

# Protótipo de medidor de gases poluentes usando tecnologia de baixo custo

Igor Alexandre Stefan <sup>[1]</sup>, Paulo Ixtânio Leite Ferreira <sup>[2]</sup>, Aldeni Sudário de Sousa <sup>[3]</sup>

[1] igorstefan@bol.com.br. [2] paulo.ferreira@ifpb.edu.br. Instituto Federal da Paraíba (IFPB) / Unidade Acadêmica da Indústria.

[3] aldeni.sousa@ifpb.edu.br. Instituto Federal da Paraíba (IFPB) / Departamento de Logística.

## RESUMO

A qualidade do ar que se respira é de extrema importância para a saúde humana. Quando se trata da medição da concentração de gases poluentes, é comum encontrar equipamentos comerciais muito caros, que não medem todos os gases regulamentados e não são destinados às pessoas leigas no assunto. Neste trabalho, foi desenvolvido um protótipo de medidor dos gases monóxido (CO) e dióxido (CO<sub>2</sub>) de carbono, que são gases com fontes presentes no cotidiano e podem causar prejuízos para a saúde, e para o desempenho de atividades físicas e cognitivas. Foram utilizados, a plataforma Arduino, recursos de linguagem de programação C++, sensores eletroquímicos (MQ-7 e MQ-135) e mostrador de OLED. Ele exibe a concentração dos dois gases em unidades ppm (partes por milhão) e em termos conceituais (bom, ruim ou péssimo). Testes comparativos foram realizados entre as leituras do protótipo e os valores lidos por medidores comerciais. Medições em ambientes fechados e abertos do Instituto Federal da Paraíba (IFPB), campus João Pessoa, foram realizadas. Os resultados são promissores, já que as medições realizadas estão coerentes com as situações em que havia ou não fontes dos gases de interesse.

**Palavras-chave:** Arduino. CO. CO<sub>2</sub>. Gases poluentes. Medição de gás. Sensores eletroquímicos.

## ABSTRACT

*The quality of the air that we breathe is extremely important for human health. When it comes to measuring the concentration of polluting gases, it is common to find very expensive commercial equipment, which does not measure all regulated gases and is not designed for lay people to operate. In this work, a prototype of a meter for carbon monoxide (CO) and carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) gases, which can cause damage to health and to the performance of physical and cognitive activities, was developed. The prototype was developed using the Arduino platform, C++ programming language resources, electrochemical sensors (MQ-7 and MQ-135) and an OLED display. It shows the concentration of the two gases in units ppm (parts per million) and in conceptual terms (good, bad or terrible). Comparative tests were performed between the readings of the prototype and the values read by commercial meters. Measurements in closed and open environments of the Federal Institute of Paraíba (IFPB), João Pessoa campus, were carried out. The results are promising, since the measurements made are consistent with the situations in which there were or not sources of the gases of interest.*

**Keywords:** Arduino. CO. CO<sub>2</sub>. Pollutant gases. Gas measurement. Electrochemical sensors.

## 1 Introdução

Com o aumento do número de processos industriais, aceleração na utilização de recursos naturais e com os hábitos diários relacionados à execução da função laboral, a população tem dado menos atenção a determinadas questões ambientais que impactam diretamente a saúde humana. Especificamente, dados relacionados à qualidade do ar ou não são coletados, ou não são divulgados de forma eficiente para informar e/ou alertar as pessoas de como está sua qualidade. Segundo especialistas em qualidade do ar, nos EUA, as mortes em 2015 atingiram a marca de 88 mil, superando doenças como diabetes, influenza, doença renal ou suicídio (BRUGGE; LANE, 2018).

Entre os poluentes atmosféricos que afetam tanto o ser humano quanto o meio ambiente estão: monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), chumbo (Pb), material particulado e enxofre (S). Eles têm potencial para provocar doenças que vão desde efeitos cognitivos até o mal de Alzheimer e problemas respiratórios (BRUGGE; LANE, 2018).

A preocupação com o monitoramento dos gases poluentes é constante em muitos países do mundo. Isso motiva o desenvolvimento de soluções tecnológicas para equipamentos de medição como, por exemplo, os trabalhos de Mukhopadhyay *apud.*, (2017), Cruz, Mariano e Cordova (2018), Duangsuwan *apud.* (2018) e Muthukumar *apud.* (2018). Em termos de circuito eletrônico, esses trabalhos apresentam características em comum, onde uma delas é a forma como os dados são apresentados. Neles, os dados são explicitados apenas em forma numérica (410 ppm, por exemplo), restringindo sua interpretação a um público especializado. Outro ponto comum é que a informação fica restrita a um banco de dados, acessado por computador ou aplicativo, via *Internet*, com exceção do trabalho de Muthukumar *et. al.* (2018), que exhibe os dados também em um LCD (*Liquid Crystal Display – Display de Cristal Líquido*). Nos trabalhos citados, as medições não foram confrontadas com equipamentos comerciais, como também não é informado sobre o procedimento de calibração dos sensores utilizados.

No Brasil, a falta de equipamentos, públicos ou privados (INSTITUTO SAÚDE E SUSTENTABILIDADE, 2019), que possam informar a população, de forma clara, como está a qualidade do ar que se respira, pode aumentar o risco de doenças relacionadas à poluição do ar. Esse risco é potencializado quando se pratica atividades físicas, por exemplo, em ruas de grande

circulação de veículos, ou com pouca ventilação, como ginásios e academias. É importante ressaltar que em atividades físicas, a quantidade de ar respirado é muito maior que em qualquer outro tipo de atividade (NEMERY *apud.*, 2015).

O mercado oferece diversos tipos de medidores de gás, porém são utilizados para a medição de gases específicos, sendo relativamente caros. Geralmente, tais medidores são utilizados especificamente para um tipo de gás, destinando-se para o uso industrial. Como exemplo de equipamentos comerciais, têm-se: *Extech CO250* (custo na faixa de R\$ 1.450,00, mede CO<sub>2</sub>); *KXL-803* (custo na faixa de R\$ 750,00, mede O<sub>2</sub>); *CO<sub>2</sub> PPM Detector Deluxe* (custo na faixa de R\$ 550,00, mede CO<sub>2</sub>); *CO-5000* (custo na faixa de R\$ 1.000,00, mede CO). As informações, apresentadas por esses equipamentos, são exibidas de forma numérica e não conceitual (aceitável, moderado e péssimo, por exemplo). Isso dificulta o entendimento por pessoas leigas no assunto, inviabilizando-as de saber se a quantidade de determinado gás está aceitável ou não.

