

**ISABELLA BOLOGNA SALOMÃO  
RENATO DE OLIVEIRA FREITAS**

**REDE DE DISPOSITIVOS PARA  
MONITORAMENTO DE QUALIDADE E  
CONFORTO EM ESCRITÓRIOS**

São Paulo  
2020

**ISABELLA BOLOGNA SALOMÃO  
RENATO DE OLIVEIRA FREITAS**

**REDE DE DISPOSITIVOS PARA  
MONITORAMENTO DE QUALIDADE E  
CONFORTO EM ESCRITÓRIOS**

Relatório parcial apresentado ao PCS -  
Computação e Sistemas Digitais, da Escola  
Politécnica da Universidade de São Paulo.

Orientadores:

Prof. Dr. Gustavo P. Rehder

Prof.<sup>a</sup> Dra. Cíntia Borges Margi

Empresa:

PullUp

Eng. Conrado Leite de Vitor

São Paulo  
2020

# RESUMO

Soluções para o monitoramento de parâmetros que remetem à qualidade e conforto de ambientes internos vêm se tornando interessantes, dado o aumento no tempo que pessoas passam nesse tipo de ambiente, como escritórios. A partir da coleta desses dados, é possível adotar medidas para tornar o local estudado mais saudável e confortável para as pessoas ali presentes. O objetivo desse trabalho é desenvolver uma rede de dispositivos eletrônicos *Open Source* capaz de monitorar escritórios fechados, realizando a medição através de sensores de dados referentes à qualidade do ar, temperatura, luminosidade e ruído, e coletando a opinião das pessoas sobre sua sensação de conforto no ambiente, para apresentar relatórios sobre o local em uma plataforma a fim de tomar ações para garantir o conforto de seus ocupantes.

**Palavras-Chave** – Internet of Things, Conforto Térmico, Conforto Acústico, Conforto Luminoso, Qualidade do Ar, Wireless Sensor Network, Green Buildings, Smart Office.

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>5</b>
1.1	Declaração da Necessidade . . . . .	5
1.2	Descrição do Problema . . . . .	6
1.3	Árvore de Objetivos . . . . .	7
<b>2</b>	<b>Estado da Arte</b>	<b>8</b>
2.1	Indicadores de Qualidade e Conforto . . . . .	8
2.1.1	Regulamentações e Normas . . . . .	8
2.1.2	Conforto Visual . . . . .	9
2.1.3	Qualidade do Ar . . . . .	9
2.1.3.1	CO2 . . . . .	10
2.1.3.2	VOC . . . . .	10
2.2	Protocolos de Rede . . . . .	11
2.3	Soluções no Mercado . . . . .	14
<b>3</b>	<b>Especificação</b>	<b>17</b>
3.1	Requisitos Técnicos . . . . .	17
3.1.1	Parâmetros de Medição . . . . .	17
3.1.2	Protocolos de Comunicação . . . . .	18
3.2	Especificação Técnica . . . . .	18
3.2.1	Arquitetura do Dispositivo . . . . .	18
3.2.1.1	Sensores . . . . .	18
3.2.1.2	Feedback . . . . .	19
3.2.1.3	Processador . . . . .	20

3.2.1.4	Alimentação . . . . .	21
3.2.2	Arquitetura da Rede . . . . .	21
3.2.3	Software . . . . .	21
<b>4</b>	<b>Desenvolvimento</b>	<b>23</b>
4.1	Protótipo . . . . .	23
4.1.1	Esquemático . . . . .	24
4.1.2	PCB - <i>Printed Circuit Board</i> . . . . .	24
4.2	Validação da Rede Mesh . . . . .	24
	<b>Apêndice A – Anexos</b>	<b>27</b>
	<b>Referências</b>	<b>29</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Declaração da Necessidade

Com o aumento do tempo que as pessoas passam em ambientes fechados, como escritórios, há também, nos últimos anos, um crescente interesse em monitorar e controlar tais ambientes, visando uma melhora na saúde e conforto das pessoas, e também um aumento na sua produtividade. Espaços que implementam essas soluções são comumente chamados de prédios inteligentes (*smart buildings*, do inglês). É possível até mesmo que esse controle seja utilizado para uma atuação de maneira energeticamente sustentável e, dentro desse contexto, surgem os *green buildings* (em português, construções sustentáveis) [1] [2].

No desenvolvimento de construções civis sustentáveis, torna-se necessário que seja pensada a implementação automatizada deste monitoramento dos ambientes desde o projeto da edificação e sua concepção, ocorrendo de forma integrada à construção. Uma pesquisa mais aprofundada sobre o conforto dos ambientes pode interferir no projeto, de modo que sejam repensados materiais utilizados e sistemas de aquecimento, ventilação, iluminação, dentre outros. Assim como a sua implementação, pesquisas na área de conforto têm ser tornado cada vez mais importantes.

Foi com essa necessidade e a proposta de desenvolver um dispositivo eletrônico que o professor Vanderley M. John, do departamento de Construção Civil da Poli (PCC) e coordenador do CICS (Centro de Inovação em Construção Sustentável da USP)[3], entrou em contato. A ideia é que seja desenvolvido um dispositivo capaz de fazer medições de parâmetros relacionados ao conforto nos ambientes internos de uma construção, coletando também a opinião das pessoas ali presentes acerca de seu bem-estar, para assim saber o real impacto dos indicadores de conforto. Para analisar todo o ambiente, é importante que existam diversos dispositivos espalhados para maior cobertura. A fim de analisar ambos os dados (medições do ambiente e opiniões), é interessante que esses dispositivos estejam conectados e integrados a uma central.

Assim, a construção de uma rede de dispositivos sensoreados tem, além de uma aplicação prática monitorando a qualidade para as pessoas, também grande utilidade em pesquisas de construção civil e arquitetura, com medições mais precisas e incluindo um elemento muitas vezes deixado de lado: o fator humano.

Em edifícios, escritórios são hoje os que ocupam a maior área física e tem o maior consumo de energia, sendo sistemas de iluminação, aquecimento e resfriamento (como ar condicionados) os principais causadores do alto consumo[2]. Por isso, escritórios são o nicho escolhido para a implementação dessa rede de dispositivos, podendo ser testada nas salas do departamento de Construção Civil ou do CICS.

## 1.2 Descrição do Problema

O conforto e a qualidade em ambientes internos são determinados através de quatro principais indicadores: **térmico, acústico, luminoso e olfativo/qualidade do ar**[4].

Para que seja possível monitorar esses indicadores, é necessário medirmos diversos dados a respeito do ambiente em questão:

- Térmico: temperatura ambiente e umidade relativa
- Acústico: ruído ambiente
- Luminoso: intensidade e temperatura da luz incidente
- Qualidade do ar (e Olfativo): CO<sub>2</sub> e VOC (*volatile organic compounds*)

Não apenas esses elementos são importantes, mas também a combinação deles afeta a percepção de conforto pelas pessoas [5]. Assim, faz-se mais necessário que haja uma medição completa dos elementos presentes no ambiente a ser estudado. Além disso, é interessante que essas medições estejam atreladas a opinião das pessoas a respeito do ambiente, sabendo se estão confortáveis, sendo necessário um sistema que possa coletar um *feedback* das pessoas no escritório.

Todos os dados coletados, tanto das variáveis do ambiente quanto a opinião das pessoas, precisam ser salvos e disponibilizados para análise. Assim, será necessária a existência de conectividade nos dispositivos, junto de uma plataforma em nuvem com um banco de dados e uma interface visual para que seja feita essa análise.

