



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO DE TECNOLÓGICO
CURSO DE POSGRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

Fernando Campo García

Título do trabalho: Subtítulo (se houver)

Florianópolis
2023

Fernando Campo García

Título do trabalho: Subtítulo (se houver)

Tese de Doutorado do Curso de Posgraduação em Engenharia Ambiental do Centro de Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Leonardo Hoinaski, Dr.

Coorientador: Prof. Alejandro Rafael García Ramírez, Dr.

Florianópolis
2023

Ficha de identificação da obra

A ficha de identificação é elaborada pelo próprio autor.

Orientações em:

<http://portalbu.ufsc.br/ficha>

Fernando Campo García

Título do trabalho: Subtítulo (se houver)

Este Tese de Doutorado foi julgado adequado para obtenção do Título de “Doutor em Engenharia Ambiental” e aprovado em sua forma final pelo Curso de Posgraduação em Engenharia Ambiental.

Florianópolis, 15 de Dezembro de 2023.

Prof. XXXXXX, Dr.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Prof. Leonardo Hoinaski, Dr.
Orientador

Prof.(a) xxxx, Dr(a).
Avaliador(a)
Instituição xxxx

Prof.(a) xxxx, Dr(a).
Avaliador(a)
Instituição xxxx

Este trabalho é dedicado aos meus colegas de classe e aos meus queridos pais.

AGRADECIMENTOS

Inserir os agradecimentos aos colaboradores à execução do trabalho.

XX.

“Texto da Epígrafe.

Citação relativa ao tema do trabalho.

É opcional. A epígrafe pode também aparecer

na abertura de cada seção ou capítulo.

Deve ser elaborada de acordo com a NBR 10520.”

(Autor da epígrafe, ano)

RESUMO

No resumo são ressaltados o objetivo da pesquisa, o método utilizado, as discussões e os resultados com destaque apenas para os pontos principais. O resumo deve ser significativo, composto de uma sequência de frases concisas, afirmativas, e não de uma enumeração de tópicos. Não deve conter citações. Deve usar o verbo na voz ativa e na terceira pessoa do singular. O texto do resumo deve ser digitado, em um único bloco, sem espaço de parágrafo. O espaçamento entre linhas é simples e o tamanho da fonte é 12. Abaixo do resumo, informar as palavras-chave (palavras ou expressões significativas retiradas do texto) ou, termos retirados de thesaurus da área. Deve conter de 150 a 500 palavras. O resumo é elaborado de acordo com a NBR 6028.

Palavras-chave: Palavra-chave 1. Palavra-chave 2. Palavra-chave 3.

ABSTRACT

Resumo traduzido para outros idiomas, neste caso, inglês. Segue o formato do resumo feito na língua vernácula. As palavras-chave traduzidas, versão em língua estrangeira, são colocadas abaixo do texto precedidas pela expressão “Keywords”, separadas por ponto.

Keywords: Keyword 1. Keyword 2. Keyword 3.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estrutura principal dos dispositivos. a) Medidor de gases fixo, e b) medidor móvel	17
Figura 2 – Ilustrações das versões (a) fixa e (b) móvel dos dispositivos de monitoramento	18
Figura 3 – A placa CLEAN Arduino Mega: (a) projeto PCB, (b) vista superior da placa, (c) vista inferior da placa.	19
Figura 4 – Representação de uma célula eletroquímica de dois eletrodos.	24
Figura 5 – Potenciômetro para condicionamento de sensores eletroquímicos.	26
Figura 6 – Diagrama de blocos dos sistemas fixo (a) e móvel (b)	27
Figura 7 – Sensores dos fabricantes a) SPEC e b) Alphasense	29
Figura 8 – Interface entre os sensores e o microcontrolador Arduino. a) Alphasense, b) SPEC	32
Figura 9 – Interface entre o módulo cartão micro SD e o microcontrolador	34
Figura 10 – Interface entre o microcontrolador e os módulos a) RTC e b) GPS . .	34
Figura 11 – Interface entre o microcontrolador e o módulo de comunicação Wi-Fi .	35
Figura 12 – Instalação em campo do protótipo fixo	36
Figura 13 – Vista interior do protótipo fixo	37
Figura 14 – Diagrama de conexões do conjunto de sensores Alphasense	37
Figura 15 – Diagrama de conexões do conjunto de sensores Alphasense	39
Figura 16 – Sensor de Monôxido de Nitrogênio Alphasense da série B4	42
Figura 17 – Fluxograma do firmware programado para o microcontrolador Arduino MEGA	46
Figura 18 – Módulos e interfaces usados para controle e interface do RTC	55

LISTA DE QUADROS

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Especificações técnicas dos ventiladores utilizados no equipamento fixo e móvel	28
Tabela 2 – Especificações técnicas dos sensores SPEC	30
Tabela 3 – Especificações técnicas dos sensores Alphasense	31
Tabela 4 – Lista de sensores utilizados no protótipo fixo	38
Tabela 5 – Principais componentes utilizados nos dispositivos CLEAN	41
Tabela 6 – Constantes e variáveis utilizadas para controlar a execução de cada funcionalidade no firmware	53

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	RECOMENDAÇÕES DE USO	14
1.2	OBJETIVOS	14
1.2.1	Objetivo Geral	14
1.2.2	Objetivos Específicos	14
2	MONITORAMENTO DA QUALIDADE DO AR	15
2.1	IMPORTÂNCIA	15
2.2	MONITORAMENTO DE REFERÊNCIA	15
2.3	MONITORAMENTO DE BAIXO CUSTO	15
3	CLEAN - COLLABORATIVE LOW-COST ENVIRONMENTAL AND AIR-QUALITY NETWORK	16
3.1	DISPOSITIVOS DE HARDWARE DESENVOLVIDOS	16
3.1.1	Protótipos de monitores de qualidade do ar de baixo custo	17
3.1.2	A placa CLEAN Arduino MEGA	18
4	SEÇÃO	20
5	CONCLUSÃO	21
	REFERÊNCIAS	22
	APÊNDICE A – DESCRIÇÃO	23
	APÊNDICE B – SENSORES DE GASES ELETROQUÍMICOS	24
	APÊNDICE C – PROTÓTIPOS DE MONITORES DA QUALIDADE DO AR DESENVOLVIDOS	27
C.1	TRANSPORTE DE GASES	28
C.2	SENSORIAMENTO	29
C.2.1	Sensores SPEC	30
C.2.2	Sensores Alphasense	30
C.3	CONDICIONAMENTO	31
C.3.1	Interface de condicionamento dos sensores Alphasense: A Placa de Sensoriamento Individual (ISB)	31
C.3.2	Interface de condicionamento dos sensores SPEC	32
C.4	MICROCONTROLADOR	33
C.4.1	Armazenamento dos dados	33
C.4.2	Controle de data e hora e geolocalização	33
C.4.3	Comunicação Wi-Fi	35
C.5	MONTAGEM DO PROTÓTIPO FIXO	36
C.6	MONTAGEM DO PROTÓTIPO MÓVEL	38

	APÊNDICE D – A PLACA CLEAN ARDUINO MEGA	40
D.1	MÓDULO DE SENSORIAMENTO	40
D.1.1	Sensores	40
D.1.1.1	Sensores SPEC.	40
D.1.1.2	Sensores Alphasense.	40
D.1.1.3	Interface de condicionamento de sensores SPEC	42
D.1.1.4	Interface de condicionamento de sensores Alphasense	42
D.2	O MICROCONTROLADOR	43
D.2.1	Armazenamento dos dados	43
D.2.2	Relógio de tempo real	43
D.2.3	Comunicação Wi-Fi	43
	APÊNDICE E – O FIRMWARE CLEAN	45
E.1	CÓDIGO CLEAN ARDUINO MEGA	45
E.1.1	Identificação do dispositivo e seus sensores	47
E.1.2	Configuração: a função setup()	47
E.1.2.1	Serial, Serial1, Serial3	49
E.1.2.2	espIoT	49
E.1.2.3	SD	49
E.1.2.4	Rtc	49
E.1.3	Interrupção Serial3	50
E.1.4	Laço principal do programa: a função loop()	51
E.1.4.1	Leitura dos sensores	54
E.1.4.2	Armazenamento dos dados	57
E.1.4.3	Envio de dados via protocolo <i>HTTP</i>	58
E.1.4.4	Geolocalização	58
	ANEXO A – DESCRIÇÃO	60

1 INTRODUÇÃO

Paralelamente ao uso deste *template* recomenda-se que seja utilizado o **Tutorial de Trabalhos Acadêmicos** (disponível neste link <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/180829>) e/ou que o discente **participe das capacitações oferecidas da Biblioteca Universitária da UFSC**.

Este *template* está configurado apenas para a impressão utilizando o anverso das folhas, caso você queira imprimir usando a frente e o verso, acrescente a opção *openright* e mude de *oneside* para *twoside* nas configurações da classe *abntex2* no início do arquivo principal *main.tex* (**abntex2classe**).

Os trabalhos de conclusão de curso (TCC) de graduação e de especialização não são entregues em formato impresso na Biblioteca Universitária. Porém, sua versão PDF pode ser disponibilizada no Repositório Institucional, consulte seu curso sobre os procedimentos adotados para a entrega.

1.1 RECOMENDAÇÕES DE USO

Este *template* foi elaborado para se compilado em L^AT_EXutilizando abnT_EX2. Todas as configurações de diferenciação gráfica nas divisões de seção e subseção seguem a norma NBR 6027/2012 automaticamente.

Uma nota de rodapé, já tem seu estilo automático com o comando \footnote¹.

1.2 OBJETIVOS

Nas seções abaixo estão descritos o objetivo geral e os objetivos específicos deste TCC.

1.2.1 Objetivo Geral

Descrição...

1.2.2 Objetivos Específicos

Descrição...

¹ As notas de rodapé possuem fonte tamanho 10. O alinhamento das linhas da nota de rodapé deve ser abaixo da primeira letra da primeira palavra da nota de modo dar destaque ao expoente.

2 MONITORAMENTO DA QUALIDADE DO AR

2.1 IMPORTÂNCIA

Importância (Efeitos da poluição atmosférica e necessidade de monitoramento para controle)

2.2 MONITORAMENTO DE REFERÊNCIA

(custos, equipamentos, técnicas)

2.3 MONITORAMENTO DE BAIXO CUSTO

(estado atual, vantagens, desvantagens e desafios, Brasil)

3 CLEAN - COLLABORATIVE LOW-COST ENVIRONMENTAL AND AIR-QUALITY NETWORK

A iniciativa CLEAN consiste numa plataforma colaborativa para promover e facilitar o desenvolvimento de monitores de qualidade do ar de baixo custo, e o acesso remoto em tempo real a informações sobre a qualidade do ar. Possui quatro componentes principais:

1. Dispositivos de hardware
2. Firmware reutilizável e bibliotecas de Programação Orientada a Objetos baseadas no framework Arduino para programação dos dispositivos de monitoramento
3. A aplicação web Renovar para visualização (e acesso) remoto dos dados em tempo real
4. Guias e documentação para reprodução do hardware e adesão à rede

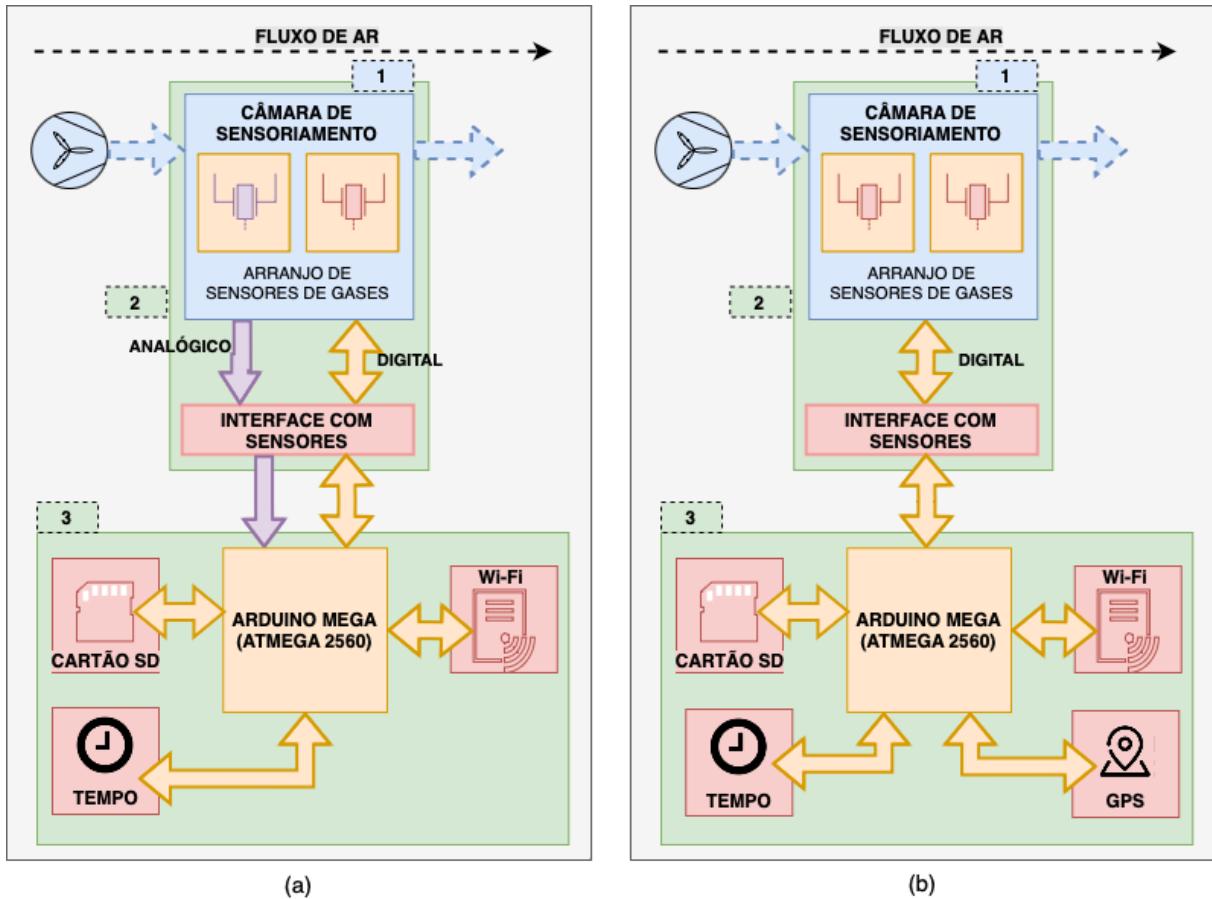
Todos os guias e documentação relativos ao desenvolvimento do hardware e firmware dos dispositivos até agora concebidos, as bibliotecas implementadas e as ferramentas de desenvolvimento estão abertas e disponíveis gratuitamente na página inicial de CLEAN.

