

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA - CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE METAL MECÂNICA
BACHARELADO EM ENGENHARIA MECATRÔNICA**

GABRIEL SCHÜTZ MORAES

**SISTEMA SUPERVISÓRIO PARA MONITORAMENTO DE
TEMPERATURA E UMIDADE EM LABORATÓRIO DE METROLOGIA**

FLORIANÓPOLIS, 2020

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA - CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE METAL MECÂNICA
BACHARELADO EM ENGENHARIA MECATRÔNICA**

GABRIEL SCHÜTZ MORAES

**SISTEMA SUPERVISÓRIO PARA MONITORAMENTO DE
TEMPERATURA E UMIDADE EM LABORATÓRIO DE METROLOGIA**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecatrônica.

Orientador:
Prof. Dr. Eng. André Roberto de Sousa

FLORIANÓPOLIS, 2020

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor.

Moraes, Gabriel

SISTEMA SUPERVISÓRIO PARA MONITORAMENTO DE TEMPERATURA E UMIDADE EM LABORATÓRIO DE METROLOGIA / Gabriel Moraes ; orientação de André Roberto de Sousa. - Florianópolis, SC, 2020.

70 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Instituto Federal de Santa Catarina, Câmpus Florianópolis. Bacharelado em Engenharia Mecatrônica. Departamento Acadêmico de Metal Mecânica.

Inclui Referências.

1. Metrologia. 2. Sistemas supervisórios. 3. Internet das Coisas. I. Roberto de Sousa, André. II. Instituto Federal de Santa Catarina. Departamento Acadêmico de Metal Mecânica. III. Título.

SISTEMA SUPERVISÓRIO PARA MONITORAMENTO DE TEMPERATURA EM LABORATÓRIO DE METROLOGIA

GABRIEL SCHÜTZ MORAES

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Mecatrônica e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso de Bacharelado em Engenharia Mecatrônica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Florianópolis, 15 de fevereiro de 2020.

Banca Examinadora:

André Roberto de Sousa, Dr. Eng.

Francisco Edson Nogueira de Melo, M. Eng.

Valdir Noll, Dr. Eng.

Entrega o teu caminho ao Senhor;
confia nele, e ele tudo fará.
Salmos 37:5

AGRADECIMENTOS

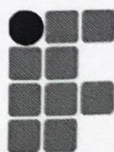
Foram 5 anos de muita batalha e dedicação, primeiramente agradeço a Deus pela força e sabedoria para enfrentar e vencer todas essas etapas.

E claro agradeço e dedico essa vitória totalmente aos meus pais, José Souza Moraes e Nazarete Schütz Moraes, que me deram total suporte para alcançar esse objetivo, além deles também aos meus familiares que estiveram apoiando, e ao meu tio-avô Osmar Schütz e a minha tia-avó Silma Schütz que estiveram presentes nestes últimos momentos de finalização do trabalho de conclusão de curso.

Agradeço também aos meus queridos amigos de Lages, da MUNIL, e de todas as amizades que fiz durante esse tempo que passei pela UDESC, UFSC, IFSC e durante o meu processo de estágio obrigatório.

Ao meu orientador Prof. Dr. Eng. André Roberto de Sousa, pelo suporte e encaminhamento no pouco tempo que lhe coube, pelas suas correções e incentivos.

DECLARAÇÃO DE FINALIZAÇÃO DE CURSO



INSTITUTO FEDERAL
SANTA CATARINA

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO

SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA
CAMPUS FLORIANÓPOLIS

DECLARAÇÃO DE FINALIZAÇÃO DE TRABALHO DE CURSO

Declaro que o estudante **Gabriel Schutz Moraes**, matrícula n° **1520045859**, do Curso de Engenharia Mecatrônica, defendeu o trabalho intitulado **Sistema Supervisório para Monitoramento de Temperatura e Unidade em Laboratório de Metrologia**, o qual está apto a fazer parte do banco de dados da Biblioteca Hercílio Luz do Instituto Federal de Santa Catarina, Campus Florianópolis.

Florianópolis, 12 de DEZEMBRO de 2018.

Prof. Orientador do TCC: André Roberto de Sousa

RESUMO

O presente trabalho visa descrever os passos para desenvolvimento e implantação de um sistema supervisório para monitoramento e análise de temperatura e umidade, empregando o conceito de Internet das Coisas no laboratório de metrologia do Instituto Federal de Santa Catarina situado em Florianópolis. O sistema se faz necessário em laboratórios de metrologia devido à necessidade de atender rígidos requisitos de controle de temperatura para manter o ambiente estável próximo a 20° C conforme a norma ISO1 e os resultados obtidos serão avaliados para obter uma classificação para a sala utilizando a norma VDI/VDE 2627.

O desenvolvimento do projeto tem como foco um sistema de baixo custo com tecnologias abertas eficientes no sensoriamento e na aquisição de dados, para a qual será empregada uma plataforma IoT possibilitando a comunicação dos dados medidos para a internet utilizando uma ESP32 no qual estão conectados os sensores em conjunto com uma Raspberry Pi que é responsável pelo supervisório desenvolvido através da plataforma Node-Red. O sistema proposto foi implementado e está em operação na avaliação da estabilidade temporal e do gradiente espacial, usando 10 sensores que estarão dispostos em lugares diferentes da sala.

Palavras-chave: Metrologia, Sistemas supervisórios, Internet das Coisas.

ABSTRACT

This paper aims to describe the steps for the development and implementation of a supervisory system for monitoring and analysis of temperature and humidity, using the concept of Internet of Things in the metrology laboratory of the Federal Institute of Santa Catarina located in Florianópolis. The system is needed in metrology laboratories due to the need to meet strict temperature control requirements to maintain the stable environment close to 20 ° C according to ISO1 standard and the results will be evaluated to obtain a rating for the room using VDI / VDE 2627.

The development of the project focuses on a low cost system with efficient open technologies for sensing and data acquisition, for which an IoT platform will be used enabling communication of the measured data to the internet using an ESP32 to which the sensors are connected in conjunction with a Raspberry Pi which is responsible for the supervisory developed through the Node-Red platform. The proposed system has been implemented and is in operation to evaluate temporal stability and spatial gradient, using 10 sensors that will be arranged in different places of the room.

Palavras-chave: *Metrology, Supervisory Systems, Internet of Things.*

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Máquina de medição por coordenadas do IFSC	16
Figura 2 - Sistema de monitoramento idealizado	18
Figura 3 - Fontes de erros em máquinas de medição por coordenadas	21
Figura 4 - Diferenças de temperaturas temporais	23
Figura 5 - Classificação para variação de temperatura temporal	24
Figura 6 - Posição dos sensores	24
Figura 7 - Classificação para temperaturas espaciais admissíveis (gradiente espacial)	24
Figura 8 - Classificação de acordo com a variação de umidade	25
Figura 9 - Zeiss Tempar	26
Figura 10 - DS18B20	28
Figura 11 - Higrômetro de fio de cabelo	28
Figura 12 - Higrômetro de ponto de orvalho	29
Figura 13 - Sensor de Umidade HTD21D	29
Figura 14 - Protocolo I2C	31
Figura 15 - Comunicação 1-Wire parasita	31
Figura 16 - Comunicação 1-Wire	32
Figura 17 - Tempo de inicialização	32
Figura 18 - Modos de escrita	32
Figura 19 - Topologias	33
Figura 20 - Padrão de pares	33
Figura 21 - Fluxo de comunicação MQTT	34
Figura 22 - Protocolo de comunicação <i>UART</i>	35
Figura 23 - ESP32	36
Figura 24 - Raspberry PI 3 B+	37
Figura 25 - Fluxo de programação Node-RED	37
Figura 26 - Interface gráfica Node-RED	38
Figura 27 - Interface Hamachi	38
Figura 28 - Interface Raspbian	39
Figura 29 - Display touchscreen Nextion	39
Figura 30 - Componentes testados	41
Figura 31 - Primeiro supervisor de testes e tela touchscreen	41
Figura 32 - Circuito eletrônico	42
Figura 33 - Módulo de temperatura	43
Figura 34 - Módulos de temperatura	44
Figura 35 - Placa finalizada	44
Figura 36 - Circuito relé	45
Figura 37 - Diagrama de blocos do circuito eletrônico	45
Figura 38 - Esquemático geral	46
Figura 39 - Cores	47
Figura 40 - Testes com a placa principal	47
Figura 41 - Testes do módulo	48
Figura 42 - Teste dos sensores	48
Figura 43 - Consumo de energia	49
Figura 44 - Circuito elétrico do painel	49
Figura 45 - Painel elétrico aberto	50
Figura 46 - Painel elétrico	50
Figura 47 - Posicionamento dos sensores	50

Figura 48 - Localização dos sensores.....	51
Figura 49 - Núcleos ESP32.....	53
Figura 50 - Aquisição de dados de temperatura.....	53
Figura 51 - Aquisição de dados de umidade.....	53
Figura 52 - Node-RED.....	54
Figura 53 - Valores tempo real.....	54
Figura 54 - Dados sensores.....	55
Figura 55 - Valores gradientes espaciais.....	55
Figura 56 - Controle ESP32.....	56
Figura 57 - Avaliador dos sensores.....	56
Figura 58 - Calibração dos sensores.....	57
Figura 59 - Calibração dos sensores de umidade.....	58
Figura 60 - Erros no sistema.....	61
Figura 61 - Estabilidade temporal.....	62
Figura 62 - Gradiente espacial local do eixo X.....	63
Figura 63 - Gradiente espacial global do eixo X.....	63
Figura 64 - Gradiente espacial local do eixo Y.....	64
Figura 65 - Gradiente espacial global do eixo Y.....	64
Figura 66 - Gradiente espacial local do eixo Z.....	65
Figura 67 - Gradiente espacial global do eixo Z.....	65
Figura 68 - Dados obtidos com sensor de umidade.....	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Especificações DS18B20	27
Tabela 2 - Especificações HTU21D.....	30
Tabela 3 - Especificações ESP32.....	36
Tabela 4 - Especificações Raspberry PI 3 B+	37
Tabela 5 - Especificações display Nextion	39
Tabela 6 - Componentes selecionados.....	42
Tabela 7 - Pares selecionados	46
Tabela 8 - Resultado das calibrações mostrando a correção a ser implementada em cada sensor	58
Tabela 9 - Resultado calibrações.....	59
Tabela 10 - Precisão dos sensores	59
Tabela 11 - Análise de incerteza de medição	60
Tabela 12 - Tabela de custos	61

LISTA DE ABREVIATURAS

IoT – *Internet of Things* (Internet das Coisas)

MMC - Máquina de medir por coordenadas

MQTT - *Message Queuing Telemetry Transport*

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA	17
3	OBJETIVOS	19
3.1	Principal.....	19
3.2	Específicos	19
4	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
4.1	Máquina de medir por coordenadas.....	20
4.2	Normas para avaliação de salas de metrologia	22
4.2.1	ISO 1: 2016 - Geometrical product specifications (GPS) — Standard reference temperature for the specification of geometrical and dimensional properties	22
4.2.2	Norma VDI/VDE2627	23
4.3	Sistemas supervisórios comerciais para avaliação de salas de metrologia	25
4.4	Tecnologias de medição de temperatura e umidade relativa do ar	26
4.4.1	Termoresistores e termopares.....	27
4.4.2	Sensores eletrônicos de temperatura.....	27
4.4.3	Sensores eletrônicos de umidade	28
4.4.4	Tecnologias de informação e comunicação aplicadas em metrologia.....	30
4.4.5	Internet das Coisas (<i>Internet of Things</i>)	30
4.4.6	Protocolo de comunicação I2C.....	30
4.4.7	Protocolo de comunicação 1-Wire.....	31
4.4.8	Protocolo de comunicação MQTT e Mosquitto Broker	33
4.4.9	Protocolo de comunicação serial <i>UART</i> (RX, TX)	34
4.5	Tecnologias de hardware e software empregados em sistemas de monitoramento.....	35
4.5.1	ESP32	35
4.5.2	Raspberry PI	36
4.5.3	Node-RED	37
4.5.4	Hamachi	38
4.5.5	Raspbian	38
4.5.6	Sistema de Touchscreen.....	39
5	DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA SUPERVISÓRIO	40
5.1	Projeto Eletrônico	40
5.1.1	Testes em protoboard do hardware.....	40
5.1.2	Confecção das placas de circuito impresso	42
5.1.3	Cabeamento (cabo de rede CAT5e).....	46
5.2	Tamanho dos cabos e alocação dos sensores na sala (projeto físico).....	47
5.2.1	Teste da placa principal e módulos de temperatura	47
5.2.2	Consumo de energia	49
5.2.3	Painel elétrico	49
5.2.4	Cálculos dos gradientes espaciais	50

5.3	Algoritmo de programação da ESP32	52
5.4	Sistema Supervisório	53
5.5	Calibração dos sensores.....	57
5.6	Custo total do projeto.....	61
6	AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS	62
6.1	Valores obtidos de temperatura	62
6.2	Valores obtidos pelo sensor de umidade	66
6.3	Avaliação geral dos dados obtidos pelo supervisorio	66
7	CONCLUSÃO	67
	REFERÊNCIAS.....	68

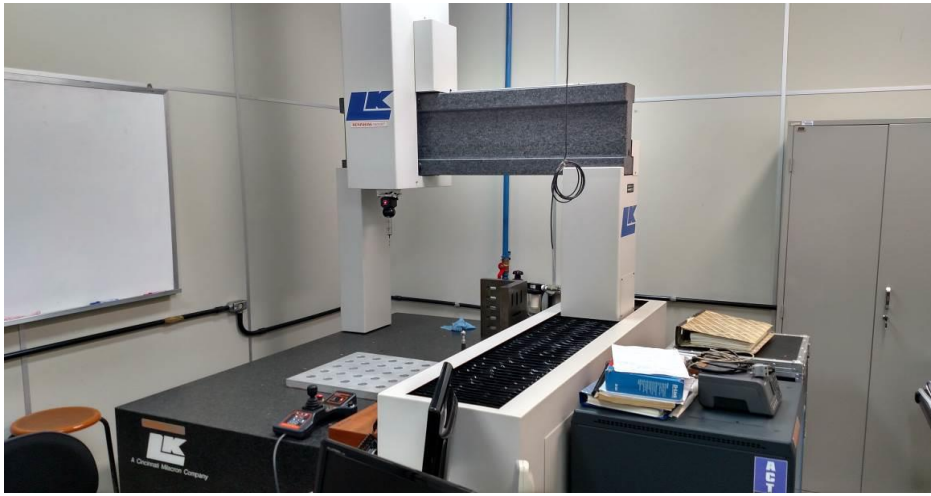
1 INTRODUÇÃO

Para obtenção de medições mais precisas, os laboratórios de metrologia necessitam atender requisitos de controle de temperatura e umidade do ar. A temperatura tem um efeito direto sobre os resultados, na medida em que provocam dilatações em peças e instrumentos de medição. A umidade é mantida sob controle para não causar oxidação em padrões e instrumentos e, no longo prazo, levar a erros de medição. Nestes ambientes a temperatura deve ser estável no tempo, com pouco gradiente espacial e próximas de 20° C, que é a temperatura de referência na área de metrologia dimensional, conforme define a norma ISO1. A umidade relativa do ar deve estar próxima de 50% para não causar oxidação nos instrumentos nem problemas de saúde nos usuários do laboratório.

Peças que estão fora do padrão acabam gerando gastos para as indústrias, já que estas peças se tornam refugo necessitando um retrabalho atrasando todos os processos, além de problemas de segurança que podem ocasionar por estarem fora do padrão. JR. e SOUSA (2008) apontam alguns pontos que podem levar a erros de medição se não forem corretamente tratados.

No laboratório de metrologia do IFSC existem diversas ferramentas e máquinas para realizar medições, como réguas, paquímetros, micrometros, mas em comparação a essas ferramentas a máquina de medição por coordenadas (Figura 1) se sobressai já que apresenta uma grande precisão de medição, ser automatizada e poder medir uma grande diversidade de geometrias. Na disciplina optativa de medição por coordenadas do curso de Engenharia Mecatrônica a mesma foi apresentada, sendo a máquina de medição mais flexível do mercado aliada à alta velocidade de medição e baixo nível de incerteza, tendo a necessidade de um ambiente controlado.

Figura 1 - Máquina de medição por coordenadas do IFSC



Fonte: IFSC.

Devido às necessidades de um ambiente com rígidos requisitos de controle de temperatura, tem-se a necessidade da implementação de sistema para monitoramento. No contexto atual das tecnologias de comunicação é possível aplicar um sistema que tenha conexão com a internet onde é possível aplicar o conceito de *IoT (Internet of Things)* que é “um sistema em que os elementos no mundo físico, e sensores dentro ou acoplados a esses elementos, estão conectados à Internet através de conexões de Internet sem fio e com fio.”(LOPEZ RESEARCH, 2013).

2 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA

Hoje, as salas de metrologia procuram manter a temperatura interna próximo a 20 °C para conseguir uma medição precisa das peças. Para isso, deve-se ter uma boa medição no valor da temperatura, já que a incerteza na medição da temperatura aumenta a incerteza na medição das peças fabricadas.

Para o monitoramento destes ambientes de medição a utilização de sistemas supervisórios é bastante frequente, devido à capacidade de medição e armazenamento de dados, bem como devido à disponibilização dos resultados aos usuários da sala de medição. As informações geradas podem indicar deficiências no sistema de climatização bem como levar a causas e ações corretivas para que o ambiente de medição esteja adequado aos requisitos de precisão das medições.