### 1.3 Árvore de Objetivos

A árvore de objetivos é uma representação gráfica dos meios necessários, chamados objetivos específicos, para alcançar o objetivo geral do projeto. Para atingir o objetivo geral do projeto, que é a realização de uma rede de dispositivos para monitorar ambientes, foram enunciados três objetivos específicos, mostrados na figura 1, com a porcentagem de dedicação ao lado de cada um.

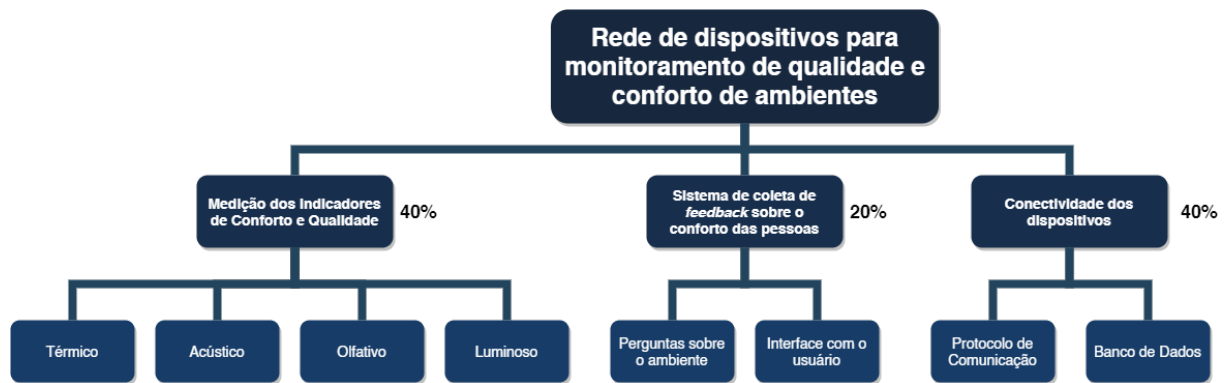


Figura 1: Árvore de objetivos do projeto



## 2 ESTADO DA ARTE

### 2.1 Indicadores de Qualidade e Conforto

Como qualidade e conforto são termos subjetivos, vamos tratar aqui como "qualidade do ambiente" as condições recomendadas por normas e pesquisas, para os quatro indicadores. Isto é, será considerado um ambiente de boa qualidade o que atender às faixas de operação pré-determinadas, funcionando como um aviso para o ocupante caso as medidas indiquem que os parâmetros do ambiente estão fora do recomendado.

Já o conforto será atrelado à percepção do usuário quanto ao ambiente. Apesar de o ambiente ser considerado saudável ou de qualidade, existem muitos fatores que afetam a sensação das pessoas, de forma que apenas a definição de uma faixa de operação não implica em bem-estar.

#### 2.1.1 Regulamentações e Normas

A legislação brasileira determina os valores máximos e mínimos dos indicadores de conforto no ambiente para que haja boas condições de trabalho:

##### **NR17 do Ministério do Trabalho [6]**

17.5. Condições ambientais de trabalho.

17.5.2. Nos locais de trabalho onde são executadas atividades que exijam solicitação intelectual e atenção constantes, tais como: salas de controle, laboratórios, escritórios, salas de desenvolvimento ou análise de projetos, dentre outros, são recomendadas as seguintes condições de conforto:

- a) níveis de ruído de acordo com o estabelecido na NBR 10152, norma brasileira registrada no INMETRO;
- b) índice de temperatura efetiva entre 20oC (vinte) e 23oC (vinte e três graus centígrados);

[...]

- d) umidade relativa do ar não inferior a 40 (quarenta) por cento.

17.5.2.1. Para as atividades que possuam as características definidas no subitem 17.5.2, mas não apresentam equivalência ou correlação com aquelas relacionadas na NBR 10152, o nível de ruído aceitável para efeito de conforto será de até 65 dB (A)

[...]

17.5.3.3. Os níveis mínimos de iluminamento a serem observados nos locais de trabalho são os valores de iluminâncias estabelecidos na NBR 5413, norma brasileira registrada no INMETRO.

**NBR 10152** [7] para Escritórios

Salas de reunião: 30 - 40 dB(A)

Salas de gerência, Salas de projetos e de administração: 35 - 45 dB(A)

Salas de computadores: 45 - 65 dB(A)

Salas de mecanografia: 50 - 60 dB(A)

**NBR 5413** [8]

Para escritórios: 500 - 750 - 1000 lux

## 2.1.2 Conforto Visual

Além da **intensidade da luz incidente**, cujos níveis são estabelecida na legislação, a **temperatura da cor** da luz incidente também tem grande relevância. A muitos anos sabe-se que a luz azul emitida, de maior temperatura, causa danos à retina [9].

Assim, temperatura é um parâmetro importante para a qualidade do ambiente, muitas vezes deixado de lado, e assim como na saúde, afeta diretamente o conforto e a atenção das pessoas, como visto em [10]:

- Conforto, luz natural: 3000K - 6000K
- Concentração: acima de 5300K

## 2.1.3 Qualidade do Ar

Não há, na legislação brasileira, informações sobre a qualidade do ar. Isto é, concentrações de CO<sub>2</sub> e VOC.

A norma a seguir fala a margem esperada, mas também sem recomendações de operação.

**ISO 16017-2:2003**

is applicable to the measurement of airborne vapours of VOCs in a concentration range of approximately 0,002 mg/m<sup>3</sup> to 100 mg/m<sup>3</sup> individual organic for an exposure time of 8 h

Por conta disso, vamos nos basear em estudos que tentam relacionar as concentrações de CO<sub>2</sub> e de VOC com efeitos na saúde e produtividade das pessoas.

### 2.1.3.1 CO<sub>2</sub>

Segundo [11], o CO<sub>2</sub> apresenta concentrações mais altas em ambientes fechados, esperando-se entre 700 e 2000 ppm, em comparação a cerca de 400ppm em ambientes abertos em áreas urbanas[12].

O CO<sub>2</sub>, além de ser um gás asfixiante e perigoso em altas concentrações (acima de 40000ppm), também pode afetar a saúde quando em níveis moderados (abaixo de 2000ppm). De acordo com o *Winsconsin Department of Health Services*[13], são os efeitos causados na saúde:

- 250-400ppm: Normal, concentração ambientes abertos
- 400-1,000ppm: concentração típica em lugares fechados com pessoas, com boa circulação de ar
- 1,000-2,000ppm: pode causar cansaço e falta de ar
- 2,000-5,000 ppm: dores de cabeça, sonolência, e falta de ar mais intensa. Baixa concentração, perda de atenção, aumento da frequência cardíaca, e náusea
- 40,000 ppm: Pode causar séria insuficiência respiratória, danos permanentes ao cérebro, coma e até a morte

### 2.1.3.2 VOC

Compostos orgânicos voláteis, ou VOC (do inglês, *Volatile organic compounds*, são partículas que ficam suspensas no ar, podendo vir de produtos (sintéticos ou naturais) utilizados no ambiente, como tintas, solventes, produtos de limpeza, perfumes que podem causar odor perceptível pelo ser humano[11].