CLEAN permite a colaboração de outros grupos e indivíduos interessados no desenvolvimento de dispositivos de monitoramento de baixo custo e dados abertos para análises ambientais. A aplicação web Renovar fornece uma API que permite que diversos dispositivos de monitoramento de baixo custo enviem seus dados para um servidor remoto para visualização e armazenamento em tempo real e geolocalizados. Esses dados permanecem disponíveis abertamente para posterior processamento e análise. Dada a grande versatilidade dos sensores de baixo custo, muitas aplicações poderiam ser monitoradas a partir de diversos cenários, contribuindo para a disponibilidade de grandes volumes de dados. A continuação serão descritos os componentes principais da iniciativa CLEAN.

3.1 DISPOSITIVOS DE HARDWARE DESENVOLVIDOS

Dentro do contexto da iniciativa CLEAN foram desenvolvidos dispositivos para medição da qualidade do ar. Dois desses dispositivos foram protótipos para validação da ideia, concebidos para medições em locais fixos e medições móveis. Numa segunda etapa foram desenvolvidos dispositivos mais robustos com placas de circuito impresso e quadros elétricos para instalação em campo. A continuação serão descritos os equipamentos produzidos.

Figura 1 – Estrutura principal dos dispositivos. a) Medidor de gases fixo, e b) medidor móvel



3.1.1 Protótipos de monitores de qualidade do ar de baixo custo

Foram concebidos dois protótipos de baixo custo para medição de poluentes atmosféricos (CAMPO *et al.*, 2020), um para monitoramento fixo e outro para monitoramento móvel. O hardware de ambos os dispositivos, conforme mostrado na Figura 1, é composto por três blocos principais: 1) transporte de gás, 2) sensoriamento e 3) microcontrolador. O estágio de transporte de gás captura o ar ambiente nos sensores, que produzem um sinal analógico proporcional à concentração do gás. O microcontrolador, que é um Microchip ATMEGA2560 embarcado em uma plataforma Arduino Mega, capture as respostas dos sensores e as transforma em dados de concentração de gás. O hardware também obtém a hora e o local onde cada medição foi coletada. O microcontrolador armazena essas informações em um cartão micro SD e as transmite para um servidor web hospedado na Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação da Universidade, rodando o aplicativo Renovar Web. Uma conexão Wi-Fi é estabelecida por um microcontrolador ESP8266 para transmissão de dados. Um relógio em tempo real e um módulo GPS fornecem informações de data, hora e geolocalização, respectivamente.

A versão fixa dos dispositivos de monitoramento (Figura 1a) utiliza seis sensores

Figura 2 – Ilustrações das versões (a) fixa e (b) móvel dos dispositivos de monitoramento



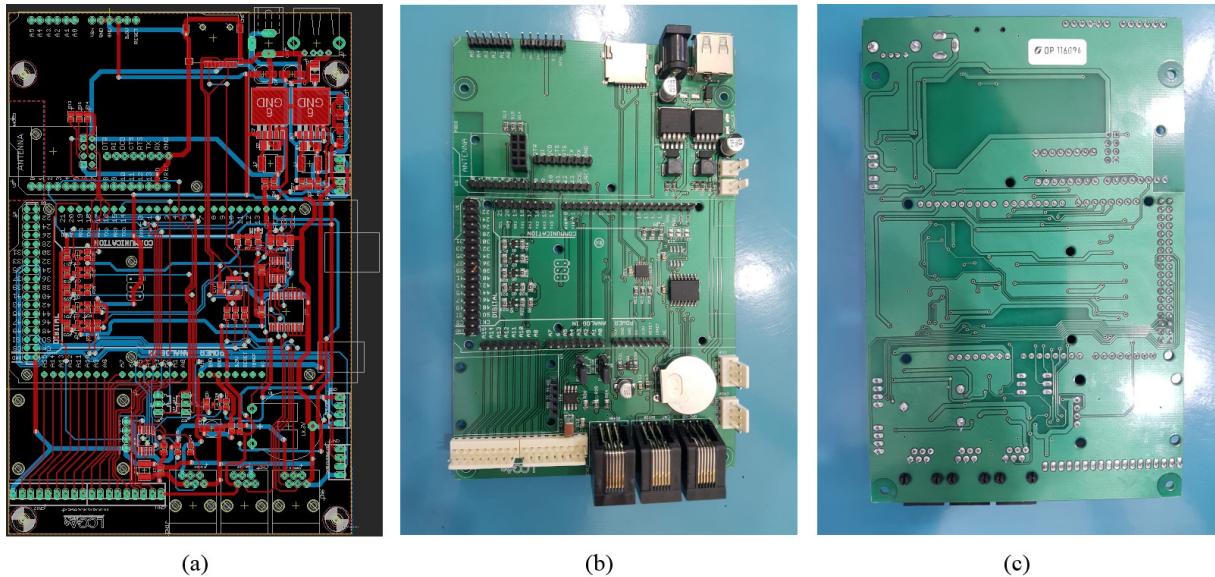
eletroquímicos do fabricante de sensores Alphasense e quatro sensores eletroquímicos do fabricante SPEC Sensors. Para alimentação de energia do dispositivo utiliza-se uma fonte de 12VCC. Este dispositivo não incorpora módulo *GPS* para geolocalização. A versão móvel (Figura 1b), por outro lado, utiliza apenas quatro sensores eletroquímicos do fabricante SPEC Sensors. O dispositivo é alimentado por um banco de energia de 5VCC através de uma conexão USB. A Figura 3 ilustra ambos protótipos na versão fixa e móvel. Mais detalhes sobre os dispositivos podem ser encontrados no Apêndice C.

3.1.2 A placa CLEAN Arduino MEGA

Com base nos resultados obtidos pelos protótipos e nas experiências alcançadas, foi desenvolvida uma versão mais compacta e atualizada para monitoramento fixo. Esta versão foi chamada de *CLEAN Arduino Mega Board* por causa do microcontrolador Arduino Mega que ela usa como processador principal. A composição do hardware é muito semelhante à dos protótipos, mas os módulos foram montados em uma única *PCB*. A Figura 3 ilustra o projeto da *PCB* e uma das placas fabricadas. A *PCB* foi criada no *software* Eagle, e os arquivos do projeto estão disponíveis nos repositórios do LCQAr da UFSC.

A Tabela 5 do apêndice D mostra os principais componentes de hardware utilizados na placa, que requer uma tensão de alimentação de 12V, 2A através de um conector de alimentação P4. Possui entradas analógicas para 6 placas de sensores Alphasense da série ISB, barramento RS-485 para futuras expansões, três saídas digitais e conectores para alimentação de ventoinhas de 12V e 5V. A placa foi concebida para suportar conexões Wi-Fi e *GPRS* à Internet. Essas conexões não podem ser utilizadas simultaneamente, o que dependerá de cada aplicação. O usuário pode configurar a placa para usar um ou outro e terá que adaptar o firmware do microcontrolador Arduino correspondentemente.

Figura 3 – A placa CLEAN Arduino Mega: (a) projeto PCB, (b) vista superior da placa, (c) vista inferior da placa.



(a)

(b)

(c)

4 SEÇÃO

Este *template* contém algumas seções criadas na tentativa de facilitar seu uso. No entanto, não há um limite máximo ou mínimo de seção a ser utilizado no trabalho. Cabe a cada autor definir a quantidade que melhor atenda à sua necessidade.

5 CONCLUSÃO

As conclusões devem responder às questões da pesquisa, em relação aos objetivos e às hipóteses. Devem ser breves, podendo apresentar recomendações e sugestões para trabalhos futuros.

REFERÊNCIAS

- ALPHASENSE. Alphasense Application Note AAN 104 How Electrochemical Gas Sensors Work. [S.l.], 2013. P. 1–4. Disponível em:
https://www.alphasense.com/WEB1213/wp-content/uploads/2013/07/AAN_104.pdf.
- _____. NO-B4 Nitric Oxide Sensor. Great Notley, UK, jul. 2019. P. 1–2. Disponível em: www.alphasense.com.
- BARON, Ronan; SAFFELL, John. Amperometric Gas Sensors as a Low Cost Emerging Technology Platform for Air Quality Monitoring Applications: A Review. **ACS Sensors**, v. 2, n. 11, p. 1553–1566, nov. 2017. ISSN 2379-3694. DOI: 10.1021/acssensors.7b00620. Disponível em:
<https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acssensors.7b00620>.
- BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). **Resolução n. 491, de 19 de novembro de 2018. Dispõe sobre padrões de qualidade do ar.** [S.l.: s.n.], 2018.
- CAMPO, Fernando *et al.* DEPLOYMENT OF MOBILE AND FIXED AIR SENSOR PLATFORMS IN THE CITY OF FLORIANÓPOLIS, BRAZIL: PRELIMINARY RESULTS. In: 19TH Annual CMAS Conference, Chapel Hill, North Carolina. Chapel Hill, North Carolina: [s.n.], out. 2020. P. 1–6. Disponível em: <https://www.cmascenter.org/conference/2020/abstracts/Campo-et-al-2020.pdf>.
- R. STETTER, Joseph; LI, Jing. Amperometric Gas SensorsA Review. **Chemical Reviews**, v. 108, n. 2, p. 352–366, jan. 2008. DOI: 10.1021/cr0681039.
- SPEC SENSORS. Digital Gas Sensor Developer Kit 968-045. [S.l.], 2017. P. 1–10. Disponível em: https://www.spec-sensors.com/wp-content/uploads/2017/01/DG-SDK-968-045_9-6-17.pdf.
- _____. SPEC Sensor Operation Overview SPEC Sensor TM Operation and Performance Considerations. [S.l.], 2016. P. 1–6. Disponível em:
<http://www.spec-sensors.com/wp-content/uploads/2016/05/SPEC-Sensor-Operation-Overview.pdf>.
- WESTBROEK, P. Fundamentals of electrochemistry. In: ANALYTICAL Electrochemistry in Textiles. [S.l.]: Elsevier Inc., jan. 2005. P. 3–36. ISBN 9781855739192. DOI: 10.1533/9781845690878.1.1.

APÊNDICE A – DESCRIÇÃO

Textos elaborados pelo autor, a fim de completar a sua argumentação. Deve ser precedido da palavra APÊNDICE, identificada por letras maiúsculas consecutivas, travessão e pelo respectivo título. Utilizam-se letras maiúsculas dobradas quando esgotadas as letras do alfabeto.

Quadro 1 – Modelo A.

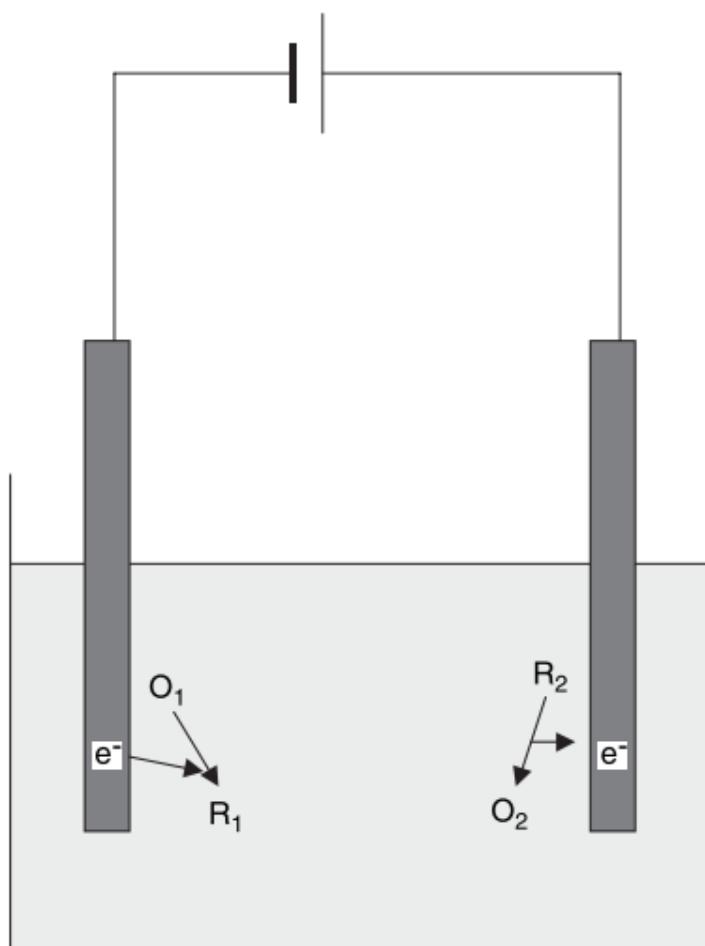
xxxx	yyyyyyyyyyyyyyyyyy
rrrrrrrrrrrrrrrrrr	eeeeeeeeeeeeeeeeee
xxxx	yyyyyyyyyyyyyyyyyy
xxxx	yyyyyyyyyyyyyyyyyy
rrrrrrrrrrrrrrrrrr	eeeeeeeeeeeeeeeeee
xxxx	yyyyyyyyyyyyyyyyyy
	ttttttttttttttt
rrrrrrrrrrrrrrrrrr	eeeeeeeeeeeeeeeeee
ttttttttttttt	
rrrrrrrrrrrrrrrrrr	eeeeeeeeeeeeeeeeee
rrrrrrrrrrrrrrrrrr	eeeeeeeeeeeeeeeeee
	gggggggggggggggggg
rrrrrrrrrrrrrrrrrr	eeeeeeeeeeeeeeeeee

Fonte: Elaborada pelo autor (2016).

APÊNDICE B – SENSORES DE GASES ELETROQUÍMICOS

Os sensores eletroquímicos funcionam baseados no princípio de conversão de energia química em energia elétrica e vice-versa, e consistem, basicamente, em uma célula contendo uma solução eletrolítica na qual são submersos eletrodos metálicos interconectados por um circuito externo (WESTBROEK, 2005). Dentro da célula originam-se reações de oxidação-redução entre cada um dos eletrodos e a solução eletrolítica. As reações de redução removem elétrons do material do eletrodo, que passa a funcionar como catodo. Nas reações de oxidação, o eletrodo que faz o papel de anodo ganha elétrons e produz-se uma espécie oxidada. Esse intercâmbio de cargas entre os eletrodos e a solução analítica, equivalente a uma corrente elétrica fluindo do anodo para o catodo, é proporcional à velocidade das reações redox nas superfícies dos eletrodos (R. STETTER; LI, 2008). A Figura 4 mostra a estrutura básica de uma célula eletrolítica amperométrica de dois eletrodos.

