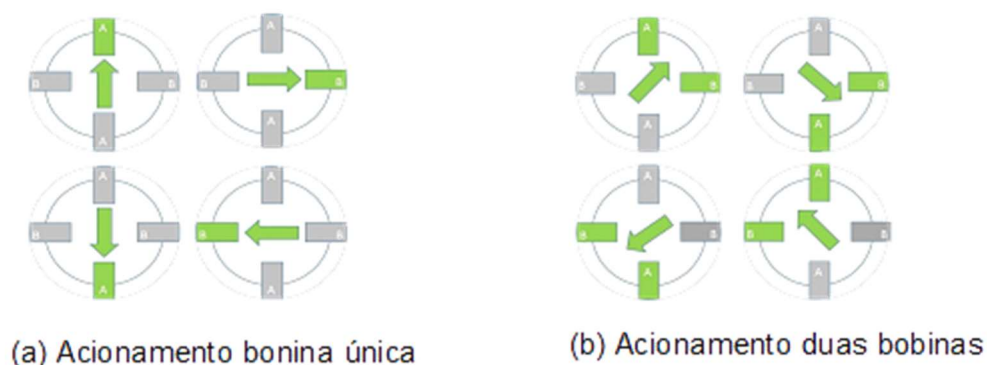


O estator, se observarmos em sua parte interna é composta por vários enrolamentos de fio de cobre, estes enrolamentos são as chamadas bobinas do motor de passo. Essas bobinas são as fases do motor de passo, responsáveis pela geração do campo magnético responsável pela movimentação do rotor.

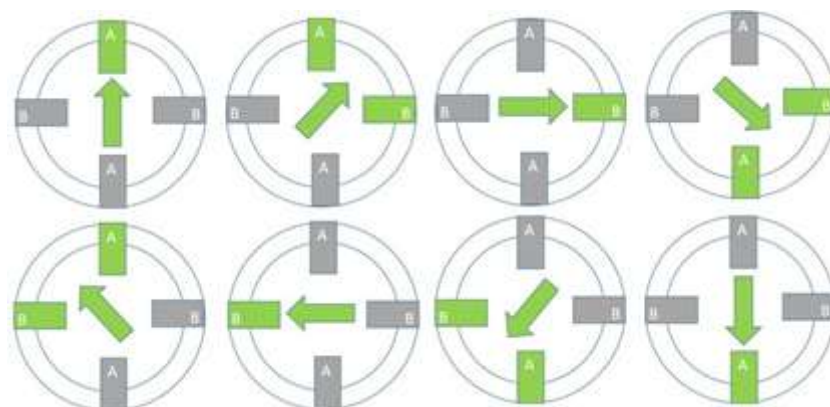
Para controle da rotação do motor de passo, existem basicamente três estratégias, sendo elas chamadas Full-Step (passo completo), Half-Step (meio passo) ou Micro-Step (micro passo).

O modo de controle full-step é utilizado para fazer o movimento do motor levando em conta o passo completo do motor, ou seja, utilizando a estrutura física do motor apenas, sem o uso de recursos para ajustar o tamanho do passo. Nesse tipo de acionamento é possível fazer o acionamento utilizando uma única fase por ciclo ou ainda duas fases. No acionamento de uma fase por passo, ou ciclo, apenas uma bobina é energizada, enquanto no modelo de duas fases por ciclo existe o acionamento de duas bobinas por passo, consequentemente, essa forma de

acionamento aumenta o torque do motor. A Figura abaixo apresenta estes dois modelos de acionamento:



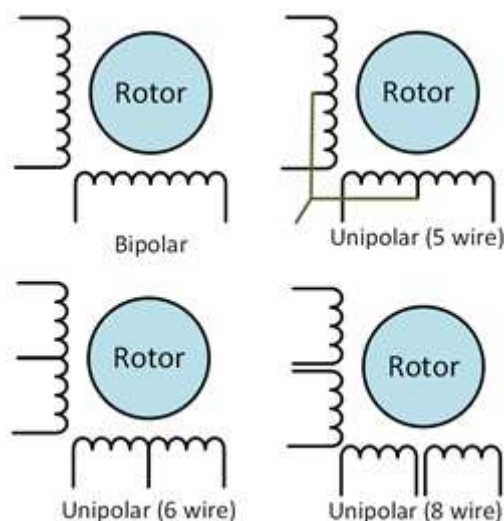
Já no modo half-step existe uma alternância entre uma bobina e duas bobinas, alternando desta forma os dois modos de acionamento do full-step gerando no caso 8 posições ao invés de 4. A Figura abaixo mostra esse tipo de acionamento de forma visual:



Por fim no acionamento micro-step o que altera do half-step é a forma em que as bobinas são energizadas, neste caso elas possuem um controle de tensão nas bobinas, alternando o campo magnético mesmo com apenas duas bobinas energizadas. Contudo, para esse tipo de acionamento é necessário sempre o uso de um driver para fazer esse controle, os chamados drivers de motor de passo. Podemos citar como exemplo, um driver genérico AKDMP16-4.2A, que é possível usar um motor de passo padrão de 200ppr (passos por revolução), ou  $1,8^\circ$  por revolução, para usar uma resolução de 25600ppr, ou seja,  $0,014^\circ$  por passo.

Entretanto, é importante dizer que alguns motores não podem ser acionados com tantos passos devido a restrição de fabricação, como a baixa qualidade de componentes ou imprecisão de similaridade nas bobinas.

Os motores de passo de uma forma geral possuem 4 configurações de fios, sendo que existem de 4, 5, 6 ou 8 fios. A quantidade de fios determina o tipo de ligação que deverá ser realizada. A Figura abaixo mostra os quatro esquemas elétricos dos motores de 4 a 8 fios. Vale ressaltar que para a ligação dos motores sem uso de micro-step é possível fazer com a utilização de componentes simples, como transistores por exemplo:



Outra forma de fácil implementação do circuito para ligação de motores que consomem uma corrente baixa é o uso do CI ULN2003, este componente possui em seu encapsulamento 7 portas que podem ser chaveadas de uma entrada única. Na realidade este componente possui 7 transistores com o coletor comum.

No exemplo deste experimento veremos como fazer o controle do motor de passo sendo possível controlar o sentido e a velocidade de rotação dele, para isso usaremos comandos seriais, o CI ULN2003 conectado as portas digitais 8, 9, 10 e 11. A Figura abaixo mostra o esquema de ligação do Arduino ao CI ULN2003 e



**Código:**

```
//Motor de passo

int motorPin1 = 7;
int motorPin2 = 8;
int motorPin3 = 9;
int motorPin4 = 10;

int motorDelay=50;
int sentido = 0;

void setup() {
    pinMode(motorPin1, OUTPUT);
    pinMode(motorPin2, OUTPUT);
    pinMode(motorPin3, OUTPUT);
    pinMode(motorPin4, OUTPUT);
    Serial.begin(9600);
}

void avancar(){
    digitalWrite(motorPin1, HIGH);
    digitalWrite(motorPin2, LOW);
    digitalWrite(motorPin3, LOW);
    digitalWrite(motorPin4, LOW);
    delay(motorDelay);

    digitalWrite(motorPin1, LOW);
    digitalWrite(motorPin2, HIGH);
    digitalWrite(motorPin3, LOW);
    digitalWrite(motorPin4, LOW);
    delay(motorDelay);

    digitalWrite(motorPin1, LOW);
```



```
digitalWrite(motorPin2, LOW);  
digitalWrite(motorPin3, HIGH);  
digitalWrite(motorPin4, LOW);  
delay(motorDelay);  
  
digitalWrite(motorPin1, LOW);  
digitalWrite(motorPin2, LOW);  
digitalWrite(motorPin3, LOW);  
digitalWrite(motorPin4, HIGH);  
delay(motorDelay);  
}
```

```
void retornar(){  
    digitalWrite(motorPin1, LOW);  
    digitalWrite(motorPin2, LOW);  
    digitalWrite(motorPin3, LOW);  
    digitalWrite(motorPin4, HIGH);  
    delay(motorDelay);  
  
    digitalWrite(motorPin1, LOW);  
    digitalWrite(motorPin2, LOW);  
    digitalWrite(motorPin3, HIGH);  
    digitalWrite(motorPin4, LOW);  
    delay(motorDelay);  
  
    digitalWrite(motorPin1, LOW);  
    digitalWrite(motorPin2, HIGH);  
    digitalWrite(motorPin3, LOW);  
    digitalWrite(motorPin4, LOW);  
    delay(motorDelay);  
  
    digitalWrite(motorPin1, HIGH);
```

```
digitalWrite(motorPin2, LOW);  
digitalWrite(motorPin3, LOW);  
digitalWrite(motorPin4, LOW);  
delay(motorDelay);  
}
```

```
void parar(){  
    digitalWrite(motorPin1, LOW);  
    digitalWrite(motorPin2, LOW);  
    digitalWrite(motorPin3, LOW);  
    digitalWrite(motorPin4, LOW);  
}
```

```
void loop() {  
    //movimento do motor lento  
    motorDelay = 20;  
    for (int i=0; i<200; i++){  
        retornar();  
    }
```

```
    for (int i=0; i<200; i++){  
        avancar();  
    }
```

```
    //movimento do motor medio  
    motorDelay = 10;  
    for (int i=0; i<200; i++){  
        retornar();  
    }
```

```
    for (int i=0; i<200; i++){  
        avancar();  
    }
```

```
}

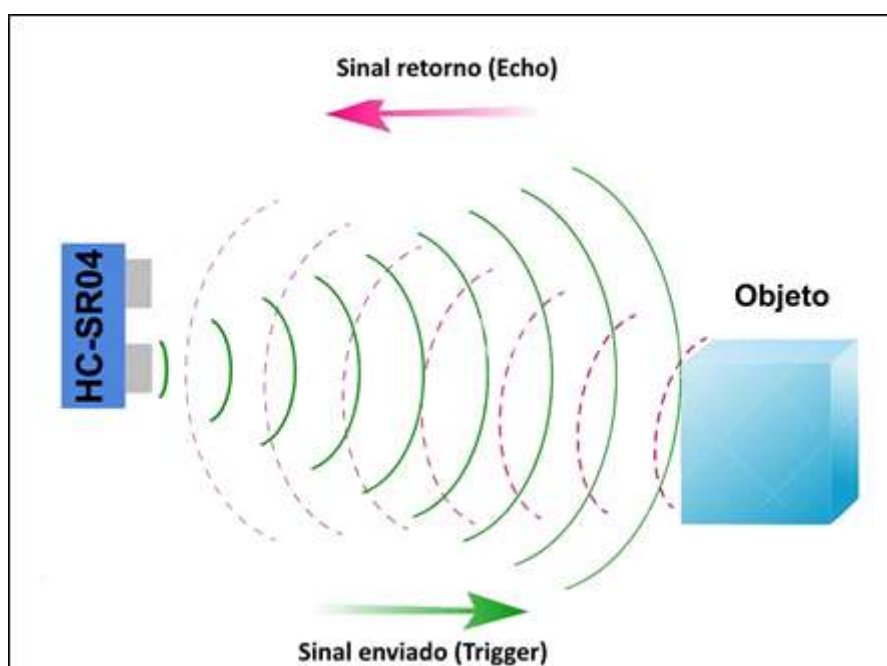
//movimento do motor rapido
motorDelay = 3;
for (int i=0; i<200; i++){
    retornar();
}

for (int i=0; i<200; i++){
    avancar();
}
}
```