Devido à importância e os efeitos danosos à saúde humana, este artigo apresenta um protótipo de instrumento que realiza a leitura da concentração dos gases CO e CO<sub>2</sub>, simultaneamente, com a temperatura e umidade, utilizando tecnologia de baixo custo. O protótipo exhibe os níveis dos gases de forma numérica e classifica-o como: bom, ruim ou péssimo. Destaca-se a apresentação de todo processo de calibração dos sensores.

Este artigo está organizado nas seguintes seções: na seção 2 é realizada uma descrição das características dos gases poluentes de interesse e os malefícios que podem causar à saúde humana; na seção 3 são apresentados os elementos que compõem o protótipo proposto, destacando suas características elétricas e funcionais. Nesta seção também é apresentado o processo de calibração dos sensores, programação e protótipo final; na seção 4 são apresentados os resultados obtidos; por fim, na seção 5 são apresentadas as considerações finais.

## 2 Fundamentação teórica

Um ar de má qualidade pode prejudicar a saúde dos seres vivos de diversas maneiras. Ele pode causar doenças e, em alguns casos, até levar a óbito (SINHARAY *apud.*, 2018).

Para os seres humanos, o ar é de extrema importância, pois nele está contido o oxigênio para que as células possam transformar esse gás em energia e

o corpo possa executar suas funções (NEMERY *apud.*, 2015). Porém, ao respirar o oxigênio presente no ar, se respira também outros gases e partículas que são prejudiciais à saúde.

Ao praticar exercícios físicos em ambientes com o ar de má qualidade, as pessoas ficam mais expostas a doenças causadas por poluentes, pois o corpo passa a exigir a inalação de maior quantidade de ar. Por isso, um ambiente com ar de boa qualidade é de extrema importância para aqueles que pretendem praticar algum tipo de atividade física (NEMERY *apud.*, 2015).

Devido ao aumento de doenças causadas por gases poluentes, muitos países começaram a adotar padrões de qualidade do ar estipulando um limite de concentração de gases emitidos, na tentativa de controlar essa emissão. No Brasil, o órgão responsável por regulamentar e indicar os níveis de concentração dos gases poluentes é o CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente), que definiu os parâmetros de qualidade do ar e os tornou público por meio da resolução nº 491/2018 (BRASIL, 2018). O CONAMA preconiza que um ambiente seguro deve apresentar um nível médio de concentração de CO de até 9 ppm (partes por milhão), medidos em um período de 8 horas, porém não apresenta limites para o CO<sub>2</sub>. A pesquisa realizada pela equipe de Tillett (2012), por exemplo, classifica um ambiente como bom, quando a concentração de CO<sub>2</sub> está abaixo de 1000 ppm.

É importante salientar que a concentração dos poluentes é influenciada pelas condições climáticas, portanto, devem ser registradas temperatura e umidade no momento das medições (CETESP, 2019).

## 2.1 Análises dos gases poluentes: CO e CO<sub>2</sub>

O monóxido e dióxido de carbono são dois dos gases que contribuem para poluição atmosférica. Dessa forma, as organizações internacionais e nacionais definem limites de concentração para esses gases, de modo a minimizar o risco a saúde das pessoas.

### 2.1.1 Gás monóxido de carbono (CO)

O CO é um gás incolor, inodoro, insípido, inflamável e extremamente perigoso para a saúde humana, pois é um asfixiante químico (BLEECKER, 2015). Ele pode ser liberado por fontes naturais e antrópicas (produzido pelo ser humano), sendo que as liberadas por ação

humana representam 60% do total de CO encontrado na atmosfera.

As fontes geradoras de monóxido de carbono estão relacionadas com a queima incompleta de materiais. Isso acontece facilmente em motores de automóveis, fábricas, sistemas de aquecimento, usinas termelétricas, queimadas em florestas, queima de gás natural e carvão mineral.

O CO é extremamente tóxico para o ser humano, pois tem uma grande afinidade com a hemoglobina contida no sangue, fazendo com que aconteça uma perda da quantidade de oxigênio no sangue do indivíduo que o respira (LACERDA; LEROUX; MORATA, 2005).

Segundo Lacerda, Leroux e Morata (2005), a presença do monóxido de carbono, mesmo em baixas concentrações, mas por períodos prolongados, pode ocasionar efeitos tóxicos cumulativos, como insônia, cefaleia, fadiga, diminuição da capacidade física, de aprendizado e trabalho, tonturas, vertigens, náuseas, vômitos, distúrbios visuais, alterações auditivas, doenças respiratórias, anorexia, síndrome de Parkinson, isquemia cardíaca, cardiopatias e arteriosclerose. Nos idosos, causa um aumento na mortalidade por infarto agudo. Por tais motivos, observa-se a importância do monitoramento desse gás.

### 2.1.2 Gás dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>)

O CO<sub>2</sub> é um gás insípido, incolor e inodoro emitido pela combustão nos motores dos carros, respiração humana, por vários processos industriais e possui ligação com o aumento da temperatura na Terra, sendo este o ponto de vista que é mais destacado quando é protagonista de uma notícia ambiental. Porém, em uma situação cotidiana, em locais fechados com pouca ventilação, esse gás produz consequências à atividade humana, por exemplo: sonolência e perda de capacidade cognitiva, diminuição da capacidade de decisão e do desempenho físico (LI *apud.*, 2011; TILLET, 2012; ALLEN *apud.*, 2015). Em longo prazo, pode causar problemas de saúde devido ao tempo de exposição (CRUZ *apud.*, 2018). Porém, não causa danos diretos à saúde humana, mas apenas quando o excesso de sua presença no sangue está ligado a alguma patologia ou situação de risco, como incêndios (LAMBERTSEN, 1971).

Em ambientes abertos, a concentração de CO<sub>2</sub> é de aproximadamente 410,43 ppm (dado do mês de agosto de 2019) (CO2 EARTH, 2019), que é uma quantidade

não prejudicial ao ser humano. Em ambientes fechados, com uma grande quantidade de pessoas, essa concentração pode aumentar rapidamente e ultrapassar facilmente a concentração de 1000 ppm. Em uma concentração acima de 2000 ppm, a capacidade cognitiva é afetada e em concentrações acima de 6000 ppm, torna-se quase impossível a realização de exercícios cognitivos de forma correta (TILLET, 2012).