Figura 4 – Representação de uma célula eletroquímica de dois eletrodos.



Fonte: (WESTBROEK, 2005).

Segundo seu princípio de operação, os sensores eletrolíticos são classificados em amperométricos, potenciométricos e condutimétricos (R. STETTER; LI, 2008). Neste trabalho apenas são abordados os sensores amperométricos por serem os mais comumente utilizados no monitoramento de baixo custo.

Os sensores amperométricos apresentam uma estrutura básica de três eletrodos: o eletrodo de trabalho, o eletrodo contador e o eletrodo de referência. O eletrodo de trabalho é a superfície onde acontece a reação de interesse entre o material do eletrodo, a solução eletrolítica e o gás sob estudo, que formam uma interface de três fases. Para aumentar a seletividade dos sensores, costuma-se aplicar algum catalisador na superfície do eletrodo para facilitar ou catalisar determinadas reações. Como este eletrodo está em contato direto com o ar ambiente, corre risco de envenenamento se exposto a certos gases que possam ser adsorvidos no catalisador ou que possam reagir com ele produzindo outros compostos químicos que inibam sua ação (ALPHASENSE, 2013; WESTBROEK, 2005; R. STETTER; LI, 2008; BARON; SAFFELL, 2017).

A reação no eletrodo de trabalho pode ser de oxidação ou de redução, dependendo da natureza da substância gasosa de interesse. Na ausência de gás, a célula eletrolítica encontra-se em equilíbrio, mas, ao entrar em contato com a substância gasosa, as moléculas do gás produzem um desbalanço nas reações redox, e, como resultado, o eletrodo pode ganhar ou perder elétrons, obtendo assim uma carga elétrica (ALPHASENSE, 2013; R. STETTER; LI, 2008).

A carga elétrica gerada no eletrodo de trabalho é balanceada com uma reação oposta no eletrodo contador. Se a reação no eletrodo de trabalho for de oxidação, então no contador se produzirá uma reação de redução complementar, e vice-versa. Como resultado, uma corrente elétrica é gerada, proporcional à velocidade das reações nas superfícies dos eletrodos, que por sua vez é proporcional à concentração do gás (ALPHASENSE, 2013; R. STETTER; LI, 2008; WESTBROEK, 2005).

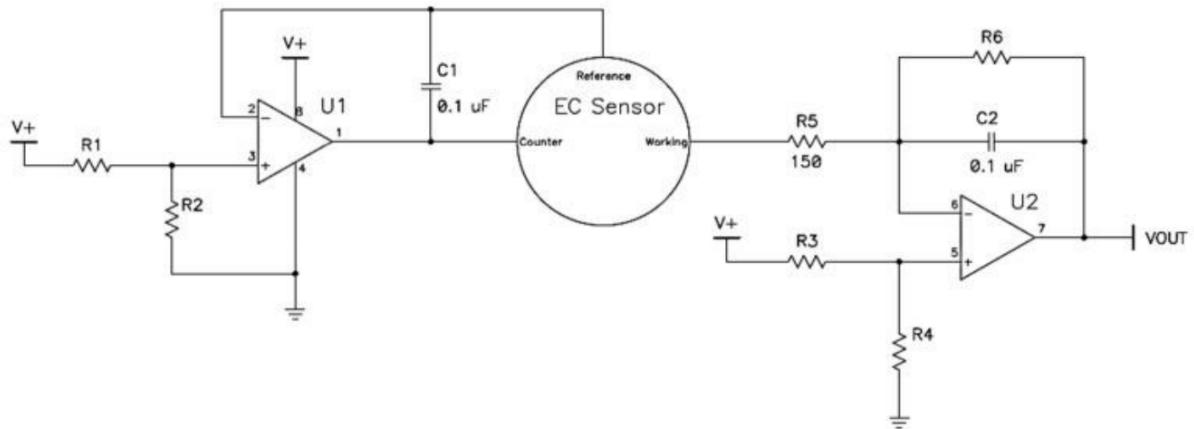
Para assegurar que o sensor se encontra operando dentro de uma região de trabalho desejada, é utilizado o eletrodo de referência. Ele é encarregado de fixar a tensão do eletrodo de trabalho em um valor constante sem que este valor (i.e.: a tensão de operação) seja alterado pela circulação da corrente elétrica, entre os eletrodos contador e de trabalho, que resulta dos processos de transdução. Já o eletrodo contador é deixado com uma carga flutuante que dependerá unicamente das reações eletroquímicas decorrentes da exposição ao gás e do fluxo de elétrons resultante. A corrente de saída do sensor é o resultado da diferença de potencial entre os eletrodos contador e de trabalho (ALPHASENSE, 2013; BARON; SAFFELL, 2017).

A corrente de saída dos sensores eletroquímicos é muito pequena, geralmente na ordem dos nanoampères (R. STETTER; LI, 2008), fazendo necessária a utilização de uma etapa posterior de condicionamento. A função principal da etapa de condicionamento é transformar o valor da variável elétrica de saída do transdutor em um dado que possa ser

lido por um sistema de aquisição e que represente a quantidade física sendo medida, em um determinado instante de tempo. Comumente, a saída da etapa de condicionamento é um sinal de tensão, ajustado para representar, proporcionalmente, dentro de um determinado intervalo, a variável física de interesse. Esse sinal de tensão pode então ser lido por um conversor analógico-digital. Adicionalmente, podem ser contempladas subetapas intermediária de amplificação, filtragem ou alisamento, ajuste de zero e de ganho, e linearização.

No caso dos sensores eletroquímicos, a configuração mais utilizada no circuito de condicionamento é o potenciostato (ALPHASENSE, 2013; SPEC SENSORS, 2016). Este circuito controla o potencial aplicado aos eletrodos de trabalho e de referência e converte a corrente que circula entre os eletrodos de trabalho e contador em um valor de tensão proporcional. Um diagrama simplificado de um sensor eletroquímico e um potenciostato é ilustrado na Figura 5.

Figura 5 – Potenciostato para condicionamento de sensores eletroquímicos.



Fonte: (SPEC SENSORS, 2016).

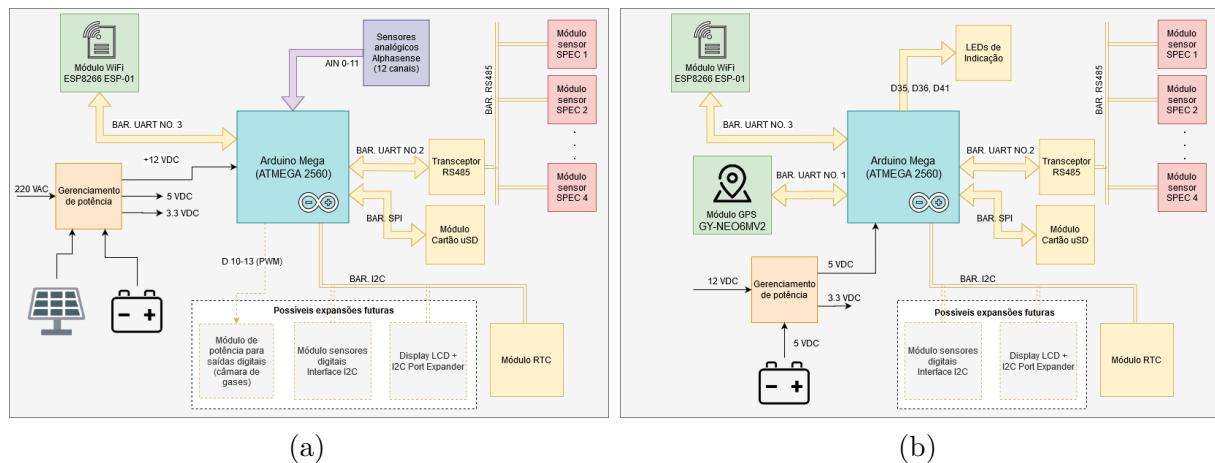
O potencial do eletrodo de referência é estabelecido pelo amplificador U1 da Figura 5, no pino 2. O amplificador U1 também garante a circulação da corrente elétrica pelo eletrodo contador, mantendo constante a tensão de referência. O amplificador U2 fixa o potencial do eletrodo de trabalho no pino 5, e converte em tensão (VOUT) a corrente que circula entre esse eletrodo e o contador. Dessa forma, é possível medir a tensão no pino VOUT como um valor proporcional à concentração do gás em contato com a superfície do sensor (SPEC SENSORS, 2016).

APÊNDICE C – PROTÓTIPOS DE MONITORES DA QUALIDADE DO AR DESENVOLVIDOS

Foram desenvolvidos dois protótipos para o monitoramento da qualidade do ar ilustrados na Figura 2 do Capítulo 3. Eles foram baseados na plataforma Arduino Mega 2560, que utiliza o microcontrolador ATMega2560 da Microchip. Um deles foi projetado para medição fixa em um local, e o outro para monitoramento de forma móvel. Este último, além de prover a informação temporal associada a cada leitura de concentração de poluente, inclui a localização onde a medição foi tomada. Os dispositivos foram projetados para a medição de poluentes regulados na Resolução CONAMA No. 491/2018, sendo eles: CO , NO_2 , SO_2 e O_3 . Além desses gases, a versão fixa também inclui um sensor de sulfeto de hidrogênio (H_2S).

A Figura 6 mostra diagramas com os módulos de *hardware* que compõem os sistemas de medição fixo e móvel, sem incluir o processo de transporte dos gases. A versão fixa do sistema de monitoramento (Figura 6a) utiliza seis sensores da empresa Alphasense sensíveis aos gases CO , NO_2 , SO_2 , O_3 e H_2S . Além destes, também estão instalados quatro sensores da empresa SPEC, sensíveis aos mesmos poluentes com exceção do H_2S . A conexão entre a plataforma Arduino Mega e os sensores SPEC é realizada pela porta serial UART2 do microcontrolador através de um barramento RS-485. Já a leitura dos sensores da Alphasense é realizada pelas entradas analógicas AI0 – AI11 do microcontrolador.

Figura 6 – Diagrama de blocos dos sistemas fixo (a) e móvel (b)



Fonte: Desenvolvido pelo autor (2023)

A versão móvel (Figura 6b) utiliza apenas sensores da SPEC para a medição de gases. Os modelos SPEC utilizados nesta versão são os mesmos que na versão fixa, e utilizam a mesma configuração para se comunicar de forma serial com o Arduino Mega. Um diferencial desta versão com relação à fixa, além de não utilizar sensores Alphasense, é a inclusão de um módulo GPS para georreferenciar as medições dos poluentes. O módulo utilizado é o GY-NEO6MV2 que se comunica com o microcontrolador através da UART1.

Tabela 1 – Especificações técnicas dos ventiladores utilizados no equipamento fixo e móvel

Características	Versão fixa	Versão móvel
Descrição	Ventilador cooler 40mm 12VDC	Ventilador cooler 40mm 5VDC
Marca	GC	GDT
Tamanho	40 x A: 40 x C: 10mm	L: 40 x A: 40 x C: 10mm
Corrente nominal	80 ± 10% mA	140 ± 10% mA
Tensão nominal	12 V	Entre 5 e 7V
Ruído	16 ± 10% dBA	16 ± 10% dBA
Velocidade rotação	5000 ± 10% RPM	7000 ± 20% RPM
Fluxo de ar	4.2 CFM	6.12 CFM
Peso	12 g	14 g
Consumo potência	1.2 W	0.8 W
Vida útil	35000 hr	50000 hr

Além dos dispositivos mencionados acima, cada unidade de monitoramento inclui um módulo ESP8266 ESP-01 conectado à porta serial UART3 do Arduino, para comunicação Wi-Fi. Ambas unidades utilizam também um módulo de cartão micro SD para o armazenamento dos dados e um módulo de Relógio de Tempo Real (RTC) para manter a informação de data e hora. Outros periféricos como sensor de pressão, monitor LCD ou atuadores para controlar o transporte dos gases, podem ser adicionados através do barramento I2C em versões futuras.

Os módulos que compõem ambos sistemas de medição funcionam com tensões de alimentação tanto de 3.3 V como 5 V. Para fornecer esses níveis de voltagem foi utilizado um módulo-fonte que utiliza dois reguladores AMS1117. Um dos reguladores fornece uma saída 3.3 V e o outro 5 V. Ambos reguladores conseguem fornecer até 1 A de corrente de saída. O módulo-fonte possui dois canais de entrada de tensão. Um canal possui um conector Jack P4 para tensões entre 9 – 15 V, enquanto o outro possui um conector USB fêmea para fornecer uma tensão de 5 V.

O sistema fixo é alimentado com uma tensão de 12 V, aplicada no conector Jack P2 do módulo-fonte. Os 12 V de tensão podem ser provenientes de uma fonte conectada à rede elétrica, ou de um controlador solar conectado a um painel solar e uma bateria de 12 V. Já o sistema móvel pode ser alimentado por qualquer carregador de bateria portátil com saída em formato USB de 5 V e mínimo 2 A de corrente.

As seções seguintes descrevem cada um dos blocos que compõem os protótipos desenvolvidos.

C.1 TRANSPORTE DE GASES

A etapa de transporte de gases é tida como a entrada do sistema. Sua função é capturar amostras do ar no ambiente e direcioná-las para o conjunto de sensores. Nos

protótipos desenvolvidos, esta etapa é formada por dois ventiladores de corrente direta e uma câmara de gases. Os ventiladores conduzem o ar desde o ambiente de monitoramento até o interior da câmara. Esta última, por outro lado, consiste em um volume que retém o ar amostrado. No interior dela, os sensores são expostos às porções de ar coletadas para extrair informação de alguns poluentes que podem estar nelas contidos.

As configurações dos ventiladores variam de acordo com a versão do protótipo que os contêm. A versão fixa utiliza ventiladores com tensão nominal de 12 V, e a instalação mecânica deles foi realizada em série para conseguir maior pressão no fluxo do ar. Os ventiladores utilizados na versão móvel, por outro lado, têm uma tensão nominal de 5 V e foram colocados em paralelo. Suas características principais estão dispostas na Tabela 1.