O laboratório de metrologia do IFSC possui ambientes com equipamentos de medição de alta exatidão, nos quais o controle de temperatura é crítico para que a exatidão das medições não sofra interferência de efeitos térmicos sobre as peças e sobre as máquinas de medir. No entanto, atualmente estes ambientes não contam com um sistema de monitoramento da temperatura ambiente, e a aquisição de sistemas comerciais incorre em alto custo, inviáveis de serem implantados.

Neste trabalho o sistema supervisório foi concebido com sensores de medição de temperatura distribuídos no espaço de uma MMC conforme idealizado na Figura 2, conectados a uma placa ESP32 com envio dos dados de medição via rede sem fio (*Wireless*) utilizando protocolo de comunicação *MQTT* para uma placa Raspberry Pi onde estará o sistema supervisório para visualização em tempo real das temperaturas e também da umidade. Com esse sistema, espera-se diminuir a incerteza da medição de temperatura e melhor monitorar a confiabilidade do sistema de controle de temperatura da sala de medições, assim diminuindo a incerteza nas medições das peças.

Figura 2 - Sistema de monitoramento idealizado

Fonte: Elaboração própria (2019).

Para avaliação dos dados obtidos no sistema supervisorio serão utilizadas as recomendações e regras da norma alemã VDI/VDE 2627 onde será possível avaliar a sala de metrologia, levando em conta as diferenças de temperaturas no espaço da sala, bem como em relação à estabilidade ao longo do tempo e o erro em relação à temperatura de referência de 20°C.

Com o sistema em funcionamento, espera-se que seja possível criar um relatório e então a sala será classificada de acordo com a norma VDI/VDE 2627, onde serão obtidos possíveis erros e melhorias para a sala. Assim como, caso implementadas, que essas melhorias no espaço tragam uma otimização no sistema de refrigeração da sala, trazendo juntamente uma economia energética.

3 OBJETIVOS

Esta proposta de trabalho de conclusão de curso possui os objetivos gerais e específicos que serão descritos a seguir.

3.1 Principal

Desenvolver um sistema supervisorio com Raspberry Pi 3 em conjunto com o módulo ESP32 que é utilizado em sistemas de Internet das Coisas, tendo o supervisorio a capacidade de avaliar a conformidade térmica de salas de medição por coordenadas, permitindo a verificação do atendimento do requisito de 20° C com as devidas tolerâncias da sala de medição que é definido na ISO1, além de avaliar a estabilidade temporal e o gradiente espacial da temperatura neste ambiente. Com os relatórios gerados pelo supervisorio será possível comparar o desempenho da sala de medidas atribuindo-lhe um critério de conformidade de acordo com a norma VDI/VDE 2627.

3.2 Específicos

- Pesquisar como funcionam os sistemas supervisorios para a área de medição de temperatura;
- Conhecer as tecnologias de medição empregadas na área de temperatura;
- Conhecer as principais normas que se aplicam à definição de condições de temperatura em ambientes de metrologia dimensional;
- Desenvolver o conceito de um sistema de medição de temperatura com 8 sensores localizados no espaço da sala;
- Especificar e adquirir transdutores de medição;
- Desenvolver e integrar circuitos eletrônicos;
- Construir o aparato mecânico para posicionar os sensores na sala de medição;
- Desenvolver a programação da ESP32 e Raspberry Pi;
- Avaliação metrológica do sistema
- Validar o sistema para monitoramento de salas de medição por coordenadas.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção será apresentada a pesquisa realizada para o desenvolvimento do projeto.

4.1 Máquina de medir por coordenadas

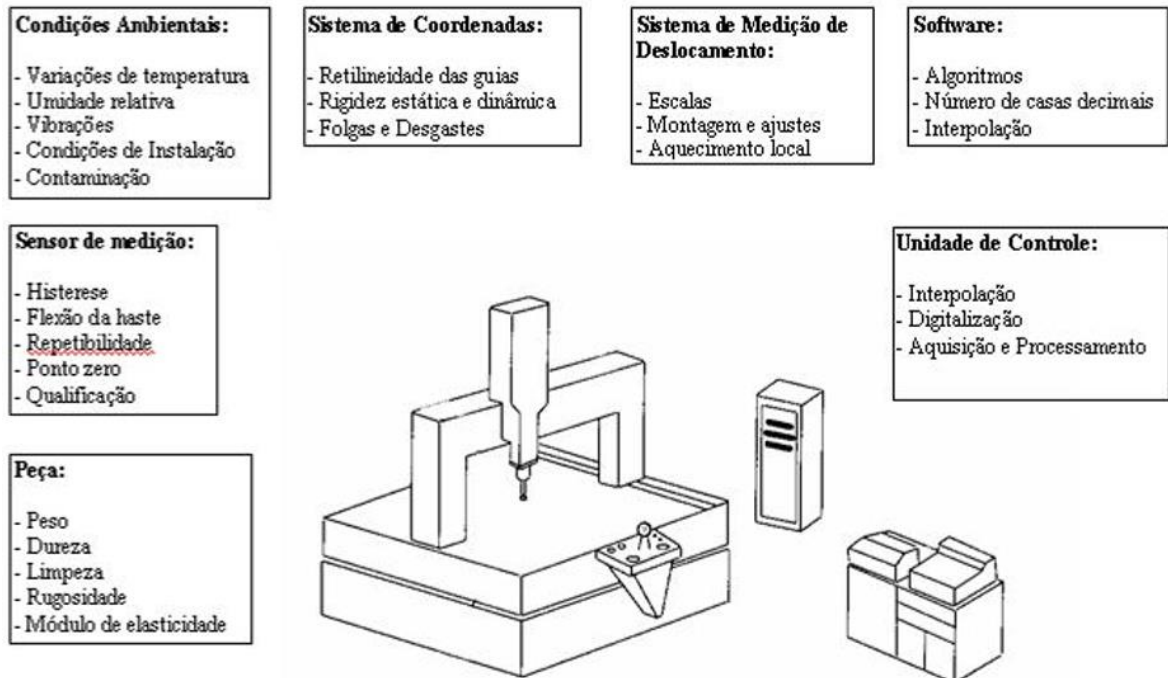
As máquinas de medir por coordenadas são conhecidas pela sua flexibilidade, rapidez e confiança, é um sistema de medição automatizado.

Segundo LUCENA (2009) com os métodos convencionais de medições não é possível obter uma medição confiável para uma superfície complexa, desta forma surgiram as máquinas de medir por coordenadas para solucionar esse problema.

Máquinas de medição por coordenadas são “compostas por um conjunto de equipamentos mecânicos (mesa, mancais, guias etc.), eletrônicos (placas de servo-amplificadores etc.) e ópticos (escalas de medição eletro-ópticas), tudo isso gerenciado por computadores e por um software de medição.” (TANAKA, 2009, p. 16).

Como descrito anteriormente as máquinas de medição por coordenadas conseguem obter uma alta precisão de medição, mas para conseguir obter tal nível de precisão e repetibilidade, é necessário atender rígidos requisitos para operação da máquina e na construção da sala de metrologia, caso contrário a mesma irá gerar erros nas medições. Essas fontes “de erro de medição, a literatura de medição por coordenadas usualmente as subdivide em grupos de influência. Uma das formas de classificação mais difundidas considera quatro grandes grupos: equipamento, ambiente, peça e operador.” (ARENHART, 2007, p. 6). Na Figura 3 é possível visualizar as fontes de erros.

Figura 3 - Fontes de erros em máquinas de medição por coordenadas



Fonte: Slides da disciplina optativa de medições por coordenadas (2019).

Em uma aferição é impossível obter uma medição totalmente sem erros, para tal feito “seriam necessários: (a) um sistema de medição perfeito; (b) um ambiente controlado e perfeitamente estável; (c) um operador perfeito e (d) que a grandeza sob medição (mensurando) tivesse um valor único, perfeitamente definido e estável.”(JR.; SOUSA, 2008, p. 10).

Para o presente trabalho será considerada apenas a influência da temperatura nas medições.

Em relação à temperatura, há três formas desta influenciar os resultados de medição: pela diferença em média do valor de referência (20°C), pelas flutuações ao longo do tempo, e pelos gradientes térmicos. Estas fontes de erro atuam tanto na estrutura e escalas da máquina quanto na peça. As máquinas normalmente apresentam uma faixa de temperaturas dentro da qual as especificações do fabricante são válidas. A incapacidade de manter o ambiente de medição nesta faixa compromete o desempenho da máquina frente àquele declarado pelo fabricante. (ARENHART, 2007, p. 18)

Diversos fatores podem influenciar na instabilidade da temperatura, como número elevado de pessoas na sala, o calor gerado pela MMC e o dimensionamento incorreto do sistema de refrigeração. Tais fatores podem gerar pequenos desvios nas medições e dependendo do material um pequeno acréscimo na temperatura pode causar uma dilatação térmica. Como essas mudanças ocorrem geralmente na escala

de micrômetros não é possível visualizar a olho nu, e essas pequenas diferenças fazem uma grande diferença no mundo da metrologia.

4.2 Normas para avaliação de salas de metrologia

Dada a grande influência da temperatura sobre os resultados das medições, foram desenvolvidas ao longo do tempo documentos normativos com a definição de temperatura de referência e de métodos de ensaio para avaliar a adequação de ambientes de medição.

As normas a seguir definem parâmetros que devem ser seguidos na construção e validação de salas de metrologia. São dois dos principais documentos de referência encontrados na pesquisa bibliográfica deste trabalho.

4.2.1 ISO 1: 2016 - Geometrical product specifications (GPS) — Standard reference temperature for the specification of geometrical and dimensional properties

A (ISO 1, 2016) estabelece que o valor padrão da temperatura de referência para a especificação de propriedades geométricas e dimensionais deve ser 20°C.

É a norma de referência mundial que define a temperatura ideal na qual a inspeção dimensional das peças deve ser realizada. A tolerância em relação a essa temperatura depende da exatidão pretendida para as medições.

Salas de medidas em ambiente industrial apresentam tolerâncias típicas de $\pm 1^\circ\text{C}$, enquanto ambientes de calibração de instrumentos possuem requisitos bem mais exigentes (até $\pm 0,1^\circ\text{C}$).

Esta definição é indispensável para que produtos fabricados em diferentes locais do mundo sob diferentes temperaturas possam montar entre si. Para efeitos de ilustração, uma mesma peça de alumínio de 1000,000 mm pode contrair-se e expandir-se de 0,1 mm com uma variação de cerca de 5°C, muito comum em ambientes fabris.

Para que estas peças possam ter suas dimensões estabelecidas de forma precisa, necessitam sair da produção e serem levadas a uma sala de medidas próxima de 20°C. Ficarão um tempo climatizando e só então serão medidas. O erro encontrado nesta condição será usado para corrigir os processos de produção.

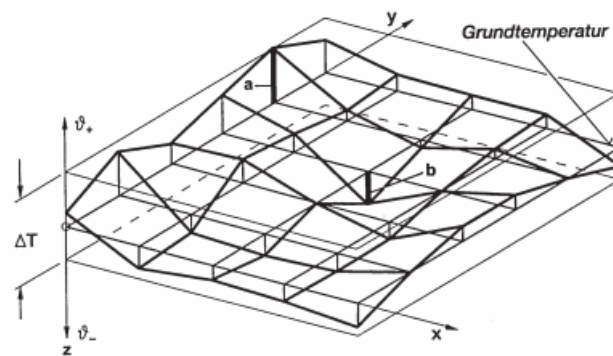
4.2.2 Norma VDI/VDE2627

A norma alemã (VDI/VDE-2627, 1998) define alguns critérios para classificação de salas de metrologia, as seguintes variáveis podem ser usadas para descrever o comportamento nas salas de metrologia: mudanças temporais de temperatura (é a avaliação quanto a flutuações que possam existir na temperatura ao longo do tempo), diferenças de temperatura temporal em relação a temperatura de referência e os gradientes espaciais. A precisão da medição é influenciada pelas alterações temporais de temperatura e de diferenças de temperatura espaciais.

A temperatura em uma sala de metrologia não é constante, e é diferente em alguns locais, já que ocorre troca de calor entre os corpos com diferentes temperaturas, estas trocas de calor são realizadas por condução, convecção e por radiação.

Sendo distribuição de temperaturas temporais (Figura 4) caracterizada pela diferença de temperatura em relação a temperatura de referência 20°C no espaço medição, para avaliar uma sala de metrologia são usadas as maiores diferenças entre todas as temperaturas medidas.

Figura 4 - Diferenças de temperaturas temporais



Fonte: Norma VDI/VDE 2627.

Na Figura 5 está apresentado a tabela para classificação das salas de metrologia, levando em conta as diferenças de temperatura no tempo em relação a temperatura de referência para um ou mais eixos espaciais.

Figura 5 - Classificação para variação de temperatura temporal

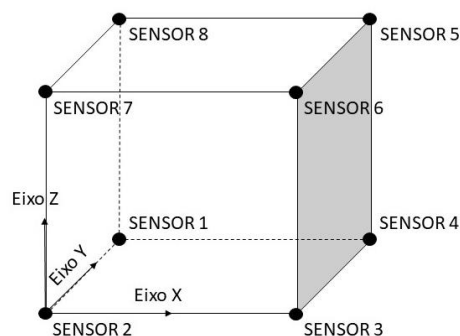
Classe de temperatura	A	B	C	D	E
15 minutos	0.2	0.4	-	-	-
60 minutos	0.2	0.4	1.0	2	2
4 horas	0.2	0.6	1.5	3	3
12 horas	0.2	0.8	-	-	-
24 horas	0.4	0.8	2	3	6
7 dias	0.4	1.0	2	4.0	8

Fonte: Norma VDI/VDE 2627.

Para a classificação de acordo com o gradiente espacial (é a variação de temperatura no espaço dos eixos X, Y e Z, podendo ser local ou global) (Figura 7).

Onde é avaliada a diferença de temperatura entre os sensores (Figura 6) de cada eixo (exemplo: **Gradiente local = Temperatura Sensor 3 – Temperatura Sensor 2**), todas as fórmulas utilizadas serão apresentadas posteriormente.

Figura 6 - Posição dos sensores



Fonte: Elaboração própria (2019).

Figura 7 - Classificação para temperaturas espaciais admissíveis (gradiente espacial)

Classe de temperatura	A	B	C	D	E
Diferenças admissíveis	0,1	0,2	0,5	1,0	2,0

Fonte: Norma VDI/VDE 2627.

A norma também define que a umidade relativa deve estar entre 30% e 60%, e não deve ser superior a 60%, evitando assim a corrosão, o que pode influenciar também nas características metrológicas de instrumentos de medição, tais como interferômetros a laser. Sendo a umidade influenciada por: mudanças

de temperatura ambiente, condições climáticas exteriores, pessoas e equipamentos na sala e limpezas (que acabem molhando o ambiente).

Na Figura 8 está a classificação da sala de acordo com a umidade (%), para as mudanças permitidas ao longo do tempo.

Figura 8 - Classificação de acordo com a variação de umidade

Classe de umidade	A	B	C	D
Diferenças locais permitidas na umidade relativa do ar em %	10	20	30	aberto

Fonte: Norma VDI/VDE 2627

4.3 Sistemas supervisórios comerciais para avaliação de salas de metrologia

Dada a importância da verificação da adequação da climatização onde operam equipamentos de medição de alta exatidão, a empresa Alemã Carl Zeiss, uma referência na área de metrologia dimensional, desenvolveu um sistema de monitoramento para salas de metrologia tridimensional conhecido como *ZEISS TEMP* (Figura 9), registrando temperatura, fluxo de ar, umidade do ar e pressão barométrica.

Para isso o sistema possui uma rede nove sensores de temperatura espalhados em torno da máquina de medir tridimensional. Dois sensores são montados em diferentes alturas em cada canto da sala. O nono sensor está localizado no centro, tanto quanto possível, tudo em conformidade com a norma alemã VDI/VDE 2627, havendo também outras configurações para o supervisório contendo 4 ou 8 sensores. (ZEISS, 2019).

Figura 9 - Zeiss Tempar



Fonte: Documentação ZEISS TEMPAR.

Com estes sensores o sistema é capaz de avaliar:

- A capacidade do sistema de climatização em deixar a sala próxima de 20° C (Erro);
- A capacidade em manter a temperatura ao longo do tempo (Estabilidade Temporal);
- A distribuição de temperatura no espaço de trabalho da máquina de medir (Gradiente espacial);
- A exatidão e estabilidade da umidade relativa do ar dentro da sala.

4.4 Tecnologias de medição de temperatura e umidade relativa do ar

Neste item são descritos os resultados da revisão bibliográfica no tema medição de temperatura e umidade relativa do ar.

4.4.1 Termoresistores e termopares

Os termoresistores são construídos geralmente de uma liga de cerâmica e polímeros, trabalhando na faixa de $-90\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $130\text{ }^{\circ}\text{C}$, “são dispositivos elétricos que possuem a sua resistência elétrica alterada com a temperatura. Ou seja, alteram sua resistência elétrica para diferentes valores de temperatura.” (MARTINAZZO; ORLANDO, 2016, p. 96).