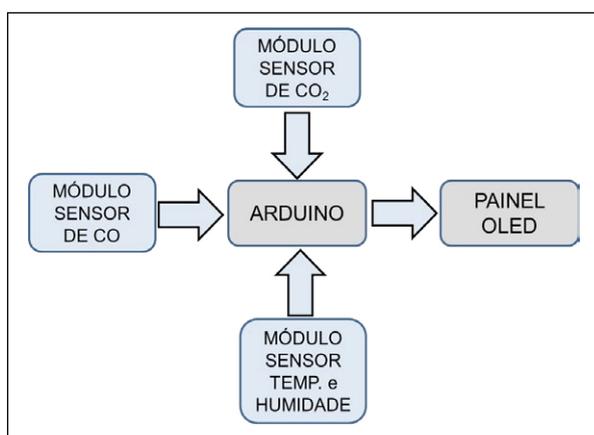
### 3 Materiais e método

Nesta seção são apresentados a organização do protótipo com seu conjunto de sensores, plataforma de desenvolvimento e embasamento matemático adotado para estimar o valor da concentração dos gases de interesse.

#### 3.1 Desenvolvimento do protótipo proposto

O diagrama em blocos do medidor proposto é apresentado na Figura 1. Nele, a etapa de processamento da informação se baseia na plataforma de prototipagem Arduino. A aquisição de informações é realizada pelos sensores de medição do nível de concentração dos gases CO e CO<sub>2</sub> e pelo sensor de temperatura e umidade. A exibição dos dados é realizada em um painel do tipo *display*, baseado na tecnologia OLED.

Figura 1 – Diagrama do protótipo proposto.



Fonte: Elaboração própria.

No *display* OLED são mostrados os níveis de concentração de cada gás e os conceitos de qualidade do ar, bom, ruim ou péssimo, nas cores verde, amarelo e vermelho, respectivamente.

#### 3.2 Plataforma de prototipagem Arduino

O Arduino é uma plataforma de uso livre, baseado no microprocessador da família Atmel AVR, possuindo uma programação baseada em C/C++, e sua própria IDE (*Integrated Development Environment* – Ambiente de desenvolvimento integrado). Ele possui pinos de entrada/saída analógicos e digitais, conectores para USB-B, saídas de 5 e 3,5 V (Volts), usadas para conectar outros dispositivos, como módulos, sensores e *shields* (McROBERTS, 2011).

No protótipo, o Arduino é responsável por receber as informações dos sensores de forma analógica, convertê-la para digital, interpretá-la, transformá-la no nível de concentração do gás e controlar o OLED para que exiba os dados.

#### 3.3 Sensores eletroquímicos

Os sensores eletroquímicos utilizados são do tipo eletrocatalítico. Eles são compostos por uma bobina de fio de platina aquecido eletricamente, coberto primeiro com uma base de cerâmica, tais como alumina e, em seguida, com um revestimento final exterior do catalisador de paládio ou ródio disperso em um substrato de tório (BAKKER; QIN, 2006).

Tais sensores, geralmente são de baixo custo e associados a módulos que os deixam preparados para conexão com um microcontrolador. Em algumas famílias de sensores eletroquímicos, como os utilizados neste trabalho, a resistência elétrica interna varia com a presença do gás. Quando o sensor detecta o gás, acontece um aumento na tensão sobre o resistor de carga, tornando possível perceber essa variação, que por sua vez é transmitida como sinal analógico ou digital, por meio dos pinos específicos do módulo.

Para o funcionamento adequado dos sensores, o fabricante recomenda um pré-aquecimento, também denominado de queima do sensor, que consiste em deixá-lo realizando leituras e aquecendo por pelo menos 24 horas antes de usá-lo em aplicações mais robustas (HANWEI ELETROINICS, 201-a). Esse tempo varia de sensor para sensor onde, por exemplo, no MQ-135 o tempo é de 24 horas, e no MQ-7, o tempo é de 48 horas.

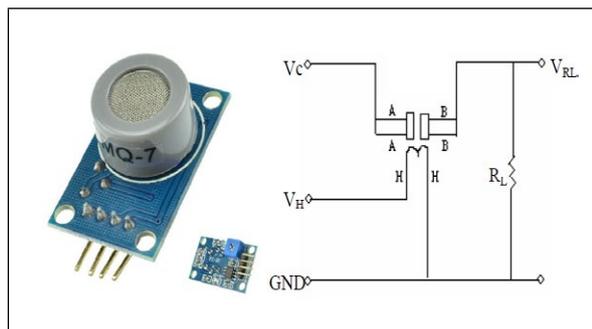
No protótipo desenvolvido neste trabalho, módulos de sensor de gás MQ para Arduino foram utilizados. Eles possuem um potenciômetro externo ao sensor (de aproximadamente 40 kΩ). Como a leitura dos sensores é realizada utilizando os terminais analógicos, não é necessário um ajuste nesse componente, que

se destina ao uso dos terminais digitais (HANWEI ELETRONICS, 201-a).

### 3.3.1 Módulo sensor MQ-7

Esse módulo possui sensor de alta sensibilidade ao monóxido de carbono em ampla faixa de temperatura. Tem vantagens como a vida útil longa, baixo custo e estabilidade nas leituras. Seu aquecedor interno utiliza tensão elétrica de 5 V (HANWEI ELETRONICS, 201-b) e, faixa de medição de 0,00 a 10.000 ppm. Na Figura 2 é ilustrado um exemplar desse módulo e o seu diagrama interno.

**Figura 2** – Imagem do módulo sensor MQ-7 e seu circuito interno equivalente.



Fonte: Hanwei Electronics (201-b).

A curva característica sensor MQ-7 está disponível em Hanwei Eletrocnics (201-b). Ela é usada para calibrar o sensor e extrair a equação que representa a concentração do gás para as variações da resistência interna, denominada .

### 3.3.2 Módulo sensor MQ-135

Esse módulo possui um sensor sensível aos gases benzeno, álcool, fumaça e dióxido de carbono. Dentre esses, no protótipo desenvolvido foi utilizado apenas a detecção do CO<sub>2</sub>. O sensor possui vida útil longa, baixo custo, resposta rápida e estabilidade nas leituras (HANWEI ELECTRONICS, 201-a), sendo aquecido, internamente, por uma tensão elétrica de 5 V. Em seu manual, a faixa de medição de concentração que pode ser medida não é apresentada. Na Figura 3 é ilustrado um exemplar desse módulo.

**Figura 3** – Imagem do módulo sensor MQ-135.



Fonte: Próprio autor.

Para garantir que o sensor esteja de fato medindo CO<sub>2</sub> e não outro gás é necessário analisar a curva característica do sensor (ver a Figura 4) referente apenas ao CO<sub>2</sub>.

### 3.3.3 Módulo sensor de temperatura e humidade

O módulo de medição de temperatura e umidade utilizado no protótipo deste trabalho é o modelo DHT 11. Ele é composto por um sensor resistivo de umidade e um termistor tipo NTC (*Negative Temperature Coefficient*), possuindo uma faixa de medição de umidade entre 20-90% RH (*Relative Humidity*), com erro relativo de  $\pm 5\%$  e, de temperatura: 0-50°C, com erro relativo de  $\pm 2\%$  (MOUSER ELECTRONICS, 201-).