C.2 SENSORIAMENTO

A etapa de sensoriamento consiste em um arranjo de sensores de gases eletroquímicos e os circuitos de condicionamento analógico ou interfaces digitais correspondentes. Os sensores utilizados nos protótipos variam da versão fixa para a móvel, mas de forma geral foram instalados sensores do tipo *screen-printed* fabricados pela SPEC Sensors LLC., e sensores da série B4 da Alphasense Ltd. Os dispositivos de transdução escolhidos são sensíveis aos poluentes regulados na Resolução CONAMA No. 491/2018: *CO*, *NO₂*, *SO₂*, *O₃*. Além desses gases, foi monitorado também o sulfeto de hidrogênio (*H₂S*) com um sensor de Alphasense. A modo de ilustração, a Figura 13 mostra os modelos SPEC DGS-CO 968-034 e Alphasense O3-B4, utilizados na medição de *CO* e *O₃*.

Figura 7 – Sensores dos fabricantes a) SPEC e b) Alphasense



A versão fixa dos instrumentos desenvolvidos contém arranjos de sensores das empresas SPEC e Alphasense. Já o equipamento móvel dispõe apenas de um arranjo de sensores da SPEC Sensors. A seguir são descritas características dos sensores de cada fabricante.

C.2.1 Sensores SPEC

Os sensores da SPEC possuem a configuração característica de três eletrodos (de trabalho, contador e de referência). A sigla SPEC provém do inglês Screen-Printed Electro-Chemical, que é a tecnologia de manufatura utilizada por esse fabricante para produzir seus sensores. Essa tecnologia possibilita fabricar sensores de gases eletroquímicos de alta performance em um encapsulamento fino e de um custo menor que os encapsulamentos mais volumosos, utilizados tradicionalmente para fabricar sensores eletroquímicos (SPEC SENSORS, 2016). A Figura 7a mostra o sensor SPEC DGS-CO 968-034, utilizado na medição de monóxido de carbono, em sua placa de condicionamento. A Tabela 2 resume as principais características dos sensores que foram utilizados dessa empresa.

C.2.2 Sensores Alphasense

Os sensores da série B4, da Alphasense, utilizam, além dos três eletrodos característicos do princípio de medição eletroquímico, um quarto eletrodo chamado de Eletrodo Auxiliar. Sua função é gerar uma corrente com um valor de intensidade muito próximo ao valor da corrente de fundo do zero (zero background current). Dessa forma é possível compensar a saída dos sensores do efeito desta corrente de zero ou de linha base. A Tabela 3 resume as principais características dos sensores que foram utilizados desse fabricante.

Tabela 2 – Especificações técnicas dos sensores SPEC

<i>Características</i>	<i>CO</i>	<i>NO₂</i>	<i>SO₂</i>	<i>O₃</i>
Modelo	DGS-CO 968-034	DGS-NO2 968-043	DGS-SO2 968-038	DGS-O3 968-042
Intervalo de medição	0 - 1000 ppm	0 - 5 ppm	0 - 20 ppm	0 - 5 ppm
Resolução	100 ppb	20 ppb	50 ppb	20 ppb
Tensão nominal	3.3 V	3.3 V	3.3 V	3.3 V
Consumo de potência	12 mW	14 mW	12 mW	14 mW
Tempo de resposta*	< 30 s	< 30 s	< 30 s	< 30 s
Temperatura de operação	-20 – 40 °C	-20 – 40 °C	-20 – 40 °C	-20 – 40 °C
Umidade relativa de operação	15 – 95 %	15 – 95 %	15 – 95 %	15 – 95 %

Tabela 3 – Especificações técnicas dos sensores Alphasense

<i>Características</i>	<i>CO</i>	<i>NO₂</i>	<i>SO₂</i>	<i>O₃</i>	<i>H₂S</i>
Modelo	CO-B4	NO ₂ -B43F	SO ₂ -B4	OX-B431	H ₂ S-B4
Intervalo de medição (ppm)	0 - 1000	0 - 20	0 - 100	0 - 20	0 - 100
Resolução (ppb)	4	15	5	15	1
Tempo de resposta (s)*	< 30	< 80	< 60	< 80	< 60
Temperatura de operação (°C)	-30 - 50	-30 - 40	-30 - 50	-30 - 40	-30 - 50
Umidade relativa de operação (%)	15 - 90	15 - 85	15 - 90	15 - 85	15 - 90

C.3 CONDICIONAMENTO

A configuração mais utilizada nos circuitos de condicionamento dos sensores eletroquímicos é o potenciómetro. Este circuito controla o potencial aplicado ao eletrodo de trabalho e converte a corrente desse eletrodo em um valor de tensão.

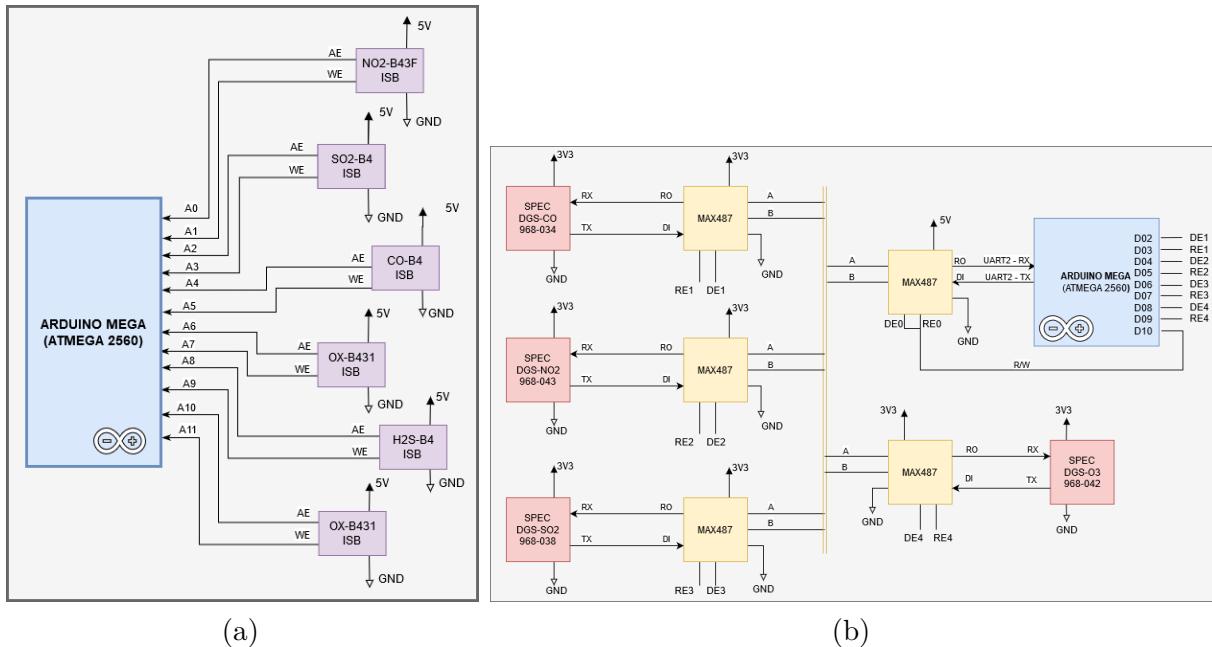
A empresa Alphasense disponibiliza para os sensores da série B4 uma placa de condicionamento chamada de *Individual Sensor Board* (ISB). Esta placa transforma o sinal de corrente de saída do sensor em um sinal de tensão proporcional ao valor de concentração do gás. A SPEC Sensors, por sua vez, disponibiliza uma placa com um microcontrolador dedicado, que condiciona a saída do transdutor e entrega o dado de concentração mediante uma interface digital serial.

C.3.1 Interface de condicionamento dos sensores Alphasense: A Placa de Sensoriamento Individual (ISB)

As placas ISB da Alphasense possuem circuitos de potenciómetro compatíveis com a família de sensores B4, de quatro eletrodos. Nesses circuitos, tanto o eletrodo de trabalho quanto o auxiliar possuem etapas de amplificação equivalentes. As tensões de saída destes dois eletrodos são disponibilizados em um conector Molex de 6 vias junto com os canais para a alimentação da placa. A tensão de alimentação das placas ISB pode ser entre 3.5 e 6.4 VDC; nos protótipos desenvolvidos foi utilizada uma tensão de 5 VDC.

O diagrama ilustrado na Figura 8a apresenta as conexões realizadas entre a plataforma Arduino e os sensores da Alphasense através das placas ISB. Percebe-se que cada conjunto composto por um sensor e seu respectivo circuito de condicionamento, ocupa

Figura 8 – Interface entre os sensores e o microcontrolador Arduino. a) Alphasense, b) SPEC



Fonte: Desenvolvido pelo autor (2023)

duas entradas analógicas do microcontrolador; uma entrada para o eletrodo auxiliar (AE) e outra para o eletrodo de trabalho (WE). No total foram utilizadas os canais analógicos A0 – A11.

C.3.2 Interface de condicionamento dos sensores SPEC

Assim como os sensores da Alphasense, os sensores da empresa SPEC também utilizam um circuito de condicionamento de potenciómetro. Na mesma placa de condicionamento, a SPEC tem incorporado um microcontrolador dedicado e sensores de temperatura e umidade. O microcontrolador converte o valor de tensão de saída do potenciómetro em um valor digital de concentração de gás, e realiza uma compensação, por software, dos efeitos da temperatura e a umidade na medição.

O kit de condicionamento SPEC funciona como uma camada de abstração no que diz respeito ao tratamento e condicionamento das informações, garantindo uma fácil integração com os sistemas de monitoramento. O dispositivo disponibiliza as informações de data e hora, o valor de concentração em ppm/ppb e as leituras de temperatura e umidade através de uma interface serial UART. De igual modo, podem ser realizadas operações como calibração, ajuste de zero e span, configuração dos sensores, e seleção de modo de operação de baixo consumo de energia, através de uma biblioteca com comandos pré definidos (SPEC SENSORS, 2017).

A Figura 8b apresenta um diagrama da conexão do arranjo de sensores da SPEC à plataforma Arduino Mega. Os sensores e o microcontrolador ATMega2560 são acoplados

a um barramento RS-485 mediante o transceptor MAX487. Esse transceptor provê uma interface entre os meios de comunicação serial UART e RS-485. O barramento RS-485 consiste basicamente em dois fios A e B que fornecem o meio físico para a transmissão de níveis de tensão que representam os dados seriais enviados pelos diferentes dispositivos. O nível do sinal transmitido através do barramento é determinado pela tensão diferencial entre os conectores A e B, independentemente da voltagem de alimentação dos dispositivos conectados. Como mostra a figura, os transceptores dos sensores são alimentados com uma tensão de 3.3 VDC, enquanto o transceptor do Arduino é alimentado pelo mesmo sinal de 5 VDC que o microcontrolador.

É possível conectar múltiplos dispositivos a um mesmo barramento RS-485 (máximo até 128), sendo necessária a ação de um controlador que determine quem acessa o meio físico a cada instante, para evitar colisões. O microcontrolador ATMega2560 realiza essa função através das saídas digitais D02 – D10. Esses sinais digitais controlam o estado das entradas RE_i e DE_i de cada MAX487, a fim de habilitar/desabilitar cada transceptor para operações de escrita/leitura.

C.4 MICROCONTROLADOR

A etapa de processamento engloba todas as funcionalidades de controle, temporização, geolocalização, aquisição dos dados dos sensores, comunicação e armazenamento dos dados. Todas essas funções são gerenciadas pelo microcontrolador ATMega2560 da Microchip, embarcado na plataforma Arduino Mega 2560. Mais detalhes sobre o firmware desenvolvido para o controle da etapa de processamento são abordados no Apêndice E. A continuação descrevem-se cada um dos módulos que compõem esta etapa.

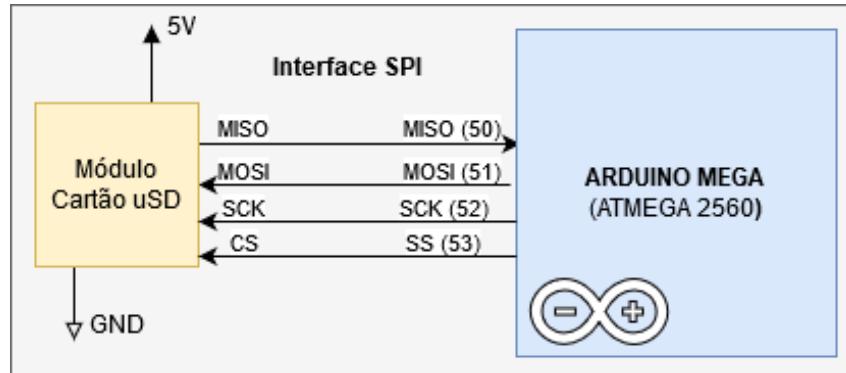
C.4.1 Armazenamento dos dados

Para o armazenamento dos dados foi utilizado um módulo para fazer leitura e escrita diretamente em um cartão micro SD. A comunicação é feita por meio de uma interface SPI, conforme se mostra na Figura 9. O nível de sinal é de 3.3V, mas o módulo possui divisores de tensão nos seus pinos que possibilitam uma ligação direta com placas que trabalham com 5 V, como o Arduino. O módulo é alimentado com uma tensão de 5 V, e suporta cartões Micro SD e Micro SDHC de alta velocidade.

C.4.2 Controle de data e hora e geolocalização

Para manter o controle da data e hora do sistema fixo, e assim acrescentar informação temporal às leituras de gases, foi utilizado o módulo de Relógio de Tempo Real (RTC) DS1307. O DS1307 é um relógio/calendário de baixo consumo de potência que utiliza um barramento I^2C bidirecional para a transferência de dados desde (e para)

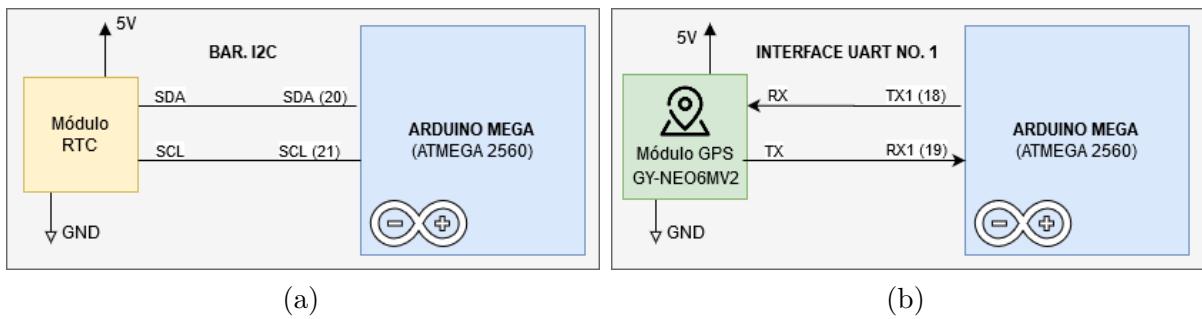
Figura 9 – Interface entre o módulo cartão micro SD e o microcontrolador



Fonte: Desenvolvido pelo autor (2023)

o microcontrolador. O relógio/calendário provê informação de segundos, minutos, horas, dia, mês e ano, incluindo ajuste automático de ano bissexto e de meses com menos de 31 dias. O DS1307 é alimentado por uma tensão de 5 V, e também possui um circuito que detecta falhas de energia e automaticamente aciona a alimentação através de uma bateria. Quando isso sucede, o relógio/calendário mantém a contagem do tempo em um modo de baixo consumo (consumo de corrente menor que 500 nA), estendendo o tempo de vida útil da bateria. A Figura 10a mostra como é realizada sua conexão ao microcontrolador no sistema desenvolvido.