Os termopares são descritos por SOUSA (2015, p. 15) eles são constituídos por dois metais distintos que são unidos em um das suas extremidades chamada de junta quente e na outra extremidade aberta fica conectado o instrumento de medição de força eletromotriz (FEM) chamada de junta fria. Então quando existe uma diferença de temperatura entre as extremidades acaba gerando uma tensão elétrica (volts).

4.4.2 Sensores eletrônicos de temperatura

O desenvolvimento da microeletrônica fez surgir diversos sistemas eletrônicos de medição de temperatura, com a vantagem de integrarem num único corpo as funções de sensoriamento e tratamento do sinal. São conhecidos no mercado como sensores eletrônicos de temperatura e são uma opção bastante interessante em caso de medição de temperaturas de baixa magnitude com média exatidão.

Neste trabalho foram pesquisados alguns sensores, o sensor de temperatura DS18B20 mostrou-se mais adequado para o projeto, é fabricado pela Maximintegrated (Figura 10) e utiliza o protocolo de comunicação 1-Wire, com ele possível é chegar a grandes distâncias de cabeamento, o protocolo possibilita conectar vários sensores em apenas uma linha de dados e no projeto serão utilizados 8 sensores de temperatura, as especificações estão na Tabela 1. Cada dispositivo possui um código de série exclusivo de 64 bits armazenado na ROM, sendo possível a utilização e a diferenciação de cada sensor. (MAXIMINTEGRATED, 2019).

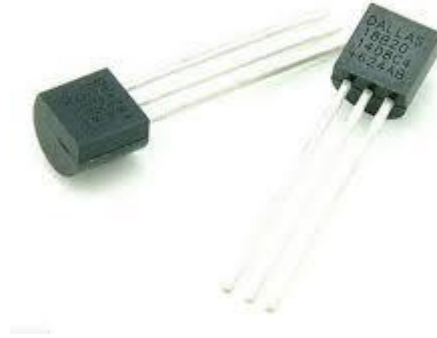
Tabela 1 - Especificações DS18B20

DS18B20	
Tensão de alimentação	3V – 5V
Resolução	9 – 12 bits

Precisão	$\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ na faixa de -10°C a $+85^{\circ}\text{C}$
Faixa de operação ($^{\circ}\text{C}$)	-55°C – 125°C

Fonte: Maximintegrated.

Figura 10 - DS18B20



Fonte: Maximintegrated.

Após analisar outras opções no mercado, este sensor foi adotado neste trabalho por reunir características técnicas promissoras, a um custo de aquisição compatível com o projeto.

4.4.3 Sensores eletrônicos de umidade

Existem diversos métodos de medição da umidade relativa do ar. Desde métodos puramente mecânicos como higrômetro de fio de cabelo (Figura 11) aos sofisticados higrômetros de ponto de orvalho (Figura 12) empregados em estações meteorológicas.

Figura 11 - Higrômetro de fio de cabelo



Fonte: <https://www.3bscientific.com.br/>

Figura 12 - Higrômetro de ponto de orvalho



Fonte: <https://www.nei.com.br/>

Além destas tecnologias existem sensores eletrônicos de umidade, com aplicação crescente no mercado por integrar num único chip o sensor com o tratamento do sinal. O princípio de medição é capacitivo, no qual a umidade do ar altera a capacitância do sensor. Tais sistemas têm sido grandemente aplicados em sistemas de baixa e média precisão.

Neste projeto foram pesquisados alguns sistemas, sendo o mais promissor o sensor de umidade HTD21D (Figura 13) que também mede temperatura. Este utiliza o protocolo de comunicação I2C, além da umidade, o sensor também consegue informar temperatura, mas acaba ficando limitado devido à distância entre o sensor e o microcontrolador que é apenas para pequenas distâncias.(MEASUREMENT SPECIALTIES INC., 2013).

Figura 13 - Sensor de Umidade HTD21D



Fonte: sparkfun.com

Tabela 2 - Especificações HTU21D

HTU21D	
Tensão de alimentação	3 – 3.3V
Resolução	8 – 12 bits
Faixa de operação (RH%)	0 – 100%
Faixa de operação (°C)	-40°C – 125°C

Fonte: Datasheet HTU21D

4.4.4 Tecnologias de informação e comunicação aplicadas em metrologia

Este item do trabalho descreve alguns conceitos e tecnologias de comunicação empregadas atualmente no desenvolvimento de sistemas de monitoramento industriais.

4.4.5 Internet das Coisas (*Internet of Things*)

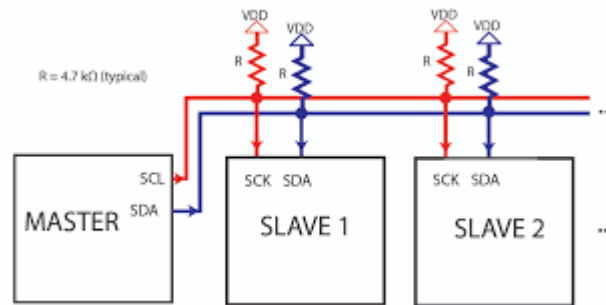
A internet das coisas “trata-se de um ecossistema que conecta objetos físicos, através de um endereço de IP ou outra rede, para trocar, armazenar e coletar dados para consumidores e empresas.” (CARRION; QUARESMA, 2019, p. 53).

Com *IOT* é possível acessar remotamente dados de monitoramento que são obtidos através de sensores. Tais sistemas supervisórios são de grande importância, tomando como o exemplo o monitoramento de temperatura para salas de metrologia, caso haja grandes oscilações de temperatura no ambiente ele vai interferir nas medições das ferramentas, trazendo prejuízos.

4.4.6 Protocolo de comunicação I2C

Como descreve CARVALHO (2016), o protocolo de comunicação I2C (Figura 14) foi desenvolvido pela *Philips* no início dos anos 90, este protocolo utiliza dois fios (SCL e SDL), sendo um dos pontos positivos devido a sua baixa complexidade para se comunicar e o ponto negativo é a limitação da distância entre um periférico e o microcontrolador. É um protocolo que possui baixa velocidade de comunicação, utilizado principalmente para se comunicar entre periféricos e microcontroladores. Possui um endereço de 7 bits, isso significa que é possível ter até 128 dispositivos no barramento I2C.

Figura 14 - Protocolo I2C



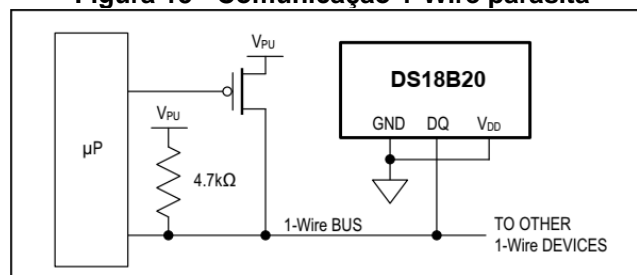
Fonte: <https://www.teachmemicro.com/i2c-primer/>

O barramento é composto por apenas dois sinais, SCL que transporta o clock, caracterizando o I2C como um protocolo síncrono, e o SDA, que é o sinal responsável por transportar os dados em ambas as direções, o que por sua vez caracteriza o protocolo como half-duplex. Ambas as linhas SCL e SDA são bidirecionais, logo os dispositivos I2C necessitam utilizar saídas do tipo dreno aberto, além de cada linha também necessitar de um resistor de pull-up externo. Este tipo de configuração tem como característica o nível lógico baixo como dominante, isto é, se mais de um dispositivo estiver controlando uma linha bidirecional ao mesmo tempo, o dispositivo que estiver transmitindo o nível lógico baixo irá vencer. (CARVALHO, 2016, p. 21).

4.4.7 Protocolo de comunicação 1-Wire

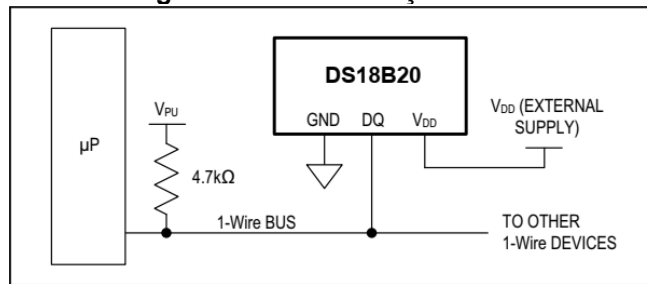
A tecnologia 1-Wire® foi desenvolvida pela *Dallas Semiconductor Corp.*, é um protocolo serial que usa uma única linha de dados mais a referência de terra para comunicação podendo ser utilizado no modo parasita sem alimentação externa como na Figura 15 ou com alimentação externa recomendado para longas distâncias como demonstrado na Figura 16, é um protocolo muito parecido com I2C mas com velocidades mais baixas e um maior alcance (podendo chegar até 100 metros de cabeamento). Cada dispositivo escravo de 1-Wire um código de identificação de 64 bits inalterável, que serve como endereço para identificação. O *datasheet* informa que é necessário colocar um resistor de pull-up entre VCC e DATA, alterando o valor dependendo da distância (1 kΩ - 4.7 kΩ). (MAXIMINTEGRATED, 2019).

Figura 15 - Comunicação 1-Wire parasita



Fonte: Maximintegrated (DS18B20).

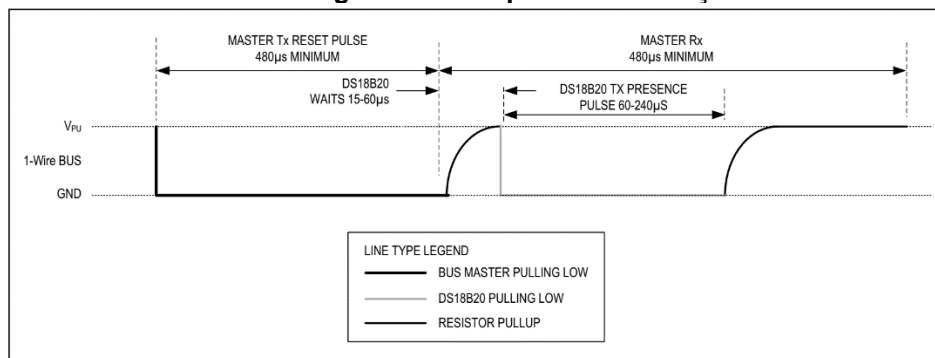
Figura 16 - Comunicação 1-Wire



Fonte: Maximintegrated (DS18B20).

A leitura é inicializada pelo o microcontrolador (*master*) envia um pulso de *reset*, este pulso é enviado em nível 0 para o barramento por pelo menos $480\mu\text{s}$. Quando o sensor de temperatura (*slave*) recebe o sinal, o mesmo envia um sinal em nível 0 por um determinado tempo de 60 a $240\mu\text{s}$ conforme Figura 17.

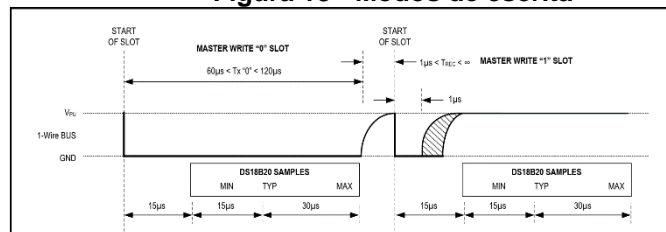
Figura 17 - Tempo de inicialização



Fonte: Maximintegrated (DS18B20).

A duração do pulso determina se o bit é 0 ou 1 como mostra a Figura 18.

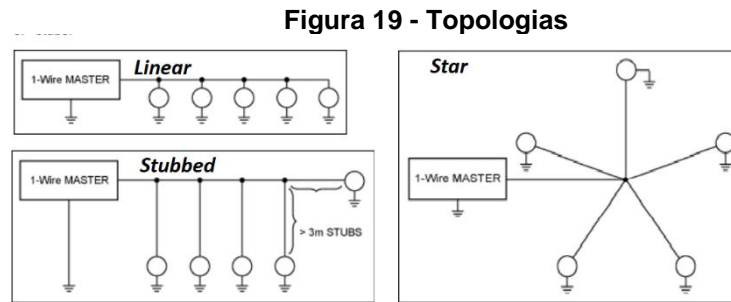
Figura 18 - Modos de escrita



Fonte: Maximintegrated (DS18B20).

Como podemos ver na Figura 18, o tempo para escrever bit 0 é um pulso longo de 60 a $120\mu\text{s}$ e para a escrita do bit 1 é pulso curto de no máximo $15\mu\text{s}$. E para a leitura do *master* e do *slave*, o *master* inicializa o *slot* e então a leitura acontece.

Para obter uma comunicação confiável a longa distância, é necessário seguir alguns requisitos como topologia na configuração dos sensores que são descritos em manual elaborado pela MAXIMINTEGRATED (2008). Existem 3 configurações descritas pela fabricante: *Linear*, *Stubbed* e *Star* que estão ilustradas na Figura 19.



Fonte: Maximintegrated.

A fabricante recomenda e garante para maiores distâncias a utilização da topologia *Linear*. A vantagem principal da utilização da topologia *Linear* é que ela gera menos ruído comparado com as outras topologias, tendo um desempenho melhor.

Para o cabeamento a DIGITRONICS (2004) desenvolveu um manual, recomendando a utilização de cabos de rede CAT5e ou CAT6, utilizando o padrão de crimpagem T568a e também identificou os pares a serem utilizados pelo VCC, DATA e Ground que estão descritos na **Figura 20**.

Figura 20 - Padrão de pares

Proposed 1WRJ45 Standard for 1-wire networks									
	White Green	Green	White Orange	Blue	White Blue	Orange	White Brown	Brown	T568A colors
Description	Optional Power Return (Ground)	Optional Regulated +5VDC (<50MA)	Optional Power Return (Ground)	One Wire Data	One Wire Return	Optional Normally Not connected Analog Signal	Optional +12Vdc regulated (+) Supply (<200ma)	Optional Power Ground Return	
Wire Pairs	Pair-3	Pair-3	Pair-2	Pair-1	Pair-1	Pair-2	Pair-4	Pair-4	T568A order wiring / Pin compatible with Dallas
Name	PWR_RTN	PWR_VCC	A_RTN	OWIO	OWRTN	A_SIG	VRAW	VRAW_RTN	T568A pairs

Fonte: Springbok Digitronics.

4.4.8 Protocolo de comunicação MQTT e Mosquitto Broker

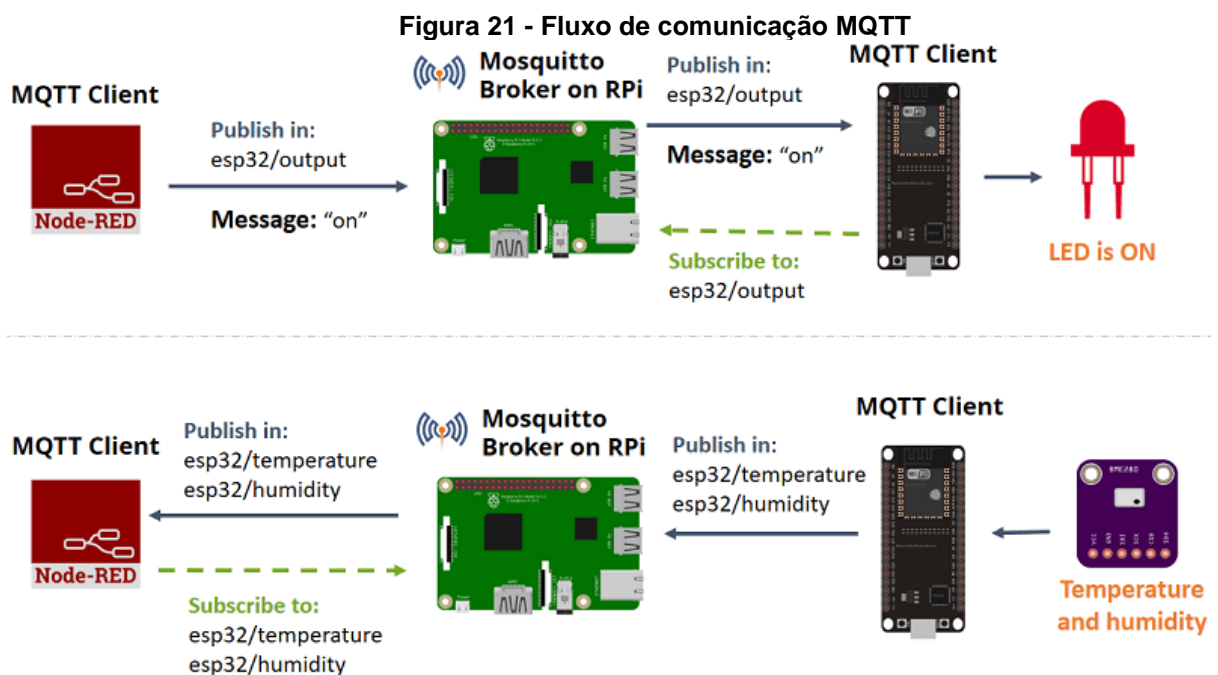
Protocolo *MQTT* (*Message Queue Telemetry Transport*) – Foi desenvolvido pela IBM no final dos anos 90, tinha como solução original a comunicação entre sensores e satélites. É um protocolo para troca de mensagens (gerenciadas pelo *Mosquitto Broker*), que atua utilizando o método de *publish/subscribe* que é

extremamente leve, projetado para ambientes TCP/IP onde existem restrições como redes de baixa largura de banda, alta latência ou até mesmo não confiáveis. Tornando-se um protocolo de extrema importância para Internet das Coisas já que é extremamente leve e escalável, sendo possível ser utilizado por dispositivos com hardware que tenham poder processamento mais baixo. (IBM, 2019).

