

Universidade do Minho

Escola de Engenharia

Tiago Costa de Araújo

**Sobre a Qualidade dos Dados em
Sensoriamento de Baixo Custo para
Caracterização Ambiental de Espaços Urbanos**

Tese de Doutoramento

Programa Doutoral em Engenharia Eletrónica e de
Computadores

Trabalho efetuado sob a orientação de:

Professor Doutor Adriano Jorge Cardoso Moreira

Professora Doutora Lúcia Torres Silva

Abril de 2020

DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros, desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos.

Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada.

Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do RepositóriUM da Universidade do Minho.

Licença concedida aos utilizadores deste trabalho



Atribuição

CC BY

AGRADECIMENTOS

Seria injusto iniciar esta seção senão pelos meus orientadores Dr. Adriano Moreira e Dr.^a Lígia Silva. Tenho muito a agradecer em razão da solicitude, sabedoria, suporte, compreensão e empatia que tiveram comigo, seja no âmbito acadêmico ou pessoal. São os responsáveis pelo amadurecimento acadêmico e científico mais significativo de minha jornada. Por isto os tenho como exemplos a seguir. Desejo, sinceramente, que nosso contacto não se encerre com esta tese.

Agradeço ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte e à Universidade do Minho (na figura de seus respetivos interlocutores) por todas as ações que permitiram firmar o protocolo de cooperação, cenário do qual este trabalho é resultado, bem como aos contribuintes brasileiros e portugueses.

A lista de pessoas que nutro gratidão é longa, sendo – talvez – proporcional ao tamanho da trajetória que aqui perfaz. Entretanto, ciente da necessidade de ser breve, mais menciono: os corriqueiros companheiros de viagem à Guimarães, Carlos e Victor, pela confraria que formamos; o amigo vimezanense Filipe Félix, e sua família, pelas gentilezas, companhia e também pela imersão cultural; os amigos que adquiri na Universidade do Minho, Abdulsalam Muhrat e Samih Eisa, pelas conversas, almoços e cafés; os funcionários da Secretaria Acadêmica, em especial à Sra. Verónica Costa, por toda a fineza e ajuda; os meus amigos de Natal (RN), colegas de trabalho e meus familiares próximos, pela partilha de momentos agradáveis e divertidos.

Que se destaque gratidão especial às minhas companhias de vida, a esposa Idaliana – pelo convívio, estima e encorajamento (quando as dificuldades me tiravam o sono) – e nossa pequena Dominique, por dar um novo significado ao universo e ter-nos permitido vivenciar o afeto em sua forma mais pura.

Por fim, dedico este esforço à minha mãe (em memória), a quem escrevi meu primeiro bilhete em meu primeiro dia na escola, a quem escrevo agora, talvez em meu “último dia na escola”, e a quem sou grato pelos ensinamentos e correções. Dedico em igual ao meu pai, por me dizer quando eu era apenas uma criança curiosa que um dia eu seria “doutor” (talvez em outra interpretação, mas igualmente nobre), e que, para que aquilo se concretizasse, poderia faltar dinheiro para os brinquedos, mas jamais para os livros.

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho académico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração.

Mais declaro que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

ABSTRACT

This work investigates the quality of low – and ultra-low – cost sensors that may be applied in environmental monitoring campaigns in urban areas, given its nominal operation features. Sensors of temperature, humidity, atmospheric pressure, carbon monoxide, carbon dioxide and ozone were investigated, chosen from a selection of commercial models available, often used in the instrumentation of initiatives in operation.

The climatic sensors were analysed under the conditions of a climatic controlled chamber where different situations for temperature and humidity were programmed. As results, it was observed that: most of the temperature sensors shown satisfactory performance; the humidity sensors have shown moderate performance; the pressure sensors shown good agreement between them, but it was observed that they suffer some interference from temperature, and it can be crucial to its accuracy when applied outdoors.

The carbon dioxide sensors were evaluated by the comparison of their data with a reference instrument during indoors exposition to indoors concentrations and has shown good results, and some of them are ready for use. The carbon monoxide sensors have not shown conclusive results about its accuracy, but it has promising performance for configuration to lower concentrations. Ozone sensors did not provide conclusive results: either positive neither negative.

In general terms, it can be concluded that climatic sensors can provide useful data if used carefully. Gas sensors, however, are much more critic, considering that its handling is not intuitive, and its readings, without treatment, presented limited quality.

Keywords: Low cost sensors, Data Quality, Environmental Monitoring.

RESUMO

Este trabalho investiga a qualidade dos dados de sensores de baixo, e ultrabaixo custo que podem ser utilizados em campanhas de monitoramento ambiental para áreas urbanas, dadas as suas características nominais de operação. Foram investigados sensores de temperatura, humidade, pressão atmosférica, monóxido de carbono, dióxido de carbono e ozono, escolhidos a partir de uma triagem de modelos comerciais disponíveis, utilizados na instrumentação de iniciativas em funcionamento.

Os sensores – então chamados de – climáticos foram analisados sob as condições de uma câmara de ambiente controlado, onde foi possível programar condições específicas de temperatura e humidade. O resultado da avaliação destes sensores foram: satisfatórios para maior parte dos sensores de temperatura; os de humidade apresentaram desempenho moderado; os sensores de pressão apresentaram boa concordância em condições ambientais específicas, sugerindo que as condições climáticas podem interferir na exatidão destes sensores.

Os sensores de CO₂ foram avaliados pela comparação com um instrumento de referência enquanto mediam concentrações em ambiente interior e apresentaram bons resultados. Os sensores de monóxido de carbono, apesar da necessidade de resultados mais conclusivos, demonstraram ser promissores para sensoriamento de baixas concentrações. Da avaliação dos sensores de ozono não se obtiveram resultados significativos que permitissem concluir sobre a qualidade dos dados por si fornecidos.

Em termos gerais, conclui-se que os sensores climáticos são capazes de fornecer dados úteis, desde que sejam utilizados com cuidado. Os sensores de gases, por sua vez, são consideravelmente mais críticos, uma vez que seu manuseio não é intuitivo e suas leituras, sem tratamento, apresentaram uma qualidade limitada.

Palavras-chave: Sensores de baixo custo, qualidade dos dados, monitoramento ambiental.

ÍNDICE

DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.
AGRADECIMENTOS	III
DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE	IV
ABSTRACT	V
RESUMO	VI
ÍNDICE	VII
LISTA DE FIGURAS	X
LISTA DE TABELAS	XVIII
LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÓNIMOS	XXII
1 INTRODUÇÃO	24
1.1. Motivação.....	25
1.2. Objetivos	25
1.3. Procedimentos metodológicos.....	26
1.4. Contributos esperados	27
1.5. Estrutura do documento	27
2 REVISÃO DA LITERATURA E ESTADO DA ARTE	29
2.1 Meio ambiente.....	29
2.1.1 Caracterização das variáveis envolvidas ao meio ambiente	29
2.1.2 Monitoramento ambiental	33
2.2 Sensoriamento participativo	37
2.3 “Citizen Science” e “Smart Cities”	41
2.4 Qualidade dos Dados	45
3 PRINCÍPIOS DE TRANSDUÇÃO.....	50
3.1 Sensores Climáticos.....	50
3.1.1 Temperatura	51
3.1.2 Humidade Relativa do Ar	53
3.1.3 Pressão Atmosférica	55
3.2 Sensores de qualidade do ar.....	57
3.2.1 Sensores eletroquímicos	57
3.2.2 Sensores de óxido metálico.....	60
3.2.3 Sensores óticos	62
4 PREPARAÇÃO EXPERIMENTAL	66
4.1 Seleção dos sensores.....	66
4.1.1 Gama de operação	71
4.1.2 Avaliação de custo.....	71
4.1.3 “Popularidade” do sensor	72
4.1.4 Precisão nominal.....	73
4.1.5 Usabilidade	74
4.1.6 Definição da lista final de sensores	74
4.2 Pormenores Técnicos E De Interface	77
4.2.1 Diagrama elétrico dos sensores climáticos	84
4.2.2 Diagrama elétrico dos sensores de qualidade do ar	86
4.3 Planeamento prático	87

4.3.1	Sensores climáticos	88
4.3.2	Sensores de qualidade do ar.....	91
4.3.2.1	Dióxido de Carbono.....	92
4.3.2.2	Monóxido de Carbono	94
4.3.2.3	Ozono.....	96
5	EXECUÇÃO EXPERIMENTAL	98
5.1	Sensores climáticos	98
5.2	Sensores de qualidade do ar.....	102
5.2.1	Dióxido de Carbono	102
5.2.2	Monóxido de Carbono.....	107
5.2.3	Ozono	114
6	ANÁLISE DOS DADOS.....	117
6.1	Sensores Climáticos.....	119
6.1.1	Temperatura	123
6.1.1.1	Precisão	125
6.1.1.2	Exatidão.....	129
6.1.1.3	Justeza	135
6.1.2	Humidade	142
6.1.2.1	Precisão	142
6.1.2.2	Exatidão.....	146
6.1.2.3	Justeza	150
6.1.3	Pressão Atmosférica	153
6.1.3.1	Correlação e concordância.....	154
6.1.3.2	Intervalo de confiança (sobreposição gráfica).....	157
6.2	Sensores de Qualidade do Ar	161
6.2.1	Dióxido de Carbono	161
6.2.1.1	Conversão dos dados brutos do sensor MG-811	162
6.2.1.2	Exatidão.....	165
6.2.1.3	Justeza	169
6.2.2	Monóxido de Carbono.....	171
6.2.2.1	Conversão dos dados brutos dos sensores de CO.....	172
6.2.2.2	Exatidão.....	177
6.2.2.3	Justeza	181
6.2.3	Ozono	182
6.3	Resumo	183
6.3.1	Sensores climáticos.....	183
6.3.2	Sensores de qualidade do ar.....	185
7	DISCUSSÃO E CONCLUSÃO.....	186
7.1	Resumo dos Resultados	186
7.1.1	Sensores climáticos.....	187
7.1.2	Sensores de qualidade do ar.....	188
7.2	Limitações do trabalho	189
7.3	Trabalhos futuros.....	190
7.4	Considerações finais	191
BIBLIOGRAFIA.....		194
I.	ANEXO I: INFORMAÇÕES COMPLEMENTARES SOBRE A ANÁLISE DOS DADOS.....	204