Figura 10 – Interface entre o microcontrolador e os módulos a) RTC e b) GPS



Fonte: Desenvolvido pelo autor (2023)

Na versão móvel, ambos os controles da data e hora e geolocalização são realizados por um mesmo dispositivo GPS, o módulo NEO6MV2. O NEO6M é um receptor GPS de baixo consumo de potência e pequenas dimensões que o tornam uma opção interessante para dispositivos móveis. O módulo possui uma antena integrada, com precisão de aproximadamente 5 metros, e tecnologia para supressão de congestionamentos na comunicação e interferências. A conexão entre o módulo e a plataforma Arduino é realizada através de um barramento serial UART a uma taxa de transferência padrão de 9600 bauds (Figura 10b). Ele pode ser alimentado com uma tensão de 3.3 ou 5 V e seu consumo de corrente em pleno funcionamento chega a 45 mA. Seus pinos de entrada são

compatíveis com níveis de tensão TTL e suportam tensões tanto de 5 como de 3.3 V, independentemente da tensão de alimentação.

C.4.3 Comunicação Wi-Fi

Para a comunicação Wi-Fi é utilizado o módulo ESP-01. Esse módulo incorpora o sistema integrado em um único chip (SoC, System on Chip) ESP8266EX, da empresa Espressif, e uma antena embarcada com ganho de potência de 3dBi, garantindo um alcance de até 90 metros em espaços abertos. O SoC ESP8266EX integra um processador de 32 bits, o Tensilica L106, que implementa os protocolos TCP/IP e o 802.11 b/g/n WLAN MAC. Ele possui como vantagens um baixo consumo de energia atrelado a uma velocidade de clock de 80 MHz. Sua memória RAM, disponível em aplicações em que o sistema está configurado como estação é de aproximadamente 36 kB. O módulo ESP-01 disponibiliza, para armazenar o programa de usuário, uma memória FLASH de 1MB externa que pode ser acessada por um barramento SPI. O módulo disponibiliza quatro portas digitais que são utilizadas principalmente para programar a FLASH de usuário e uma porta serial UART.

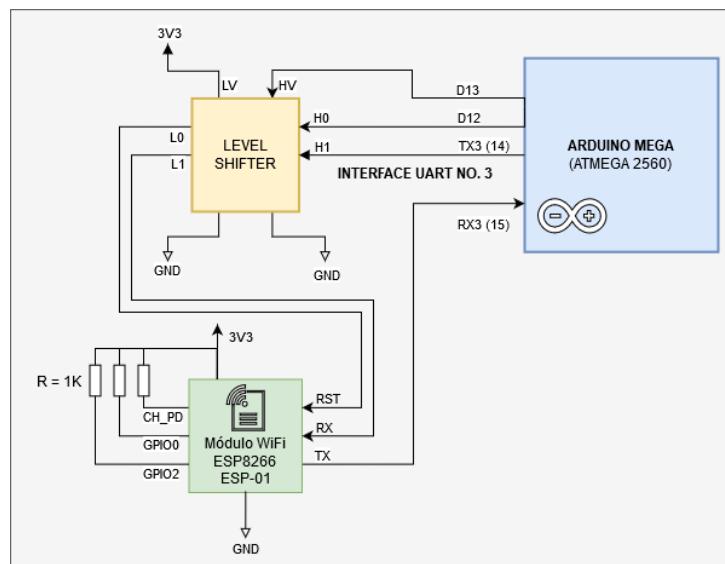


Figura 11 – Interface entre o microcontrolador e o módulo de comunicação Wi-Fi

Fonte: Desenvolvido pelo autor

A Figura 11 apresenta as conexões realizadas entre o ESP-01 e a plataforma Arduino. O módulo opera com uma tensão de 3.3 V, por esse motivo é utilizado um circuito intermediário, um elevador de nível (level shifter) para converter os níveis de tensão de 5 V para 3.3 V, e vice-versa. O pino CH_PD corresponde ao chip enable do ESP-01 e deve ser conectado a um resistor de *pull-up* de $1\text{ k}\Omega$, assim como as entradas GPIO0 e GPIO2. Essas entradas são utilizadas para configurar o ESP8266 em modo gravação (para gravar o programa de usuário) ou modo estação. A figura mostra a configuração do modo estação, com ambas entradas conectadas à 3.3 V por meio de resistores de *pull-up* de 1

$k\Omega$. O pino de entrada RST tem como função reiniciar o módulo. Como esse pino é “ativo baixo”, cada vez que uma tensão de 0 V for aplicada nessa porta o módulo será reiniciado. No circuito desenvolvido, o Arduino pode reiniciar o ESP8266 através da saída digital D12. Já a saída D13 do microcontrolador Arduino é encarregada de manter uma tensão de referência de 5 V no elevador de nível para possibilitar a conversão dos níveis de tensão.

C.5 MONTAGEM DO PROTÓTIPO FIXO

A seguir descreve-se brevemente a montagem e interligação dos elementos de hardware que compõem o protótipo de medição fixa. A Figura 12 mostra o protótipo de monitor fixo instalado em campo. O quadro externo é a caixa ambiental modelo Atlantic 352 00 da Cemar & Legrand com nível de proteção IP66.

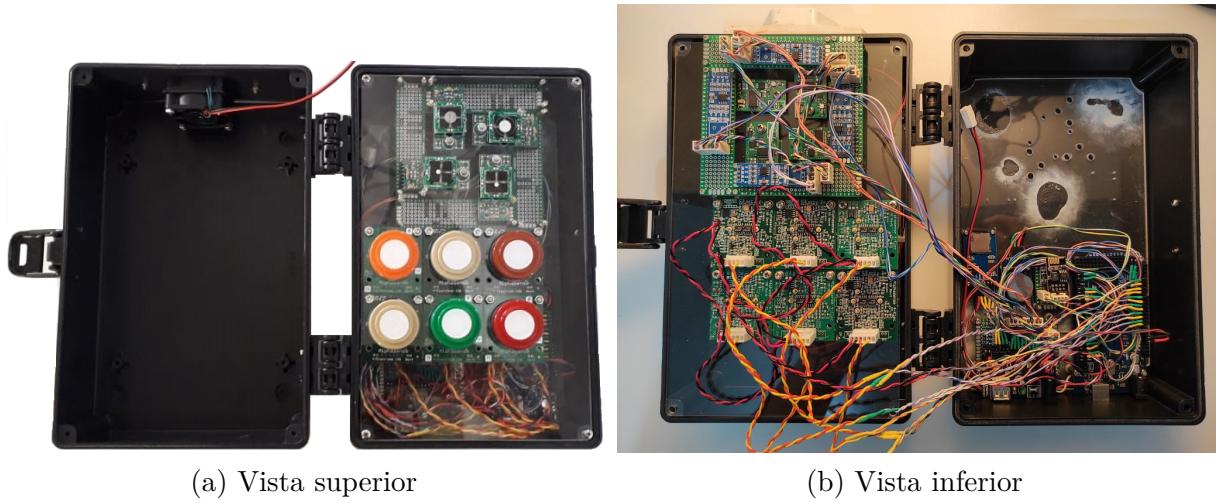
Figura 12 – Instalação em campo do protótipo fixo



As Figuras 13a e 13b mostram o módulo de sensoriamento, que é a parte fundamental de todo o sistema. Nele são contidos todos os elementos que compõem o sistema e que foram descritos anteriormente.

Um sistema de transporte de gases, composto por duas ventoinhas de 12VDC, coleta amostras do ar ambiente para dentro da câmara. A entrada é composta por uma

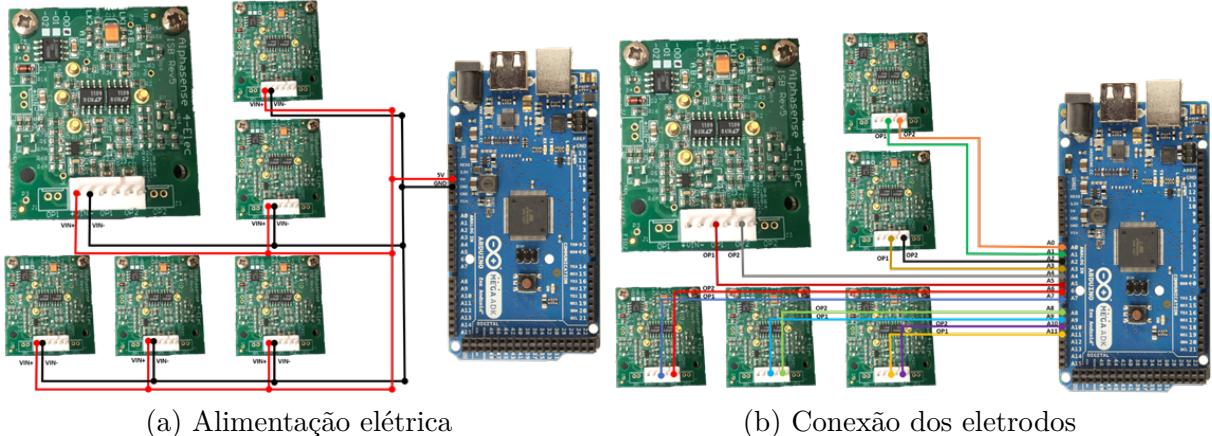
Figura 13 – Vista interior do protótipo fixo



flange de 50 mm de diâmetro (que serve para acoplar a câmara no restante do sistema de transporte de gases) e um filtro de tecido. As dimensões das ventoinhas são 40x40mm, e foram fixadas com quatro parafusos M2x30mm com porca e arruela. Dentro do volume da câmara, as superfícies dos sensores de gás interagem com os componentes gasosos e produzem um sinal de resposta proporcional à concentração do gás. A Tabela 4 resume os sensores e placas de condicionamento que foram utilizados nesssa versão do equipamento.

Uma placa de acrílico foi utilizada para fixar os sensores de maneira correta e isolá-los do hardware do fluxo de ar. As conexões elétricas para levar os sinais de saída dos sensores até o Arduino foram feitas com fios de seção 0,2mm², soldando “headers” nas pontas e isolando-as corretamente com duto termoretrátil. As Figuras 14a e 14b ilustram respectivamente diagramas de conexão da alimentação elétrica e dos eletrodos dos sensores ao Arduino.

Figura 14 – Diagrama de conexões do conjunto de sensores Alphasense



A fixação dos sensores *SPEC* na placa de acrílico mencionada anteriormente foi feita através de placas de prototipagem confeccionadas artesanalmente. Nas placas foram

Tabela 4 – Lista de sensores utilizados no protótipo fixo

Qtd.	Ítem	Descrição	Fabricante
1	CO-B4	Sensor de <i>CO</i>	Alphasense
1	H2S-B4	Sensor de <i>H₂S</i>	Alphasense
1	SO2-B4	Sensor de <i>SO₂</i>	Alphasense
1	NO-B4	Sensor de <i>NO</i>	Alphasense
1	NO2-B43F	Sensor de <i>NO₂</i>	Alphasense
1	OX-B431	Sensor de <i>O₃</i>	Alphasense
1	NH3-B1	Sensor de <i>NH₃</i>	Alphasense
3	CO/H2S/SO2 4-electrodes ISB	Placa de condicionamento para sensores da série B4 que medem <i>CO</i> , <i>H₂S</i> e <i>SO₂</i>	Alphasense
1	NO 4-electrodes ISB	Placa de condicionamento para sensores da série B4 que medem <i>NO</i>	Alphasense
1	NO2/O3 4-electrodes ISB	Placa de condicionamento para sensores da série B4 que medem <i>NO₂</i> e <i>O₃</i>	Alphasense
1	NH3 4-electrodes ISB	Placa de condicionamento para sensores da série B4 que medem <i>NH₃</i>	Alphasense
1	DGS-O3-968-042_9-6-17	Sensor de <i>O₃</i> para IoT	SPEC Sensors
1	DGS-SO2-968-038	Sensor de <i>SO₂</i> para IoT	SPEC Sensors
1	DGS-NO2-968-043-9-6-17	Sensor de <i>NO₂</i> para IoT	SPEC Sensors
1	DGS-CO-968-034	Sensor de <i>CO</i> para IoT	SPEC Sensors

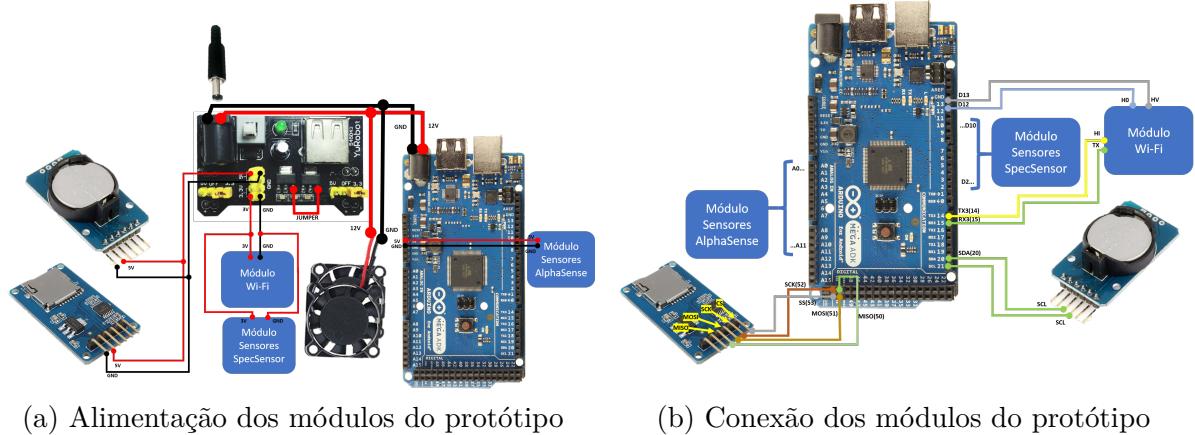
soldados “headers” fêmeas encima dos quais os sensores foram montados. Nas placas também foram instalados os transceptores MAX487 que criam o barramento RS-485 para a conexão serial com o microcontrolador da placa Arduino. As placas são conectadas ao barramento através de fios e conectores do tipo MOLEX. As placas de prototipagem com os sensores foram fixadas diretamente à placa de acrílico com espaçadores M2.