A concentração esperada é entre 0.2 e 0.5 mg/m<sup>3</sup>, e mesmo que nem todos os compostos presentes no ar sejam nocivos à saúde, por precaução é recomendado que estes sigam: [14]

TVOC Level [mg/m <sup>3</sup> ]	Level of Concern
Less than 0.3 mg/m <sup>3</sup>	Low
0.3 to 0.5 mg/m <sup>3</sup>	Acceptable
0.5 to 1 mg/m <sup>3</sup>	Marginal
1 to 3 mg/m <sup>3</sup>	High

## 2.2 Protocolos de Rede

Com o crescimento do conceito de Internet das Coisas, novas tecnologias para conexão rápida, segura e fácil de dispositivos são criadas e utilizadas por desenvolvedores em inúmeras aplicações. Segundo a pesquisa *Embedded Markets Study* realizada pela empresa Aspencore[15] e apresentada pelos meios EETimes[16] e Embedded[17] em 2019, as interfaces sem fio mais utilizadas por desenvolvedores em projetos de sistemas embarcados são Wi-Fi, *Bluetooth Low Energy (BLE)* e *Bluetooth Classic*. Essa pesquisa também aponta os protocolos de comunicação sem fio mais utilizados, dentre eles *BLE mesh*, Zigbee, 6LoWPAN e Thread.

Wi-Fi é uma família de tecnologias designadas para comunicação sem fio baseada no padrão IEEE 802.11[18], amplamente utilizada em redes de área local (em inglês *local area network*, LAN) para prover acesso à internet como uma alternativa à tecnologia cabeada Ethernet. Essa tecnologia opera nas faixas de 2,4GHz e 5GHz, sendo que a primeira permite uma taxa de transmissão de até 600 Mbits/s e a segunda até 1 Gbit/s em casos mais extremos[19]. A topologia comum de uma rede Wi-Fi é dada por um dispositivo que atua como ponto de acesso que disponibiliza o sinal sem fio para que dispositivos ao seu redor possam se conectar à rede, em uma topologia de rede em estrela. Deste modo, os dispositivos têm que estar a uma distância de poucos metros do ponto de acesso para que a comunicação não seja afetada, sendo essa distância cerca de 76m a 122m em ambientes internos[20], dependendo da antena utilizada.

Outra norma comumente utilizada em redes sem fio é a IEE 802.15.4, que define especificações de camada física para redes de comunicação sem fio que operam com baixa taxa de transmissão de dados (em inglês, *Lower Rate Wireless Personal Area Network*, ou LR-WPAN), que também utiliza a banda de frequência de 2,4GHz[21]. Os nós participantes da rede podem ser do tipo "função completa" (em inglês, *full-function device* (FFD)), agindo como coordenador da rede, podendo retransmitir mensagens para outros nós, ou do tipo "função reduzida" (em inglês, *reduced-function device* (RFD)), destinados a serem dispositivos simples e com poucos requisitos de comunicação, podendo apenas se comunicar com FFDs. As especificações Zigbee e 6LoWPAN são baseadas nessa norma.

Por último, dentre as tecnologias citadas anteriormente, o Bluetooth surgiu com objetivo inicial de substituir a conexão por fios entre dispositivos móveis comuns como celulares e fones de ouvido, porém já evoluiu muito e pode ser encontrada em diversas aplicações. Em 2009, a *Bluetooth Special Interest Group* (Bluetooth SIG, organização que gerencia o desenvolvimento do padrão Bluetooth) definiu uma nova versão de baixo

consumo energético, chamada de *Bluetooth Low Energy* (BLE), visando aplicações em que não é necessária comunicação contínua como, por exemplo, sensores que coletam dados em intervalos de tempo espaçados. O BLE vem se tornando uma das principais tecnologias para aplicações IoT, principalmente por estar presente na maioria dos dispositivos mais comuns utilizados no dia-a-dia das pessoas, como computadores, *smartphones* e *tablets*, o que facilita a comunicação do usuário com outros dispositivos específicos. As aplicações BLE operam a 2,4GHz com taxas de transmissão entre 0,27 e 1,37 Mbps[22].

Os protocolos citados possuem, em geral, topologias de rede baseadas em estrela, com vários dispositivos periféricos conectados a um central, ou em árvore, que pode ser vista como várias redes em estrela interconectadas. No segundo caso, apenas os dispositivos centrais de cada rede em estrela poderia se comunicar com as outras, atuando como um dispositivo de borda. Desse modo, a conexão entre dispositivos periféricos e central da rede se dá de forma ponto-a-ponto, o que gera uma dependência forte do central e, caso ele apresente algum problema, pode afetar o funcionamento da rede inteira.

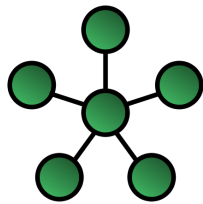


Figura 2: Topologia de rede em estrela

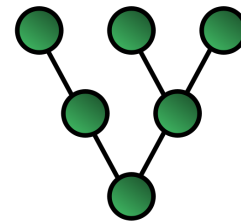


Figura 3: Topologia de rede em árvore

O crescimento e evolução das aplicações IoT requer topologias mais novas e complexas, com a capacidade de se ajustarem dinamicamente caso ocorra alguma mudança na rede. Com isso em mente, soluções de redes em malha começam a surgir nos protocolos anteriormente citados. Nessa topologia, os nós ficam interligados de forma não-hierárquica, permitindo a comunicação *many-to-many* entre os dispositivos da rede, possibilitando que dados de um ponto qualquer seja enviado a outro ponto qualquer da rede.

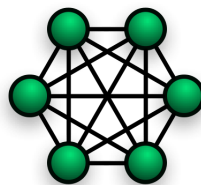


Figura 4: Topologia de rede em malha

Dada essa necessidade, as especificações dos protocolos de comunicação começaram a adicionar soluções de rede em malha, como BLE Mesh, 802.11s (Wi-Fi mesh) e Thread,

que é construída em cima da especificação 6LoWPAN. O protocolo Zigbee já possui suporte a redes em malha desde sua primeira concepção.

O artigo *Wireless Mesh Networking: An IoT-Oriented Perspective Survey on Relevant Technologies*, publicado pela *Future Internet*[23] faz uma análise comparativa entre diferentes tipos de protocolos de comunicação atuando na topologia de rede em malha: família IEEE 802.15.4 (Zigbee e Thread), IEEE 802.11 (em especial a IEEE 802.11s que define redes em malha), LoRa Mesh e IEEE 802.15.1 (BLE Mesh).

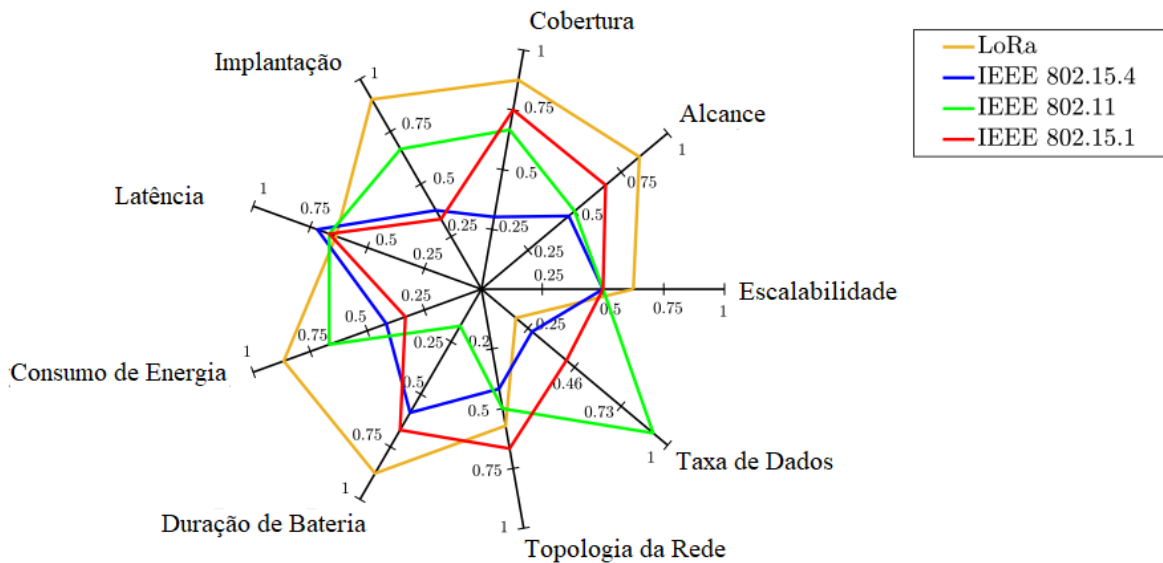


Figura 5: Comparação de performance entre 4 tecnologias de rede sem fio, em topologia de malha, de acordo com 9 parâmetros. Retirado de [23] (traduzido).