## 3.4 Fundamentos de análise dos sensores

Para a utilização dos módulos sensores de gás, alguns parâmetros devem ser considerados, tais como: a curva característica do sensor; suas resistências; a função para determinar a concentração do gás; o processo de calibração; sua programação e a conexão com a plataforma de prototipagem.

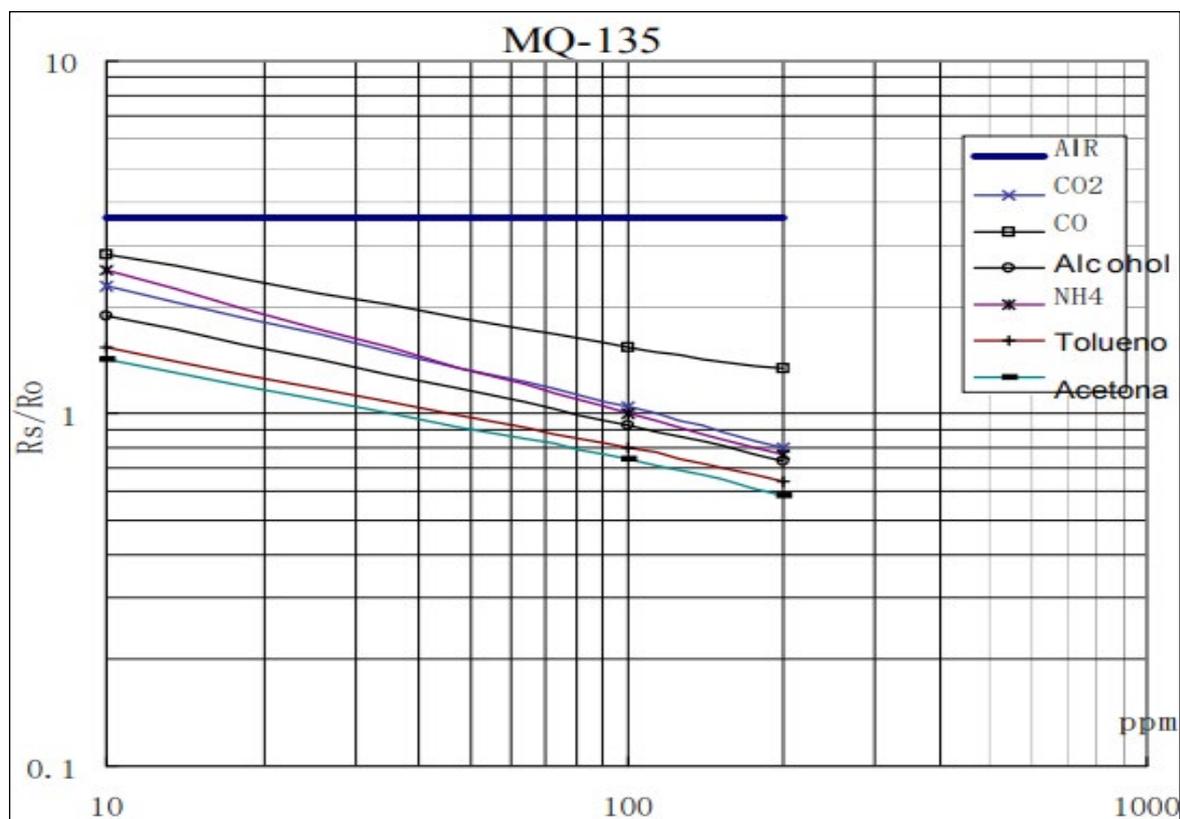
### 3.4.1 Curva característica

Os sensores da família MQ enviam um sinal analógico para o microprocessador, mas essa informação não é suficiente para se determinar o nível de concentração do gás. Para que a concentração seja determinada é preciso verificar as informações da curva característica do sensor, presentes no seu manual. Nele, o eixo das ordenadas corresponde à razão e

o eixo das abcissas corresponde à concentração do gás em partes por milhão. Cada sensor da família MQ possui uma curva com suas informações. Como

exemplo, na Figura 4 é ilustrada a curva característica do módulo MQ-135. Observa-se que para cada tipo de gás, existe uma curva específica.

Figura 4 – Curva característica do MQ-135.



Fonte: Adaptado de Mukhopadhyay apud., 2017.

### 3.4.2 Razão

Esse parâmetro é fundamental para todas as análises, com seu uso é possível estimar o valor da concentração do gás.

O parâmetro é o valor da resistência do sensor que é obtido em uma medição. Em altas concentrações de gás possui um valor baixo, caso contrário tem valor alto.

O parâmetro é um valor fixo e específico de cada sensor da família MQ, determinado pelo fabricante. Por exemplo, para o MQ-135 esse valor corresponde à resistência do sensor em ar limpo na presença de 100 ppm de amônia (NH<sub>3</sub>); para o MQ-7, corresponde à resistência do sensor quando está na presença de 1.000 ppm de hidrogênio (H).

Entretanto, não é necessário que o sensor esteja na presença dos gases especificados, nem nas concentrações especificadas pelo fabricante, para que

se possa determinar o valor de . Isso porque, em todas as curvas características, existe um valor constante para a razão , quando o sensor está em ar limpo (ver a Figura 4, curva em azul (AIR)).

O valor da razão é diferente para sensores MQs diferentes. Como o valor é constante, é suficiente fazer a calibração do sensor em um ambiente com ar limpo.

O processo de calibração dos sensores será explicado na subseção 3.4.4. A razão é encontrada a partir dos valores analógicos enviados pelo sensor.

### 3.4.3 Função da curva característica

Para explicar o processo de extração da função matemática dos sensores, o gráfico do MQ-135, ilustrado na Figura 4, foi utilizado como referência. Nesse gráfico, deve-se observar a curva referente apenas ao gás CO<sub>2</sub>.

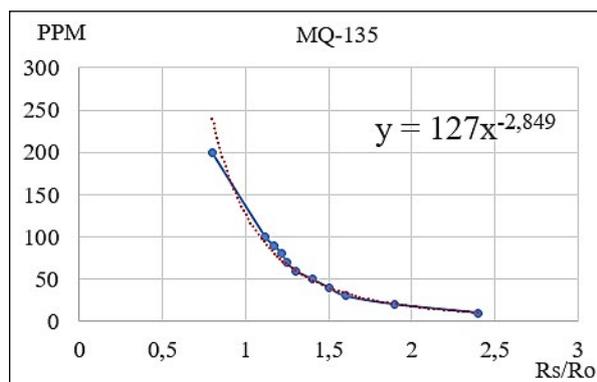
Para que seja possível obter o valor da concentração, para qualquer razão, é necessário obter a função da curva característica do sensor (CRUZ; MARIANO; CORDOVA, 2018). Para tal, se fez uso do processo de aproximação por regressão não linear. Após as análises gráficas das curvas, utilizando o *software Excel*, chegou-se à conclusão que a função de aproximação por regressão é da forma apresentada na Equação (1).

$$y(x) = a \times x^b \tag{1}$$

onde **a** e **b** são constantes; **x** representa a razão  $R_s/R_o$ ; e **y** representa a concentração do gás em ppm.