I.I. Verificação de sincronia dos sensores climáticos.....	204
I.II. Gráficos de temperatura obtidos a partir das execuções experimentais	206
I.III. Gráficos de humidade obtidos a partir das execuções experimentais.....	209
I.IV. Gráficos de pressão barométrica obtidos a partir das execuções experimentais.	211
ANEXO II – CÓDIGOS UTILIZADOS PARA LEITURA DOS SENSORES.....	214
II.I Artefato climático (sensores de temperatura, humidade relativa do ar e pressão atmosférica). 214	
II.II Artefato para dióxido de carbono.	217
II.III Artefato para monóxido de carbono.	219

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1. Plataformas automatizadas de recolha de dados ambientais. (a) Brasil (INPE); (b) Portugal (IPMA).....	35
Figura 2-2. Artefacto eletrónico de recolha de dados ambientais baseado em Arduino proposto pelos autores em (Saini <i>et al.</i> , 2016).	42
Figura 2-3. Imagem do antigo CubeSensor, hoje produzido pela Koto Lab.	43
Figura 3-1. Termístor de vidro (superior) e epóxi (inferior). (Guadagnini & Barlette, 2005)	51
Figura 3-2. Comportamento das curvas de resposta de sensores de temperatura quanto ao seu modo de transdução. (Fonte: Adaptação própria).....	52
Figura 3-3. Higrómetro mecânico. (Fonte: FineTools).....	53
Figura 3-4. Ilustração de estrutura interna de um higrómetro eletrónico capacitivo (à esquerda) e resistivo (à direita). (Fonte: Adaptação própria)	54
Figura 3-5. Exemplo de curva de resposta de sensor de humidade relativa: (a) capacitivo; (b) resistivo.	54
Figura 3-6. Estrutura interna de um barómetro aneróide.	55
Figura 3-7. Proposta de barómetro microfabricado utilizando cantoneira móvel com elemento piezoresistivo.....	56
Figura 3-8. Fotografia microscópica de câmara a vácuo dos barómetros comerciais da Bosch Sensortech (O'Brien, 2011).	56
Figura 3-9. Barómetro (em destaque verde) na placa mãe do <i>smartphone</i> Samsung Galaxy S7.	56
Figura 3-10. Diagrama de componentes internos de um sensor eletroquímico genérico.	57
Figura 3-11. Encapsulamento tradicional para sensores eletroquímicos. (Fonte: <i>ApolloSense</i>).....	58
Figura 3-12. Ilustração do processo de reidratação de um sensor eletroquímico de monóxido de carbono utilizando vapor de solução saturada de água e sal. (Fonte: <i>TSI Instruments</i>)	59
Figura 3-13. Diagrama de estrutura interna e vista lateral de um sensor de óxido metálico semiconductor (MOS).	60
Figura 3-14. Conjunto de sensores de gases a óxido metálico em placas de interface analógica. (Fonte: <i>Emakefun</i>).....	61
Figura 3-15. Coeficiente de absorção energética de alguns gases em função do comprimento de onda da gama de infravermelho.	62

Figura 3-16. Processo de transdução simplificado por absorção, utilizado em sensores de infravermelho não dispersivo (Bogue, 2015).	63
Figura 3-17. Sensores óticos a infravermelho não-dispersivo em diferentes encapsulamentos (imagem fora de escala). (Fonte: <i>Alphasense</i> e <i>Inteform</i>).	63
Figura 3-18. Diagrama do processo de deteção de óxidos de azoto por quimiluminescência.	64
Figura 3-19. Diagrama de deteção de SO ₂ por fluorescência ultravioleta. ²⁵	65
Figura 3-20. Equipamentos padrão para deteção de: (a) NO _x por quimiluminescência; (b) SO ₂ por fluorescência ultravioleta.	65
Figura 4-1. Árvore de decisões simplificada para a seleção dos sensores.	68
Figura 4-2. Sensores climáticos adquiridos para a investigação sobre a qualidade dos dados. Da esquerda para a direita: DS18B20, AM2302 (DHT22), HTU21D, BMP180, BME280 e MPL3115A2.	76
Figura 4-3. Sensores de qualidade do ar para investigação sobre a qualidade dos dados. Da esquerda para a direita: MG811, MH-Z16, MQ7, MQ9 e MiCS-2614.	77
Figura 4-4. Artefacto de hardware utilizado para recolha dos dados. (Fonte: Arduino.cc)	78
Figura 4-5. Área de operação de diferentes tipos de sensores de gases. (Adaptado de Figaro Japan Co.).	81
Figura 4-6. Esquema de conexão do sensor DS18B20.	85
Figura 4-7. Esquema de conexão do sensor AM2302 (com DHT22 interno).	85
Figura 4-8. Diagrama elétrico do sensor BMP180.	85
Figura 4-9. Diagrama elétrico do sensor BME280, com alteração de endereço lógico.	85
Figura 4-10. Diagrama de conexão do sensor HTU21D.	86
Figura 4-11. Diagrama de conexão do sensor MPL3115A2.	86
Figura 4-12. Diagrama de conexão da placa do sensor MQ7.	86
Figura 4-13. Diagrama de conexão da placa do sensor MQ9.	86
Figura 4-14. Diagrama de ligações elétricas do sensor MG-811.	87
Figura 4-15. Diagrama de conexões elétricas do sensor MH-Z16. A figura apresenta seus dois segmentos: sensor e interface.	87
Figura 4-16. Esquema de ligações elétricas para o sensor MiCS-2614.	87
Figura 4-17. Câmara climática idêntica à disponibilizada para a execução experimental dos sensores climáticos (Divulgação, Aralab©).	89

Figura 4-18. Planeamento de programação de estágios climáticos na câmara artificial. As cores correspondem à temperatura, e os textos internos aos patamares de humidade relativa.	90
Figura 4-19. Instrumento de referência para temperatura e humidade. (Fonte: <i>Lasca Electronics</i>)	91
Figura 4-20. Instrumento de referência disponível para utilização no experimento de dióxido de carbono. (Vaisala)	93
Figura 4-21. Equipamento utilizado como referência para o monóxido de carbono.....	95
Figura 4-22. Ilustração do local planeado para o posicionamento dos sensores de monóxido de carbono. (Google Maps)	96
Figura 4-23. Valores diurnos médios de ozono em nível de solo em Pequim de 2014 a 2017 (Zhao et al., 2018).....	97
Figura 5-1. Interface e monitor sensível a toque da câmara de ambiente controlado.	99
Figura 5-2. Artefacto final com sensores ligados ao <i>Arduino</i>	99
Figura 5-3. Artefactos em funcionamento no interior da câmara climática antes da rotina experimental.	100
Figura 5-4. Artefactos em funcionamento no interior da câmara climática durante a execução experimental.	100
Figura 5-5. Um conjunto de sensores sendo testados em bancada na sala LID 3.....	105
Figura 5-6. Conjunto experimental em execução em ambiente fechado do LID 3.	105
Figura 5-7. Fontes de alimentação necessárias para os dispositivos exemplificados na Figura 5-6... ..	105
Figura 5-8. Sensores em funcionamento durante o experimento em quarto residencial.	106
Figura 5-9. Alimentador auxiliar utilizado na ligação dos sensores MQ7 e MQ9.	107
Figura 5-10. Artefacto construído com os sensores MQ7 durante o <i>burn-in</i>	108
Figura 5-11. Artefacto construído com os sensores MQ9 durante o <i>burn-in</i>	108
Figura 5-12. Recorte temporal da saída do sensor MQ-7.B, em níveis de tensão, obtido das primeiras 24h de <i>burn-in</i> (tempo de amostragem de 5 segundos).....	109
Figura 5-13. Dispositivos durante execução ao ar livre. À esquerda as fontes de alimentação; ao centro, os artefactos eletrónicos; na parte inferior central, o instrumento de referência da marca TSI.	110
Figura 5-14. Vista da rua em horário de baixo movimento. À esquerda da imagem, o parque da Quintã.	111
Figura 5-15. Indicativo de densidade de tráfego típico da região em horário de pico.....	111