Mosquito Broker – Ferramenta desenvolvida pela Eclipse, que tem a capacidade de atuar como *broker* no protocolo MQTT, onde é responsável por centralizar e distribuir as mensagens recebidas.

O funcionamento do método *publish/subscribe*: Um dispositivo publica (*publish*) uma informação em um tópico (*topic* – onde são armazenadas as informações recebidas, exemplo: esp32/temperatura) que é enviado ao *broker* (responsável por gerir as mensagens e distribuir para os clientes), um segundo dispositivo se inscreve (*subscribe*) no tópico em que o primeiro dispositivo publicou, desta forma o segundo dispositivo recebe a mensagem (podendo ser um comando ou informação).

Como podemos ver na Figura 21, está ilustrado o funcionamento de comandos enviados para acionar um LED através de um supervisor e também o envio de dados de um sensor de temperatura para o supervisor.

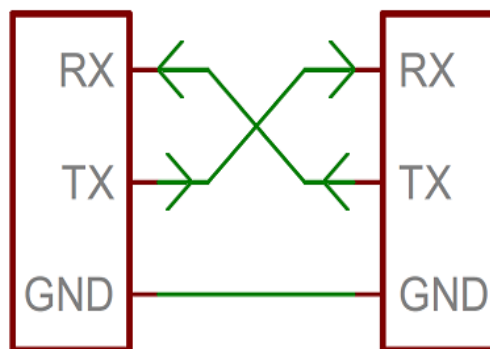


Fonte: <https://randomnerdtutorials.com/>

4.4.9 Protocolo de comunicação serial *UART* (RX, TX)

A *UART* (*Universal Asynchronous Receiver/Transmitter*) é um protocolo (Figura 22) de comunicação assíncrona (sem sinal de *clock*). Os bits são enviados e recebidos com uma determinada velocidade (*baudrate* – medida em bits por segundo), o *baudrate* é configurado com o mesmo valor no emissor e receptor. Os bits são enviados através de dois fios (TX e RX) permitindo uma comunicação simultânea nos dois sentidos. (JUNIOR, 2012, p. 38).

Figura 22 - Protocolo de comunicação *UART*



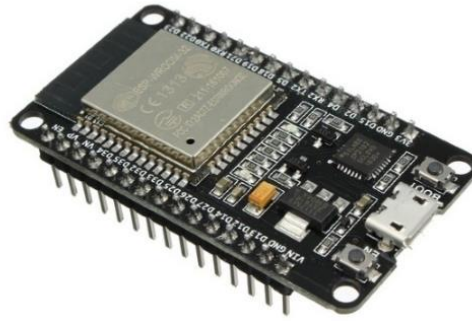
Fonte: <https://www.robocore.net/>

4.5 Tecnologias de hardware e software empregados em sistemas de monitoramento

4.5.1 ESP32

O ESP32 (Figura 23) é um dispositivo IoT, que possui Wi-Fi e Bluetooth 2.4 GHz, tendo um microprocessador com dois núcleos (Tensilica Xtensa 32-bit LX6). (SYSTEMS, 2018).

Figura 23 - ESP32



Fonte: Espressif Systems.

Tabela 3 - Especificações ESP32

ESP32	
Núcleos	2
Arquitetura	32 bits
Clock	240 MHz
RAM	512 KB
FLASH	16 Mb
GPIO	36
Interfaces	SPI/I2C/UART/I2S/CAN
ADC	18
DAC	2
Tensão de alimentação	4,5 – 12V

Fonte: Espressif Systems.

4.5.2 Raspberry PI

Para o projeto em questão foi escolhido a Raspberry PI 3 B+ (Figura 24) em conjunto com o sistema Raspbian. É um computador de baixo custo, sendo uma alternativa ao computador comum, sendo possível navegar na internet, reproduzir vídeos, ler documentos, desenvolver a aprendizagem de programação em diversas linguagens, obter conhecimento de terminal Linux (Debian) e desenvolver aplicações IoT, as especificações estão descritas na Tabela 4. (RASPBERRY PI FOUNDATION, 2015).

Figura 24 - Raspberry PI 3 B+



Fonte: <https://www.raspberrypi.org/>

Tabela 4 - Especificações Raspberry PI 3 B+

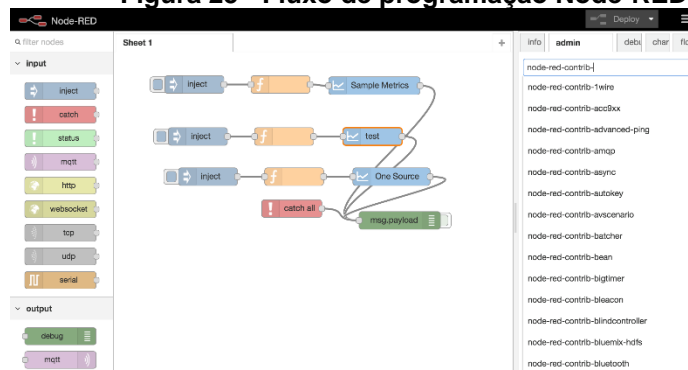
Raspberry PI 3 B+	
Processador	Broadcom BCM2837B0, Cortex-A53 (ARMv8) 64-bit SoC @ 1.4GHz
Memória RAM	1GB LPDDR2 SDRAM
Wi-Fi	2.4GHz e 5GHz IEEE 802.11.b/g/n/ac wireless LAN, Bluetooth 4.2, BLE
GPIO	40
Tensão de alimentação	5V

Fonte: <https://www.raspberrypi.org/>

4.5.3 Node-RED

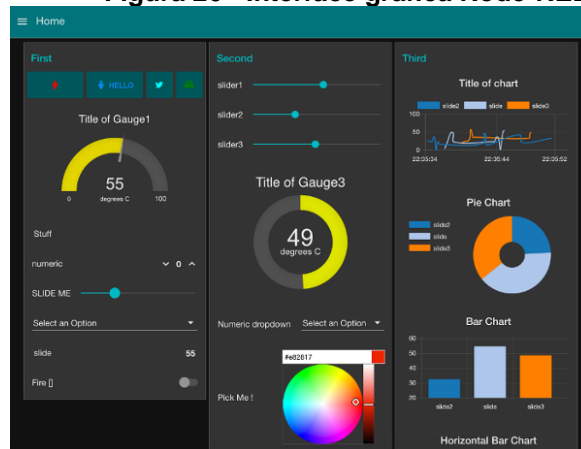
A plataforma Node-RED é um ambiente de programação voltado para Internet das Coisas baseada em fluxo (Figura 25), além disso é possível criar uma interface gráfica para o usuário onde é possível visualizar os dados e também controlar dispositivos (Figura 26). A programação é realizada conectando “nós”, onde dentro de cada “nó” são configuradas as funções a serem desempenhadas, também consegue se comunicar com os seguintes protocolos web: http, TCP, WebSocket e MQTT. A instalação pode ser realizada nas seguintes plataformas: Raspberry Pi, BeagleBone e PC. (Node-RED, 2019).

Figura 25 - Fluxo de programação Node-RED



Fonte: <https://nodered.org/>

Figura 26 - Interface gráfica Node-RED

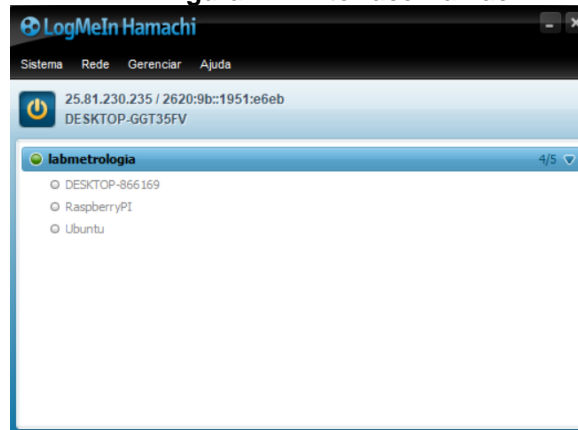


Fonte: <https://nodered.org/>

4.5.4 Hamachi

O Hamachi é um programa que simula uma rede local (LAN), desta forma permitindo conectar a essa rede outros computadores mesmo em locais diferentes. O programa na sua versão gratuita permite o acesso a 5 usuários simultâneos, sendo compatível com a Raspberry Pi e PC. (Hamachi, 2019).

Figura 27 - Interface Hamachi

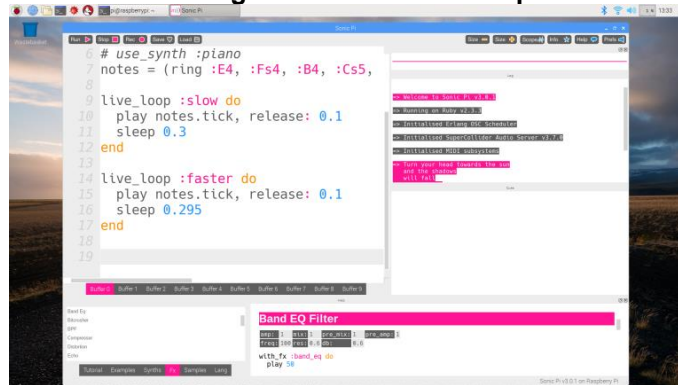


Fonte: Elaboração própria (2019).

4.5.5 Raspbian

Raspbian (Figura 28) é uma distribuição Linux (Debian), que foi otimizada para rodar os conjuntos de instruções ARMv6 dos Raspberry Pi. (RASPBERRY PI FOUNDATION, 2015).

Figura 28 - Interface Raspbian

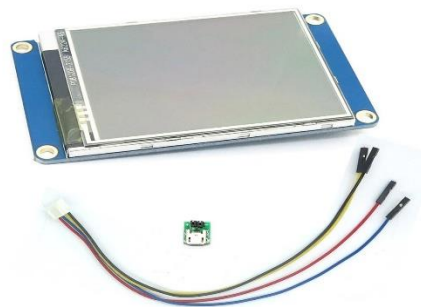


Fonte: <https://www.raspberrypi.org/>

4.5.6 Sistema de Touchscreen

O display touchscreen Nextion (Figura 29) é uma solução Interface Homem Máquina (IHM), especificações da tela na Tabela 5. É uma tela sensível ao toque resistiva que facilita a criação de uma interface gráfica, sendo uma ótima solução para monitorar parâmetros, sendo aplicada principalmente a aplicativos de IoT. (NEXTION, 2019).

Figura 29 - Display touchscreen Nextion



Fonte: Nextion.

Tabela 5 - Especificações display Nextion

Display Serial Touch 2.8"	
Resolução	320x240
Tensão de alimentação	5V
Comunicação	Serial (RX, TX)

Fonte: Nextion.

5 DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA SUPERVISÓRIO

Nesta seção do TCC serão apresentadas as etapas do desenvolvimento do projeto.

5.1 Projeto Eletrônico

Nesta etapa serão descritas as atividades referentes ao desenvolvimento do projeto eletrônico, desde testes até a instalação.

5.1.1 Testes em protoboard do hardware

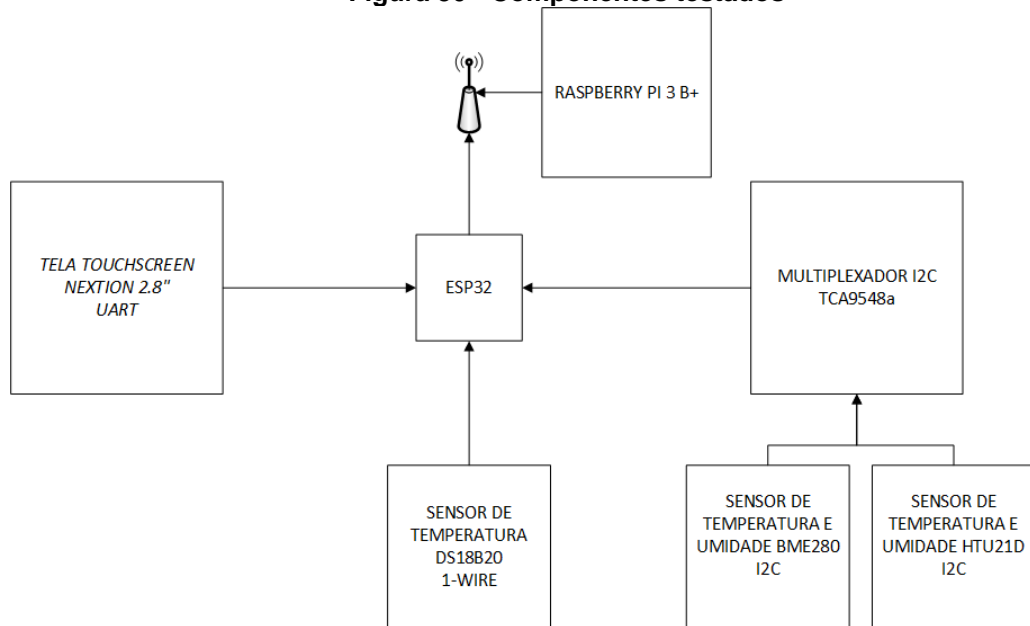
Antes de projetar o circuito (placa impressa) do painel elétrico no *software Proteus*, todos os componentes foram testados individualmente e integrados, e então foram definidos quais componentes seriam utilizados, como o microcontrolador ESP32, Raspberry PI, tela touchscreen, sensores de temperatura e de umidade, multiplexador I2C (houve a necessidade de usar um multiplexador já que seriam utilizados sensores iguais e eles tem o mesmo endereço), fonte e reguladores de tensão.

Para integração de todas essas tecnologias em um único algoritmo, foram realizados testes em todos os componentes por etapas, cada conjunto possui um algoritmo de programação:

- 1) Sensores de temperatura DS18B20 + ESP32 (foi validado o funcionamento com um cabo de aproximadamente 30 metros);
- 2) Sensores de umidade I2C + Multiplexador I2C (TCA9548a) + ESP32;
A utilização do multiplexador foi necessária devido os sensores possuírem o mesmo endereço hexadecimal, onde não é possível alterar via software o endereço, havendo a necessidade de um multiplexador para diferenciá-los.
- 3) Tela touchscreen + ESP32 (Figura 31);
- 4) Comunicação MQTT entre a Raspberry PI (supervisório) e a ESP32;
- 5) Envio de algoritmo de programação para ESP32 via Wi-Fi;
- 6) Depois de todos os testes e validações, os códigos foram integrados em um único algoritmo;

Todos os componentes integrados estão ilustrados na Figura 30.

Figura 30 - Componentes testados



Fonte: Elaboração própria (2019).

Mesmo no início do projeto já foi desenvolvido um supervisor para a visualização das informações, também é possível visualizar na tela touchscreen fornecidas pelo microcontrolador conforme Figura 31.

Figura 31 - Primeiro supervisor de testes e tela touchscreen



Fonte: Elaboração própria (2019).

Com os testes realizados, optou-se por usar os sensores de temperatura DS18B20, com eles é possível utilizar em distâncias maiores (para posicionar os sensores seriam necessários pelo menos 15 metros de cabo), estes sensores utilizam o protocolo de comunicação 1-Wire onde é possível alcançar distâncias de até 100 metros se seguir os parâmetros de instalação e cabeamento recomendados). Se comparados com os outros sensores que utilizam o protocolo de comunicação I2C ficam limitados a distâncias de até 1 metro, dentre os sensores BME280 e HTU21D,

foi escolhido o segundo já que ele apresentou um melhor funcionamento, estes sensores apenas realizarão a medição da umidade do ar (estarão posicionados próximos ao painel elétrico).

Na Tabela 6 estão componentes que serão utilizados em definitivo no projeto.

Tabela 6 - Componentes selecionados

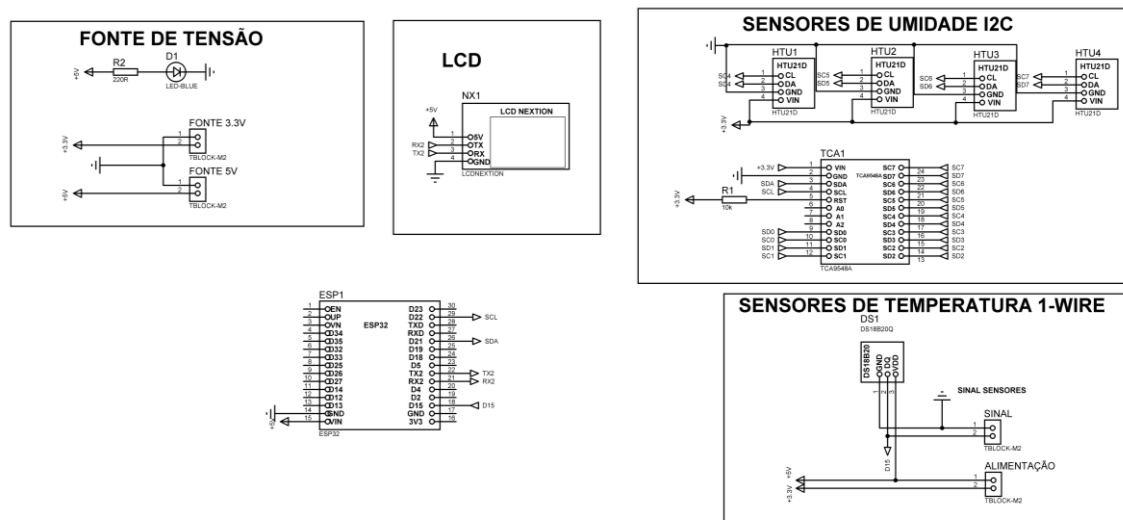
Componentes	Quantidade
ESP32	1
Raspberry PI 3 B+	1
Sensor de temperatura DS18B20	8
Sensor de umidade HTU21D	2
Multiplexador I2C TCA9548a	1
Tela touchscreen Nextion	1

Fonte: Elaboração própria (2019).