## Roteiro 8 - Medir a distância de um objeto a frente

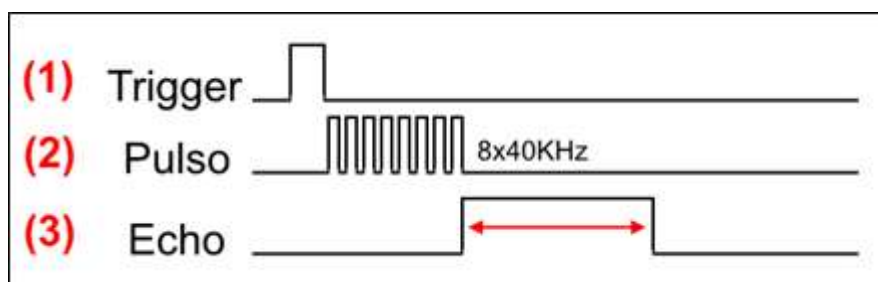
Dentre as diversas aplicações que podemos desenvolver, existem alguns projetos onde é necessário saber a distância de algo que está na frente, como um objeto, ou até mesmo medir o nível de um tanque. Existem algumas formas de se fazer essas medições, e dentre elas é possível fazer por meio de ondas ultrassônicas. Para tanto, são necessários um emissor e um receptor de ondas ultrassônicas. Existe no mercado diversos Shields para realizar esta tarefa, como por exemplo o HC-SR04, que será utilizado nesse experimento.

O funcionamento desse sensor é baseado na emissão de um sinal pelo emissor e monitoramento de quanto tempo esse sinal demora para retornar e ser captado pelo receptor, ou seja, funciona como um eco. A Figura abaixo apresenta a representação do funcionamento das ondas ultrassônicas.