Por meio do *software Excel*, foi possível determinar os parâmetros e da Equação (1), para cada sensor de interesse. Na Figura 5 são exibidos os pontos retirados da curva característica do MQ-135 para o dióxido de carbono e a função obtida. A curva pontilhada vermelha representa a linha de tendência aproximada pelo *software*.

**Figura 5** – Regressão não linear do MQ-135



Fonte: Elaboração própria.

Para obter os parâmetros da função que caracteriza o sensor MQ-7, foram realizados os mesmos procedimentos descritos para o MQ-135, resultando nos valores das constantes, **a= 605,41** e **b=2,028**.

### 3.4.4 Processo de calibração dos sensores

O processo de calibração dos sensores MQ se resume a obter o valor do parâmetro  $R_o$ . Por ser um elemento importante, é necessário ser rigoroso com relação à sua aquisição. Para uma medição correta, é imprescindível que o ambiente de calibração apresente baixos níveis de concentração de poluentes.

Primeiramente, é necessário encontrar o valor da resistência do sensor ( $R_s$ ). O valor analógico recebido pelo Arduino, corresponde à tensão no resistor de carga  $R_L$  (ver a Figura 2). Então, é necessário obter o valor da resistência do sensor. Para isso, o conceito de divisor de tensão foi utilizado, conforme as Equações (2) e (3).

$$R_s = R_L \times \left( \frac{V_{fonte}}{V_{sensor}} - 1 \right) \tag{2}$$

$$R_s = R_L \times \left( \frac{1023 - V_{sensor}}{V_{sensor}} \right) \tag{3}$$

As Equações (2) e (3) são equivalentes, porém a Equação (3) representa como o Arduino calcula o valor  $R_s$ .

O parâmetro  $V_{fonte}$  é igual a 5 V e é representado em valores analógicos pelo número inteiro 1023, pois é o maior valor que pode ser lido pela entrada analógica do Arduino devido a resolução do seu conversor analógico-digital (AD) ser de 10 bits. O parâmetro  $V_{sensor}$  é o valor analógico correspondente à tensão do sensor, ou seja, é um número inteiro maior ou igual a 0 e menor ou igual à 1023.

O parâmetro  $R_L$  é o valor da resistência de carga em kilohms ( $k\Omega$ ) que é ajustável. Cada sensor possui uma faixa de valor informado pelo fabricante, onde o valor é utilizado tanto na fase de calibração quanto no momento de obtenção de uma medida qualquer, não influenciando o valor final da razão  $R_s/R_o$ . Por isso, visando à praticidade,  $R_L$  foi considerado igual a **1  $k\Omega$** .

Após adquirir um único valor de  $R_s$ , é evidente que esse valor não é confiável, então a estratégia foi utilizar médias entre as medições. Para isso foi realizado um número definido **n** de medidas em um intervalo de tempo **t** entre elas, de alguns milissegundos, definidos no programa do microcontrolador.

Os valores foram armazenados calculando-se a média ao final de todas as medições. Os valores dessa primeira média são armazenados e repete-se o processo até que seja calculado um número **k** de médias, sendo desta vez o intervalo de tempo **t<sub>1</sub>**, o tempo que se leva para calcular uma média. Ao final do processo, tem-se um valor de  $R_s$  que é a média das médias. O processo é representado matematicamente pela Equação (4).

$$R_s = \frac{1}{k} \times \sum_{1}^k \frac{1}{n} \sum_{1}^n M \quad (4)$$

em que:  $n$  é o número de medidas a serem realizadas;  $k$  é o número de médias que se deseja obter;  $M$  é o valor de uma medição obtida calculando o valor  $R_s$  por meio da Equação (3);  $R_s$  é o valor final, mais confiável, do valor da resistência do sensor.

Após realizar todas as medidas, o valor que se obtém é a média das médias dos valores de  $R_s$  em ar limpo. No gráfico da Figura 4 é fornecida a razão  $R_s/R_o$  também em ar limpo, porém, como o ambiente é o mesmo, calcula-se o valor de  $R_o$  por meio da Equação (5).

$$\frac{R_s}{R_o} = \frac{R_{s\_arlimpo}}{R_{o\_arlimpo}} \quad (5)$$

O segundo membro da Equação (5) é obtido na curva característica do sensor e o termo  $R_s$  é calculado após o procedimento da aquisição das medidas representado pela Equação (4). Por exemplo, para o módulo MQ-135, o fator  $R_s/R_o$  em ar limpo é igual a, aproximadamente, 3,7 (consultar a Figura 4). Então, substituindo e organizando os termos da Equação (5), conclui-se que o valor de  $R_o$  é a razão entre  $R_s$  e o fator  $R_{s\_arlimpo}/R_{o\_arlimpo}$ .

Ao final desse processo, o valor de  $R_o$  será estimado e o sensor estará calibrado. Esse valor é fixo e só será alterado se uma nova calibração for realizada.

### 3.5 Obtenção da concentração dos gases

Para determinar a concentração do gás, o microcontrolador executa a programação para obter um valor de  $R_s$  médio. Porém, não é preciso calcular a média das médias das medições. Nessa etapa é necessário apenas calcular a média aritmética de um número predeterminado de medições, em um intervalo de amostragem.

As médias são utilizadas para se obter maior confiabilidade nos valores medidos, evitando assim, erros como picos de valores causados por um vento forte e rápido que, eventualmente, surja no local de medição. A Equação (6) representa matematicamente essa etapa do programa.

$$R_{s\_med} = \frac{1}{n} \times \sum_{1}^n M \quad (6)$$

onde  $M$  é o valor de uma medição;  $n$  é número definido de medições a serem realizadas;  $R_{s\_med}$  é o valor médio da resistência do sensor encontrado após  $n$  medições.

No microcontrolador, é calculada a razão  $R_s/R_o$  e por meio da Equação (1), obtém-se o valor da concentração do gás em ppm.