Figura 5-16. Tráfego típico nas imediações da localização em que os sensores foram expostos na cidade de Natal, Brasil. O local está marcado com um “X”	113
Figura 5-17. Artefactos durante exposição ao ar exterior em Natal, Brasil.	113
Figura 5-18. Artefacto eletrônico com os sensores MiCS-2614 em funcionamento no pré-teste.	115
Figura 6-1. Leituras de temperatura do conjunto de sensores A durante a sua primeira execução experimental, ocorrida na primeira rotina.	122
Figura 6-2. Leituras de humidade relativa do conjunto de sensores C, durante a sua primeira execução experimental, ocorrida na primeira rotina.	122
Figura 6-3. Leituras de pressão atmosférica obtidas pelo conjunto de sensores A, durante a sua primeira execução experimental.	122
Figura 6-4. Diagrama de caixas para avaliação da precisão do sensor DS18B20. (a) Desvio padrão das leituras de temperatura; (b) cv^{-1} das leituras de temperatura.	127
Figura 6-5. Diagrama de caixas para avaliação da precisão do sensor AM2302. (a) Desvio padrão das leituras de temperatura; (b) cv^{-1} das leituras de temperatura.	127
Figura 6-6. Diagrama de caixas para avaliação da precisão do sensor HTU21D. (a) Desvio padrão das leituras de temperatura; (b) cv^{-1} das leituras de temperatura.	127
Figura 6-7. Diagrama de caixas para avaliação da precisão do sensor BMP180. (a) Desvio padrão das leituras de temperatura; (b) cv^{-1} das leituras de temperatura.	128
Figura 6-8. Diagrama de caixas para avaliação da precisão do sensor BME280. (a) Desvio padrão das leituras de temperatura; (b) cv^{-1} das leituras de temperatura.	128
Figura 6-9. Diagrama de caixas para avaliação da precisão do sensor MPL3115A2. (a) Desvio padrão das leituras de temperatura; (b) cv^{-1} das leituras de temperatura.	128
Figura 6-10. Erro Médio individual dos sensores de temperatura. (a) DS18B20; (b) AM2302; (c) HTU21D; (d) BMP180; (e) BME280; (f) MPL3115A2.	131
Figura 6-11. Comparativo geral dos erros absolutos médios dos sensores de temperatura.	132
Figura 6-12. Comparativo geral de erros médios absolutos após compensação aritmética por desvio médio com visualização de concordância ao requisito de erro da Organização Mundial de Meteorologia.	133
Figura 6-13. Gráficos de dispersão das unidades A (a), B (b) e C (c) do sensor de temperatura DS18B20 nas suas duas execuções experimentais (1 e 2).	137

Figura 6-14. Gráficos de dispersão das unidades A (a), B (b) e C (c) do sensor de temperatura AM2302 nas suas duas execuções experimentais (1 e 2).....	137
Figura 6-15. Gráficos de dispersão das unidades A (a), B (b) e C (c) do sensor de temperatura HTU21D nas suas duas execuções experimentais (1 e 2).....	137
Figura 6-16. Gráficos de dispersão das unidades A (a), B (b) e C (c) do sensor de temperatura BMP180 nas suas duas execuções experimentais (1 e 2).....	138
Figura 6-17. Gráficos de dispersão das unidades A (a), B (b) e C (c) do sensor de temperatura BME280 nas suas duas execuções experimentais (1 e 2).....	138
Figura 6-18. Gráficos de dispersão das unidades A (a), B (b) e C (c) do sensor de temperatura MPL3115A2 nas suas duas execuções experimentais (1 e 2).....	138
Figura 6-19. Mapa de cor com a Relação Sinal-Ruído do sensor AM2302.....	145
Figura 6-20. Mapa de cor com a Relação Sinal-Ruído do sensor HTU21D.....	145
Figura 6-21. Mapa de cor com a Relação Sinal-Ruído do sensor BME280.....	145
Figura 6-22. Valores médios gerais da Relação Sinal-Ruído dos sensores de humidade nas execuções experimentais.....	146
Figura 6-23. Mapa de cor referente à exatidão do sensor AM2302.....	149
Figura 6-24. Mapa de cor referente à exatidão do sensor HTU21D.....	149
Figura 6-25. Mapa de cor referente à exatidão do sensor BME280.....	149
Figura 6-26. Gráfico de dispersão para verificar reprodutibilidade das leituras da mesma referência de humidade relativa em três execuções experimentais distintas. Da esquerda para a direita: 1ª execução x 2ª execução, 1ª execução x 3ª execução, 2ª execução x 3ª execução.....	150
Figura 6-27. Gráficos de dispersão para obtenção do modelo linear e coeficiente de determinação do sensor AM2302, nas unidades A, B e C.....	151
Figura 6-28. Gráficos de dispersão para obtenção do modelo linear e coeficiente de determinação do sensor HTU21D, nas unidades A, B e C.....	151
Figura 6-29. Gráficos de dispersão para obtenção do modelo linear e coeficiente de determinação do sensor BME280, nas unidades A, B e C.....	152
Figura 6-30. Comparação entre sensores A e B durante primeira execução experimental.....	154
Figura 6-31. Comparação entre A e C durante a segunda execução experimental.....	154
Figura 6-32. Comparação entre sensores B e C durante terceira execução experimental.....	155
Figura 6-33. Comparação entre sensores B e C durante a quarta execução experimental.....	155

Figura 6-34. Comparação entre sensores A e B durante a quinta execução experimental.	155
Figura 6-35. Comparação entre sensores A e C durante a sexta, e última, execução experimental. ...	155
Figura 6-36. Sobreposição de exatidão nominal dos sensores de pressão atmosférica da unidade A em sua primeira exposição experimental.....	157
Figura 6-37. Sobreposição de exatidão nominal dos sensores de pressão atmosférica da unidade A em sua segunda exposição experimental.	158
Figura 6-38. Sobreposição de exatidão nominal dos sensores de pressão atmosférica da unidade B em sua primeira exposição experimental.....	158
Figura 6-39. Sobreposição de exatidão nominal dos sensores de pressão atmosférica da unidade B em sua segunda exposição experimental.	159
Figura 6-40. Sobreposição de exatidão nominal dos sensores de pressão atmosférica da unidade C em sua primeira exposição experimental.....	159
Figura 6-41. Sobreposição de exatidão nominal dos sensores de pressão atmosférica da unidade C em sua primeira exposição experimental.....	160
Figura 6-42. Leituras do sensor de referência para dióxido de carbono colhidas no primeiro experimento em ambiente interior, realizado na sala LID3, no DSI da Universidade do Minho.....	161
Figura 6-43. Leituras do sensor de referência para dióxido de carbono colhidas no segundo experimento em ambiente interior em cômodo residencial.	162
Figura 6-44. Leituras do sensor de referência para dióxido de carbono colhidas no terceiro experimento em ambiente interior, realizado na sala LID3, no DSI da Universidade do Minho.....	162
Figura 6-45. Curva de resposta do sensor MG-811 fornecida pelo fabricante (Hanwei Electronics, 2016).	163
Figura 6-46. Ajuste de dados nominal para o sensor MG-811.	164
Figura 6-47. Conversão de dados do sensor MG-811, unidade A, com dados do sensor referência como gabarito.....	164
Figura 6-48. Conversão de dados do sensor MG-811, unidade B, com dados do sensor referência como gabarito.....	164
Figura 6-49. Leituras dos sensores de CO ₂ na primeira coleta de dados.....	166
Figura 6-50. Leituras dos sensores de CO ₂ na segunda execução experimental.	167
Figura 6-51. Leituras dos sensores de CO ₂ na terceira execução experimental.....	168

Figura 6-52. Gráficos de dispersão para avaliação de justeza do sensor MH-Z16, unidade “A” em sua: (a) primeira execução, (b) segunda execução e (c) terceira execução.....	170
Figura 6-53. Gráficos de dispersão para avaliação de justeza do sensor MH-Z16, unidade “B” em sua: (a) primeira execução, (b) segunda execução e (c) terceira execução.....	170
Figura 6-54. Gráficos de dispersão para avaliação de justeza do sensor MG-811, unidade “A” em sua: (a) primeira execução, (b) segunda execução e (c) terceira execução.....	170
Figura 6-55. Gráficos de dispersão para avaliação de justeza do sensor MG-811, unidade “B” em sua: (a) primeira execução, (b) segunda execução e (c) terceira execução.....	171
Figura 6-56. Curva de sensibilidade dos sensores MQ7 (a) e MQ9 (b).	172
Figura 6-57. Dependência ambiental nominal da resistência sensitiva dos sensores MQ7 e MQ9.....	174
Figura 6-58. Dependência dos coeficientes lineares em função da humidade relativa do ar.....	174
Figura 6-59. Curvas de ajuste para os sensores de CO em função da variação da resistência sensitiva normalizada.	176
Figura 6-60. Leituras de CO fornecidas pela referência TSI em exposição ao ar exterior nas proximidades da Universidade do Minho.	176
Figura 6-61. Leituras dos sensores de monóxido de carbono obtidas da primeira exposição experimental ao ar exterior após aquecimento.	178
Figura 6-62. Curva de ajuste dos sensores de CO em função da resistência sensitiva normalizada durante segunda exposição experimental ao ar exterior.....	179
Figura 6-63. Leituras dos sensores de monóxido de carbono obtidas da segunda exposição experimental ao ar exterior.....	179
Figura 6-64. Gráficos de dispersão para avaliação de justeza dos sensores referentes à primeira (a) e segunda (b) exposição experimental em situações de baixa concentração de monóxido de carbono.	181
Figura I-1. Leituras de temperatura do conjunto de sensores B durante a sua primeira execução experimental, ocorrida na primeira rotina.	206
Figura I-2. Leituras de temperatura do conjunto de sensores C durante a sua primeira execução experimental, ocorrida na segunda rotina.....	207
Figura I-3. Leituras de temperatura do conjunto de sensores A durante a sua segunda execução experimental, ocorrida na segunda rotina.....	207
Figura I-4. Leituras de temperatura do conjunto de sensores B durante a sua segunda execução experimental, ocorrida na terceira rotina.	208