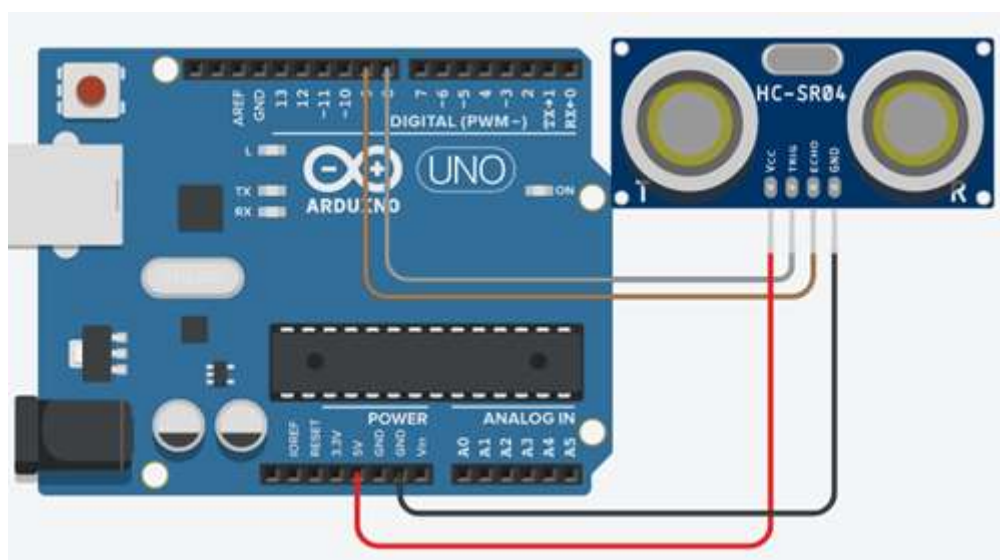


O emissor emite o sinal por  $10\mu\text{s}$  que indica o início da transmissão, em seguida são enviados 8 pulsos na frequência de 40 KHz. Uma vez enviado o sinal, o dispositivo aguarda o sinal de retorno, eco, para poder então determinar a distância do objeto ao sensor. Para realizar esse cálculo é levado em conta a velocidade do som. A Figura abaixo mostra a representação da emissão do sinal e o tempo que o

dispositivo aguarda a resposta.

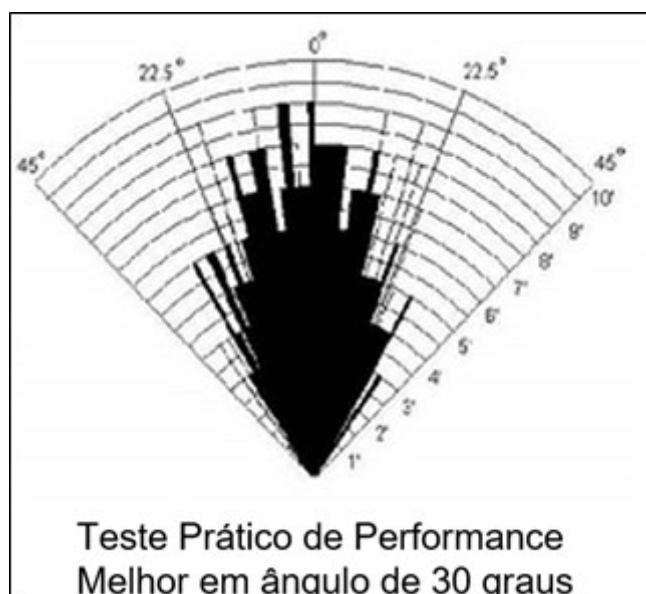


A conexão do HC-SR04 no Arduino é simples, sendo necessário apenas a utilização de 4 pinos, sendo que dois deles são para alimentação, ou seja, VCC e GND, e os outros dois, um é utilizado para enviar o sinal de início da transmissão (10 $\mu$ s), o Trigger, e o Echo que é o último pino é utilizado para receber o retorno do pulso enviado. A Figura abaixo mostra a ligação do HC-SR04 no Arduino.