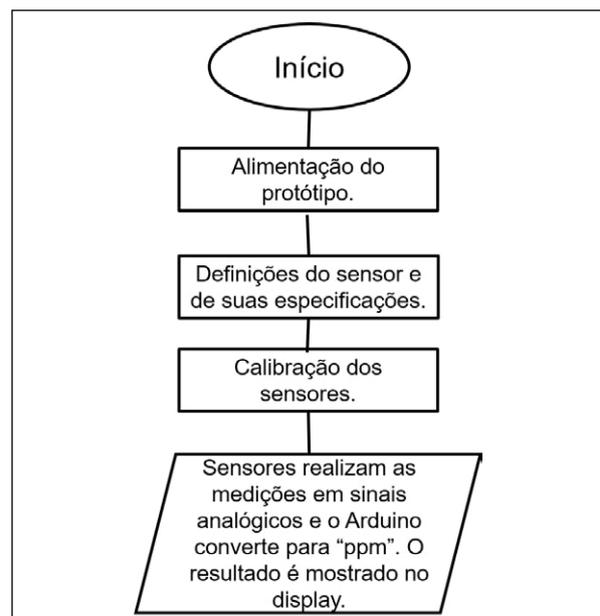
### 3.6 Programação

Essa etapa foi realizada na IDE do Arduino, utilizando recursos da linguagem de programação C++, principalmente a estrutura de classes. Uma classe nomeada "Sensor" foi criada, possuindo várias funções, entre elas: definição de objeto (por meio de um construtor); calibração do sensor; obter um valor  $R_s$ ; calcular a concentração; exibir qualidade do nível de concentração, entre outras.

A estrutura de classe permite que o protótipo possa ser expandido sem muitas dificuldades e agregue outros sensores da família MQ, ou sensores que tenham o mesmo princípio de funcionamento. Para isso é suficiente modificar os valores das constantes  $a$  e  $b$  da Equação (1), e definir o fator  $R_s/R_o$  no ar limpo, para cada novo sensor.

O programa está estruturado de acordo com os procedimentos mostrados na Figura 6.

Figura 6 – Estrutura do programa



Fonte: Elaboração própria.

### 3.7 Medidor proposto

Na Tabela 1 encontram-se ilustradas as concentrações de cada gás e sua classificação, tendo como base os valores adotados pela CETESP para o CO e, os valores encontrados no trabalho dos pesquisadores Allen *apud.* (2015), sobre a influência do CO<sub>2</sub> no cérebro humano. Esses limites foram programados no microcontrolador.

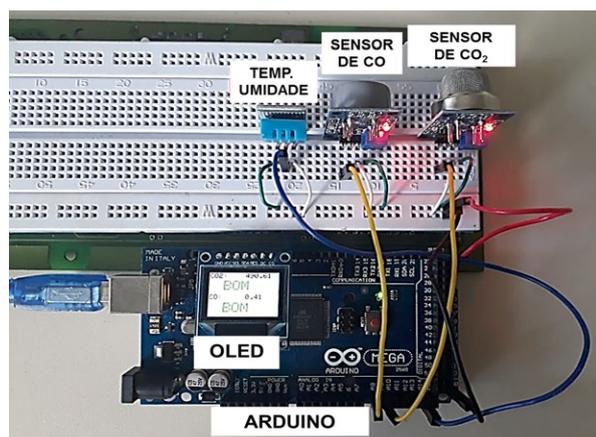
**Tabela 1** – Classificação da concentração dos gases CO e CO<sub>2</sub>.

Classificação	CO	CO <sub>2</sub>
	Concentração (ppm)	Concentração (ppm)
Bom	≤ 11	≤ 1000
Ruim	> 11 e ≤ 15	> 1000 e < 2000
Péssimo	≥ 15	≥ 2000

Fonte: adaptado da CETESP (2019) para o CO; adaptado de Allen *apud.* (2015) para o CO<sub>2</sub>.

Na Figura 7 é exibido o circuito do medidor proposto, com todos os seus elementos. Observe a exibição no *display* OLED, os valores das concentrações dos gases (CO<sub>2</sub> e CO, respectivamente) e sua classificação, além dos sensores utilizados para o monitoramento dos parâmetros.

**Figura 7** – Protótipo proposto em funcionamento.



Fonte: Elaboração própria.

## 4 Resultados

Alguns testes de campo foram realizados com o sistema desenvolvido. As medições foram divididas

em duas etapas: comparação dos valores medidos com valores de referência; e medições realizadas em ambientes abertos e fechados do Instituto Federal da Paraíba (IFPB), campus João Pessoa.

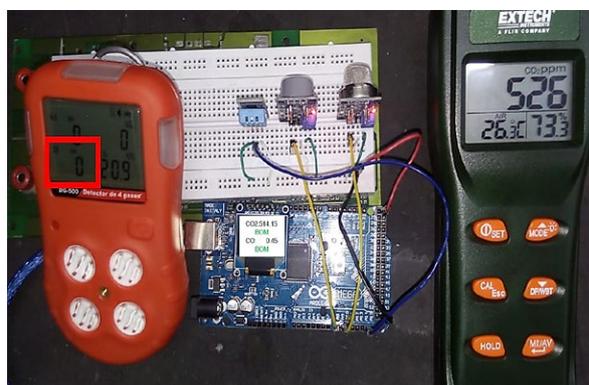
### 4.1 Comparação com valores de referência

Após o funcionamento do protótipo, testes foram realizados para validá-lo. Como referência, foram usados os valores do site *co2.earth* e o medidor comercial CO250 para o dióxido de carbono, além do medidor comercial da *Instrutherm* DG-500, para o monóxido de carbono.

No teste em ambiente aberto e ventilado foi obtido um nível de concentração de 450,60 ppm. Esse valor difere em 40,17 ppm em relação à referência dada pelo site *co2.earth* (CO2 EARTH, 2019), que informou no mesmo momento, o valor de 410,43 ppm. O *CO2earth* é uma organização americana que mede o nível de CO<sub>2</sub> no mundo, por meio do observatório *Mauna Loa Observatory*, localizado no Havaí. Portanto, é de se esperar que houvesse diferenças entre os valores citados, tendo em vista a diferença de localidade em que as medições foram feitas.

A medição em ambiente fechado foi realizada na sala A132 (laboratório de Eletrônica II) do IFPB campus João Pessoa. O nível de concentração obtido foi de 514 ppm que difere apenas 12 ppm em relação ao medidor comercial CO250, que apresentou 526 ppm, ou seja, um erro relativo de 2,3%. Na Figura 9 é ilustrada a realização da medição dos gases CO e CO<sub>2</sub>.

**Figura 9** – Imagem do protótipo desenvolvido e medidores comerciais para efeitos comparativos.



Fonte: Elaboração própria.

Comparando o valor medido pelo protótipo e o valor medido pelo DG-500, equipamento no canto esquerdo da Figura 9, obteve-se uma diferença nos

valores de 0,45 ppm. O protótipo mediu 0,45 ppm e o DG-500 mediu 0,00 ppm.