Figura I-5. Leituras de temperatura do conjunto de sensores C durante a sua segunda execução experimental, ocorrida na terceira rotina.	208
Figura I-6. Leituras de humidade relativa do conjunto de sensores B durante sua primeira execução experimental, ocorrida na primeira rotina para verificação dos dados de humidade relativa do ar.	209
Figura I-7. Leituras de humidade relativa do conjunto de sensores A durante sua primeira execução experimental, ocorrida na segunda rotina para verificação dos dados de humidade relativa do ar.	209
Figura I-8. Leituras de humidade relativa do conjunto de sensores C, durante a sua segunda execução experimental, ocorrida na terceira rotina para verificação dos dados de humidade relativa do ar.	210
Figura I-9. Leituras de humidade relativa do conjunto de sensores B, durante a sua segunda execução experimental, ocorrida na segunda rotina para verificação dos dados de humidade relativa do ar.	210
Figura I-10. Leituras de humidade relativa do conjunto de sensores A, durante a sua segunda execução experimental, ocorrida na terceira rotina para verificação dos dados de humidade relativa do ar.	211
Figura I-11. Leituras de pressão atmosférica obtidas pelo conjunto de sensores B, durante sua primeira execução experimental, entre os dias 1º e 3 de março de 2017.	211
Figura I-12. Leituras de pressão atmosférica obtidas pelo conjunto de sensores C, durante sua primeira execução experimental, entre os dias 3 e 5 de março de 2017.	212
Figura I-13. Leituras de pressão atmosférica obtidas pelo conjunto de sensores A, durante sua segunda execução experimental, entre os dias 3 e 5 de março de 2017.	212
Figura I-14. Leituras de pressão atmosférica obtidas pelo conjunto de sensores B, durante a sua segunda execução experimental, ocorrida entre os dias 6 e 8 de março de 2017.	213
Figura I-15. Leituras de pressão atmosférica obtidas pelo conjunto de sensores C, durante a sua segunda execução experimental, ocorrida entre os dias 6 e 8 de março de 2017.	213

LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1. Poluentes, suas origens e suas consequências à saúde humana (Choi, Kim, Cha, & Ha, 2009; Environmental Protection Agency, 2017; WHO, 2016).	32
Tabela 2-2. Valores típicos de operação (ou valores-guia) para as grandezas climáticas e poluentes atmosféricos que compõem usualmente a atmosfera urbana (Agência Portuguesa do Ambiente, 2017; WMO, 2008).	33
Tabela 3-1. Sumarização qualitativa de características de desempenho dos tipos de sensores de temperatura. (Adaptação de <i>Texas Instruments</i> e <i>Design World</i>).....	52
Tabela 3-2. Exemplos de interferências cruzadas, em nível percentual, em sensores de gases comumente utilizados no monitoramento da qualidade do ar exterior. (Fonte: <i>Industrial Scientific</i>).....	59
Tabela 4-1. Listagem dos principais sensores climáticos obtidos na triagem inicial (preços de junho de 2016).....	69
Tabela 4-2. Sensores de qualidade do ar obtidos na triagem inicial (preços de junho de 2016).....	69
Tabela 4-3. Recomendações de resolução para grandezas climáticas de acordo com a Organização Mundial de Meteorologia. (WMO, 2008).....	70
Tabela 4-4. Incerteza de medição de acordo com Organização Mundial de Meteorologia e precisão estimada a partir destes valores (WMO, 2008).	74
Tabela 4-5. Sensores climáticos adquiridos para experimento (T – Temperatura; H – Humidade; P – Pressão Atmosférica).	75
Tabela 4-6. Sensores de qualidade do ar disponíveis para aquisição no segundo semestre de 2016. .	76
Tabela 4-7. Desempenho nominal dos sensores constituintes do universo de análise.	80
Tabela 4-8. Sumarização das características dos sensores de gás quanto à sua tecnologia. (Com adaptação de informações contidas em Ozone Solutions e O.I. Analytical)	82
Tabela 6-1. Correlação de Pearson (r) dos sensores de temperatura do Conjunto A para com o dispositivo de referência. Linha destacada corresponde à amostra síncrona.	120
Tabela 6-2. Correlação de Pearson (r) dos sensores de humidade do Conjunto A para com o dispositivo de referência.	120
Tabela 6-3. Correlação de <i>Pearson</i> (r) dos sensores de pressão barométrica de mesmo tipo entre os conjuntos A e B, na primeira execução experimental.	121

Tabela 6-4. Parâmetros estatísticos calculados para os conjuntos de sensores A e B em cada patamar de temperatura, a partir da primeira execução experimental na câmara de ambiente controlado.	123
Tabela 6-5. Parâmetros estatísticos calculados para os conjuntos de sensores A e C em cada patamar de temperatura a partir da segunda execução experimental na câmara de ambiente controlado.	124
Tabela 6-6. Parâmetros estatísticos calculados para os conjuntos de sensores A e C em cada patamar de temperatura a partir da terceira execução experimental na câmara de ambiente controlado.....	124
Tabela 6-7. Compilação de dados de desempenho para a análise de precisão dos sensores de temperatura.	126
Tabela 6-8. Compilação de dados de desempenho para análise de exatidão dos sensores de temperatura.	130
Tabela 6-9. Erros Quadráticos Médios dos sensores durante o comportamento dinâmico, e um comparativo com os parâmetros obtidos em comportamento estático.	135
Tabela 6-10. Possíveis interpretações qualitativas dos modelos lineares a serem obtidos dos sensores, comparados com um modelo ideal para $\alpha=0$ e $\beta=1$	136
Tabela 6-11. Parâmetros individuais e médios dos modelos lineares obtidos dos sensores de temperatura investigados a partir das execuções experimentais.	139
Tabela 6-12. Comparativo entre a temperatura esperada, temperatura estimada pelo modelo linear comum e a temperatura média geral lida por cada sensor nos experimentos.....	140
Tabela 6-13. Distância quadrática média entre os modelos estimadores médios de cada sensor e a reta referencial.	141
Tabela 6-14. Dados de precisão dos sensores de humidade quando em 10°C.....	143
Tabela 6-15. Dados de precisão dos sensores de humidade quando em 25°C.....	143
Tabela 6-16. Dados de precisão dos sensores de humidade quando em 40°C.....	144
Tabela 6-17. Dados de desempenho de exatidão dos sensores de humidade relativa do ar para a temperatura de 10°C.....	147
Tabela 6-18. Dados de desempenho de exatidão dos sensores de humidade relativa do ar quando em 25°C.....	147
Tabela 6-19. Dados de desempenho de exatidão dos sensores de humidade relativa do ar quando em 40°C.....	148
Tabela 6-20. Verificação de reprodutibilidade entre as leituras da referência nas três execuções experimentais.....	150

Tabela 6-21. Modelos lineares descritivos médios dos sensores de humidade em comparação com sensor de referência.	152
Tabela 6-22. Desvio quadrático médio computado entre o descritor linear médio de cada sensor de humidade relativa e a reta de referência.	153
Tabela 6-23. Desvio quadrático médio geral entre pares de sensores de mesmo modelo, sob mesmas condições experimentais.....	156
Tabela 6-24. Erro quadrático médio dos sensores de dióxido de carbono em primeiro experimento.	166
Tabela 6-25. Erro quadrático médio dos sensores de dióxido de carbono em segundo experimento.	167
Tabela 6-26. Erro quadrático médio dos sensores de dióxido de carbono em terceiro experimento...	169
Tabela 6-27. Sumário de calibração dos sensores de monóxido de carbono em primeira exposição experimental.	177
Tabela 6-28. Erro Quadrático Médio dos sensores de monóxido de carbono obtido na primeira exposição experimental.	178
Tabela 6-29. Sumário de calibração dos sensores de monóxido de carbono em segunda exposição experimental.	179
Tabela 6-30. Erro Quadrático Médio dos sensores de monóxido de carbono obtido na primeira exposição experimental.	180
Tabela 6-31. Sumário com coeficientes de determinação computados em cada exposição experimental.	182
Tabela 6-32. Sumário de indicativos de desempenho obtidos dos sensores de temperatura.....	183
Tabela 6-33. Sumário de dados de desempenho obtidos dos sensores de humidade relativa.	184
Tabela 6-34. Sumário de dados de desempenho obtidos dos sensores de pressão atmosférica.	184
Tabela 6-35. Sumário de dados de desempenho obtidos dos sensores de dióxido de carbono.	185
Tabela 6-36. Sumário de dados de desempenho obtidos dos sensores de monóxido de carbono.	185
Tabela I-1. Verificação de sincronia através da Correlação de Pearson (r) dos sensores de temperatura do Conjunto B para com o dispositivo de referência.	204
Tabela I-2. Verificação de sincronia através da Correlação de Pearson (r) dos sensores de temperatura do Conjunto C para com o dispositivo de referência.	204
Tabela I-3. Verificação de sincronia através da Correlação de Pearson (r) dos sensores de humidade do Conjunto B para com o dispositivo de referência.	205

Tabela I-4. Verificação de sincronia através da Correlação de Pearson (r) dos sensores de humidade do Conjunto C para com o dispositivo de referência.	205
Tabela I-5. Verificação de sincronia através da Correlação de <i>Pearson</i> (r) dos sensores de pressão barométrica de mesmo tipo entre os conjuntos A e C, na segunda execução experimental.	206

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÓNIMOS

- ADC** – Conversor analógico-digital.
- AES** – *“Advanced Encryption Standard”*.
- APA** – Agência Portuguesa do Ambiente.
- CL** – *“Chemiluminescence”*.
- DIY** – *“Do it Yourself”*.
- DP** – Desvio Padrão.
- E/S** – Entrada/Saída.
- EPA** – *“Environmental Protection Agency”*.
- EQM** – Erro quadrático médio.
- GND** – *“Ground”*.
- GPS** – *“Global Positioning System”*.
- I²C** – *“Inter-integrated circuits”*.
- IDE** – *“Integrated Development Environment”*.
- IEEE** – *“Institute of Electrical and Electronics Engineering”*.
- INMETRO** – Instituto Nacional de Tecnologia, Qualidade e Tecnologia.
- INPE** – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.
- IoT** – *“Internet of Things”*.
- IR** – *“Infrared”*.
- LSB** – *“Least Significant Bit”*.
- MEMS** – *“Micro-electro-mechanical systems”*.
- MOS** – *“Metal-oxide semiconductor”*.
- MSB** – *“Most Significant Bit”*.
- NDIR** – *“Non-dispersive infra-red”*.
- PM** – *“Particulate Matter”*.
- QualAr** – Projeto de monitoramento da qualidade do ar conduzida pela Agência Portuguesa do Ambiente.
- RTD** – *“Resistance Temperature Detector”*.
- SCL** – *“Serial Clock”*.
- SDA** – *“Serial Data”*.
- SNR** – Relação Sinal-Ruído

SPI – *“Serial Peripheral Interface”*.