O gráfico mostrado na figura 5 pode ser utilizado para resumir de maneira completa a pesquisa realizada em [23]. O protocolo LoRa foge do escopo deste projeto, pois é destinado para comunicações entre distâncias quilométricas e possui taxa de transmissão de dados muito baixa, por isso será desconsiderado como alternativa para a aplicação deste projeto. É possível observar os seguintes pontos:

- A tecnologia Wi-Fi é claramente a que possui maior taxa de transmissão de dados, com área de cobertura e alcance razoáveis, mas com a desvantagem de possuir um consumo de energia elevado.
- Redes BLE Mesh são as mais eficientes em termos de consumo de energia, mostrado também no artigo [24], possuem grande área de cobertura, já que uma rede pode possuir até 32 mil nós[25], e possuem uma taxa de transmissão de dados alta, comparada com as soluções baseadas na IEEE 802.15.4.

- Todas as soluções apresentadas possuem alta escalabilidade e níveis de latência comparáveis.

## 2.3 Soluções no Mercado

A tabela a seguir mostra algumas das principais soluções encontradas no mercado para monitoramento de ambientes fechados:

Projeto	Térmico	Luminoso	Acústico	Ar	Conectividade
Multi comfort [26]	Sim*	Sim*	Sim*	Sim*	Sim*
MC350[27]	Sim*	Sim*	Sim*		Bluetooth, App
Metriful Sense[28]	Temperatura, Umidade, Pressão	Intensidade	Volume, Freq.	VOC	
CoMoS[29]	Temperatura, Umidade, Veloc Ar	Intensidade			Wifi, SW Web
HC tech[30]	Temperatura, Umidade	Intensidade			Sigfox, SW Web
ECOMLITE [31]	Temperatura, Umidade, Pressão		Volume	$CO_2$ , CO, VOC, $NO_2$	Wi-fi, Zigbee, Ethernet, SW Web
Netatmo[32]	Temperatura, Umidade,		Volume	CO2	Wi-fi, App
Senlab O[33]	Temperatura, Umidade	Intensidade			LoRa
Comfort Click[34]	Temperatura, Umidade		Volume		Wi-fi, App

(\*) Solução não detalhada pela construtora

Ao observar as soluções existentes no mercado, é possível ver que a maioria atende a apenas alguns dos indicadores.

Multi Comfort [26], a solução mais completa encontrada, trata-se de uma sistema desenvolvido pela construtora Saint-Gobain de forma integrada à construção do edifício. Como apresentado pelo prof. Vanderley (PCC), o monitoramento e automação na construção civil vem crescendo nos últimos anos, de forma que soluções desse tipo tendem a tornar-se mais comuns. Apesar de atender aos 4 indicadores de qualidade e conforto, essa solução não apresenta detalhes sobre as medições que são feitas, quais os elementos medidos ou a precisão dessas medições, assim como sobre a sua conectividade. Também apresenta grande dificuldade para integração em um ambiente já construído. Nesse contexto, é introduzido o equipamento MC350[27] - da mesma empresa -, mas que não atende mais a todos os indicadores.

Em seguida, temos o Metriful Sense [28], que também atende a todos os indicadores de conforto, que é um produto novo em *crowdfunding*. Diferentemente das demais, esse não é um dispositivo completo, mas uma plataforma de sensores projetada para o monitoramento de ambientes, que necessita de uma interface com outro processador e possivelmente com um módulo *wireless* para que haja conexão com uma plataforma de análise.

Os demais produtos atendem em média apenas dois dos indicadores de conforto, sendo apenas o conforto térmico presente em todos. O conforto luminoso, quando presente, é atendido de forma superficial, sendo medida apenas a intensidade da luz e não a temperatura, que é um elemento importante na sensação de conforto [10]. Já no monitoramento da qualidade do ar, apenas uma das soluções [31] (cuja especificação está disponível) mede ao menos os dois principais elementos indicadores [11].

Vemos, assim, que nenhum dos produtos existentes no mercado atende a todos os requisitos levantados para a nossa aplicação. A proposta aqui é o desenvolvimento de um dispositivo que monitore a qualidade e o conforto do ambiente atendendo a todos os indicadores apresentados de forma completa, e com uma medição mais aprofundada em conforto luminoso e qualidade do ar que os projetos comparados.

Além disso, nenhuma das soluções encontradas envolve diretamente a opinião das pessoas frequentando o ambiente na análise dos seus dados, apenas no controle do ambiente quando esse não atende os requisitos de qualidade ou de conforto.

Vale destacar, por fim, que na maioria dos casos essas soluções são fechadas, com protocolos que dificultam a integração dos dispositivos com outros que possam complementá-los em seu funcionamento, ou de forma que seja possível uma centralização da análise dos dados coletados. Desenvolvendo um projeto *open-source* e com protocolos



padrão de comunicação sem fio, isso deixa de ser um problema.

## 3 ESPECIFICAÇÃO

### 3.1 Requisitos Técnicos

#### 3.1.1 Parâmetros de Medição

Assim, definimos as métricas de qualidade do ambiente, pensando no que a literatura apresenta como saudável para as pessoas e no que diz a legislação brasileira e as normas técnicas. Estas servirão como forma de alerta.

E também os indicadores de conforto, que serão os relacionados à percepção do usuário ao ambiente considerado saudável.

Para cada um dos quatro indicadores, temos as faixas necessárias de medição do ambiente para o funcionamento dentro do escopo.

- Indicador Térmico
  - Temperatura: entre 0°C e 50°C
  - Umidade relativa: entre 10 e 100%
- Indicador Acústico
  - Volume do som ambiente: até 100 dB(A)
- Indicador do Ar
  - $CO_2$ : 100 a 40000ppm
  - VOC: 0 a 3 mg/ $m^3$
- Indicador Luminoso
  - Intensidade equivalente a iluminamento de 0 a 1500 lux
  - Temperatura da cor: 100 a 8000K

### 3.1.2 Protocolos de Comunicação

Com base na pesquisa sobre os protocolos de rede mais adequados ao escopo, o protocolo BLE será utilizado para interconectar os dispositivos, dado seu baixo consumo de energia, alta escalabilidade e alta taxa de transmissão de dados, quando comparado com as outras tecnologias apresentadas. Como os dados coletados pelos dispositivos precisam ser analisados posteriormente, os dispositivos contarão também com a possibilidade de se conectarem via Wi-Fi à internet, tornando possível o acesso remoto aos dados.