5.1.2 Confeção das placas de circuito impresso

Com a validação dos componentes a serem utilizados, foi possível projetar a placa de circuito impresso, como pode ser visto na Figura 32, o projeto foi concebido para receber 4 sensores de umidade caso houvesse a necessidade, mas foram utilizados apenas 2.

Figura 32 - Circuito eletrônico



Fonte: Elaboração própria (2019).

A parte dos sensores de temperatura 1-Wire, como mostrado na Figura 32, ela foi desenvolvida para receber outros sensores em série, para isto foi desenvolvido módulos de temperatura como demonstrado na Figura 33.

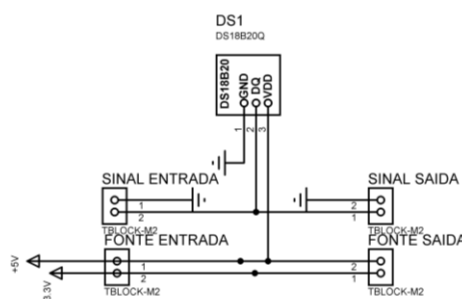
O barramento 1-Wire exige o uso de um resistor de *pull-up* para que o sinal de controle fique em nível lógico alto desta forma possibilita ao dispositivo mestre submeter um sinal de nível lógico baixo para requisitar a informação do sensor, desta forma o dispositivo escravo se comunica colocando um sinal lógico baixo para fornecer os dados, o tempo de duração do pulso que irá determinar se bit transmitido é 0 (pulso curto) ou 1 (pulso longo), desta forma possibilita que se conecte vários dispositivos 1-Wire no mesmo sinal.

Através de testes o valor de resistor de *pull-up* que se mostrou estável para obtenção dos dados dos sensores foi de 1,2 k Ω , este resistor é colocado entre o sinal DATA (DQ) e a alimentação de 3,3V.

Como é possível visualizar na Figura 33, a alimentação do sensor é de 5V, foi utilizado esse valor de tensão para garantir um funcionamento correto do sensor, caso fosse alimentado com 3.3V poderia haver uma queda de tensão ao longo do fio e faria com que os sensores tivessem um mal funcionamento.

A entrada digital da ESP32 aceita valores de tensão entre 2.2V a 3.6V, mas isso não é um problema já que o sinal de DATA (DQ) é de dreno aberto (*open-drain*), sendo assim o valor máximo de tensão de alimentação que chegará na ESP32 é de 3,3V e não o valor de 5V.

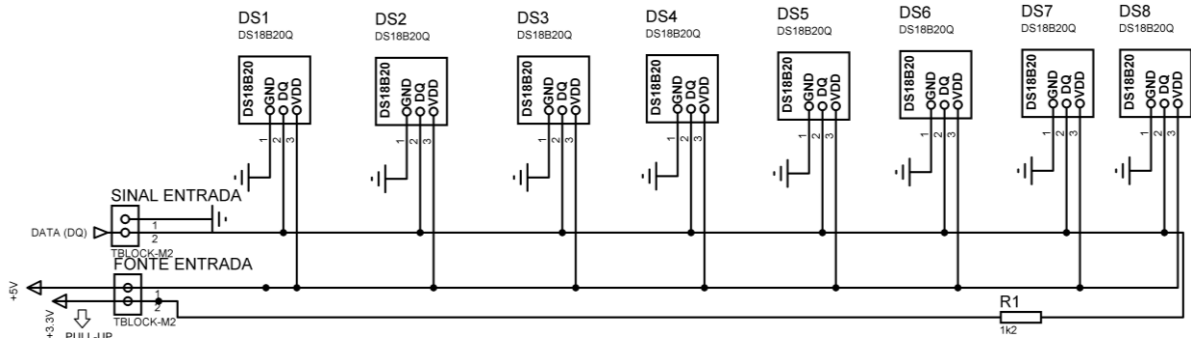
Figura 33 - Módulo de temperatura



Fonte: Elaboração própria (2019).

A configuração com os 8 sensores de temperatura (DS18B20) está na Figura 34.

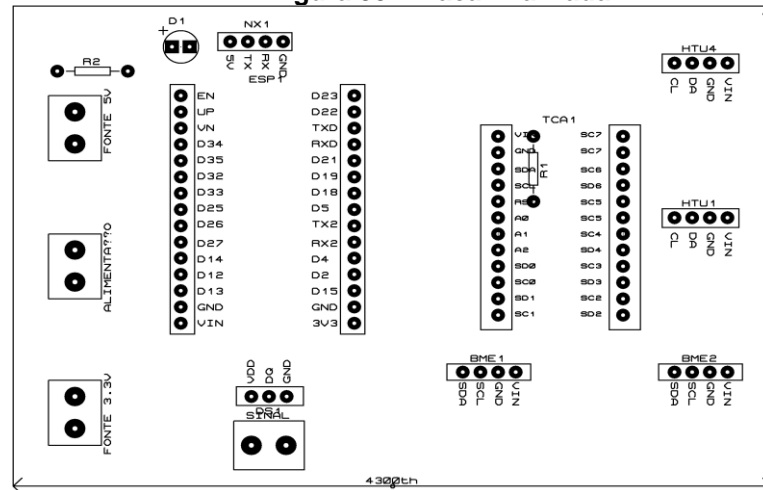
Figura 34 - Módulos de temperatura



Fonte: Elaboração própria (2019).

A Figura 35 ilustra a placa finalizada.

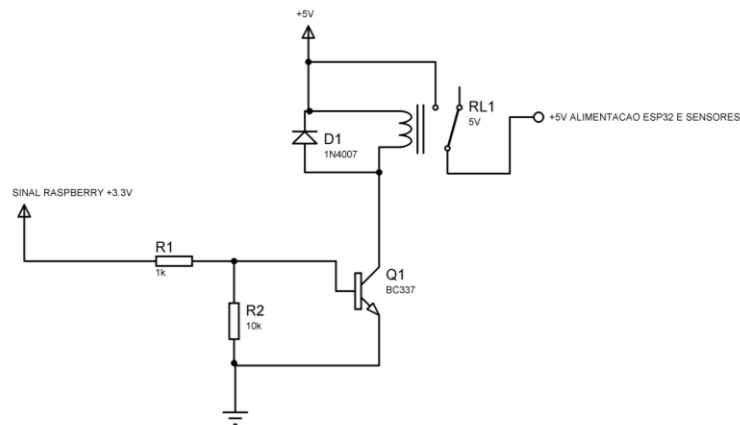
Figura 35 - Placa finalizada



Fonte: Elaboração própria (2019).

Foi desenvolvido um outro circuito para a Raspberry conseguir acionar um relé (5V) com intuito de desligar a fonte de tensão que alimenta a ESP32 e todos os sensores, a representação do circuito está na Figura 36, desta forma é possível controlar o microcontrolador através do supervisor.

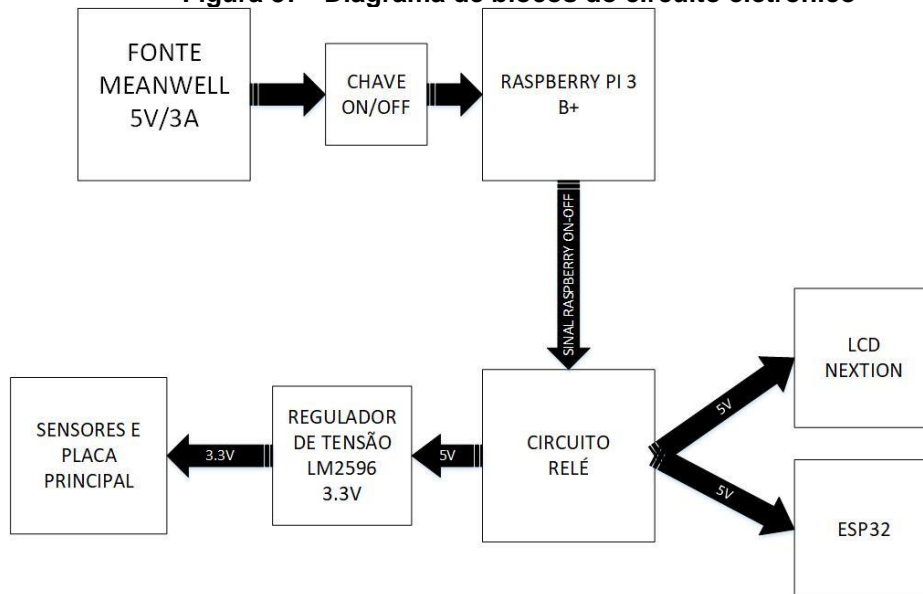
Figura 36 - Circuito relé



Fonte: Elaboração própria (2019).

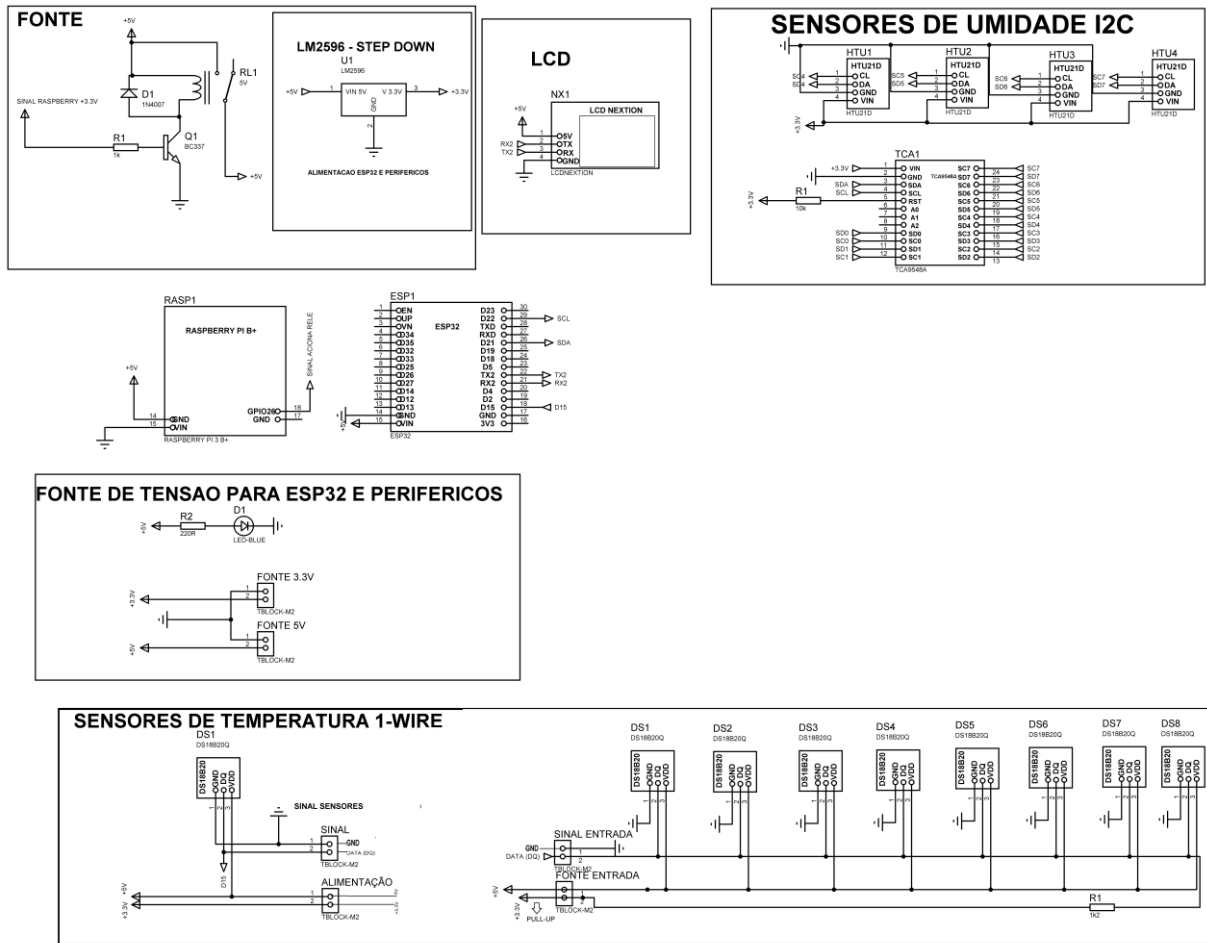
Para exemplificar melhor o circuito foi feito um diagrama de blocos que está na Figura 37, o esquemático geral do circuito eletrônico ficou conforme a Figura 38.

Figura 37 - Diagrama de blocos do circuito eletrônico



Fonte: Elaboração própria (2019).

Figura 38 – Esquemático geral



Fonte: Elaboração própria (2019).

5.1.3 Cabeamento (cabo de rede CAT5e)

Para o cabeamento dos sensores foi escolhido um cabo de rede CAT5e UTP (par trançado não blindado) de 4 pares (Figura 39) da fabricante Furukawa. Seguindo as recomendações apresentadas pela DIGITRONICS (2004), foram escolhidos os pares para alimentação e dados dos sensores conforme Tabela 7.

Tabela 7 - Pares selecionados

AZUL	DATA (DQ)
AZUL-BRANCO	GND
VERDE	5V
VERDE-BRANCO	3.3V

Fonte: Elaboração própria (2019).

Figura 39 - Cores

Fonte: Elaboração própria (2019).

5.2 Tamanho dos cabos e alocação dos sensores na sala (projeto físico)

Num primeiro momento foi prevista a utilização de aproximadamente 32 metros de cabo para conectar todos os sensores já que seriam colocados sensores em cada canto da sala, mas analisando a sala ficou decidido que a instalação dos sensores seria ao redor da máquina de medir por coordenadas conforme Figura 48, já que usaria uma quantidade menor de cabos e assim evitando interferência eletromagnética, utilizou-se aproximadamente 15 metros de cabo.

5.2.1 Teste da placa principal e módulos de temperatura

Com a placa principal e dos módulos de temperatura finalizados, iniciou-se novamente os testes, agora já validando na sala de metrologia.

Para os testes (Figura 40) dos módulos de temperatura antes de posicionar os mesmos na sala, eles foram validados utilizando um comprimento de cabos maior e utilizando a maior resolução (12 bits), para garantir o correto funcionamento quando fossem instalados.

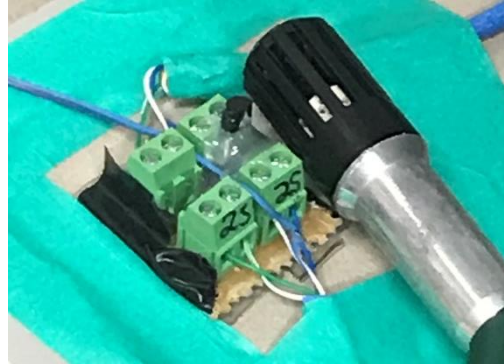
Figura 40 - Testes com a placa principal

Fonte: Elaboração própria (2019).

A rotina para validação foi a seguinte:

- 1) Teste individual de cada módulo Figura 41 e identificação deles pelo código de 64 bits;

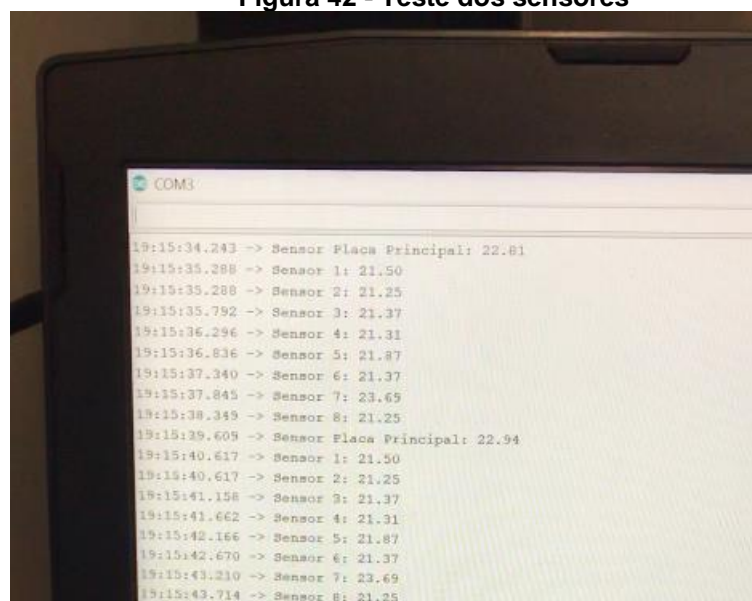
Figura 41 - Testes do módulo



Fonte: Elaboração própria (2019).

- 2) Depois dos testes, foram conectados todos juntos;
Em um primeiro momento ocorreram problemas de comunicação, onde o tempo de aquisição estava muito abaixo do tempo necessário para realizar a captura da temperatura e a conversão, seguindo o as recomendações do fabricante do sensor, foi alterado o tempo de aquisição e o problema foi resolvido.
- 3) E então foi validado o funcionamento utilizando os pares do cabeamento escolhidos anteriormente conforme Figura 42.