Após a montagem do conjunto de sensores e prefixação dos componentes eletrônicos da câmara de medição, foi realizada a ligação elétrica de alimentação e comunicação de todos os componentes envolvidos no sistema. O diagrama de alimentação é mostrado na Figura 15a. Vale salientar que a alimentação da placa Arduino foi feita diretamente com 12V com fios soldados no conector P2 de entrada. Já a conexão do restante dos módulos com a placa Arduino é ilustrada na Figura 15b.

C.6 MONTAGEM DO PROTÓTIPO MÓVEL

O equipamento mede poluentes da legislação ambiental brasileira (BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA), 2018) que são: *CO*, *NO₂*, *SO₂*, *O₃* e *H₂S*. Para isso utiliza um

Figura 15 – Diagrama de conexões do conjunto de sensores Alphasense



conjunto de quatro sensores do fabricante SPEC Sensor que contemplam a medição desse poluentes. O controle da estação de monitoramento, armazenamento e envio de dados é baseado na plataforma Arduino Mega 2560, que utiliza o microcontrolador ATMega2560 da Microchip. Para operar com sucesso, o sistema inclui: módulo Wi-Fi, módulo de cartão SD, módulo GPS e indicadores LED operacionais.

APÊNDICE D – A PLACA CLEAN ARDUINO MEGA

A continuação são descritos os principais módulos que compõem a placa CLEAN Arduino Mega e os protótipos desenvolvidos. A Tabela 5 mostra os principais componentes de hardware utilizados sem considerar os sensores.

D.1 MÓDULO DE SENSORIAMENTO

D.1.1 Sensores

Nos sistemas desenvolvidos foram utilizados sensores de gases eletroquímicos dos fabricantes *SPEC Sensors* e *Alphasense*.

D.1.1.1 Sensores SPEC.

Os sensores da *SPEC* são sensores amperométricos, constituídos por células eletroquímicas (veja Apêndice B) de três eletrodos, i.e.: eletrodos de trabalho, de referência e eletrodo contador. *SPEC* significa *Screen-Printed Electrochemical*, que é a tecnologia utilizada para a fabricação dos sensores, reduzindo seus custos e dimensões, e ainda mantendo um alto desempenho (*SPEC SENSORS*, 2016).

D.1.1.2 Sensores Alphasense.

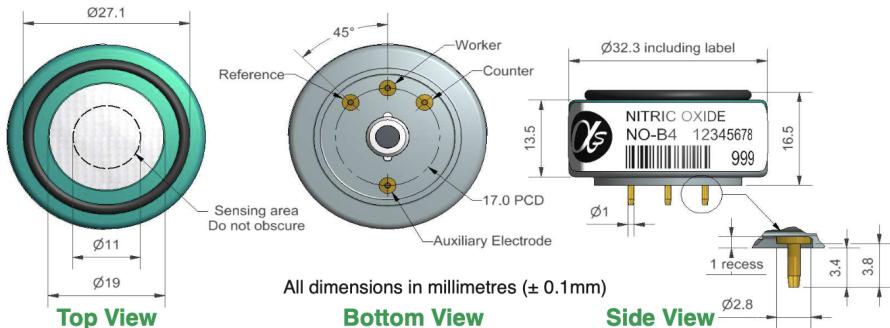
Alphasense fabrica sensores eletroquímicos amperométricos. Especificamente, os sensores da série B4 foram selecionados para os monitores desenvolvidos, já que são indicados pelo fabricante para a medição de baixas concentrações de gases. Estes sensores incorporam um quarto eletrodo, denominado eletrodo auxiliar, que compensa os efeitos da temperatura e da umidade relativa nas leituras dos sensores (BARON; SAFFELL, 2017). A Figura 16 ilustra um sensor Alphasense da série B4, suas dimensões e disposição dos eletrodos. Para mais informações sobre os efeitos das variáveis ambientais nas respostas dos sensores, confira a nota de aplicação AAN 110 da Alphasense. Para informações adicionais sobre os sensores da série B4 da Alphasense, como especificações elétricas, dimensões e pinagem, consulte as fichas técnicas dos modelos de sensores listados na Tabela 1.

Sensores eletroquímicos amperométricos produzem uma corrente de saída que é proporcional à concentração do gás. Para ler este sinal elétrico com um sistema de aquisição de dados, a corrente de saída deve ser transformada em um sinal de tensão. Para isso, o circuito mais utilizado é o potenciómetro. *Alphasense* e *SPEC* fornecem placas de circuito potenciómetro para acoplar facilmente seus sensores a um sistema de monitoramento.

Tabela 5 – Principais componentes utilizados nos dispositivos CLEAN

Item	Descrição	Modelo e fabricante
Arduino Mega 2560	Placa microcontroladora baseada no microcontrolador Microchip ATmega2560	Arduino MEGA 2560 Rev3, de Arduino
DS3231 RTC	Relógio em tempo real (RTC) I2C com oscilador de cristal compensado por temperatura integrado	DS3231, by Maxim Integrated
Soquete micro SD	Soquete TF / micro SD tipo PUSH-PUSH	KLS1-TF-007, da KLS Electronic
Buffer CI 74XX125	Portas de buffer de barramento quádruplas com saídas de 3 estados para buffer de pinos de cartão micro SD	74HC125, da Texas Instruments
Cartão MicroSD	Cartão Micro SD Classe 10 de 16 GB	microSDHC SanDisk Ultra, da SanDisk
Módulo GPS	Módulo GPS NEO-6M c/ antena	GY-GPS6MV2, por u-blox
Módulo GPRS	Shield Arduino - GSM GPRS SIM900 com antena Quad Band	SIM900, da SIMCom
Módulo Wi-Fi	Módulo serial Wi-Fi ESP-01 ESP8266	ESP8266, da Expressif
Sensor BMP280	Sensor digital de temperatura e pressão BMP280 I2C	BMP280, da Bosch Sensortec
Sensor SHT20	Sensor de umidade e temperatura SHT20 I2C	SHT20, por Sensirion
MAX487	Transceptor RS-485 MAX487 Baixa potência, taxa de variação limitada	MAX487, da Maxim Integrated

Figura 16 – Sensor de Monôxido de Nitrogênio Alphasense da série B4



Fonte: (ALPHASENSE, 2019).

D.1.1.3 Interface de condicionamento de sensores SPEC

Os sensores digitais para IoT fornecidos pela SPEC são compostos por um transdutor eletroquímico montado em uma placa com um circuito potencioscato, que converte a saída do sensor (corrente elétrica) a tensão. Os sensores incorporam também um microcontrolador e um sensor de temperatura e umidade relativa. O microcontrolador adquire o sinal de tensão do potencioscato como valores de concentração de gás e realiza uma compensação em software para reduzir os efeitos da temperatura e a umidade relativa nas leituras do sensor. Os valores de concentração, temperatura e umidade relativa são transmitidos através de uma interface UART seguindo um protocolo serial definido pelo fabricante. Esta placa de condicionamento atua como uma camada de abstração para condicionamento de sinal que permite a fácil integração dos sensores a qualquer sistema de monitoramento. Para obter mais informações sobre os sensores SPEC, como especificações elétricas, dimensões, pinagem e protocolo serial, verifique as fichas técnicas dos sensores (Tabela 1) e do kit de desenvolvimento do sensor de gás digital 968-045 (REF).

D.1.1.4 Interface de condicionamento de sensores Alphasense

A Alphasense fornece placas de sensores individuais para seus sensores de gás de 4 eletrodos da série B4 (REF). Essas placas incorporam circuitos potencioscatos equivalentes para os eletrodos de trabalho e auxiliar. As saídas de cada canal do potencioscato foram conectadas às entradas analógicas do microcontrolador Arduino MEGA, conforme mostrado na Figura A.3. Os sinais AE e WE representam os sinais correspondentes ao eletrodo auxiliar e de trabalho respectivamente. Seis sensores foram utilizados no protótipo, sendo utilizadas assim doze entradas analógicas do microcontrolador (A0 – A11). Cada módulo ISB foi alimentado com uma tensão de 5 V. Para obter mais detalhes sobre a montagem e conexão dos sensores Alphasense, consulte o Guia de montagem de sensores Alphasense.

D.2 O MICROCONTROLADOR

O microcontrolador Arduino MEGA 2560 coordena as tarefas associadas à aquisição e armazenamento de dados, temporização, geolocalização e comunicação. O firmware para este protótipo está disponível no repositório de firmware. Para obter detalhes sobre a estrutura do firmware e bibliotecas de firmware, consulte a documentação do firmware.

D.2.1 Armazenamento dos dados

Para armazenamento dos dados foi utilizado um módulo micro SD conectado ao microcontrolador através de uma Interface Periférica Serial (SPI). O cartão micro SD funciona com 3.3 V, mas o módulo inclui buffers e um regulador de tensão que permite conexão direta ao Arduino SPI e fonte de alimentação de 5 V, conforme mostra a figura 6.

D.2.2 Relógio de tempo real

Para monitorar a data e a hora de forma contínua foi utilizado o módulo DS1307 Real-Time Clock (RTC). Este módulo é um relógio/calendário de baixo consumo de energia que fornece informações sobre segundos, minutos, horas, dia, data, mês e ano (REF). A data do final do mês é ajustada automaticamente para meses com menos de 31 dias, incluindo correções para anos bissextos. O DS1307 possui um circuito sensor de energia integrado que detecta falhas de energia e alterna automaticamente para a fonte de backup por meio de uma bateria. A operação de cronometragem continua enquanto a peça opera no modo de baixo consumo de energia da fonte de reserva. O módulo se conecta ao Arduino MEGA através da interface I2C e é alimentado com 5V, conforme mostra a figura 7.

D.2.3 Comunicação Wi-Fi

Para a comunicação Wi-Fi foi utilizado o módulo ESP-01 (Figura 8). Este módulo incorpora o microcontrolador ESP8266 junto com uma antena embarcada com ganho de potência de 3dBi e alcance de até 90 m. O ESP8266 é um System on Chip (SoC), fabricado pela Espressif Systems, que integra o microprocessador Tensilica L106 de 32 bits e implementa os protocolos TCP/IP e 802.11 b/g/n WLAN MAC (REF). O ESP-01 também incorpora uma memória flash de 512 kB para programação, que é acessível ao ESP8266 via SPI. Ele também possui oito pinos que são utilizados para alimentação, conexão à porta serial do ESP8266 e conexão aos quatro GPIOs do ESP8266, conforme mostrado na Figura 8. Para mais detalhes sobre a pinagem do ESP-01 e como programar e conectar este módulo para o Arduino MEGA, consulte o Guia de programação do módulo ESP-01. Uma descrição do firmware que desenvolvemos para o microcontrolador ESP8266 pode ser encontrada em The ESP8266 Firmware.

O módulo ESP-01 fornece a conexão a uma rede Wi-Fi para o Arduino MEGA. Conforme mostrado na Figura 9, um circuito de mudança de nível é necessário para fazer a interface com os pinos do Arduino como resultado das diferentes tensões de operação das placas. A comunicação entre os microcontroladores ATMega2560 e ESP8266 é implementada através de uma interface UART (UART3 na placa Arduino), seguindo um protocolo de comunicação que é descrito detalhadamente no Guia de Programação do Módulo ESP-01. O Arduino atua como mestre do ESP8266, cuja única iniciativa é estabelecer conexão com a Internet. Uma vez estabelecida a conexão, o Arduino pode enviar comandos para criar posts HTTP, obter o horário da internet ou obter as coordenadas de geolocalização do Google; para obter mais detalhes, consulte o Guia de programação do módulo ESP-01. O microcontrolador Arduino também pode redefinir o ESP8266 através do pino D12 GPIO.

APÊNDICE E – O *FIRMWARE CLEAN*

O *firmware* dos dispositivos foi desenvolvido para o microcontrolador Microchip ATMega2560 embarcado em uma plataforma Arduino Mega. O código foi implementado na linguagem de programação C/C++ utilizando o *framework* de Arduino, disponível na IDE PlatformIO para o editor de código Microsoft Visual Studio (VSCode).

Para a programação de todas as funcionalidades do *firmware*, o código foi estruturado em um conjunto de classes. Essa estrutura foi concebida visando seu reaproveitamento em outros microcontroladores suportados no Framework Arduino, como o ESP8266 da Espressif, e também para facilitar a revisão e manutenção do código. As classes desenvolvidas para o projeto estão distribuídas em três pacotes de bibliotecas, mostrados na Figura ???: o pacote *IoT*, o pacote *Data* e o pacote *Hardware Interfaces*.

O pacote *IoT* encapsula os processos associados à conexão na rede Wi-Fi, comunicação com o servidor e envio de dados pelo protocolo *HTTP*. Já o pacote *Data* engloba todas as funcionalidades relacionadas à preparação dos dados dos sensores para seu armazenamento e transmissão. Este pacote permite abstrair as informações de concentração adquiridos pelos sensores de gases, de detalhes específicos sobre o funcionamento e operação do hardware destes sensores. Ele atua como uma camada intermediária entre as tarefas de aquisição, e as de armazenamento e transmissão dos dados. Por último, o pacote *Hardware Interfaces* agrupa as classes e estruturas utilizadas para interfacear todo o hardware periférico ao microcontrolador utilizado, como sensores, módulos de temporização, módulos de geolocalização e módulos de armazenamento.