## 3.2 Especificação Técnica

### 3.2.1 Arquitetura do Dispositivo

A partir da definição dos requisitos técnicos, chegamos a seguinte arquitetura do dispositivo:

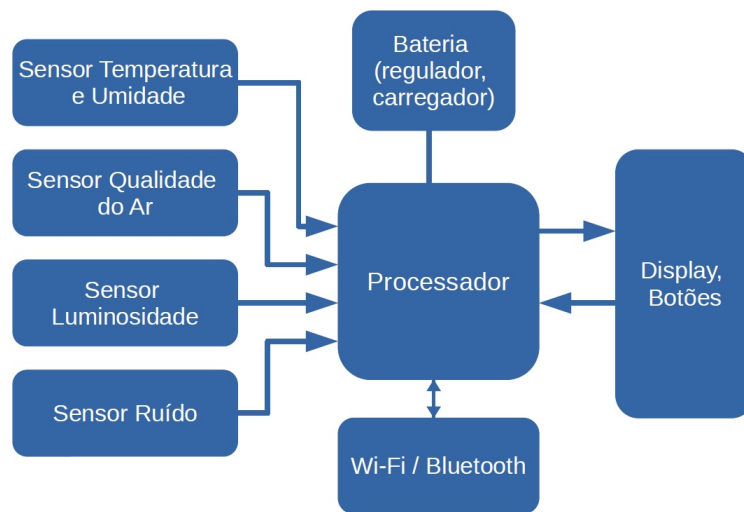


Figura 6: Diagrama de Blocos simplificado do dispositivo

#### 3.2.1.1 Sensores

A fim de atender aos critérios apresentados para o monitoramento, foram escolhidos os seguintes sensores:

- **AS7262**[35], da AMS:

Atende aos requisitos de medição de *conforto luminoso*.

**Medidas:** Intensidade e cor da luz incidente.

A cor da luz, nesse sensor, é medida através de 6 canais, correspondendo aos espectros de luz vermelha (650nm), laranja (600nm), amarela (570nm), verde (550nm), azul (500nm) e violeta (450nm), ao invés de simples RGB, com resolução de 16 bits.

**Comunicação:** I<sup>2</sup>C, SPI ou UART (configurável)

- **BME280** [36], da Bosch:

Atende aos requisitos de *conforto térmico*.

**Medidas:**

- Temperatura entre -40 e 85°C, com precisão de  $\pm 1.0^\circ\text{C}$
- Umidade relativa com precisão de  $\pm 3\%$
- Pressão entre 300 e 1100hPa, com precisão  $\pm 1$  hPa

**Comunicação:** SPI ou I<sup>2</sup>C

- **SGP30** [37]:

Sensor para medições de aplicação *indoor*.

**Medidas:**

- TVOC entre 0 ppb e 60000 ppb, com resolução de 1ppb
- CO<sub>2</sub> entre 400 ppm e 60000 ppm, com resolução de 1ppb

**Comunicação:** I<sup>2</sup>C

- **Microfone de Eletreto:**

Em conjunto com um circuito amplificador, atende aos requisitos de *conforto acústico*.

**Medida:** volume de ruído sonoro ambiente

**Comunicação:** Analógica, precisão de 12 bits (resolução do conversor analógico-digital do ESP32).

### 3.2.1.2 Feedback

Para Sistema de coleta de *feedback* nos dispositivos, optamos por utilizar um display OLED[38] de 128x64 pixels, com driver de comunicação I2C, e 2 botões do tipo *push button*.

### 3.2.1.3 Processador

De acordo com a mesma pesquisa da Aspecore citada anteriormente, 61% dos projetos de sistemas embarcados usam processadores de 32-bits, e 65% utiliza algum tipo de sistema operacional.

A partir das especificações dadas, listamos os periféricos necessários ao microcontrolador, e buscamos as principais opções existentes no mercado para atuar como processador central do dispositivo.

Como a comunicação dos dispositivos é uma funcionalidade crucial, foi dada a preferência para os *System-on-a-Chip* (SoCs), ou Sistema em um chip, ao invés de microcontroladores e módulos *wireless* independentes. SoC é o nome dado a circuitos integrados que englobam processadores (ou microcontroladores, usualmente em dispositivos embarcados), memórias, dentre outros módulos, como circuitos para comunicação sem fio, personalizados para uma aplicação [39]. Assim, chegamos a três opções de SoCs com **bluetooth** integrado.

Vendor	Chip	Price	Kit	Kit Price
Nordic Semi	BMD350	\$11.3	BMD350-EVAL	\$89
Espressif Systems	ESP32	\$3.8	ESP32-DevKitC	\$10
STMicroelectronics	BlueNRG-2	\$3.5	BlueNRG-Tile	\$50

Analisando principalmente os ambientes de desenvolvimento, a documentação disponível e o preço dos CIs e de seus kits de desenvolvimento, optamos pela família ESP32 [40].

Além do Wi-fi como diferencial no SoC, a Espressif possui um bom suporte e ferramentas de desenvolvimento focadas em BLE e Wi-Fi, em especial para o uso de BLE Mesh, e um dos menores preços, assim considerado o melhor custo-benefício.

#### Especificações do ESP32: [41]

- **Processador:** Xtensa 32-bits, dual core
- **Wi-Fi:** 802.11 b/g/n
- **Bluetooth:** v4.2 BR/EDR e BLE

#### 3.2.1.4 Alimentação

Para alimentar os dispositivos, foi pensado em utilizar uma bateria de Lítio-Polímero, de uma célula (1S), por ter a maior densidade energética dentre as baterias recarregáveis, permitindo que o dispositivo seja portátil e não dependente da rede elétrica. A capacidade da bateria será definida com base nos testes de consumo do equipamento nas etapas finais de desenvolvimento do protótipo.

A bateria LiPo tem tensões de operação entre 3.5 e 4.2 Volts. Para alimentar o circuito foi optado por elevar a tensão para 5V, através de um regulador chaveado boost, ainda não definido.

Para fazer a recarga da bateria de forma eficiente e segura, foi pensado em um circuito carregador utilizando o CI TP4056 [42], alimentado por 5V através de um conector USB-micro. Com esse CI é possível também que o circuito opere enquanto a bateria está sendo recarregada.

### 3.2.2 Arquitetura da Rede

Os dispositivos serão interconectados por meio de uma rede *Bluetooth Mesh*, disponibilizando dados de medições dos sensores e *feedback* ao longo do dia por toda a rede. Essa arquitetura utiliza o conceito de rede por inundação, no qual os dados de um nó são enviados para vários outros nós, que atuam como retransmissores desses dados para outros dispositivos dentro do seu alcance, o que aumenta a área de cobertura da rede e sua confiabilidade, já que se um dos dispositivos se desconectar, outras rotas estarão disponíveis para a propagação dos dados.

Apenas um dos dispositivos da rede estará conectado também à internet via Wi-Fi, já que esse é um protocolo com alto consumo energético, sendo assim necessário que ele também esteja conectado a uma fonte fixa de energia. Essa conexão permitirá o envio dos dados coletados pela rede para um banco de dados localizado em um servidor externo ao sistema, possibilitando o acesso remoto aos dados.