Figura 42 - Teste dos sensores



Fonte: Elaboração própria (2019).

Os sensores de umidade também foram validados posteriormente, juntamente com todos os outros periféricos, sendo assim toda a parte de projeto eletrônico foi concluída.

5.2.2 Consumo de energia

É interessante saber o consumo de energia, proveniente de todo o sistema, para assim poder dimensionar corretamente um fusível de proteção para o painel elétrico, foi registrado um consumo máximo de corrente de 0,964 A (amperes) está apresentado na Figura 43. Utilizando uma margem de segurança de 20%, o valor para o fusível ficará em 1,1568 A, o fusível comercial mais próximo para o projeto é de 1,25 A.

Figura 43 - Consumo de energia

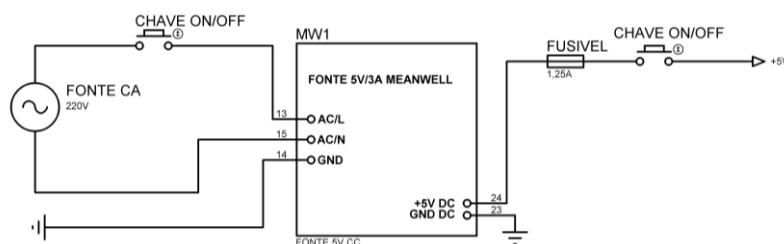


Fonte: Elaboração própria (2019).

5.2.3 Painel elétrico

Depois de finalizadas as validações necessárias de funcionamento, foi elaborado um painel elétrico (Figura 45 e Figura 46) para receber a fonte de alimentação e a placa principal. O circuito do painel está na Figura 44.

Figura 44 - Circuito elétrico do painel



Fonte: Elaboração própria (2019).

Figura 45 - Painel elétrico aberto



Fonte: Elaboração própria (2019).

Figura 46 - Painel elétrico

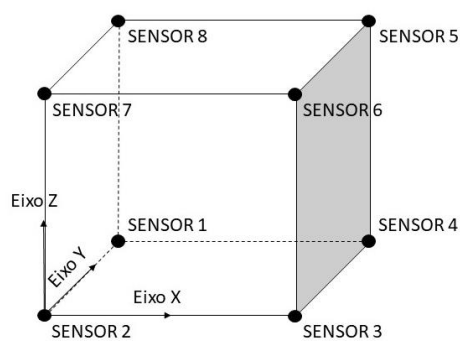


Fonte: Elaboração própria (2019).

5.2.4 Cálculos dos gradientes espaciais

Para o cálculo dos gradientes espaciais locais (por setor) e globais referentes aos eixos X, Y e Z da Figura 47 e Figura 48.

Figura 47 - Posicionamento dos sensores



Fonte: Elaboração própria (2019).

Figura 48 - Localização dos sensores



Fonte: Elaboração própria (2019).

Foram utilizadas as seguintes fórmulas:

- **Para o eixo X:**

Gradiente espacial – X Local:

Grandiente Local 1 = Temperatura Sensor 1 – Temperatura Sensor 2

Grandiente Local 2 = Temperatura Sensor 4 – Temperatura Sensor 3

Grandiente Local 3 = Temperatura Sensor 8 – Temperatura Sensor 7

Grandiente Local 4 = Temperatura Sensor 5 – Temperatura Sensor 6

Gradiente espacial – X Global:

*Gradiente Global = ((Temperatura Sensor 1 + Temperatura Sensor 4 +
Temperatura Sensor 5 + Temperatura Sensor 8) / 4) – ((Temperatura Sensor 2 +
Temperatura Sensor 3 + Temperatura Sensor 6 + Temperatura Sensor 7) / 4)*

- **Para o eixo Y:**

Gradiente espacial – Y Local:

Grandiente Local 1 = Temperatura Sensor 3 – Temperatura Sensor 2

Grandiente Local 2 = Temperatura Sensor 4 – Temperatura Sensor 1

Grandiente Local 3 = Temperatura Sensor 6 – Temperatura Sensor 7

$$\text{Gradiente Local 4} = \text{Temperatura Sensor 5} - \text{Temperatura Sensor 8}$$

Gradiente espacial – Y Global:

$$\text{Gradiente Global} = ((\text{Temperatura Sensor 3} + \text{Temperatura Sensor 4} + \text{Temperatura Sensor 5} + \text{Temperatura Sensor 6}) / 4) - ((\text{Temperatura Sensor 1} + \text{Temperatura Sensor 2} + \text{Temperatura Sensor 7} + \text{Temperatura Sensor 8}) / 4)$$

- **Para o eixo Z:**

Gradiente espacial – Z Local:

$$\text{Gradiente Local 1} = \text{Temperatura Sensor 7} - \text{Temperatura Sensor 2}$$

$$\text{Gradiente Local 2} = \text{Temperatura Sensor 8} - \text{Temperatura Sensor 1}$$

$$\text{Gradiente Local 3} = \text{Temperatura Sensor 5} - \text{Temperatura Sensor 4}$$

$$\text{Gradiente Local 4} = \text{Temperatura Sensor 6} - \text{Temperatura Sensor 3}$$

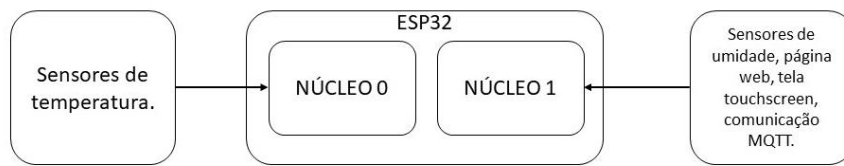
Gradiente espacial – Z Global:

$$\text{Gradiente Global} = ((\text{Temperatura Sensor 5} + \text{Temperatura Sensor 6} + \text{Temperatura Sensor 7} + \text{Temperatura Sensor 8}) / 4) - ((\text{Temperatura Sensor 1} + \text{Temperatura Sensor 2} + \text{Temperatura Sensor 3} + \text{Temperatura Sensor 4}) / 4)$$

5.3 Algoritmo de programação da ESP32

Para a programação do microcontrolador ESP32, foi utilizada a IDE do Arduino, realizando a programação em C++.

A ESP32 conta com um processador de dois núcleos, desta forma foi possível alocar atividades específicas para cada núcleo, os valores das conversões dos sensores de temperatura e seus respectivos cálculos de gradientes espaciais ficaram dedicados no núcleo 0, e todos outros processos ficaram alocados no núcleo 1 (Figura 49), garantindo uma dedicação completa para o processamento dos sensores de temperatura.

Figura 49 - Núcleos ESP32

Fonte: Elaboração própria (2019).

O tempo de aquisição de dados dos sensores de temperatura ficou próximo de 1 minuto, utilizando uma resolução de 11 bits (0,125°C) na Figura 50 é possível visualizar os tempos de aquisição, este tempo o sistema ficou estável e sem erros.

Figura 50 - Aquisição de dados de temperatura

```

2019-10-4 2:51:59 PM, Sensor Temperatura 1, 23,4
2019-10-4 2:52:57 PM, Sensor Temperatura 1, 23,4
2019-10-4 2:53:54 PM, Sensor Temperatura 1, 23,4
2019-10-4 2:54:51 PM, Sensor Temperatura 1, 23,4
2019-10-4 2:55:49 PM, Sensor Temperatura 1, 23,3
2019-10-4 2:56:46 PM, Sensor Temperatura 1, 23,4
  
```

Fonte: Elaboração própria (2019).

Agora o tempo de aquisição para os sensores de umidade ficou próximo de 20 segundos, utilizando uma resolução de 12 bits (0,04%), na Figura 51 é possível visualizar os tempos de aquisição, desta forma os sensores apresentaram bons resultados e se mostrou estável.

Figura 51 - Aquisição de dados de umidade

```

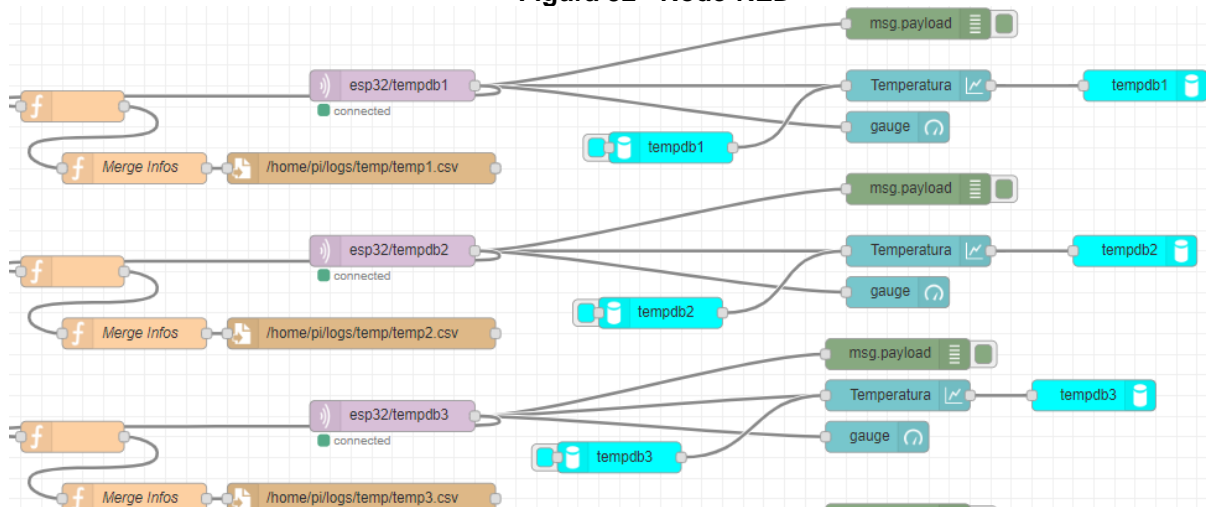
2019-10-27 12:46:13 AM, Sensor umidade 1, 68,6
2019-10-27 12:46:33 AM, Sensor umidade 1, 68,6
2019-10-27 12:46:53 AM, Sensor umidade 1, 68,6
2019-10-27 12:47:14 AM, Sensor umidade 1, 68,6
2019-10-27 12:47:34 AM, Sensor umidade 1, 68,7
2019-10-27 12:47:54 AM, Sensor umidade 1, 68,6
  
```

Fonte: Elaboração própria (2019).

5.4 Sistema Supervisório

O sistema supervisório foi desenvolvido utilizando o Node-RED (Figura 52) que é uma plataforma gráfica voltada para a Internet das Coisas onde foi instalado na Raspberry PI, ele é capaz de receber as informações dos sensores e enviar comandos através da rede Wi-Fi, por meio do protocolo MQTT.

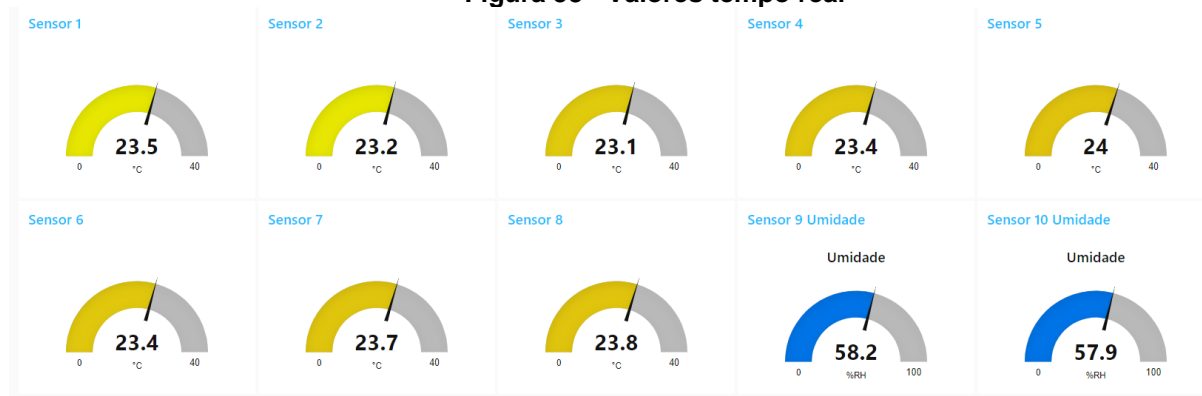
Figura 52 - Node-RED



Fonte: Elaboração própria (2019).

A página principal, mostra os valores atuais dos sensores dispostos na sala, contando com sensores de temperatura e umidade como demonstrado na Figura 53.

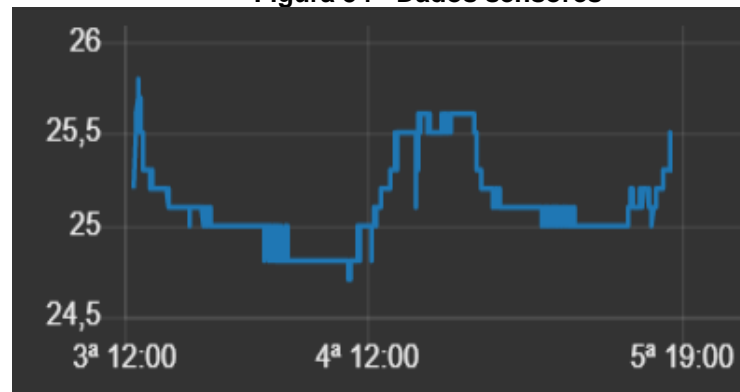
Figura 53 - Valores tempo real



Fonte: Elaboração própria (2019).

É possível consultar cada sensor individualmente, desta forma os valores de temperatura geram um gráfico, onde é possível visualizar as temperaturas no decorrer de três dias como é possível ver na Figura 54.

Figura 54 - Dados sensores



Fonte: Elaboração própria (2019).

Na Figura 55 está a página responsável por mostrar os valores dos gradientes espaciais dos eixos X, Y e Z no decorrer do tempo, o banco de dados salva as informações por um dia.

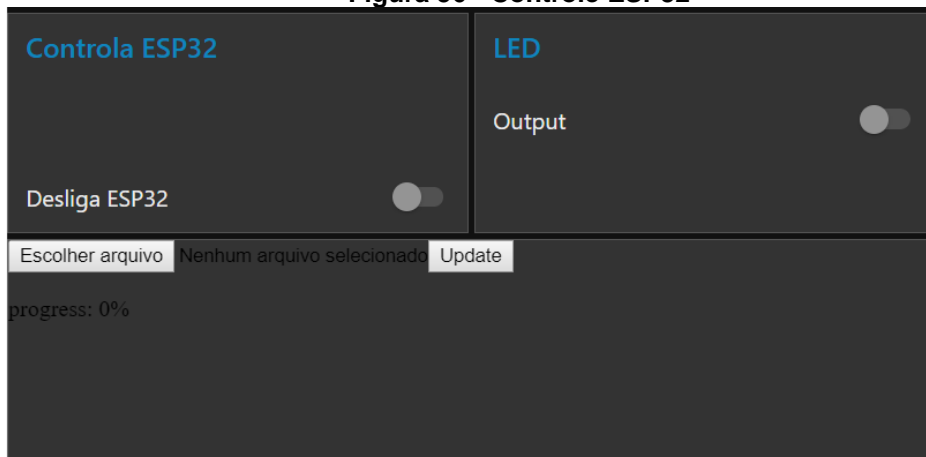
Figura 55 - Valores gradientes espaciais



Fonte: Elaboração própria (2019).

Foi criada uma página para controle (administração) da ESP32, caso haja algum problema é possível desligar a ESP32 e todos sensores manualmente, nesta mesma página é possível enviar códigos para ESP32, não havendo a necessidade de conectar um computador para enviar novos programas, sendo assim tudo é realizado via Wi-Fi, é possível visualizar essa página na Figura 56.

Figura 56 - Controle ESP32



Fonte: Elaboração própria (2019).

Existe também uma página que faz uma avaliação dos sensores, caso haja algum erro na leitura de algum sensor e faz a contagem de erros (Figura 57).

Figura 57 - Avaliador dos sensores

Estado dos sensores	Contador
S. OK!	OK 501
	NOK 1

Fonte: Elaboração própria (2019).

Além do banco de dados para os gráficos, para cada sensor é gerado um log, com as informações de temperatura, gradiente, hora e data, sendo possível acessar informações de outros dias que os gráficos não fornecem. O supervisor também é responsável por desligar e religar o microcontrolador ESP32 durante um horário específico todos os dias, essa programação foi necessária já que a ESP32 depois de um tempo não enviava mais as informações para o supervisor e assim foi resolvido o problema, o sistema se estabilizou.

Como o sistema foi criado em uma rede local, não era possível acessar o sistema supervisor fora do laboratório de metrologia, para contornar esse problema foi utilizado o programa Hamachi, onde foi possível acessar o supervisor em outros locais fora da rede do IFSC.

5.5 Calibração dos sensores

Para a calibração dos sensores do sistema se dará pelo método indireto. Cada sensor será calibrado individualmente utilizando outro sensor de referência. Estes medirão uma mesma temperatura e a diferença nestas indicações será empregada para estimar os erros sistemático e aleatórios do sistema.

O sensor de referência a ser utilizado será o Termo-Higrômetro da MINIPA modelo MTH-1360, com uma resolução de 0,1 °C e exatidão de $\pm 0,5$ °C, este termômetro era único que estava disponível para utilização.