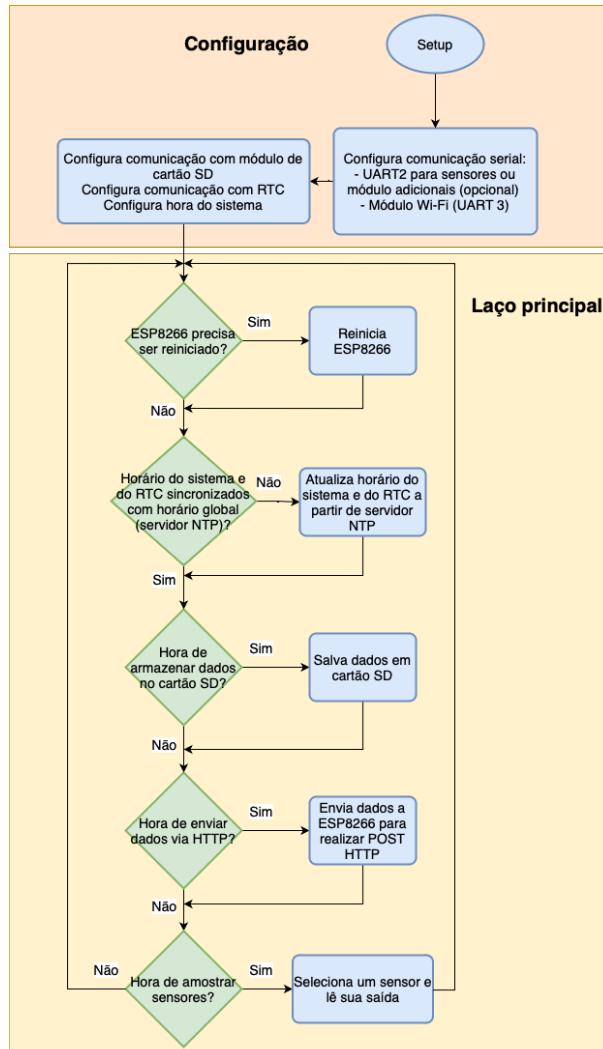
E.1 CÓDIGO CLEAN ARDUINO MEGA

O código consiste em duas partes: uma para configuração (*setup*) e outra para o laço (*loop*) de execução principal. A versão atual do código possui quatro funcionalidades principais que estão de acordo com o hardware do monitor, sendo elas:

1. Amostragem, ou leitura das saídas dos sensores
2. Armazenamento das informações de concentração de gás em um cartão SD
3. Envio dos dados dos sensores para o servidor Renovar através do microcontrolador ESP8266
4. Leitura das coordenadas geográficas do local onde ocorre cada leitura

A Figura 17 mostra um fluxograma do código programado para o ATMega2560. Como acontece com todo programa do Arduino Framework, o código é executado em duas funções principais: `setup()` e `loop()`. Na versão atual do firmware, o `setup` prepara a comunicação entre os módulos externos (i.e.: RTC, Wi-Fi, cartão de memória e sensores

Figura 17 – Fluxograma do firmware programado para o microcontrolador Arduino MEGA



Fonte: Desenvolvido pelo autor (2023)

seriais) e o microcontrolador. A função `loop()` verifica se o ESP8266 não responde há algum tempo, e, se for o caso, é enviado um sinal RESET para o ESP8266. O resto da função está dividido em quatro seções que são executadas periodicamente e controlam as funcionalidades mencionadas.

O firmware inclui mais uma funcionalidade que está separada do fluxo principal do programa: a função `serialEvent3()` que trata os eventos de interrupção da porta serial UART3. Ela é executada cada vez que novos dados são recebidos no buffer dessa interface de hardware que estabelece a comunicação entre o Arduino Mega e o microcontrolador ESP8266. A seguir, são descritas as diferentes seções do código.

E.1.1 Identificação do dispositivo e seus sensores

Uma parte crucial do firmware é a identificação do dispositivo e dos sensores conectados a ele. Essas identificações deverão corresponder às que tenham sido previamente configuradas no servidor da aplicação Web Renovar, já que serão utilizadas pela aplicação backend para atualizar o banco de dados. A definição do dispositivo é feita na seguinte linha:

```
unsigned long Device::id = <THE NUMBER OF YOUR DEVICE>;
```

Depois disso, devem ser definidos os IDs dos sensores, de forma que cada um deles represente uma variável na aplicação Renovar. O código da Lista E.1.1 exemplifica a definição dos identificadores de 6 sensores previamente registrados na aplicação Renovar.

Listing E.1 – Definição dos identificadores dos sensores de um dispositivo

```
enum iotId_e {
    // The ID of the CO gas concentration read from a sensor
    CO_ID      = 156,
    // The ID of the NO2 gas concentration read from a sensor
    NO2_ID     = 157,
    // The ID of the O3 gas concentration read from a sensor
    O3_ID      = 158,
    // The ID of the SO2 gas concentration read from a sensor
    SO2_ID     = 159,
    // The ID of the temperature variable
    TEMP_ID    = 160,
    // The ID of the relative humidity variable
    RHUM_ID    = 161
};
```

E.1.2 Configuração: a função setup()

A função `setup()` prepara a comunicação entre os módulos externos e o microcontrolador. O código desta função é mostrado na Lista E.1.2. Primeiramente o programa configura as portas seriais que serão utilizadas para comunicação com os sensores seriais utilizando uma interface RS-458 (RS485_2) e ESP8266 (Serial3). Cada porta serial é inicializada a uma taxa de transmissão previamente definida no código, conforme será descrito posteriormente. A porta serial UART0 (Serial) é usada para depuração. O RS485_2 implementa uma interface serial ao barramento RS485 que conecta os sensores ao microcontrolador. A função também reinicia o microcontrolador ESP8266 através do objeto `espIoT`, inicializa as interfaces para o cartão SD e módulos RTC e define a hora do sistema. A continuação são descritos os objetos, constantes e funções usados nesta parte do código.

Listing E.2 – Definição dos identificadores dos sensores de um dispositivo

```

void setup ()
{
    Serial . begin (9600);
#ifndef FIXED_DEVICE
    Serial1 . begin (GPSBaud);
#endif
    Serial3 . begin (9600UL);

    pinMode (13 , OUTPUT);
    digitalWrite (13 , HIGH);

    espIoT . restart ();

    SD . begin (CHIPSEL_PIN);

    Rtc . Begin ();
    if (!Rtc . GetIsRunning ())
    {
        Rtc . SetIsRunning (true);
    }
#ifndef DS3231
    Rtc . Enable32kHzPin (false);
    Rtc . SetSquareWavePin (DS3231SquareWavePin_ModeNone);
#endif
    time_t now = Rtc . GetDateTime () . Epoch32Time ();
    setSyncProvider (sync_time);
    setSyncInterval (5*SECS_PER_MIN);
    TimeDriver :: config (TIMEZONE_SEC);
    SHT20 . initSHT20 ();
    BMP280 . begin (BMP280_ADDRESS_ALT, BMP280_CHIPID);
    Alpha_OPc . begin ();
#ifndef FIXED_DEVICE
    GPSDriver :: set_coordinates (true,
                                DeviceFixedLocation :: LATITUDE,
                                DeviceFixedLocation :: LONGITUDE,
                                DeviceFixedLocation :: ALTITUDE);
#endif
    mLastTime = millis ();
}

```

```

mLastTimeGPS = mLastTime;
mLastTimeSD = mLastTime;
mLastTimeHTTP = mLastTime;
}

```

E.1.2.1 Serial, Serial1, Serial3

Esses objetos, declarados no *framework* Arduino, representam as portas UART do microcontrolador. Os objetos são inicializados pela função `begin()`, que recebe a taxa de transmissão da comunicação serial. O objeto `Serial` representa a porta serial `UART0` que é usada para depuração do programa. Já os objetos `Serial1` e `Serial3`, que representam as portas seriais `UART1` e `UART3` do Arduino Mega, são utilizadas para comunicação com o módulo GPS e o microcontrolador `ESP8266` respectivamente.

A variável `GPSBaud` é uma constante que define a velocidade em *bits* por segundo da comunicação serial entre o microcontrolador `ATMega` do Arduino e o módulo GPS. O valor predeterminado é 9600 baúdios, definido na biblioteca `serial-geo-interface`, mas pode ser redefinido segundo a aplicação.

E.1.2.2 espIoT

Este é um objeto da classe `ESPSerialInterface` definido na biblioteca `serial-internet-interface`. Este objeto controla a comunicação com o `ESP8266` conectado ao `UART3` do Arduino. A função `restart()` envia um sinal de *RESET* para o `ESP8266`. O objeto `espIoT` é definido no código da seguinte forma: `ESPSerialInterface espIoT(&Serial3);`

E.1.2.3 SD

Este é um objeto do `SDClass` declarado no núcleo do Arduino para interfacear módulos de cartão SD. Ele é inicializado com um método `begin()` que recebe o pino digital que se conecta ao pino CS do módulo. O pino digital utilizado para a versão atual do hardware e firmware é definido no arquivo `hardstorage.h` da seguinte forma: `#define CHIPSEL_PIN 53`

E.1.2.4 Rtc

Este é um objeto da classe `RtcDS3231` definida na biblioteca `Rtc` de Makuna. O objeto `Rtc` é declarado da seguinte forma:

```

#define I2C Wire
RtcDS3231<TwoWire> Rtc(I2C);

```

A instância `Rtc` é inicializada com a função `begin()` e posteriormente o código verifica se o módulo está funcionando por meio de uma chamada ao método `GetIsRunning()`. Caso não esteja rodando, o código chama o método `SetIsRunning(true)`. Caso o módulo RTC DS3231 tenha sido configurado incorretamente, o código também redefine seu status através do seguinte código:

```
#ifdef DS3231
    Rtc.Enable32kHzPin(false);
    Rtc.SetSquareWavePin(DS3231SquareWavePin_ModeNone);
#endif
```

A chamada ao método `Rtc.GetDateTime().Epoch32Time()` da classe `RtcDS3231` obtém a hora atual do módulo RTC no formato UNIX. Já os métodos `setSyncProvider(getExternalTime getTimeFunction)` e `setSyncInterval(time_t interval)` são funções da biblioteca `Time` que permitem a sincronização automática da hora do sistema com uma fonte de relógio determinada. Neste caso, a fonte utilizada para sincronização é o módulo RTC. A função `setSyncProvider()` recebe um ponteiro para uma função que retorna a data e hora atual como uma variável de tipo `time_t`. Neste caso, a função que é passada como ponteiro é `sync_time()`, declarada anteriormente no código conforme mostrado abaixo:

```
RtcDS3231<TwoWire> Rtc(I2C);
RTCDS3231Interface My_RTCInterface(&Rtc);
time_t sync_time() {
    return RTCDriver<RtcDS3231<TwoWire>>::
        sync_time_from_RTC(&My_RTCInterface);
}
```

A função `setSyncInterval()` recebe o período de sincronização da hora do sistema, que neste caso foi definido como 5 segundos.

E.1.3 Interrupção Serial3

O código da função que trata a interrupção do UART3 é mostrado na Lista E.1.3. Cada vez que os dados estiverem disponíveis no *buffer* de entrada da porta serial, o objeto `espIoT` irá analisar a cadeia de caracteres recebida.

Listing E.3 – Código para tratamento da interrupção da porta serial UART3

```
void serialEvent3() {
    if(Serial3.available()) {
        String buffer = Serial3.readStringUntil(';' );
        Serial3.flush();
        espIoT.parse_esp_string(buffer);
```

```

    }
}
```

E.1.4 Laço principal do programa: a função loop()

A sequência de instruções do programa da placa CLEAN Arduino Mega é executado dentro de um laço infinito definido na função `loop()` do *Framework* Arduino. Esta função é responsável por tratar quatro funcionalidades que foram mencionadas anteriormente, i.e.: amostragem, armazenamento, envio de dados e geolocalização. A Lista E.1.4 mostra o código da função `loop()`.

Listing E.4 – Código do laço de execução do programa

```

void loop()
{
    static bool sd_ok = false;

    espIoT.watch_dog();

    if (( ! TimeDriver :: _already_up_to_date ()) ) espIoT.request_time ();
    if (( ! My_RTCInterface .is_up_to_date () ))
        RTCDriver<RtcDS3231<TwoWire>>::update_rtc(&My_RTCInterface , now ());

    // /*
    if (( millis () - mLastTime) >= SAMPLE_ITERATION_PERIOD_MS)
    {
        mLastTime = millis ();
        static uint8_t index = 0;
        Vars [index]→smooth( sensors [index]→read ());
        index = (index >= numSensors - 1) ? 0 : index + 1;
    }
    // */

    // /*
    if (( millis () - mLasteuSD) >= uSD_TIME_MSEC)
    {
        mLasteuSD = millis ();
        static uint8_t data_index_uSD = 0;
        Vars [data_index_uSD]→sense(&data );
```

```

char* filename = (char*)malloc(strlen_P(
    filenames [data_index_uSD])+1);
strcpy_P(filename , filenames [data_index_uSD]);
if(open_file(filename))
    sd_ok = save_to_file(&data , filename );
else SD.begin(CHIPSEL_PIN);
free( filename );

data_index_uSD = (data_index_uSD >= numSensors-1) ? 0 :
    data_index_uSD + 1;
}

// */

if(( millis () - mLastTimeHTTP) >= HTTP_TIME_MSEC)
{
    mLastTimeHTTP = millis ();
    static uint8_t data_index_iot = 0;

    Vars [data_index_iot]->sense(&data );
    readings [0] = &data ;
    if (!espIoT.send_http_post(&data)) print_debug("Couldn't post!");
    data_index_iot = (data_index_iot >= numSensors-1) ? 0 :
        data_index_iot + 1;
}

// */

if(( millis () - mLastTimeGPS) >= MSECS_GPSOUTDATE)
{
    static uint8_t gps_tries = 0;
    print_debug(" [MAIN] GPS");
    mLastTimeGPS = millis ();
    if (!gps.read_gps(MSECS_GPSOUTDATE/2))
    {
        if (gps_tries++ > 7)
        {
            GPSDriver::set_coordinates(true,
                DeviceDefaultLocation::LATITUDE,

```

```

        DeviceDefaultLocation ::LONGITUDE,
        DeviceDefaultLocation ::ALTITUDE);
    gps_tries = 8;
}
}
else {
    gps_tries = 0;
}
//
}
}

```

As quatro funcionalidades principais que o código executa periodicamente são controladas pelas variáveis `mLastTime`, `mLastTimeGPS`, `mLastTimeuSD` e `mLastTimeHTTP`, que armazenam a marca o instante de tempo em que cada funcionalidade é executada. As constantes `uSD_TIME_MSEC`, `HTTP_TIME_SEC`, `SAMPLE_ITERATION_PERIOD_MS` e `MSECS_GPSOUTDATE` representam os períodos em que cada funcionalidade deve ser executada, conforme está resumido na Tabela 6. Em cada ciclo do laço, o objeto `espIoT` chama ao método `watch_dog()` para verificar se existe alguma solicitação enviada ao ESP8266 cujo tempo de espera tenha expirado. Caso isso aconteça, o ESP8266 será reiniciado. A função `loop()` também verifica se o microcontrolador atualizou seu horário a partir de um servidor de data e hora da Internet, caso contrário, uma solicitação é enviada ao ESP8266 para retornar o horário atual da Internet.