### 3.2.3 Software

Outro requisito comumente encontrado em dispositivos IoT focados em monitoramento é a alta disponibilidade de dados para que esse monitoramento em questão seja realizado de forma eficiente. Isso faz com que soluções de armazenamento em nuvem

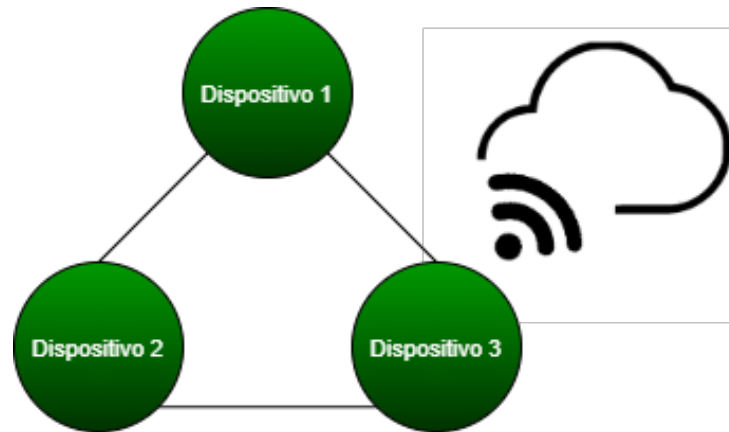


Figura 7: Arquitetura da Rede de Dispositivos

sejam boas alternativas, já que os dados estariam armazenados em um servidor externo ao sistema, possibilitando o seu acesso remotamente. Grandes empresas de tecnologia oferecem plataformas de desenvolvimento com interfaces de programação de aplicações (API, do inglês *application programming interface*) que facilitam o desenvolvimento de bancos de dados conectados.

## 4 DESENVOLVIMENTO

Para o desenvolvimento do projeto, dividimos as tarefas entre 3 áreas: Hardware, Firmware e Software.

No **hardware** estará concentrado todo o desenvolvimento da eletrônica dos dispositivos que estarão nos nós da rede. O **firmware** será todo o software embarcado no dispositivo, desde a comunicação com o hardware até a comunicação sem fio, entre os dispositivos da rede e do dispositivo *gateway* com a plataforma. O **software**, por fim, trata do desenvolvimento relacionado à plataforma onde os dados serão armazenados e apresentados.

### 4.1 Protótipo

A partir das especificações técnicas, foi elaborado um novo diagrama de blocos.

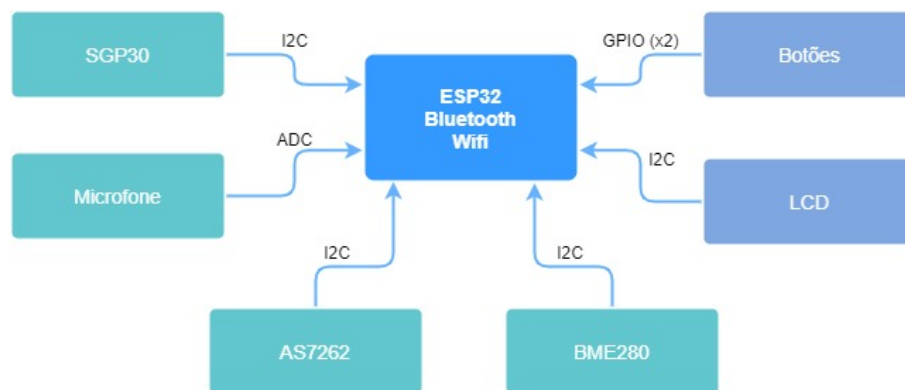


Figura 8: Diagrama de Blocos de Hardware do Protótipo

Quando possível, foram utilizados kits de desenvolvimento e módulos que nos permitissem uma validação mais rápida do hardware nessa fase inicial, permitindo avançar mais com o firmware e fazer testes em campo.

O DevKitC do ESP32 possui integrado um USB, através do qual é possível alimentar os demais subcircuitos da placa, não existindo a necessidade de uso de bateria nessa etapa.



### 4.1.1 Esquemático

Para o design do hardware, utilizamos o software de CAD de PCB *Altium Designer* 20 [43]. Foi utilizada a licença da empresa orientadora, sendo possível também conseguir uma licença gratuita para estudantes. Os arquivos estão disponíveis em [44].

A partir do diagrama de blocos, foi desenvolvido o esquema elétrico

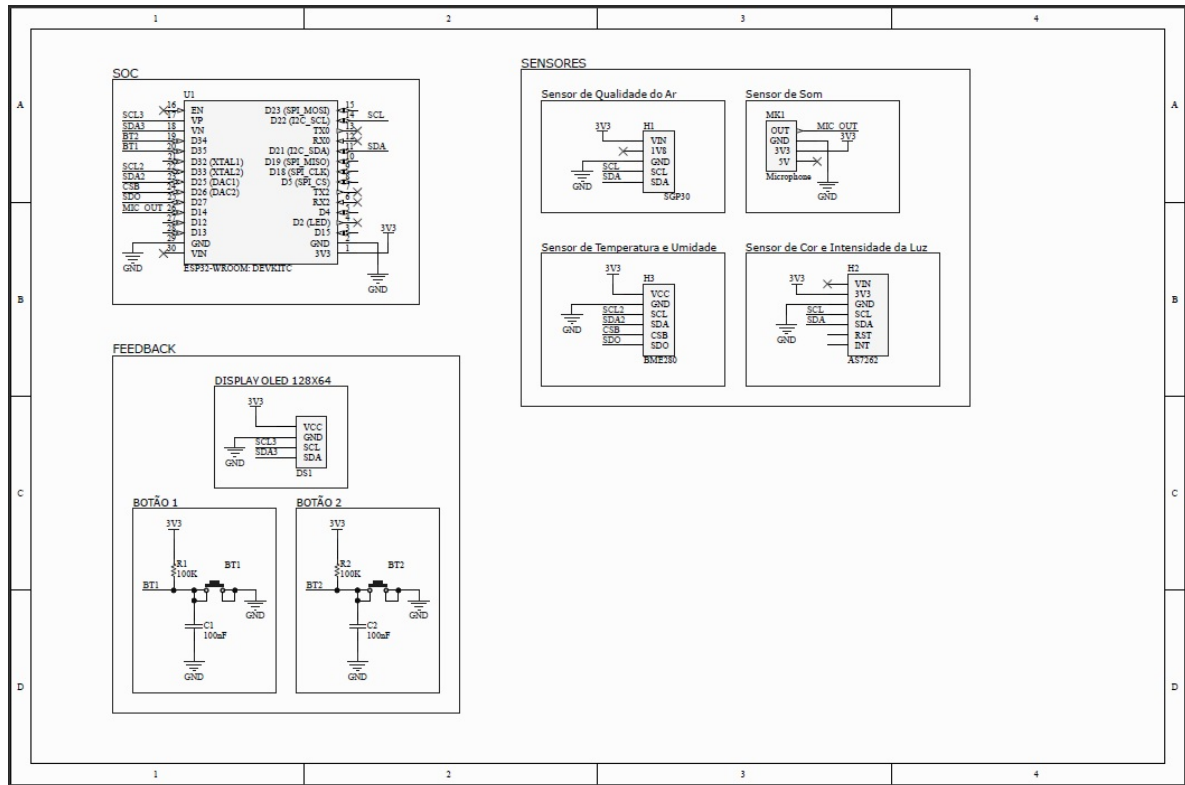


Figura 9: Esquemático do Protótipo

### 4.1.2 PCB - *Printed Circuit Board*

A placa foi pensada como *Single Layer*, para ser fabricada em fibra por uma fresadora CNC, com seus componentes e conectores soldados à mão.