Com o sensor de referência posicionado, para cada sensor esperou-se um tempo até a estabilização da temperatura, de 5 a 10 minutos como mostrado na Figura 58. E então com o valor obtido pelo Termo-Higrômetro é subtraído do valor que o sensor indicava no supervisório, como mostrado pela seguinte equação:

$$\text{Correção (}^\circ\text{C)} = \text{Temperatura TermoHigrômetro (}^\circ\text{C)} - \text{Temperatura Sensor (}^\circ\text{C)}$$

Figura 58 - Calibração dos sensores



Fonte: Elaboração própria (2019).

Os resultados das calibrações obtidas se encontram na Tabela 8. Para estes resultados foram realizadas 10 leituras e a correção é a média destas indicações.

Tabela 8 - Resultado das calibrações mostrando a correção a ser implementada em cada sensor

Sensor	Correção (°C)
Sensor 1	+0,3 °C
Sensor 2	+0,3 °C
Sensor 3	+0,1 °C
Sensor 4	+0,3 °C
Sensor 5	+0,2 °C
Sensor 6	+0,3 °C
Sensor 7	+0,2 °C
Sensor 8	+0,2 °C

Fonte: Elaboração própria (2019).

Para os sensores de umidade (Figura 59) também foram feitas calibrações seguindo os mesmos moldes da calibração do sensor de temperatura, o tempo para esperar o sistema estabilizar foi de aproximadamente 10 minutos e então foram registrados os dados para calibração conforme Tabela 9.

Figura 59 - Calibração dos sensores de umidade



Fonte: Elaboração própria (2019).

Tabela 9 - Resultado calibrações

Sensor	Correção (%RH)
Sensor 1	+1,0 %RH
Sensor 2	+1,4 %RH

Fonte: Elaboração própria (2019).

Para a estimativa dos erros aleatórios do sistema foi realizado um ensaio de estabilidade com os sensores medindo durante 50 minutos a temperatura da sala em condição estável (ar condicionado desligado, portas fechadas e sem ninguém dentro da sala). O objetivo deste ensaio foi o de avaliar a variabilidade na indicação dos sensores em uma condição de temperatura constante. O desvio padrão destes valores foi multiplicado pelo coeficiente t de *student* para uma confiança estatística de 95,45% e, deste modo, foi estimada a precisão de cada sensor.

Estes valores estão mostrados na tabela a seguir.

Tabela 10 - Precisão dos sensores

Sensor avaliado	Precisão (°C)
Sensor 1	$\pm 0,01$ °C
Sensor 2	$\pm 0,01$ °C
Sensor 3	$\pm 0,01$ °C
Sensor 4	$\pm 0,15$ °C
Sensor 5	$\pm 0,15$ °C
Sensor 6	$\pm 0,15$ °C
Sensor 7	$\pm 0,09$ °C
Sensor 8	$\pm 0,15$ °C

Fonte: Elaboração própria (2019).

Na estimativa da incerteza de medição do sistema foram considerados os seguintes fatores:

- Resolução do termômetro de referência: 0,1°C
- Exatidão do termômetro de referência: $\pm 0,5$ °C
- Resolução de indicação dos sensores a calibrar: 0,1° C
- Repetibilidade dos resultados: $\pm 0,15$ °C (pior caso da tabela anterior)

De posse destas informações foi montada uma tabela de análise da incerteza de medição, mostrada na Tabela 11, para a obtenção da incerteza expandida para uma confiança estatística de 95,45%. Este balanço de incerteza foi realizado com base na norma ISO-GUM (2008).

Tabela 11 - Análise de incerteza de medição

Fonte de incerteza	Valor (°C)	Distribuição de probabilidade	Graus de liberdade	Incerteza padrão
Termômetro Minipa	0,5	Retangular	infinito	0,29
Resolução Minipa	0,1	Retangular	infinito	0,06
Resolução supervisorio	0,1	Retangular	infinito	0,06
Precisão	0,15	Normal (k=2)	9	0,07
Incerteza combinada				0,31
Fator de abrangência k				2,3
Incerteza expandida (95,45%)				0,71

Fonte: Elaboração própria (2019).

Com base nesta análise verificou-se que a incerteza de medição ficou relativamente alta e a causa disto foi a incerteza do termômetro de referência empregado nas calibrações e que era previsível devido as informações referentes a resolução e exatidão. A disponibilidade de um termômetro com melhor exatidão nos ensaios certamente resultaria numa incerteza de medição próxima de 0,2° C, adequada para o monitoramento de ambientes de medição com tolerância de 2° C ($\pm 1^\circ$ C). A precisão do sistema no pior caso da Tabela 11 ($\pm 0,15^\circ$ C) mostra o bom potencial do sistema de monitoramento desenvolvido para este requisito de exatidão.

Quanto ao aspecto operacional, o sistema supervisorio mostrou-se bastante robusto durante os ensaios, havendo pouca perda de sinal, como pode-se ver na Figura 60, o sistema apresentou 1 erro na leitura de 502 leituras realizadas dos sensores de temperatura.

Figura 60 - Erros no sistema

Estado dos sensores	Contador
S. OK!	OK 501
	NOK 1

Fonte: Elaboração própria (2019).

5.6 Custo total do projeto

A tabela dos componentes utilizados para o projeto com a quantidade e valores estão na Tabela 12. Quanto a escolha dos componentes, como havia disponibilidade de tempo optou-se pela importação da China, onde foi possível obter preços mais baixos e em uma quantidade maior, possibilitando a diminuição no custo total do projeto e estando de acordo com a proposta de ser um projeto de baixo custo, alguns itens foram comprados no mercado nacional por não apresentarem uma grande diferença de preço.

Tabela 12 - Tabela de custos

COMPONENTE	QUANTIDADE	PREÇO (R\$)	PREÇO TOTAL (R\$)
TCA9548a	1	R\$6,58	R\$6,58
HTU21D	2	R\$9,76	R\$19,52
DS18B20	8	R\$5,362	R\$42,896
FONTE MEANWELL 5V/3A	1	R\$142,67	R\$142,67
CABO DE REDE CAT5e	15 metros	R\$2,33 por metro	R\$35,00
ESP32	1	R\$19,39	R\$19,39
RASPBERRY PI 3 B+	1	R\$200,00	R\$200,00
CARTÃO SD 8GB		R\$30,00	R\$30,00
TELA TOUCHSCREEN	1	R\$ 69,03	R\$ 69,03
CHAVE ON/OFF	2	R\$4,50	R\$9,00
CAIXA PAINEL	1	R\$34,21	R\$34,21
PORTA FUSÍVEL	1	R\$1,20	R\$1,20
BORNE 2 VIAS	36	R\$0,65	R\$23,4
PLUG TRIPOLAR P/PAINEL	1	R\$4,00	R\$4,00

LM2596 DC/DC	1	R\$ 5,53	R\$ 5,53
BARRA PINO FÊMEA/40 vias	2	R\$0,72	R\$1,44
CUSTO TOTAL (R\$)			R\$643,87

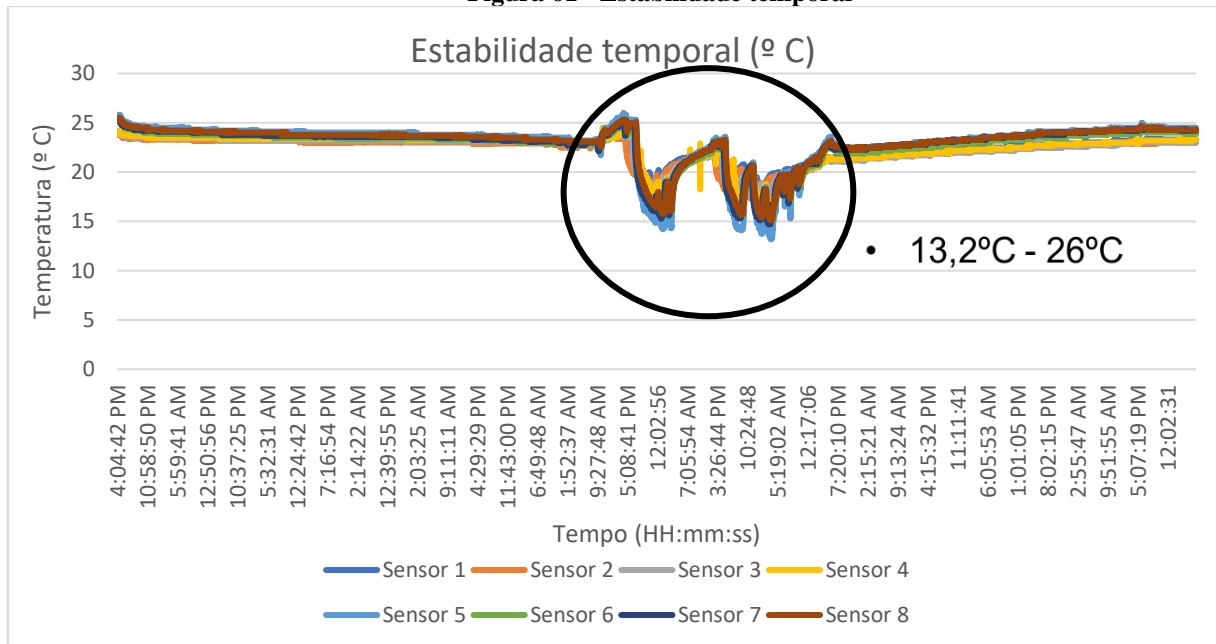
Fonte: Elaboração própria (2019).

6 AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS

6.1 Valores obtidos de temperatura

Os dados abaixo dos sensores foram coletados no período de 2 a 15 de outubro.

Figura 61 - Estabilidade temporal



Fonte: Elaboração própria (2019).

Observa-se que pelos dados coletados (Figura 61) que a sala tem um comportamento estável, a temperatura média durante esse período foi de 22,59 °C, onde é possível visualizar picos elevados de temperatura que mostram o momento em que a sala estava sendo utilizada. Mas nota-se que quando o ar-condicionado estava ligado acabou atingindo uma temperatura abaixo dos 20°C, que é a temperatura de referência padrão para salas de metrologia e isto ocorreu devido a problemas na instalação do ar-condicionado, que está atuando em malha aberta, onde

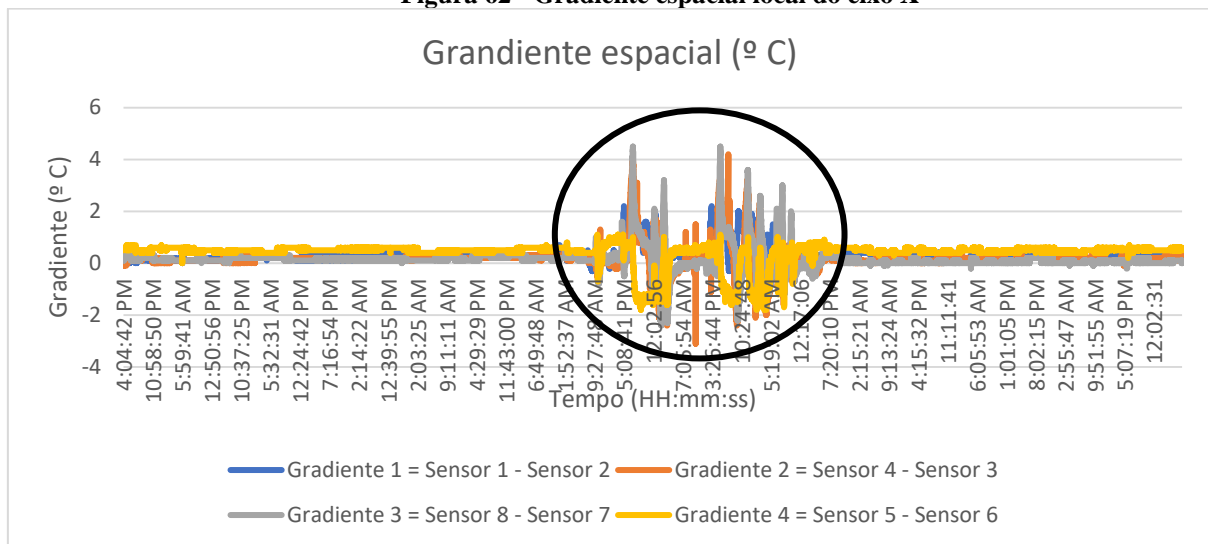
não há controle da temperatura, o sensor 5 ficou posicionado próximo da saída de ar, tornando-o mais sensível a mudanças.

Levando em consideração a ISO1 e a norma alemã VDI/VDE2627, o ambiente não está de acordo com as tolerâncias exigidas pelas normas.

Com os dados da Figura 61 foi possível calcular os gradientes espaciais locais e globais em relação aos eixos X, Y e Z.

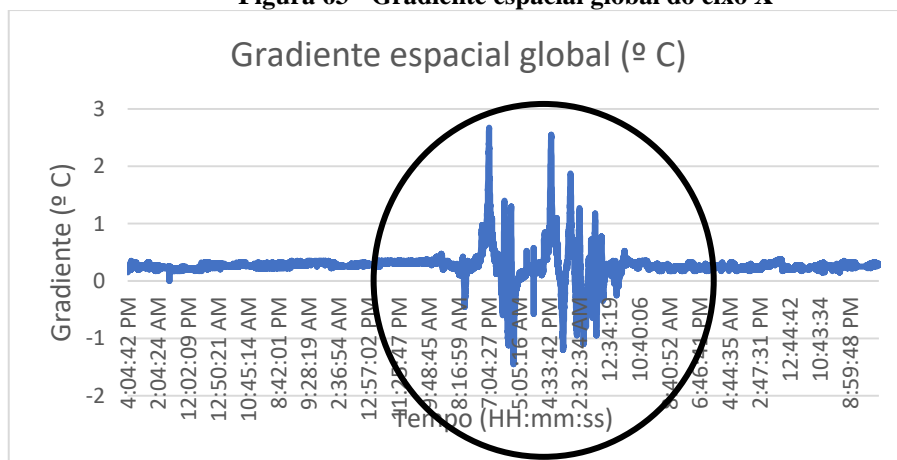
Observando os gráficos (Figura 62 e Figura 63) que representam o eixo X, nota-se a grande variação dos gradientes em conformidade com o mesmo momento em que o ar-condicionado foi acionado.

Figura 62 - Gradiente espacial local do eixo X



Fonte: Elaboração própria (2019).

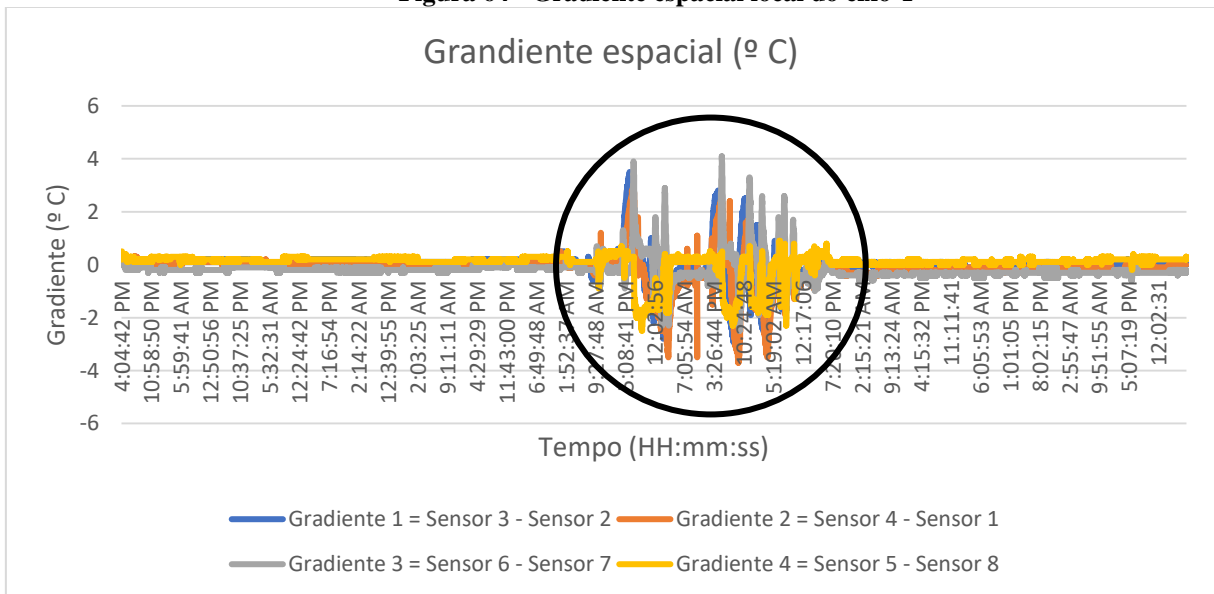
Figura 63 - Gradiente espacial global do eixo X



Fonte: Elaboração própria (2019).