USB – *“Universal Serial Bus”*.

UV – Ultravioleta.

UVF – *“Ultraviolet fluorescence”*.

VIM – Vocabulário Internacional de Metrologia.

WHO – *“World Health Organization”*.

WMO – *“World Meteorology Organization”*.

CAPÍTULO 1

1 INTRODUÇÃO

Sob uma tendência recente de mercado, vê-se a popularização de plataformas de desenvolvimento baseadas em microcontroladores/microprocessadores a preços acessíveis, assim como a fácil acesso a sensores periféricos de baixo custo¹. Isto leva, dentre um universo de possibilidades, a uma crescente oferta de elementos eletrônicos que podem ser destinados à construção, ou aplicação, de plataformas individuais que, em grandes quantidades (dispersas geograficamente), podem contribuir positivamente ao monitoramento ambiental urbano, fornecendo mais dados acerca do ambiente em que se inserem os indivíduos. Esta difusão tem encontrado amparo em diferentes grupos de indivíduos, sejam aqueles com afinidade pela parte eletrônica, que veem a significação prática de um conjunto “controlador – sensor”, sejam aqueles com afinidade pela quantificação do ambiente e sua preocupação correlata com o meio.

Esta difusão é promissora por algumas razões específicas: há uma descentralização do monitoramento de dados ambientais, permitindo que indivíduos se envolvam em um projeto de coleta de dados; há um grande potencial para capilarização de pontos de coleta de dados ambientais, dado o baixo custo e a baixa complexidade dos dispositivos; há uma suposta confiabilidade nas informações geradas por estes dispositivos, o que habilita também a comercialização de elementos montados prontos para uso. Estes pontos parecem ser atrativos quando comparados às características das estações de referência que possuem um elevado custo de aquisição e manutenção, além da necessidade de grande espaço físico disponível que implica, ainda, na dificuldade de transporte.

Por outro lado, apesar da boa aceitação e amplo emprego destes elementos, foi observado que há uma lacuna sobre a qualidade dos dados gerados por estes sensores quando aplicados a situações do cotidiano. O principal interesse deste trabalho de investigação é avaliar o quão fiáveis são alguns destes sensores de baixo custo que são amplamente comercializados, quer individualmente, quer embarcados em plataformas prontas para uso, e o quanto estes sensores podem ser mesmo úteis como uma ferramenta auxiliar aos instrumentos de referência para monitoramento ambiental em centros urbanos, que exigem uma maior densificação de pontos de coleta.

¹ Custo é um conceito relativo. Por isto, consideramos aqui como sendo de baixo custo os dispositivos cujos valores sejam menos da metade do valor de instrumentos referenciais para o mesmo propósito.

1.1. Motivação

Diversos sensores ambientais climáticos (temperatura, humidade relativa do ar e pressão) e de qualidade do ar (CO₂, CO, O₃, NO_x, etc) vêm sendo comercializados em grande volume nos últimos anos. Estima-se que o mercado de sensores para Internet das Coisas, que engloba os sensores ambientais, atinja a marca dos 22.5 mil milhões de dólares em 2023². Diante de um cenário em que há um potencial para difusão destes sensores por toda a parte, quer para a monitorização de ambientes interiores, quer para ambiente exterior, como centros urbanos, é necessário um estudo da qualidade dos dados gerados por estes dispositivos, permitindo que seja apontado o quão úteis são as informações por eles geradas e, também, fornecer embasamento para futuras decisões sobre aplicação e desenvolvimento de iniciativas colaborativas no âmbito ambiental com sensores de baixo custo.

Portanto, a questão de investigação do presente trabalho pode ser oficializada como: *“São os sensores de baixo (e muito baixo) custo capazes de captar a realidade ambiental em espaços urbanos de maneira fiável quando utilizados na instrumentação de Smart Cities ou ciência cidadã?”*.

1.2. Objetivos

Os objetivos primários deste trabalho são, mas não se limitam a:

- Analisar numericamente os dados dos sensores e extrair indicadores estatísticos para aplicação de métricas de desempenho que permitam conclusões objetivas acerca da qualidade dos dados dos sensores climáticos e de qualidade do ar de baixo custo que, frequentemente, figuram nas iniciativas colaborativas e “faça você mesmo”;
- Investigar a aplicabilidade dos sensores em situações reais do cotidiano urbano, como, por exemplo, robustez às intempéries ou complexidade de uso por indivíduos não treinados (uma das vertentes do sensoriamento participativo e da ciência cidadã);
- Identificar eventuais correlações entre o desempenho de um sensor e a tecnologia empregada em sua fabricação;

² Informação obtida em: <https://www.marketsandmarkets.com/PressReleases/sensors-iot.asp> (novembro de 2018).

- Identificar, a partir de longas exposições experimentais, eventuais fontes de erros ou interferências nos sensores investigados, auxiliando a predição de problemas em iniciativas de monitoramento ambiental com sensores de baixo custo.

1.3. Procedimentos metodológicos

O processo metodológico adotado para atingir os objectivos deste trabalho toma a seguinte sequência:

- Estudo do ponto da situação de conceitos correlatos à utilização de sensores ambientais na instrumentação de campanhas de sensoriamento colaborativo e *smart cities*;
- Apropriação teórica dos principais princípios de transdução utilizados pelos sensores eletrônicos para grandezas climáticas e gases;
- Um estudo da utilização de sensores ambientais nas iniciativas colaborativas e “faça você mesmo”, de modo a se obter uma base para estipular os critérios de escolha dos sensores a serem investigados. Adicionalmente, esta etapa forneceu dados para uma publicação sobre questões do monitoramento ambiental com *smartphones* (de Araújo et al., 2017);
- Estudo dos pormenores técnicos para ligar os sensores em simultâneo sem prejuízo de sincronia nem sobrecarga ao artefacto eletrônico microcontrolador, bem como a programação de hardware para a recolha e armazenamento dos dados em arquivo;
- Planeamento dos experimentos de exposição;
 - Para os sensores climáticos, o experimento se dá em uma câmara de ambiente controlado e programável;
 - O experimento dos sensores de qualidade do ar se dá por exposição a condições naturais, tendo em vista a indisponibilidade de equipamentos e recursos capazes de reproduzir condições controladas dos gases que os sensores são sensíveis;
- Montagem electrónica dos sensores à plataforma de controlo, em acordo com os pormenores técnicos, de modo a preparar os sensores às execuções experimentais planeadas;
- Após a descarga dos dados, verificar sua integridade e sincronia verificada para que
- Empregar os cálculos estatísticos para obtenção dos indicadores de desempenho, em acordo com o Vocabulário Internacional de Metrologia (Inmetro, 2012). São eles: exactidão, precisão e justeza.

- Os cálculos estatísticos incluem (mas não se limitam a): erro médio, erro quadrático médio, desvio padrão, relação sinal-ruído e coeficiente de determinação.
- Para alguns dos sensores de qualidade do ar, é necessária uma etapa preliminar de conversão dos dados. O processo de conversão é descrito na referida seção. Então estes dados são confrontados novamente com a referência, e seus indicadores de desempenho também são verificados por cálculos estatísticos.
- As discussões acerca da qualidade dos dados dos sensores são, finalmente, feitas com base nos indicadores obtidos na etapa de análise.

1.4. Contributos esperados

A partir das metas traçadas, espera-se poder contribuir com este trabalho nos seguintes pontos:

- Fornecer dados sobre o quanto os sensores de baixo (e ultrabaixo) custo podem ser úteis em campanhas de monitoramento em função da interpretação dos indicadores qualitativos de desempenho;
- Tipificar um protocolo de testes para sensores climáticos que possam ser replicados em outras câmaras controladas;
- Publicitar pormenores sobre estes sensores que não são elencados nas iniciativas comerciais sobre venda de kits para monitoramento individual do meio-ambiente;
- Identificar comportamentos nos sensores de qualidade do ar que muitas vezes não estão explícitos nas fichas técnicas (*datasheets*) dos dispositivos; realizar uma análise abrangente sobre a aplicabilidade destes sensores por indivíduos sem treinamento técnico;
- Identificar o comportamento dos sensores de óxido metálico para monóxido de carbono quando estiverem monitorando patamares abaixo de seu limiar de deteção nominal.

1.5. Estrutura do documento

A continuação deste documento de investigação segmenta-se na seguinte estrutura:

- **Capítulo 1 – Introdução:** Capítulo dedicado à ambientação do problema e apresentação do documento em função de seu teor e estrutura.