## 4.2 Validação da Rede Mesh

Visando validar a parte de comunicação sem fio utilizando BLE Mesh do ESP32 para o uso no projeto, uma rede simples com apenas 3 dispositivos foi desenvolvida. Dentre os dispositivos, 2 deles eram constituídos pelo microcontrolador escolhido conectados a de 3

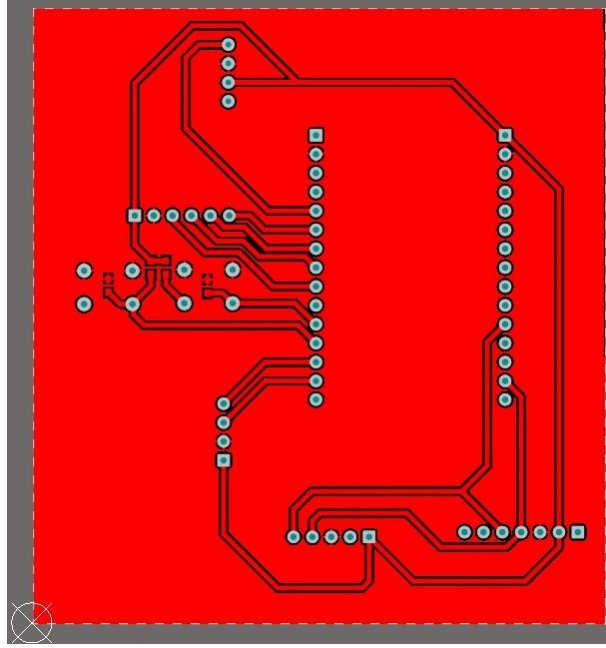


Figura 10: Visão 2D da Camada Top Layer da PCB

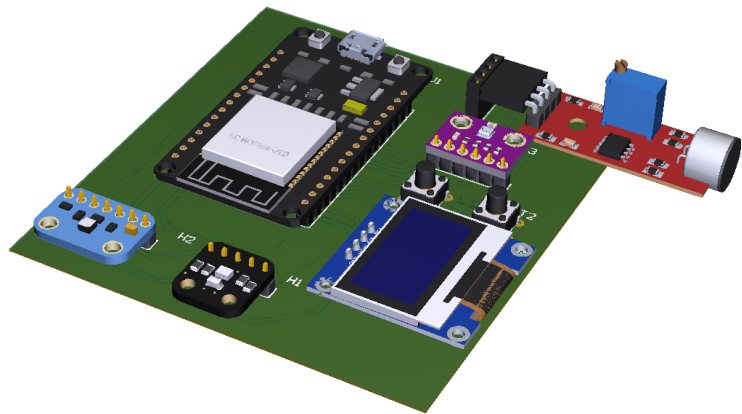


Figura 11: Visão 3D da PCB

LEDs cada um, e o terceiro um *smartphone*.

Arquitetura da rede de testes criada:

- Nó com microcontrolador ESP32: 3 elementos, cada um com o *OnOff Server Model* [45] implementado, visando controlar o ligamento e desligamento de um LED.
- *Smartphone*: utilizando o aplicativo nRF Mesh [46], usado para provisionar os outros nós e controlar a rede *mesh*.

O teste completo aqui descrito pode ser visto em [47].

A partir do aplicativo citado, os outros dois dispositivos foram provisionados, criando a rede *mesh*. Depois, foram criados 3 grupos diferentes:

- *Red Lights*: grupo em que os *models* que controlam os LEDs vermelhos nos nós foram inscritos;
- *Green Lights*: grupo em que apenas um dos *models* que controlam LEDs verdes foi inscrito;
- *Red and Blue*: grupo em que tanto os *models* de LEDs vermelhas quanto os de LEDs azuis foram inscritos.

O funcionamento da rede pode ser validado quando mensagens de *On* e *Off* eram enviadas em cada grupo e apenas os LEDs que deveriam receber a mensagem do respectivo grupo era acionado ou desligado.

Foi possível visualizar o a criação e o funcionamento de uma rede BLE Mesh na plataforma escolhida, bastando apenas modificar a lógica e parâmetros necessários para que as mensagens contenham os dados coletados pelos sensores do projeto e sejam enviadas para os dispositivos desejados.

## APÊNDICE A – ANEXOS

Comment	Description	Designator	Footprint	LibRef	Quantity
SPST	SWITCH TACTILE SPST- NO 0.05A 24V	BT1, BT2	TACT SWITCH PHT	SWITCH TACTILE SPST- NO 0.05A 24V	2
VJ0603Y104JXPW1BC	Multilayer Ceramic Capacitors MLCC - SMD/SMT 0603 0.1uF 16volts X7R 5%	C1, C2	Capacitor-0603	CAP CER 0.1UF 16V 5% 0603	2
Display OLED	MONOCHROME 1.3 128X64	DS1	OLED 128x64	Display OLED	1
SGP30	SGP30 AIR QUALITY SENSOR BREAKOU	H1	SGP30 1x5	SGP30	1
AS7262	Adafruit AS7262 6- Channel Visible Light / Color Sensor Breakout	H2	AS7262	AS7262	1
BME280	SENSOR HUM/PRESS I2C/SPI BME280	H3	BME280 1x6	BME280-module	1
Microphone	Accessory Type:Electret Microphone; For Use With:MCU & Sensor Evaluation & Development Boards; Features:20-20kHz Electret Microphone, Adjustable Gain, Excellent Power Supply Noise Rejection ;RoHS Compliant: Yes	MK1	microphone module - front	Microphone	1
100K		R1, R2	RESISTOR 0603	RES 100K 5% 0603	2
ESP32-DEVKITC	EVAL BOARD FOR ESP- WROOM-32	U1	ESP32-WROOM- devkit	ESP32-DEVKITC	1

Figura 12: Bill of Materials (Lista de Materiais)

## REFERÊNCIAS

- 1 Kumar, A.; Hancke, G. P. An energy-efficient smart comfort sensing system based on the iee 1451 standard for green buildings. *IEEE Sensors Journal*, v. 14, n. 12, p. 4245–4252, 2014.
- 2 Tuan Anh Nguyen and Marco Aiello. Energy intelligent buildings based on user activity: A survey. *Energy and Buildings*, v. 56, p. 244–257, 2013.
- 3 CICS website (<http://cics.prp.usp.br/>). Disponível em: <http://cics.prp.usp.br/>.
- 4 Ciabattoni, L. et al. Iot based indoor personal comfort levels monitoring. *2016 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE)*, p. 125–126, 2016.
- 5 Li Huang, Yingxin Zhu, Qin Ouyang, Bin Cao. A study on the effects of thermal, luminous, and acoustic environments on indoor environmental comfort in offices. *Building and environment*, v. 49, p. 304–309, 2012.
- 6 NR17. *Ergonomia*. [S.l.], 2018. Disponível em: [https://enit.trabalho.gov.br/portal/images/Arquivos\\\_SST/SST\\\_NR/NR-17.pdf](https://enit.trabalho.gov.br/portal/images/Arquivos\_SST/SST\_NR/NR-17.pdf).
- 7 NBR10152. *Níveis de ruído para conforto acústico*. [S.l.], 1987. Disponível em: [http://www.joaopessoa.pb.gov.br/portal/wp-content/uploads/2015/02/NBR\\\_10152-1987-Conforto-Ac\\\_stico.pdf](http://www.joaopessoa.pb.gov.br/portal/wp-content/uploads/2015/02/NBR\_10152-1987-Conforto-Ac\_stico.pdf).
- 8 NBR5413. *Iluminância de Interiores*. [S.l.], 1992. Disponível em: <http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM802/NBR5413.pdf>.
- 9 J. O'Shagan, M. Khazova and L. Price. Low-energy light bulbs, computers, tablets and the blue light hazard. *Eye*, v. 30, p. 230–233, 2016.
- 10 Gao, Q.; Zhang, K.; Li, D. Research on visual comfort based on fuzzy neural network. p. 884–888, 2018.
- 11 A.P. Jones. Indoor air quality and health. *Atmospheric Environment*, v. 33, p. 4525–4564, 1999.
- 12 EARTH, C. *Daily CO2*. Disponível em: <https://www.co2.earth/daily-co2/>.
- 13 CARBON Dioxide. Disponível em: <https://www.dhs.wisconsin.gov/chemical/carbondioxide.htm>.
- 14 GROUP, T. *What are acceptable VOC levels in the air*. Disponível em: <https://www.tecamgroup.com/acceptable-voc-levels/>.
- 15 AspenCore. *2019 Embedded Markets Study: Integrating iot and advanced technology designs, application development and processing environments*. embedded, 2019. Disponível em: [https://www.embedded.com/wp-content/uploads/2019/11/EETimes\\\_Embedded\\\_2019\\\_Embedded\\\_Markets\\\_Study.pdf](https://www.embedded.com/wp-content/uploads/2019/11/EETimes\_Embedded\_2019\_Embedded\_Markets\_Study.pdf).