Tabela 6 – Constantes e variáveis utilizadas para controlar a execução de cada funcionalidade no firmware

Funcionalidade	Período	Constante definida no código	Variável de controle
Amostragem	6 segundos	<code>SAMPLE_ITERATION_PERIOD_MS</code>	<code>mLastTime</code>
Armazenamento	60 segundos	<code>uSD_TIME_MSEC</code>	<code>mLastTimeuSD</code>
Envio de dados	60 segundos	<code>HTTP_TIME_MSEC</code>	<code>mLastTimeHTTP</code>
Geolocalização	70 segundos	<code>MSECS_GPSOUTDATE</code>	<code>mLastTimeGPS</code>

Fonte: Desenvolvido pelo autor (2023)

O código também verifica se o módulo RTC foi atualizado com o horário da internet. Caso contrário, ele chama o método `update_rtc()` da classe `RTCDriver`. Esta classe é um *template* para controlar as funcionalidades relacionadas a um módulo RTC genérico, como atualizar seu horário, por exemplo. O método `update_rtc()` recebe um ponteiro para uma instância da classe `RTCInterface`, que cria uma interface para o hardware de

qualquer módulo RTC. `RTCInterface` é uma classe abstrata, portanto, para instanciar essa interface em um módulo RTC, uma classe concreta deve ser herdada dele. No presente caso, esta instância foi implementada no objeto `My_RTCInterface`, declarado previamente no código conforme mostrado abaixo.

```
class RTCDS3231Interface : public RTCInterface<RtcDS3231<TwoWire>>
{
public:
    RTCDS3231Interface( RtcDS3231<TwoWire>* rtc ) :
        RTCInterface<RtcDS3231<TwoWire>>( rtc ) {}

    virtual void set_time( time_t t ) {
        RtcDateTime dt;
        dt.InitWithEpoch32Time( t );
        _rtc->SetDateTime( dt );
    }

    virtual time_t get_time() {
        return _rtc->GetDateTime().Epoch32Time();
    }
};

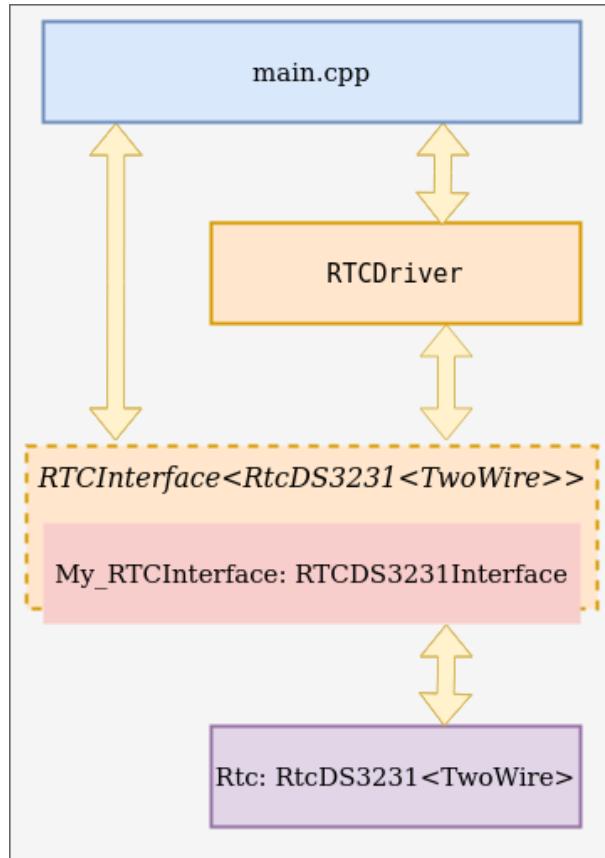
#define I2C Wire
RtcDS3231<TwoWire> Rtc( I2C );
RTCDS3231Interface My_RTCInterface(&Rtc);
```

Como pode ser observado, a classe `RTCDS3231Interface` herda de `RTCInterface`. Quando o objeto daquela classe é declarado, ele recebe em seu construtor uma referência a um objeto `rtc`, que neste caso representa o próprio módulo DS3231. Resumindo, o objeto `rtc` representa o módulo DS3231; o objeto `My_RTCInterface` implementa a interface entre o módulo RTC e o código principal; e a classe `RTCDriver` controla as funcionalidades do módulo dentro do código. Essa relação é representada no diagrama da Figura 18.

E.1.4.1 Leitura dos sensores

A seção do código que lê os sensores de gás é mostrada na Lista E.1.4.1. O código primeiro verifica se o tempo de leitura dos sensores já passou e atualiza a variável `mLastTime`. Esta seção do código basicamente itera entre as listas `Vars` e `sensors` para obter a leitura de cada sensor e atribuir a variável correspondente. A lista `sensors` contém todos os sensores conectados na placa CLEAN, já a lista `Vars` contém as variáveis que cada sensor representa; um representa a camada de *hardware* enquanto o outro representa

Figura 18 – Módulos e interfaces usados para controle e interface do RTC



Fonte: Desenvolvido pelo autor (2023)

uma camada de mais alto nível dos dados, as variáveis físicas. Dessa forma a informação de mais baixo nível contida no sinal de saída dos sensores é transportada para camadas de dados superiores que possibilita seu armazenamento e transmissão remota. Na Lista E.1.4.1 ilustra-se o código que implementa cada uma das listas.

Listing E.5 – Código para leitura dos sensores

```

if (( millis () - mLastTime) >= SAMPLE_ITERATION_PERIOD_MS)
{
    mLastTime = millis ();
    static uint8_t index = 0;
    Vars [index]→smooth( sensors [index]→read ());
    index = (index >= numSensors - 1) ? 0 : index + 1;
}
  
```

Listing E.6 – Declaração das listas de sensores e variáveis

```

Sensor* sensors [numSensors] =
{
    ( SensorInterface<Adafruit_BMP280>*&)IntTempSensor ,
  
```

```

( SensorInterface<Adafruit_BMP280>*)&IntPresSensor ,
( SensorInterface<AlphaSenseCompensator>)
    (new AlphaSenseCompensatorSensor(&Alpha_COComp)) ,
( SensorInterface<AlphaSenseCompensator>)
    (new AlphaSenseCompensatorSensor(&Alpha_NO2Comp)) ,
( SensorInterface<AlphaSenseCompensator>)
    (new AlphaSenseCompensatorSensor(&Alpha_SO2_1_Comp)) ,
( SensorInterface<AlphaSenseCompensator>)
    (new AlphaSenseCompensatorSensor(&Alpha_O3_1_Comp)) ,
( SensorInterface<AlphaSenseCompensator>)
    (new AlphaSenseCompensatorSensor(&Alpha_O3_2_Comp)) ,
( SensorInterface<AlphaSenseCompensator>)
    (new AlphaSenseCompensatorSensor(&Alpha_SO2_2_Comp)) ,
( SensorInterface<DFRobot_SHT20>*)&ExtTempSensor ,
( SensorInterface<DFRobot_SHT20>*)&ExtHumSensor ,
( SensorInterface<AlphasenseOPC>)*(new
    AlphaSenseOPCPM10Sensor(&Alpha_OPc)) ,
( SensorInterface<AlphasenseOPC>)*(new
    AlphaSenseOPCPM2_5Sensor(&Alpha_OPc)) ,
( SensorInterface<AlphasenseOPC>)*(new
    AlphaSenseOPCPM1Sensor(&Alpha_OPc)) ,
( SensorInterface<AlphasenseOPC>)*(new
    AlphaSenseOPCTempSensor(&Alpha_OPc)) ,
( SensorInterface<AlphasenseOPC>)*(new
    AlphaSenseOPCHumSensor(&Alpha_OPc)) )
};

Variable* Vars [ numSensors ] =
{
    new Temperature(TEMPERATURE_ID, SI_TEMP_Celsius, BUFFER_SIZE) ,
    new Pressure(PRESSURE_ID, SI_PRES_Pascal, BUFFER_SIZE) ,
    new GasConcentration(ALPHA_CO_ID, SI_CONC_ppb, BUFFER_SIZE) ,
    new GasConcentration(ALPHA_NO2_ID, SI_CONC_ppb, BUFFER_SIZE) ,
    new GasConcentration(ALPHA_SO2_1_ID, SI_CONC_ppb, BUFFER_SIZE) ,
    new GasConcentration(ALPHA_OX_1_ID, SI_CONC_ppb, BUFFER_SIZE) ,
    new GasConcentration(ALPHA_OX_2_ID, SI_CONC_ppb, BUFFER_SIZE) ,
    new GasConcentration(ALPHA_SO2_2_ID, SI_CONC_ppb, BUFFER_SIZE) ,
    new Temperature(EXT_TEMPERATURE_ID, SI_TEMP_Celsius, BUFFER_SIZE) ,
    new Humidity(EXT_HUMIDITY_ID, SI_HUMD_Relative, BUFFER_SIZE) ,

```

```

new GasConcentration(PM10_ID, SI_CONC_ug, BUFFER_SIZE),
new GasConcentration(PM25_ID, SI_CONC_ug, BUFFER_SIZE),
new GasConcentration(PM01_ID, SI_CONC_ug, BUFFER_SIZE),
new Temperature(OPC_TEMPERATURE_ID, SI_TEMP_Celsius, BUFFER_SIZE),
new Humidity(OPC_HUMIDITY_ID, SI_HUMD_Relative, BUFFER_SIZE)
};

```

E.1.4.2 Armazenamento dos dados

A seção do código que armazena os dados em um cartão SD é mostrada na Lista . O código primeiro verifica se o tempo de armazenamento dos dados já passou e atualiza a variável `mLastTimeuSD`. Esta seção do código transfere os dados de cada variável para um objeto `data`, que é do tipo `SensorData` e que é usado para armazenar as informações da variável. O método utilizado para transferir as informações de `Variable` para `SensorData` é a função `sense()`, que recebe um ponteiro para `SensorData`. Este objeto `data` é definido anteriormente no código conforme mostrado abaixo. Depois que os dados forem transferidos para a instância de `SensorData`, eles são armazenados em um arquivo no cartão SD.

Listing E.7 – Sequência de armazenamento de dados

```

SensorData data;

// ...

void loop()
{
    // ...
    if(( millis () - mLastTimeuSD ) >= uSD_TIME_MSEC)
    {
        mLastTimeuSD = millis ();
        static uint8_t data_index_uSD = 0;
        Vars [data_index_uSD]→sense (&data );

        char* filename = (char*)malloc (strlen_P (
            filenAMES [data_index_uSD])+1);
        strcpy_P (filename , filenAMES [data_index_uSD]);
        if(open_file (filename ))
            sd_ok = save_to_file (&data , filename );
        else SD.begin (CHIPSEL_PIN);
        free (filename );
    }
}

```

```

    data_index_uSD = (data_index_uSD >= numSensors-1) ? 0 :
                    data_index_uSD + 1;
}
// ...
}

```

E.1.4.3 Envio de dados via protocolo *HTTP*

A seção do código que envia os dados ao ESP8266 para postagem em um servidor HTTP é mostrada abaixo. Assim como as demais seções do código, esta seção primeiro verifica se o tempo de envio dos dados já passou e atualiza a variável `mLastTimeHTTP`. Depois disso, ele utiliza o último objeto `SensorData` armazenado para enviar as informações adquiridas para a variável correspondente. O objeto `espIoT` enviará uma cadeia de caracteres com um objeto JSON contendo as informações a serem postadas pelo ESP8266. O método `send_http_post()` recebe um ponteiro para um `DataContainer`. Como a classe `SensorData` herda de `DataContainer`, cada item nos dados pode ser convertido em um ponteiro desse tipo

```

if (( millis () - mLastTimeHTTP ) >= HTTP_TIME_MSEC)
{
    mLastTimeHTTP = millis ();
    static uint8_t data_index_iot = 0;

    Vars [ data_index_iot ]->sense (&data );
    readings [ 0 ] = &data ;
    if (!espIoT . send _http _post (&data )) print _debug ( " Couldn ' t post ! " );
    data_index_iot = ( data_index_iot >= numSensors -1) ? 0 :
                    data_index_iot + 1;
}

```

E.1.4.4 Geolocalização

Por fim, a continuação mostra a seção de código que atualiza as informações de geolocalização do módulo GPS. Assim como nas outras seções do código, esta seção primeiro verifica se passou o tempo para atualizar as informações do GPS e atualiza a variável `mLastTimeGPS`. Para ler o módulo GPS, o objeto `gps` invoca o método `readGPS()`. Este método toma como parâmetro o tempo máximo que o Arduino deve aguardar uma resposta do módulo GPS, neste caso `MSECS_GPSOUTDATE/2`. O objeto `gps` é uma instância da classe `TinyGPSSerialInterface` que está previamente definida no código conforme mostrado. O construtor deste objeto recebe uma referência à porta serial utilizada para comunicação com o módulo, neste caso `Serial1`. Em caso de falha na comunicação

com o módulo GPS, depois da sétima tentativa, é setado um valor padrão previamente configurado.

```
TinyGPSSerialInterface gps(&Serial1);  
  
// ...  
  
void loop()  
{  
    // ...  
  
    if ((millis() - mLastTimeGPS) >= MSECS_GPSOUTDATE)  
    {  
        static uint8_t gps_tries = 0;  
        print_debug("[MAIN] GPS");  
        mLastTimeGPS = millis();  
        if (!gps.read_gps(MSECS_GPSOUTDATE/2))  
        {  
            if (gps_tries++ > 7) {  
                GPSDriver::set_coordinates(  
                    true,  
                    DeviceDefaultLocation::LATITUDE,  
                    DeviceDefaultLocation::LONGITUDE,  
                    DeviceDefaultLocation::ALTITUDE);  
                gps_tries = 8;  
            }  
        }  
        else {  
            gps_tries = 0;  
        }  
    }  
}
```

ANEXO A – DESCRIÇÃO

São documentos não elaborados pelo autor que servem como fundamentação (mapas, leis, estatutos). Deve ser precedido da palavra ANEXO, identificada por letras maiúsculas consecutivas, travessão e pelo respectivo título. Utilizam-se letras maiúsculas dobradas quando esgotadas as letras do alfabeto.