- **Capítulo 2 - Revisão da literatura e estado da arte:** Neste capítulo são revisados os trabalhos mais recentes e com dada relevância nos tópicos relacionados com a presente investigação, de modo a fornecer um pano de fundo robusto para os propósitos desta investigação. É o capítulo que trata as grandezas mais relevantes, e seus níveis de interesse.
- **Capítulo 3 – Princípios de transdução:** São tratados os fenómenos de transdução amparados em conceitos físicos e fenómenos elétricos que resultam na possibilidade do monitoramento climático por microssores eletrônicos e do monitoramento do ar pelos sensores de óxido metálico, eletroquímico e infra-vermelho não dispersivo.
- **Capítulo 4 – Preparação experimental:** Neste capítulo são descritos o processo de seleção dos sensores para a investigação, a preparação dos sensores para ligação à plataforma microprocessada, assim como os esquemas de conexão. Também neste capítulo está contido o plano experimental, onde explica-se o processo prático a que os sensores serão submetidos para fornecer os dados suficientes à análise principal.
- **Capítulo 5 – Execução experimental:** Capítulo que trata do processo prático de execução de tudo que foi planeado e programado no Capítulo 4. Em outros termos, é um relato de como os experimentos ocorreram, e os pormenores encontrados.
- **Capítulo 6 – Análise dos Dados:** Nesta seção são estabelecidas as métricas de desempenho e são analisados numericamente os dados obtidos dos experimentos. O capítulo é segmentado entre os sensores climáticos e sensores de qualidade do ar. Os resultados obtidos são apresentados em concomitância com análises de contexto sobre o desempenho dos sensores. Ao final de cada análise, os sensores são classificados em função de seu desempenho na respetiva métrica.
- **Capítulo 7 – Discussão dos resultados e conclusões:** Capítulo final onde são discutidos os achados acerca dos sensores e os resultados são comparados com trabalhos semelhantes na mesma área.

CAPÍTULO 2

2 REVISÃO DA LITERATURA E ESTADO DA ARTE

Este capítulo dedica-se à revisão dos trabalhos acadêmicos e documentos considerados como relevantes e atuais nas áreas de conhecimento do meio ambiente e sua monitorização, do sensoriamento participativo, do *citizen science/Smart Cities* e, também, das análises de qualidade dos dados.

2.1 Meio ambiente

Para uma adequada contextualização dos termos e conceitos envolvidos no monitoramento ambiental, julga-se ser importante dedicar seções específicas a dissertar acerca destes tópicos. Portanto, há um tópico dedicado à caracterização das variáveis que se envolvem ao meio ambiente, e um tópico dedicado à análise dos sistemas de monitoramento ambiental.

2.1.1 Caracterização das variáveis envolvidas ao meio ambiente

Como já fora redigido nos objetivos, propõe-se aqui investigar a qualidade dos dados e a aplicabilidade dos sensores de baixo custo ao monitoramento ambiental urbano. Portanto, de acordo com o guia oficial da Organização Mundial de Meteorologia (WMO, 2008), as variáveis climáticas para o monitoramento ambiental observáveis ao nível do solo são: temperatura, pressão atmosférica, humidade relativa do ar, velocidade do vento, precipitação, tempo de incidência solar, visibilidade, evaporação e humidade do solo. Se atrelarmos estas variáveis com o conceito de “centros urbanos”, e bem como o ambiente percebido pelos indivíduos, percebe-se que nem todos estes parâmetros seriam igualmente relevantes à percepção dos indivíduos, uma vez que alguns deles – como evaporação e humidade do solo – são específicos a outros propósitos, como a agricultura.

Portanto, de entre as variáveis climáticas elencadas pela WMO, foram escolhidas para este estudo a temperatura do ar e a humidade relativa do ar, pois julga-se que estes são os agentes primários da percepção individual do ambiente, uma vez que compõem o cálculo de sensação térmica (diretamente relacionada ao conforto térmico, portanto), e a pressão atmosférica, dada sua importância na previsão de chuvas. Justifica-se a escolha também reconhecendo a pertinência de monitoramento dos outros fenómenos. Entretanto, a temperatura, a humidade e a pressão são os sensores mais viáveis para

monitores tanto móveis quanto fixos, dentro da esfera de *Citizen Science*³, uma vez que dispõem de dispositivos miniaturizados. Os anemômetros e pluviômetros, por exemplo, exigem cuidados com posicionamento e orientação e requerem maior espaço físico, inviabilizando a mobilidade (Manlio et al., 2017).

Apesar da observação de parâmetros climáticos ser um dos principais recursos para assessorar o monitoramento ambiental, outro indicativo não menos importante para investigar as condições de um ambiente urbano são as concentrações de gases e poluentes dispersos na atmosfera, pois, em sua maior parte, a poluição urbana tem origem antrópica. O monitoramento desta, portanto, é uma ferramenta essencial para garantir a integridade do meio ambiente, pois fornece evidências concretas da alteração deste, facilitando a tomada de decisões acerca do controle das fontes de emissão ou de estratégias de mitigação.

A Organização Mundial da Saúde (*World Health Organization – WHO*, em inglês) elenca os seguintes poluentes como os principais agentes danosos à saúde dos indivíduos: matéria particulada, ozono, dióxido de azoto e dióxido de enxofre (WHO, 2006). Além destes, a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (*USEPA*) e a diretiva 2008/50/CE do Parlamento Europeu mencionam ainda a necessidade da observação dos agentes orgânicos oriundos da queima de combustíveis fósseis: o monóxido de carbono e o dióxido de carbono.

A seguir, apresenta-se uma sucinta redação descritiva acerca de cada um dos poluentes comuns aos ambientes urbanos, de acordo com os órgãos mencionados e em conformidade com o modelo de avaliação da qualidade do ar proposto por (Silva & Mendes, 2012):

- **A matéria particulada**, usualmente referida por PM_{x} – do inglês “*particulate matter*” – é o poluente que mais afeta os indivíduos e é composta por uma mistura de fragmentos microscópicos de matéria orgânica e inorgânica em suspensão no ar, subproduto de combustões. Por atingirem dimensões muito pequenas (aerodinâmica equivalente na ordem de microns: 10 μm para o PM_{10} , e 2,5 μm para o $PM_{2.5}$), podem penetrar nos pulmões e causar danos ao sistema respiratório;

³ Pode ser definida, informalmente, como a “sabedoria das multidões” aplicada às tecnologias atuais, como Big Data. Sua principal característica consiste na participação voluntária de indivíduos não especializados na análise ou recolha de grandes volumes de informações. (Mais informações em <https://www.theguardian.com/science/the-h-word/2016/apr/26/how-citizen-science-could-change-historical-research-crowdsourcing>)

- Já o **dióxido de azoto** (ou dióxido de nitrogênio; NO_2) é um gás tóxico cuja fonte é, única e exclusivamente, o processo de combustão e queimas. Está fortemente correlacionado com tráfego automotivo intenso e processos industriais;
- O **ozono** (O_3) ao nível do solo tem efeito contrário ao seu papel na estratosfera. Enquanto a camada de ozono estratosférico tem papel fundamental na manutenção da vida na terra por filtrar a radiação solar, ao nível do solo o mesmo gás é nocivo se inalado por seres vivos. Trata-se de um poluente secundário gerado a partir da reação fotoquímica pela radiação ultravioleta do sol incidente em zonas com elevadas concentrações de dióxido de azoto. Portanto é comum encontrar elevadas concentrações de ozono ao nível do solo relacionados, portanto, com elevadas concentrações de NO_2 em dias ensolarados, ou no verão – período em que há maior tempo de incidência solar;
- Dos poluentes apontados pela WHO, o último é o **dióxido de enxofre** (SO_2). É um gás tóxico com cheiro forte, oriundo da queima de combustíveis fósseis e do processamento de minerais sulfurosos. Em grandes volumes, combina-se com a água da atmosfera e forma o ácido sulfúrico (H_2SO_4), originando a conhecida chuva-ácida;
- O **monóxido de carbono**, um poluente de origem inorgânica, é um gás bastante tóxico, incolor e inodoro. Advém de processos de queima de combustíveis fósseis em condições de carência de oxigênio, e as principais fontes são os automóveis e queimas;
- Por fim, o **dióxido de carbono** não é considerado um poluente. É gerado em processos biológicos e é essencial para o crescimento de plantas e vegetais. Entretanto, como também é produzido em ações antrópicas, e é um dos gases contribuintes ao efeito estufa, tem sido cada vez mais estudado em níveis externos. É ainda usualmente investigado em ambientes fechados como um indicador da qualidade da ventilação do espaço. Ademais, grandes concentrações de CO_2 podem diminuir a capacidade cognitiva de indivíduos e dificultar tomadas de decisões (Allen et al., 2016; Satish et al., 2012; Seppänen et al., 1999), daí a necessidade de sistemas de ventilação eficiente acionados pelo monitoramento interno deste gás e a necessidade sobre um novo olhar da concentração deste gás em ambientes externos.

A Tabela 2-1 sumariza os agentes supracitados em relação às suas principais fontes e consequências na saúde dos indivíduos.

Tabela 2-1. Poluentes, suas origens e suas consequências à saúde humana (Choi, Kim, Cha, & Ha, 2009; Environmental Protection Agency, 2017; WHO, 2016).