Na medição de CO, obteve-se um valor próximo do aparelho comercial, demonstrando um bom desempenho do protótipo.

#### 4.2 Medição em ambiente aberto

Os ambientes escolhidos para medição foram locais em que havia circulação de veículos, com maior concentração de pessoas e locais de prática de exercícios físicos.

#### 4.3 Estacionamento do IFPB campus João Pessoa

Durante a realização dos testes havia, no estacionamento, aproximadamente trinta veículos e três pessoas. Desses veículos, três estavam em funcionamento.

Na medição de CO foi obtida uma concentração média de 0,46 ppm, classificada como regular segundo os critérios da CETESP.

Na medição de CO<sub>2</sub> foi obtido um valor de concentração média de 540,96 ppm, que está acima do valor de referência, porém não é prejudicial ao ser humano. Os resultados foram coerentes, pois não havia presença identificada de grandes fontes dos gases.

#### 4.4 Medição em ambiente fechado

Para a medição em ambientes fechados a biblioteca e o ginásio do IFPB campus João Pessoa foram utilizados. Esse dois ambientes possuem práticas de atividades cognitivas e físicas, respectivamente.

#### 4.4.1 Sala de estudos da biblioteca Nilo Peçanha

A sala de estudos da Biblioteca Nilo Peçanha é um local grande e totalmente fechado, com a presença de mesas, cadeiras e com pouca circulação de ar.

Durante os testes havia, aproximadamente, vinte pessoas no local. Mediu-se um valor de concentração média de CO<sub>2</sub> elevado, 2.277,13 ppm, que é um valor que pode causar problemas de concentração. Com o aumento de pessoas no local, os valores das medições tenderam a oscilar para acima da média.

No teste de CO, foi encontrado um nível de concentração de 0,33 ppm, que é considerado baixo e não causa prejuízos à saúde humana.

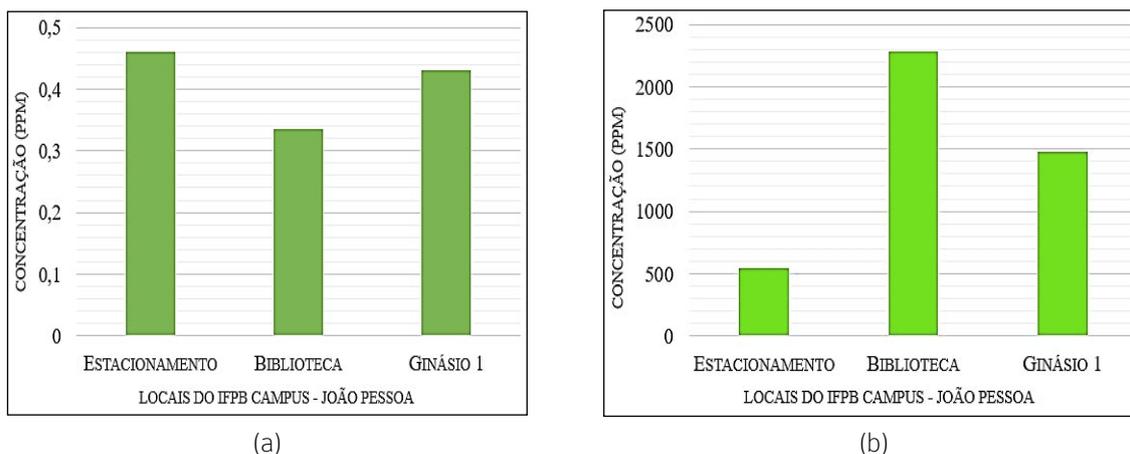
#### 4.4.2 Ginásio 1 do IFPB campus João Pessoa

Nesse ginásio, os alunos geralmente praticam atividades de modalidades coletivas. As medições foram realizadas no período vespertino quando havia uma aula de educação física e dezoito pessoas estavam presentes.

O valor de concentração de CO obtido foi de 0,43 ppm que é considerado baixo e não causa danos à saúde dos praticantes de atividade física. Com relação à medição de CO<sub>2</sub> se obteve um nível de 1.475,40 ppm, que é considerado ruim. Esse nível é capaz de gerar desconforto, problemas cognitivos e afetar o desempenho de praticantes da atividade (ALLEN *apud.*, 2015).

Nas Figuras 10a e 10b são apresentados gráficos em coluna que resumem os níveis de concentração de monóxido (CO) e dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), respectivamente, nos ambientes analisados.

**Figura 10** – Gráfico da concentração dos gases medidos no IFPB *campus* João Pessoa (a) CO. (b) CO<sub>2</sub>



Fonte: Elaboração própria.

Verifica-se na Figura 10a, que os níveis de CO são próximos, com uma diferença de, aproximadamente, 0,15 ppm, porém são mais preponderantes no estacionamento do campus, mesmo com a maioria dos veículos desligados. Os valores obtidos nos outros locais estão coerentes, pois não havia fontes de CO.

Na Figura 10b, é possível verificar que a concentração de CO<sub>2</sub> atingiu valores que são considerados prejudiciais para o desenvolvimento de atividades de concentração e de exercícios físicos (locais fechados). No ambiente aberto (estacionamento), a boa ventilação auxilia para uma menor concentração do gás.

#### 4.5 Custo do protótipo

O protótipo foi montado com sensores de baixo custo e informou sobre a qualidade do nível de concentração dos gases baseado nas regulamentações em vigor. Essa é uma característica diferencial em relação aos medidores com os quais foi comparado. Na Tabela 2 é ilustrado o preço dos componentes do protótipo baseado em valores disponíveis no mercado nacional, não sendo contabilizados despesas com mão de obra, frete e impostos.

**Tabela 2** – Preços dos componentes do protótipo

Componente	Preço (R\$)
Display OLED 0.96"	75,00
MQ135	20,00
MQ7	20,00
Arduino Mega	55,00
DHT11	10,00
Total	180,00

Fonte: Elaboração própria.

**Tabela 3** – Comparação entre os equipamentos comerciais e o protótipo

Produto	Preço (R\$)
CO250	1.407,36
DG500	2.371,50
Protótipo	180,00

Fonte: Elaboração própria.

Na Tabela 3 é ilustrada a comparação do custo do protótipo em relação ao custo dos medidores comerciais DG-500 (EXTECH, 2013; INSTRUTHERM, 2017). Observa-se que o protótipo possui um custo bem menor em relação aos outros dois medidores. Uma vantagem é que é possível medir o nível de concentração de dois gases distintos sem a necessidade de adquirir dois produtos diferentes.