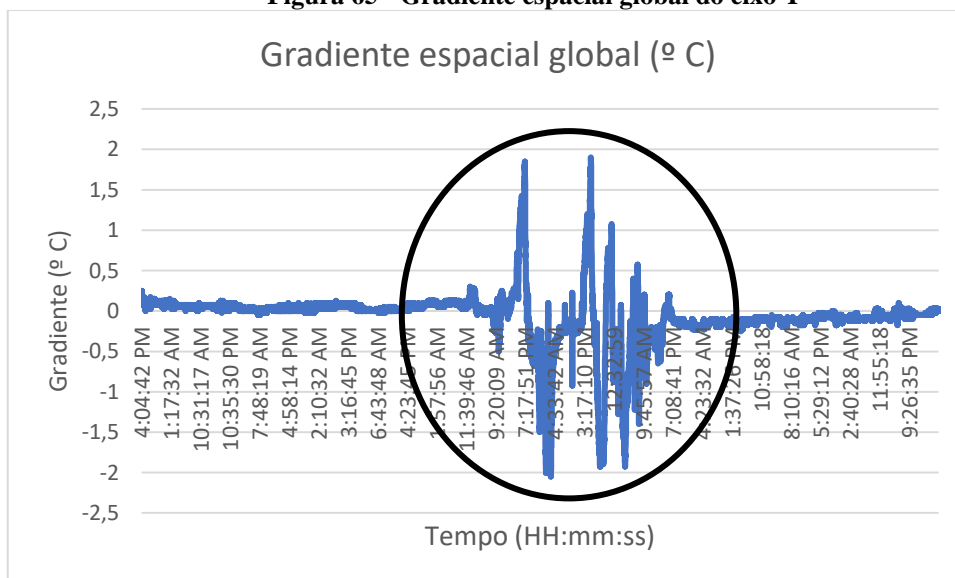
Os gráficos abaixo (Figura 64 e Figura 65) representam os gradientes locais e globais do eixo Y, é possível analisar novamente a diferença de temperatura ocasionada pelo acionamento do ar-condicionado no mesmo instante que nos outros gráficos, a diferença se torna maior devido ao posicionamento dos sensores, já que saída do ar frio pode estar mais próximo de um sensor, o que acaba gerando uma diferença maior de temperatura.

Figura 64 - Gradiente espacial local do eixo Y



Fonte: Elaboração própria (2019).

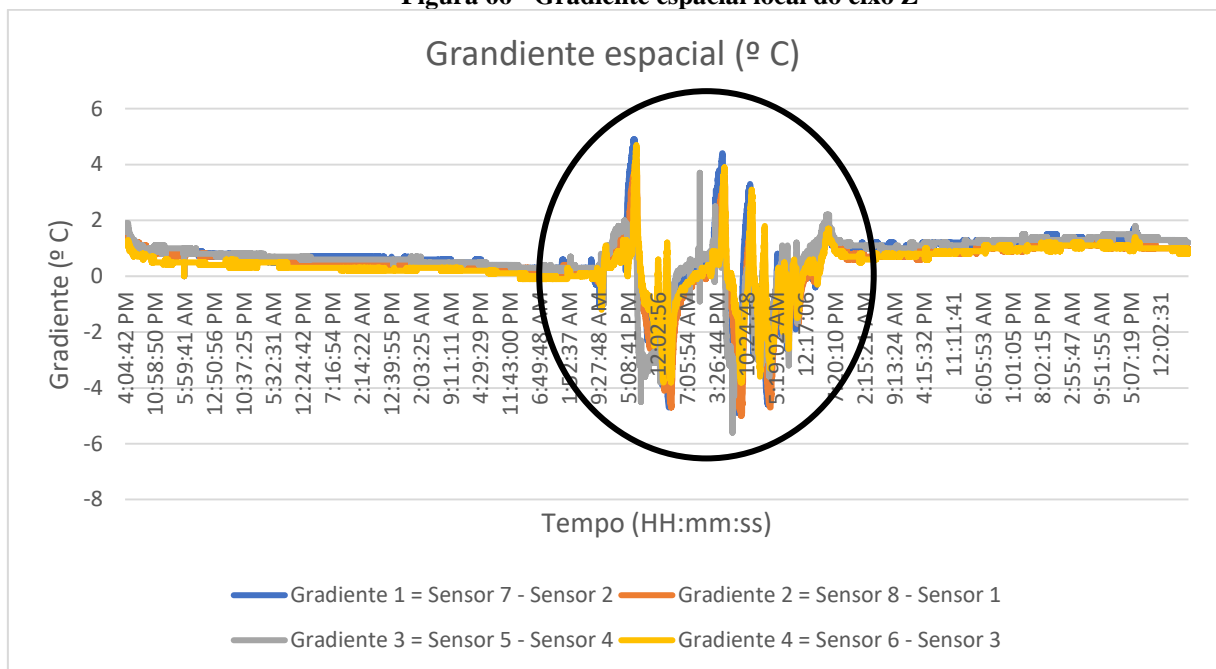
Figura 65 - Gradiente espacial global do eixo Y



Fonte: Elaboração própria (2019).

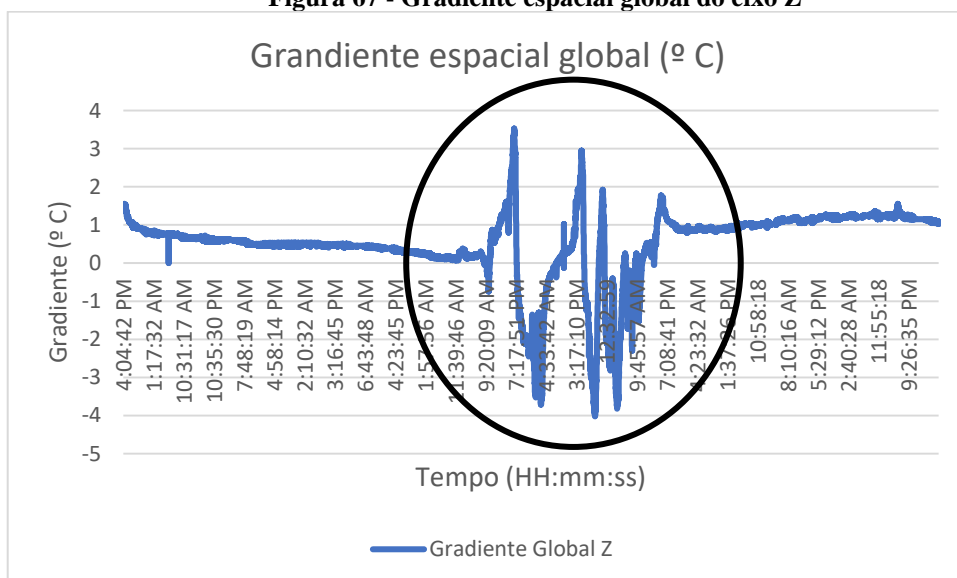
Os gráficos (Figura 66 e Figura 67) representam os gradientes locais e globais do eixo Z, analisando ambos nota-se que a diferença de temperatura foi maior do que dos outros eixos, já que agora a comparação dos sensores se dá pelos 4 sensores do topo com os 4 sensores da base. Sendo possível visualizar que quando o ar-condicionado é ligado, o ar frio que é mais denso desce e o ar quente que é menos denso sobe, formando uma corrente de convecção.

Figura 66 - Gradiente espacial local do eixo Z



Fonte: Elaboração própria (2019).

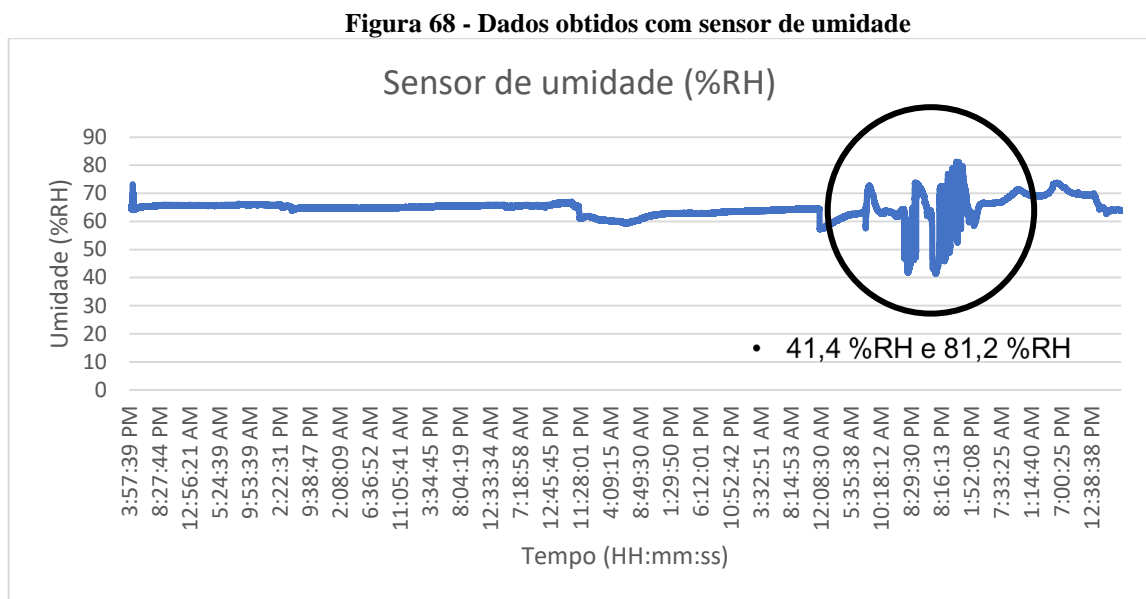
Figura 67 - Gradiente espacial global do eixo Z



Fonte: Elaboração própria (2019).

6.2 Valores obtidos pelo sensor de umidade

A Figura 68 mostra a coleta de dados referente ao período de 2 a 15 de outubro, onde apresentou os seguintes valores mínimos e máximos, respectivamente, 41,4 %RH e 81,2 %RH, a média da umidade relativa do ar ficou em 64,64 %RH. Devido à grande quantidade de dados gerados tem-se a percepção de uma mudança abrupta dos valores de umidade, mas essa mudança não foi instantânea.



Fonte: Elaboração própria (2019).

6.3 Avaliação geral dos dados obtidos pelo supervisório

Considerando as normas ISO1 e VDI/VDE2627, o sistema de medição conseguiu apontar erros quanto ao mau funcionamento do ar-condicionado, sendo necessário a devida manutenção. Primeiramente considerando a ISO1 que define a temperatura de referência de 20° C com as suas devidas tolerâncias, foi possível avaliar que a temperatura ultrapassa as tolerâncias especificadas para a sala, não atendendo a ISO1.

Quanto a norma VDI/VDE2627, analisando a estabilidade temporal em relação a temperatura de referência (20° C) não seria possível obter uma classificação correta da sala, a mesma percepção pode ser aplicada aos gradientes espaciais, não sendo possível obter uma classificação da sala, os valores ultrapassam aos indicados nas tabelas da norma. No que se refere a umidade relativa do ar é possível afirmar

que os equipamentos estão sofrendo oxidação, já que a norma estipula que a umidade deve estar entre 30 %RH a 60 %RH e o ambiente está apresentando uma média de 64,64 %RH.

7 CONCLUSÃO

Um sistema supervisório que avalie a estabilidade temporal e gradientes de temperatura em salas de medição por coordenadas é muito útil para a qualificação do sistema de climatização de ambientes de medição por coordenadas. Para que este sistema seja útil, no entanto, há que apresentar uma boa confiabilidade na informação gerada nas medições, e que estas informações sejam processadas de modo adequado para extrair os parâmetros numéricos necessários a esta qualificação, de acordo com normas internacionais.

Atualmente há poucas soluções disponíveis no mercado, todas elas empregando tecnologias fechadas e com alto custo de aquisição. Neste sentido, o sistema aqui desenvolvido teve como meta ser de custo atrativo e empregar tecnologias padronizadas e abertas. Também é importante citar que este projeto não fica limitado para utilização apenas em laboratórios de metrologia, mas também pode ser utilizado em granjas, na hidroponia e entre outros, com as devidas adequações.

O sistema desenvolvido neste trabalho apresentou um bom desempenho onde se mostrou estável durante todo o tempo de funcionamento estando de acordo com as necessidades para avaliação de salas de metrologia mesmo sendo um projeto de baixo custo. Sendo assim foi possível implementar os objetivos propostos para o trabalho, onde é possível avaliar em tempo real a temperatura e umidade da sala, possibilitando também avaliar a estabilidade temporal e gradiente espacial.

Alguns melhoramentos futuros para o projeto seriam a implementação de novos conectores para as placas dos sensores de temperatura utilizando o padrão RJ-45, classificação da sala em tempo real quanto a norma alemã VDI/VDE 2627, instalação de sensores de umidade em toda a sala, realizar uma revisão do algoritmo para evitar a necessidade de realizar o desligamento diário da ESP32, utilizar outro termômetro de referência já que a incerteza de medição ficou relativamente alta e o causador deste problema foi a incerteza do termômetro de referência utilizado nas calibrações e possivelmente com uma continuação deste trabalho a implementação do controle de temperatura para o ambiente de medição.

REFERÊNCIAS

ARENHART, Francisco Augusto. **Desempenho Metrológico de Máquinas de**. [s. l.], 2007. Disponível em: <http://www.abcm.org.br/downloads/3Y_monografia.pdf> Acesso em: 10 agosto. 2019.

CARRION, Patrícia; QUARESMA, Manuela. **Internet da Coisas (IoT): Definições e aplicabilidade aos usuários finais** Internet of Things (IoT): Definitions and applicability for end users. [s. l.], p. 49–66, 2019.

CARVALHO, Vicente Bueno. **Desenvolvimento e Teste de um Monitor de Barramento I2C para Proteção Contra Falhas Transientes**. [s. l.], 2016. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/150164>> Acesso em: 10 agosto. 2019.

DIGITRONICS, Springbok. **1-Wire**. [s. l.], 2004. Disponível em: <<https://www.maximintegrated.com/en/design/technical-documents/tutorials/1/1796.html>> Acesso em: 10 agosto. 2019.

INMETRO. **Guia para a expressão de incerteza de medição - 1ª Edição Brasileira da 1ª Edição do BIPM de 2008: Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement**. [s.l: s.n.].

JR., Armando Albertazzi G.; SOUSA, André R. De (EDS.). **Fundamentos de METROLOGIA científica e industrial**. [s.l: s.n.].

JUNIOR, Helio Taliani. **Estudo dos protocolos de comunicação das arquiteturas eletroeletrônicas automotivas**. [s. l.], 2012.

LOPEZ RESEARCH. “ **Uma introdução à Internet da Coisas (IoT)**”. [s. l.], n. 866, p. 1–8, 2013. Disponível em: <https://www.cisco.com/c/dam/global/pt_br/assets/brand/iot/iot/pdfs/lopez_research_an_introduction_to_iot_102413_final_portuguese.pdf> Acesso em: 14 agosto. 2019.

LUCENA, Henrique Neves De. **Geracao de Estrategias de Medicao de Superficies Complexas em Sistemas CAD para Máquinas de Medir por Coordenadas.** [s. l.], p. 127, 2009.

MARTINAZZO, Claodomir Antonio; ORLANDO, Tailan. **Comparação entre três tipos de sensores de temperatura em associação com arduíno.** Perspectiva, [s. l.], p. 93–104, 2016.

MAXIMINTEGRATED. **Guidelines for Reliable Long Line 1-Wire ® Networks.** [s. l.], p. 1–19, 2008. Disponível em: <<https://www.maximintegrated.com/en/design/technical-documents/tutorials/1/148.html>> Acesso em: 12 agosto. 2019.

MAXIMINTEGRATED. **DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer Absolute Maximum Ratings.** [s. l.], v. 92, p. 1–20, 2019. Acesso em: 10 agosto. 2019.

MEASUREMENT SPECIALTIES INC. HTU21D(F) - **Relative Humidity sensor with Temperature output - Datasheet.** [s. l.], n. October, p. 1–21, 2013. Disponível em: <<https://learn.sparkfun.com/tutorials/htu21d-humidity-sensor-hookup-guide/all>> Acesso em: 10 agosto. 2019.

PHILLIPS, Steven D. et al. The 2016 Revision of ISO 1 – Standard Reference Temperature for the Specification of Geometrical and Dimensional Properties. **Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology**, [s. l.], v. 121, p. 498, 2016.

RASPBERRY PI FOUNDATION. **Raspberry Pi 3 Model B+ 1Gb.** [s. l.], p. 5, 2015. Disponível em: <<https://static.raspberrypi.org/files/product-briefs/Raspberry-Pi-Model-Bplus-Product-Brief.pdf>> Acesso em: 20 agosto. 2019.

SOUSA, Gabriel Ricardo Güntensperger. **IDENTIFICAÇÃO DE QUEDA INADVERTIDA DE BARRA DE CONTROLE UTILIZANDO MEDIDAS DOS**

TERMOPARES. [s. l.], v. 151, p. 10–17, 2015.

SYSTEMS, Espressif. **ESP32 Series (Datenblatt).** [s. l.], 2018.

TANAKA, Marcelo Costa. Monografia de Graduação. [s. l.], 2009.

VDI/VDE 2627 PART 2. Measuring rooms: Guide for planning, construction and operation. Verein Deutscher Ingenieure, 1998.

ZEISS, Carl. **All-round monitoring of the measuring.** [s. l.], 2019.

IBM. **Conhecendo o MQTT.** Disponível em:

<https://www.ibm.com/developerworks/br/library/iot-mqtt-why-good-for-iot/index.html>.

Acesso em: 15 agosto. 2019.

Node-RED. **Node-RED.** Disponível em: <https://nodered.org/>. Acesso em: 10 agosto. 2019.

Hamachi. **Hamachi LogMeIn.** Disponível em: <https://www.logmein.com/pt/>. Acesso em: 10 agosto. 2019.