Agentes	Fontes emissoras mais comuns	Efeitos na saúde
Monóxido de Carbono (CO)	Aquecedores a gás, forno à lenha, lareira, fogareiros, automóveis e combustão de combustíveis fósseis.	Dores de cabeça, confusão, náusea, perda de coordenação e visão descoordenada. Pode ser letal em casos de exposição prolongada a altas concentrações.
Dióxido de Carbono (CO ₂)	Aquecedores a gás, fumaça de tabaco, forno à lenha, automóveis e combustão de combustíveis fósseis.	Irritações ao sistema respiratório, tonturas, confusão, perda momentânea de capacidade cognitiva, sonolência.
Dióxido de Azoto (NO ₂)	Automóveis, aquecedores a querosene, forno a gás, fumaça de tabaco.	Irritação aos olhos e trato respiratório, aumento de infecções respiratórias.
Dióxido de enxofre (SO ₂)	Automóveis a combustíveis derivados do petróleo ⁴ , processos de mineração, queimas.	Irritações ao trato respiratório, asma.
Matéria Particulada (PM)	Fogueiras, fumaça de tabaco, forno a lenha, forno a gás, automóveis.	Irritação aos olhos e trato respiratório, bronquite, câncer de pulmão.
Ozono (O ₃)	Oriundo do processo fotoquímico do dióxido de azoto.	Acarreta problemas respiratórios, tal como asma, redução da capacidade pulmonar e outros problemas.

Complementando estas informações, a Tabela 2-2 descreve os valores guia para cada grandeza climática e para os poluentes. Estes números servem como parâmetros para a escolha dos sensores, uma vez que são os quantitativos típicos encontrados no ambiente exterior. Ademais, são os valores constantes nos guias de recomendações elaborados pelas organizações correlatas ao meio ambiente, como a Agência de Proteção Ambiental (EPA), a Agência Portuguesa do Ambiente (APA), a Organização Mundial de Meteorologia (WMO) e a Organização Mundial da Saúde (WHO).

⁴ Em veículos que utilizam o Etanol, por exemplo, não há emissão relevante de dióxido de enxofre, conforme informação disponível no website da União da Indústria da Cana-de-Açúcar. Ligação em: <http://www.unica.com.br/convidados/15403541920327850689/o-carro-a-alcool-e-mais-poluidora/> (acessada em maio de 2018).

Tabela 2-2. Valores típicos de operação (ou valores-guia) para as grandezas climáticas e poluentes atmosféricos que compõem usualmente a atmosfera urbana (Agência Portuguesa do Ambiente, 2017; WMO, 2008).

Grandeza / Agente	Faixa de interesse	Observações
Temperatura	-30°C a 45°C	Recomendações da WMO para instrumentos convencionais (analógicos). Contudo, a amplitude do sinal do instrumento de medição elétrico ou eletrônico deve ser adequada às características do local da medição.
Humidade relativa do ar	5% a 100%	
Pressão atmosférica	500 a 1080 hPa	
Dióxido de Carbono	> 400 ppm (775 mg/m ³)	Patamar de 400 ppm corresponde ao valor médio encontrado em um ar exterior “limpo”.
Monóxido de Carbono	0 a 8 ppm (0 a 10mg/m ³)	Os maiores valores numéricos correspondem ao limiar em que o ar começa a ser considerado como de “má qualidade”, em médias temporais (8h para o CO; 1h para os demais), conforme estipula a APA (Agência Portuguesa do Ambiente, 2017). Valores instantâneos podem, naturalmente, superar estes patamares.
Dióxido de Azoto	0 a 200 ppb (0 a 400 µg/m ³)	
Ozono	0 a 120 ppb (0 a 240 µg/m ³)	
Dióxido de enxofre	0 a 180 ppb (0 a 500 µg/m ³)	
Matéria Particulada (PM ₁₀)	0 a 120 µg/m ³	

2.1.2 Monitoramento ambiental

O monitoramento ambiental, por sua vez, pode ser definido como um processo contínuo ou periódico de recolha e processamento de dados de informações advindas de grandezas físicas e químicas, presentes no ambiente, que podem mudar seu valor instantâneo ou seu padrão de comportamento em razão de agentes naturais ou artificiais.

Por influenciar diretamente na qualidade de vida e saúde de indivíduos, é comum encontrar premissas de proteção e preservação do meio ambiente garantidas em diferentes leis ou constituições federais. Exemplificando, o artigo 225.º da Constituição Federal Brasileira de 1988 (BRASIL, 1988) diz:

“Todos têm direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, bem de uso comum do povo e essencial à sadia qualidade de vida, impondo-se ao Poder Público e à coletividade o dever de defendê-lo e preservá-lo para as presentes e futuras gerações.”

Em termos atuais, trata de maneira similar em um de seus objetivos, em Portugal, a lei de bases do ambiente – Lei n.º 19/2014 – que trata das bases da política de ambiente (PORTUGAL, 1976):

“Compete ao Estado a realização da política de ambiente, tanto através da ação direta dos seus órgãos e agentes nos diversos níveis de decisão local, regional, nacional, europeia e internacional, como através da mobilização e da coordenação de todos os cidadãos e forças sociais, num processo participado e assente no pleno exercício da cidadania ambiental.”

Deste modo, como um desdobramento óbvio de tais premissas, o monitoramento do meio ambiente usualmente fica sob responsabilidade de órgãos governamentais, pois são os responsáveis por tomar as decisões em função de eventuais alterações do meio ambiente, seja para mitigar os agentes causais, seja para proteger os indivíduos de eventuais consequências nocivas.

Apesar dos muitos pormenores que envolvem um monitoramento ambiental adequado, em nível estrutural, é possível dizer-se que pouco mudou nos últimos anos em nível de sistema, pois os focos das inovações são, em maior parte, direcionados às tecnologias envolvidas nos processos de recolha e transmissão dos dados e não à estrutura do sistema em si. Portanto, comumente os sistemas de monitoramento ambiental de grande escala possuem a mesma estrutura de dois segmentos: de recolha (solo), de transmissão (solo/espço), e de processamento (solo). O segmento de solo é composto pelas plataformas de recolha de dados ambientais que são responsáveis pela leitura e transmissão dos dados, e pelos centros de processamento que são responsáveis pelo armazenamento, análise e divulgação destas informações. O segmento de transmissão, ou espacial, quando é o caso de sistemas com grandes coberturas geográficas, é composto por uma constelação de satélites específicos para retransmissão da informação emitida pelas plataformas. A exemplo, o Sistema Brasileiro de Coleta de Dados Ambientais, sob tutela do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), possui em seu segmento de solo cerca de mil plataformas de hardware espalhadas dentro do território brasileiro a recolher os mais variados dados (temperatura, humidade relativa do ar, pressão atmosférica, velocidade e direção do vento, radiação UV, etc.), e então transmitem-nos – periodicamente – por ligação via satélite (segmento espacial) com georreferenciamento, para que possam ser armazenados e processados para exibição posterior (M. A. F. dos Santos et al., 2013). Em Portugal, por sua vez, o monitoramento fica a cargo do Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA). O sistema possui 78 plataformas continentais a recolher informações com periodicidade de 10 minutos e então transmitem-nas à central via rádio – utilizado quando não há a possibilidade de conexão física entre plataforma e centro de processamento – para processamento e divulgação, além da utilização de balões meteorológicos para um estudo estratificado da atmosfera (IPMA, 2017). Já se tratando de escala mundial, convém citar o consórcio

franco-americano Argos. Este possui cerca de vinte e duas mil plataformas ambientais, espalhadas por todo o planeta, a recolher e enviar informações meteorológicas e ambientais via satélite, que por sua vez retransmitem estas informações aos centros de processamento em terra (Argos System, 2016). A figura 2-1 exemplifica estações automáticas de recolha de dados ambientais no Brasil e em Portugal, respetivamente.



Figura 2-1. Plataformas automatizadas de recolha de dados ambientais. (a) Brasil (INPE); (b) Portugal (IPMA).

O monitoramento da qualidade do ar, por sua vez, não apresentaria alguma semântica sem o amparo de estudos que estabeleçam os níveis adequados e aceitáveis para cada um dos agentes, em termos qualitativos. Se valendo dos agentes mencionados, e mais o benzeno (C_6H_6), os autores em (Silva & Mendes, 2012) estabeleceram um modelo qualitativo e estratificado, em modo de *score*, para a poluição do ar urbano através da modelação dos poluentes ao ambiente exterior. Em um modelo similar, porém mais simples e integrado a um sistema em operação, trabalha o projeto Qualar da Agência Portuguesa do Ambiente, que – dentro dos valores especificados na Tabela 2-2 – estabelece patamares para a qualidade do ar e mantém uma interface web ativa onde usuários podem acompanhar a situação acerca da qualidade do ar, observando médias temporais ao longo do dia, oriunda dos equipamentos em funcionamento nas estações automáticas de monitoramento mantidas pela instituição no território português (APA, 2017).

Apesar de ser possível encontrar diferentes modelos de avaliação da qualidade do ar com o mesmo propósito, a principal documentação acerca dos valores guia, considerando exposições instantâneas e prolongadas, é composta pelos guias e diretrizes da comunidade europeia (European Union, 2008) e da Organização Mundial da Saúde (Penney et al., 2010), quer para ambientes interiores quer para ambientes exteriores (urbanos). Indo mais além, estes valores também servem como “nicho-alvo” para

a indústria de sensores, muito embora atualmente os sensores ditos de baixo custo ainda apresentem uma certa dificuldade para funcionarem dentro destes patamares, pois ainda existe um “*trade-off*” nominal entre sensibilidade e preço nos sensores de gases.