## 5 Considerações finais

O protótipo mostrou-se promissor. Na fase de calibração, os valores de temperatura e de umidade apresentados foram próximos aos encontrados no instrumento CO250. As medidas dos níveis de concentração dos gases escolhidos foram coerentes e exibidas de forma clara no OLED, com contraste de cores nos conceitos de qualidade do ar, bom, ruim ou péssimo. Assim, é possível alertar pessoas leigas no assunto sobre os níveis de concentração dos gases no ambiente.

Durante os testes em ambientes abertos, pôde-se notar que a concentração de CO<sub>2</sub> não sofre grande variação. Entretanto, próximo de veículos, a quantidade de CO apresentou um pequeno aumento, pois são fontes de CO.

Em ambientes fechados ocorreu aumento na concentração de CO<sub>2</sub> quando o número de pessoas no local aumentou, mas a concentração de CO não sofreu alterações. Além disso, percebeu-se que o aumento na concentração de CO<sub>2</sub> está relacionado também com pouca ventilação. Como exemplo, a sala de estudos da biblioteca do Campus João Pessoa apresentou níveis de concentração próximos aos do ginásio 1. Nesses ambientes, os valores medidos indicaram a condição péssima de qualidade do ar. Portanto, implantar medidas para melhorar a ventilação é uma opção recomendável. Por exemplo, instalar exaustores.

Pretende-se aprimorar o protótipo, implementando outros sensores de gás, principalmente os que medem concentrações de poluentes definidos pelo CONAMA, tais como: o MQ-131 (gás ozônio) e 2SH12 (gás dióxido de enxofre). Além disso, pretende-se confeccionar uma placa de circuito impresso para que se torne um instrumento portátil e de fácil manuseio.

## REFERÊNCIAS

ALLEN, J. G. *apud*. Associations of cognitive function scores with carbon dioxide, ventilation, and volatile organic compound exposures in office

workers: a controlled exposure study of green and conventional office environments. **Environmental Health Perspectives**, v. 6, p. 805-812, 2015.

BAKKER, E.; QIN, Y. Electrochemical sensors. **Analytical Chemistry**, v. 78, n. 12, p. 3965-3983, 2006.

BLEECKER, M. L. Carbon monoxide intoxication. **Handbook of Clinical Neurology**, v. 131, p. 191-203, 2015.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente/Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução nº 491, de 19 de novembro de 2018**: dispõe sobre padrões de qualidade de ar. Brasília (Brasil), 2018.

BRUGGE, D.; LANE, K. J. Fine particle air pollution is a public health emergency hiding in plain sight. **The Conversation**, 2018. Disponível em: <https://bit.ly/3aUGxJZ>. Acesso em: mar. 2019.

CETESP. **Qualidade do ar**: poluentes. São Paulo (Brasil), 2019. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/ar/poluentes/>. Acesso em: ago. 2019.

CO2 EARTH, The world's CO2 home page. Disponível em: [www.co2.earth/earths-co2-main-page](http://www.co2.earth/earths-co2-main-page). Acesso em: ago. 2019.

CRUZ, M. M.; MARIANO, A. M.; CORDOVA, M. M. S. Implementation of an evaluation system to measure air quality on public transport routes using the Internet of Things. In: CONGRESO ARGENTINO DE CIENCIAS DE LA INFORMÁTICA Y DESARROLLOS DE INVESTIGACIÓN (CACIDI), 2018, Buenos Aires (Argentina), **Proceedings...** 2018. p. 1-4.

DUANGSUWAN, S. *apud*. A Study of air pollution smart sensors LPWAN via NB-IoT for Thailand smart cities 4.0. In: 10<sup>th</sup> INTERNATIONAL CONFERENCE ON KNOWLEDGE AND SMART TECHNOLOGY (KST), 2018, Chiang Mai (Thailand), **Proceedings...** 2018. p. 1-4.

EXTECH. **Extech CO250 portable indoor air quality CO2 meter**: catálogo. **Equipment USA**, 2013. Disponível em: <http://www.extech.com/products/CO250>. Acesso em: jun. 2019.

HANWEI ELECTRONICS. **Technical Data MQ-135 Gas Sensor**. HWSENSOR. [201-a]. 3 p.

HANWEI ELECTRONICS. **Technical data MQ-7 gas sensor**. HWSENSOR. [201-b]. 3 p.

INSTITUTO SAÚDE E SUSTENTABILIDADE. **Análise do monitoramento de qualidade do ar no Brasil 2019**. São Paulo (Brasil), 2019. 20 p.

INSTRUTHERM. **Detector de 4 gases mod. DG-500**: catálogo. Instrutherm, 2017. Disponível em: <https://bit.ly/3aZIDbE>. Acesso em: jun. 2019.

LACERDA, A.; LEROUX, T.; MORATA, T. Ototoxic effects of carbon monoxide exposure: a review. **Pró-Fono Revista de Atualização Científica**, v. 17, n. 3, p. 403-412, 2005.

LAMBERTSEN, C. J. **Carbon dioxide tolerance and toxicity**. Philadelphia (United States): University of Pennsylvania Medical Center. Philadelphia. 1971. 86 p.

LI, X.; ZHU, N.; GUO, R. D. Indoor air pollution control and cognition situation investigation in university. In: 2011 INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRIC TECHNOLOGY AND CIVIL ENGINEERING (ICETCE), Lushan (China), **Proceedings...** 2011. p. 1307-1309.

McROBERTS, M. **Arduino Básico**. São Paulo: Novatec, 2011.

MOUSER ELECTRONICS. **Technical data DHT11 humidity & temperature sensor**. Mouser Electronics. 201-. 10 p.

MUKHOPADHYAY, A. *apud*. Design of air quality meter and pollution detector. In: 8th ANNUAL INDUSTRIAL AUTOMATION AND ELECTROMECHANICAL ENGINEERING (IEMECON), 2017, Bangkok (Thailand), **Proceedings...** 2017. p. 381-384.

MUTHUKUMAR, S. *apud*. IoT based air pollution monitoring and control system. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INVENTIVE RESEARCH IN COMPUTING APPLICATIONS (ICIRCA 2018), Coimbatore (India), **Proceedings...** 2018. p.1286-1288.

NEMERY, B. *apud*. Exercise and air quality: 10 top tips. **Breathe (Sheff)**, v. 11, n. 3, p. 239-242, 2015.

SINHARAY, R. *apud*. Respiratory and cardiovascular responses to walking down a traffic-polluted road compared with walking in a traffic-free area in participants aged 60 years and older with chronic lung or heart disease and age-matched healthy controls: a randomised, crossover study. **The Lancet**, v. 391, n. 10118, p. 339-349, 2018.

TILLETT, T. Don't hold your breath: indoor CO2 exposure and impaired decision making. **Environment Health Perspectives**, v. 120, n. 12, p. A475, 2012.