- 16 ELETRONIC ENGINEERING TIMES. *EETimes*. Disponível em: [⟨https://www.eetimes.com⟩](https://www.eetimes.com).
- 17 ASPENCORE. *embedded*. Disponível em: [⟨https://www.embedded.com⟩](https://www.embedded.com).
- 18 IEEE Standard for Information technology—Telecommunications and information exchange between systems Local and metropolitan area networks—Specific requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. *IEEE Std 802.11-2016 (Revision of IEEE Std 802.11-2012)*, p. 1–3534, 2016.
- 19 INTEL. *Different Wi-Fi Protocols and Data Rates*. Disponível em: [⟨https://www.intel.com/content/www/us/en/support/articles/000005725/network-and-i-o/wireless-networking.html⟩](https://www.intel.com/content/www/us/en/support/articles/000005725/network-and-i-o/wireless-networking.html).
- 20 DONG, J. et al. Indoor passive ranging based on wifi. p. 1, 2014.
- 21 IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks. *IEEE Std 802.15.4-2020 (Revision of IEEE Std 802.15.4-2015)*, p. 1–800, 2020.
- 22 NOVELBITS. *Bluetooth 5 BLE: Achieving maximum throughput*. Disponível em: [⟨https://www.novelbits.io/bluetooth-5-speed-maximum-throughput/⟩](https://www.novelbits.io/bluetooth-5-speed-maximum-throughput/).
- 23 CILFONE L. DAVOLI, L. B. A.; FERRARI, G. Wireless mesh networking: An iot-oriented perspective survey on relevant technologies. *Future Internet*, p. 27–31, 2019.
- 24 SIEKKINEN, M. H. M.; NURMINEN, J. How low energy is bluetooth low energy? p. 1–6, 2012.
- 25 BLUETOOTH SIG. *Mesh Networking Specifications*. Disponível em: [⟨https://www.bluetooth.com/specifications/mesh-specifications⟩](https://www.bluetooth.com/specifications/mesh-specifications).
- 26 GOBAIN, S. *MULTI COMFORT*. Disponível em: [⟨https://multicomfort.saint-gobain.com/⟩](https://multicomfort.saint-gobain.com/).
- 27 GOBAIN, S. *MultiComfort 350*. Disponível em: [⟨https://www.saint-gobain.com.br/mc350⟩](https://www.saint-gobain.com.br/mc350).
- 28 METRIFUL. *Metriful Sense*. Disponível em: [⟨https://www.metriful.com/⟩](https://www.metriful.com/).
- 29 SPACE, L. L. smart office. *CoMoS Comfort Monitoring Station*. Disponível em: [⟨http://www.livinglab-smartofficespace.com/en/research/heat-and-thermal-comfort/detail/comos-comfort-monitoring-station/⟩](http://www.livinglab-smartofficespace.com/en/research/heat-and-thermal-comfort/detail/comos-comfort-monitoring-station/).
- 30 HC Technologies. *RETAIL SPACE COMFORT MONITORING*. Disponível em: [⟨https://www.hc-technologies.com/retail-iot-solutions/store-ambient-comfort-monitoring⟩](https://www.hc-technologies.com/retail-iot-solutions/store-ambient-comfort-monitoring).
- 31 ENTECH. *ECOMLITE monitoring indoor comfort*. Disponível em: [⟨https://www.entech.co.th/product/ecomlite/⟩](https://www.entech.co.th/product/ecomlite/).
- 32 NETATMO. *Smart Indoor Air Quality Monitor*. Disponível em: [⟨https://www.netatmo.com/el-gr/aircare/homecoach⟩](https://www.netatmo.com/el-gr/aircare/homecoach).

- 33 LABS, S. *Senlab O: Indoor Comfort and occupancy monitoring*. Disponível em: <https://sensing-labs.com/portfolio-item/21334/>.
- 34 CLICK, C. *Office: Smart Buildings*. Disponível em: <https://www.comfortclick.com/SmartBuilding/Solutions/Office>.
- 35 AMS. *Datasheet AS7262*. [S.l.], 2017. Disponível em: [https://br.mouser.com/datasheet/2/588/AS7262\\_DS000486\\_2-00-1513124.pdf](https://br.mouser.com/datasheet/2/588/AS7262_DS000486_2-00-1513124.pdf).
- 36 DATASHEET BME280. [S.l.], 2018. Disponível em: <https://br.mouser.com/datasheet/2/783/BST-BME280-DS002-1509607.pdf>.
- 37 SENSIRION. *Datasheet SGP30*. [S.l.], 2020. Disponível em: [https://br.mouser.com/datasheet/2/682/Sensirion\\_Gas\\_Sensors\\_SGP30\\_Datasheet-1843629.pdf](https://br.mouser.com/datasheet/2/682/Sensirion_Gas_Sensors_SGP30_Datasheet-1843629.pdf).
- 38 Solomon Systech. *128 x 64 Dot Matrix OLED/PLED Segment/Common Driver with Controller*. [S.l.], 2008. Disponível em: <https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/SSD1306.pdf>.
- 39 FLYNN, M. J.; LUK, W. Computer System Design: System-on-Chip. In: \_\_\_\_\_. [S.l.]: John Wiley and Sons, Inc, 2011. cap. Introduction to the Systems Approach.
- 40 ESPRESSIF. *ESP32*. Disponível em: <https://www.espressif.com/en/products/modules/esp-wroom-32/overview>.
- 41 ESPRESSIF SYSTEMS. *ESP32 Series datasheet*. [S.l.], 2020. Disponível em: [https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32\\_datasheet\\_en.pdf](https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf).
- 42 CORP, N. T. P. A. *TP4056 Datasheet*. [S.l.]. Disponível em: <https://dlmh9ip6v2uc.cloudfront.net/datasheets/Prototyping/TP4056.pdf>.
- 43 ALTIUM. *Altium Designer®*. Disponível em: <https://www.altium.com/altium-designer/>.
- 44 BOLOGNA, I.; FREITAS, R. *Repositório do projeto de Hardware*. Disponível em: <https://github.com/co-env/hardware>.
- 45 WOOLLEY, M. Bluetooth mesh models. p. 15–17, 2019.
- 46 Nordic Semiconductor. *nRF Mesh (Version 2.4.1)*. Disponível em: <https://www.nordicsemi.com/Software-and-tools/Development-Tools/nRF-Mesh>.
- 47 BOLOGNA, I.; FREITAS, R. *Validação BLE Mesh ESP32*. Disponível em: <https://youtu.be/jgBU62UjaI>.