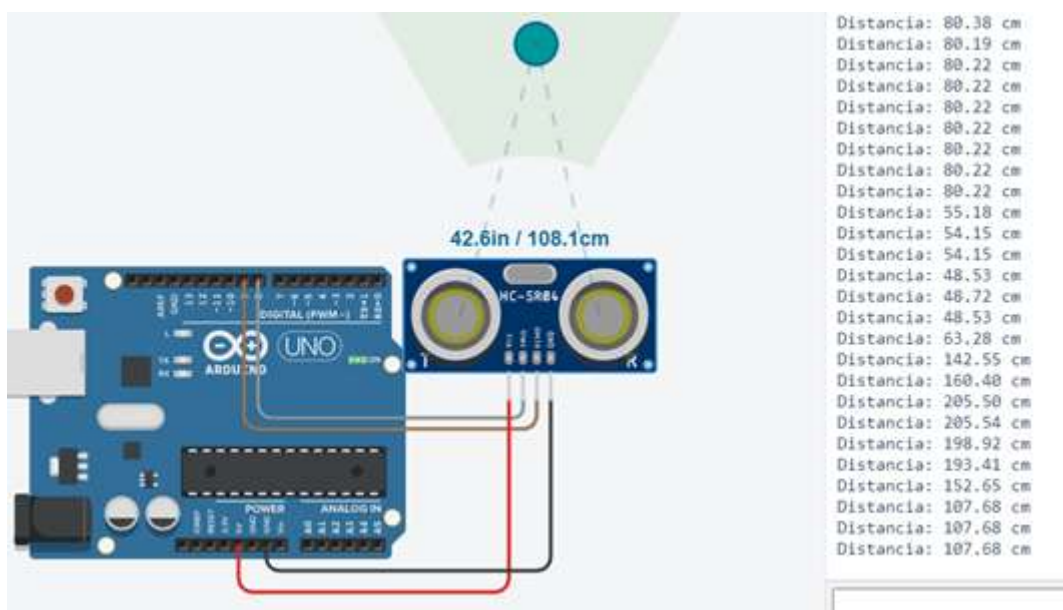


O sensor ultrassônico trabalha com uma faixa angular para medição de  $\pm 15^\circ$ , gerando assim um campo de visão de  $30^\circ$ , como pode ser visto na Figura abaixo. Outro detalhe importante é a distância que este módulo é capaz de medir, podendo medir desde 2cm à 4m de distância a uma precisão de 3mm. Vale ressaltar que essa precisão de medição ainda pode ser melhorada por meio de processos de

criação de curva de ajuste e calibração, gerando assim valores mais precisos.



Vejamos agora o exemplo do experimento em execução, onde foram simulados diversos pontos de medição, como mostrado na seguinte Figura.



**Código: //Ultrassonico**

```
//Pinos de comunicação do sensor ultrassonico
```

```
#define trigPin 12
```

```
#define echoPin 13
```

```
//Motor de passo
```

```
int motorPin1 = 7;
```

```
int motorPin2 = 8;
```

```
int motorPin3 = 9;
```

```
int motorPin4 = 10;
```

```
int motorDelay = 0;
```

```
float tempoResp, distancia;
```

```
void setup() {
```

```
    Serial.begin(9600);
```

```
    pinMode(trigPin, OUTPUT);
```

```
    pinMode(echoPin, INPUT);
```

```
    delay(1000);
```

```
    pinMode(motorPin1, OUTPUT);
```

```
    pinMode(motorPin2, OUTPUT);
```

```
    pinMode(motorPin3, OUTPUT);
```

```
    pinMode(motorPin4, OUTPUT);
```

```
    motorDelay = 3;
```

```
}
```

```
void avancar(){
```

```
    digitalWrite(motorPin1, HIGH);
```

```
    digitalWrite(motorPin2, LOW);
```

```
    digitalWrite(motorPin3, LOW);
```

```
    digitalWrite(motorPin4, LOW);
```

```
    delay(motorDelay);
```

```

    digitalWrite(motorPin1, LOW);
    digitalWrite(motorPin2, HIGH);
    digitalWrite(motorPin3, LOW);
    digitalWrite(motorPin4, LOW);
    delay(motorDelay);

    digitalWrite(motorPin1, LOW);
    digitalWrite(motorPin2, LOW);
    digitalWrite(motorPin3, HIGH);
    digitalWrite(motorPin4, LOW);
    delay(motorDelay);

    digitalWrite(motorPin1, LOW);
    digitalWrite(motorPin2, LOW);
    digitalWrite(motorPin3, LOW);
    digitalWrite(motorPin4, HIGH);
    delay(motorDelay);
}

void loop() {
    digitalWrite(trigPin, LOW);
    delayMicroseconds(2);
    digitalWrite(trigPin, HIGH);
    delayMicroseconds(10);
    digitalWrite(trigPin, LOW);

    tempoResp = pulseIn(echoPin, HIGH);
    distancia = (tempoResp*.0343)/2;
    Serial.print("Distância: ");
    Serial.println(String(distancia) + " cm");
    delay(1000);
}

```



```
    for (int i=0; i<50; i++) avancer();  
}
```

## APÊNDICE D – FLUXOGRAMA DOS DADOS COLETADOS