Independente da escala ou da natureza em que um sistema de monitoramento ambiental se inclua, há sempre um ponto em comum: a baixa densidade da malha de coleta, que impossibilita a verificação de fenómenos localizados extremamente importante nos centros urbanos. Se por um lado o monitoramento do clima e do ambiente sobre uma visão “macroscópica” já está bem estabelecido e operacional, caso se necessite de averiguações localizadas, em menor escala, alguns problemas surgem. Atualmente, cada plataforma implantada pode ficar responsável pela cobertura de milhares de quilômetros quadrados em território, deixando de cobrir variações pontuais que podem ser importantes para análises mais direcionadas. A exemplo: Portugal continental possui cerca de 90.000 km², e conta com 68 plataformas para monitoramento da qualidade do ar (nem todas monitoram todos os poluentes), resultando em uma cobertura média de 1.300 km² para cada plataforma; e se considerarmos que as regiões metropolitanas de Lisboa e Porto contam, juntas, com quase metade das plataformas que as demais regiões (19 para Lisboa e 13 para o Porto), esta aproximação numérica de cobertura geográfica piora para o resto do país. Como os equipamentos de referência de monitoramento ambiental e climático são caros (e.g. uma plataforma climática pode chegar a €4000, com despesas operacionais de instalação e manutenção inclusas)⁵, caso se planeie uma malha com alta discretização de pontos de coleta, como em um centro urbano, seria necessário elevado investimento financeiro, pois demanda-se um grande número de pontos de coleta de modo que se capte minuciosamente todos os fenómenos de interesse, como as ilhas de calor, inversão térmica e bolsas de concentração de poluentes. Justificando, as informações detalhadas e discretizadas da temperatura e da humidade relativa do ar em cidades podem ajudar estudos e estratégias para a redução das ilhas de calor, que podem aumentar a temperatura percebida pelos indivíduos em até 10 graus Celsius (Qaid et al., 2016). Alguns estudos sobre estes fenómenos embasam a necessidade de uma atenção especial para o monitoramento ambiental urbano em alta discretização: os autores em (Salata et al., 2017) utilizaram uma simulação de microclima para verificar efeitos de algumas estratégias para a mitigação de calor; já os autores em (Martins et al., 2016) utilizaram dados ambientais para traçar uma estratégia de implementação de uma “ilha fria urbana”

⁵ Informação obtida a partir de:

<http://texaset.tamu.edu/Resources/Documents/2015%20Weather%20Station%20Cost%20Complete.pdf> (acessado em fevereiro de 2017).

baseando-se na percepção de calor individual como guia; já os autores em (Magli et al., 2016) investigaram a energia liberada por um edifício específico para traçar estratégias de tratamento térmico, e, com os devidos resultados, delinear aplicações e ações para reduzir as consequências das ilhas de calor.

Com os argumentos defendidos no parágrafo anterior é possível realizar uma inferência lógica e afirmar que a necessidade de uma discretização de coleta de dados sobre poluição do ar é latente, e ainda mais crítica, considerando que: as fontes de poluição estão – em maior parte – dentro das cidades; a elevada dinâmica intrínseca dos gases; e o alto custo dos equipamentos de referência utilizados no monitoramento destes. Assim, com um olhar mais voltado às soluções tecnológicas de baixo custo para o monitoramento da poluição, os autores em (Choi et al., 2009) analisaram pormenores técnicos – de hardware e software – de alguns sensores específicos com o objetivo de fornecer uma alternativa viável à redução de custos na monitoramento ambiental urbana. Em outra parte do problema, os autores em (Marjovi et al., 2015), propõem uma solução para uma alta cobertura espacial e temporal das medições através do embarque de sensores em autocarros de transporte público urbano, cuja viabilidade, em termos de cobertura espacial e temporal, foi demonstrada por modelos matemáticos. Ambos trabalhos, contudo, não fornecem informações acerca da qualidade dos dados dos sensores, ou sobre a sensibilidade em frente aos valores típicos encontrados em uma atmosfera urbana.

O emprego de sensores de baixo custo ao monitoramento ambiental, portanto, ainda aparenta ser um paradigma a ser transpassado. Isto é evidenciado quando os autores em (McKercher et al., 2017) desempenham uma análise de literatura que realça a necessidade de maior atenção aos sensores móveis de poluição, e sugerem que monitores móveis e portáteis, seriam mais adequados a avaliar a exposição dos indivíduos que os tradicionais locais fixos de monitoramento. Contudo, o problema recai no cerne motivacional deste trabalho: o preço que estes dispositivos portáteis de mercado podem custar chega à casa das centenas de dólares, ou mesmo milhares.

2.2 Sensoriamento participativo

Em meados da primeira década do Séc. XXI começou a se pensar de maneira conceitual no fenômeno do sensoriamento coletivo, participativo, onde indivíduos atuam como agentes, ou mesmo nós, em uma malha de monitoramento de realidade utilizando alguma tecnologia como plataforma para realizar a observação ou transmissão da informação (Burke et al., 2006; Goldman et al., 2009). Esta

ideia, que tem os elementos da “*Citizen Science*”, conforme escrutinada por (Arnstein, 1969), faz surgir o conceito de Sensoriamento Participativo (do inglês “*Participatory Sensing*”) investigado na atualidade. Esta potencial participação dos indivíduos em uma modalidade de sensoriamento pode ocorrer por diferentes maneiras, sejam elas por opiniões subjetivas ou por sensores (estáticos ou móveis) adquiridos e operados por cidadãos, sempre aproveitando-se da mobilidade e pervasividade dos indivíduos (Campbell et al., 2006) para contornar a necessidade de, eventualmente, aumentar a malha de coleta e, como consequência, reduzir o custo financeiro da execução de uma rede de monitoramento de grande cobertura espacial, independente da sua finalidade (monitoramento ambiental, social, etc.).

Deste modo, a expansão dos dispositivos móveis, sobretudo os *smartphones*, não só em alcance e penetração na sociedade, mas também em recursos tecnológicos, iluminou a possibilidade de sua utilização como o principal recurso tecnológico a ser utilizado em sensoriamentos centralizados - e conduzidos - pelos indivíduos. A premissa fundamental para tal baseia-se no costume das pessoas carregarem consigo os telemóveis ao longo da jornada diária, e, portanto, estarem carregando – por toda a parte e a toda a hora – um hardware versátil, que tanto serve para recolha quanto para transmissão dos mais diversos tipos de dados. Portanto, os *smartphones* trazem a computação e o sensoriamento móvel, portátil, às pessoas desta época do mesmo modo que o computador pessoal habilitou a computação “doméstica” às pessoas em meados dos anos 90 (Giordano & Puccinelli, 2015). Além disso, a grande capacidade de hardware dos *smartphones*, bem como os sensores presentes nestes, têm encorajado alguns pesquisadores a desenvolver técnicas de sensoriamento por diferentes abordagens, sempre extraindo o máximo de informação dos elementos internos dos *smartphones*: de padrões de comportamento, de deslocamento e desempenho esportivo, às questões de segurança no trânsito, como condições de estradas, tráfego e mesmo condução perigosa (Kanhere, 2011; M. Liu, 2013).

Combinando o aparato tecnológico dos *smartphones* e considerando que, estatisticamente, nos centros urbanos há uma maior densidade destes dispositivos, pode-se dizer que há um ambiente propício para o sensoriamento colaborativo urbano (do inglês “*Collaborative Urban Sensing*”). Este, por sua vez, pode englobar duas modalidades: o participativo e o “oportunista”. A abordagem participativa é aquela que prevê um usuário mais ativo, literalmente participando das ações da campanha de sensoriamento (e.g. tirando fotografias de congestionamentos ou de áreas alagadas, interferindo na coleta e envio das informações, etc.), conforme já mencionado; a abordagem oportunista, por sua vez, se assemelha à participativa mas prevê a autonomia do processo de coleta e transmissão de informações, gerenciada por software (ainda que sob o consentimento do usuário, que voluntariamente se dispôs a fazer parte da

campanha). A definição de qual abordagem seguir pode depender da magnitude da campanha de sensoriamento desenhada durante a fase de planejamento. Um estudo verificou que esta escolha tem forte dependência da quantidade de indivíduos envolvidos: para uma maior adesão de indivíduos, o modelo oportunista apresenta probabilidades de sucesso maiores que o modelo participativo, enquanto que para campanhas envolvendo poucos indivíduos a abordagem participativa apresenta mais chances de sucesso (Lane et al., 2008).

No campo prático, resultados validaram o sensoriamento colaborativo urbano como alternativa viável às vias tradicionais para monitoramento ambiental, independentemente do fenômeno monitorado. Por exemplo, nos resultados apresentados por (D'Hondt et al., 2013), foram utilizados smartphones para monitorar os níveis de poluição sonora através de janelas de ociosidade do microfone destes dispositivos, acrescidas de marcação temporal e georreferenciada (GPS). Após a recolha, as medições foram comparadas com dispositivos convencionais, geograficamente espalhados, e demonstraram uma grande fidelidade, habilitando a utilização dos *smartphones* para o monitoramento da poluição sonora em espaços urbanos.

Os autores em (Kotovirta et al., 2012) experimentaram um sensoriamento “subjetivo” através das impressões de indivíduos voluntários e não treinados para tal fim, que foram encorajados a dar sua opinião sobre a presença e densidade de algas em lagos na cidade – e quantificá-las mesmo que aproximadamente – utilizando uma aplicação em seus *smartphones*. Como referência, os lagos monitorados possuíam instrumentos específicos para detecção das referidas algas. Os resultados, apesar de apresentarem erros absolutos relevantes (*offsets*), acompanharam positivamente as variações medidas pelos instrumentos.

Sob uma perspectiva mais heterodoxa, o trabalho desenvolvido em (Overeem et al., 2013) investigou a possibilidade de estimar a temperatura do ar a partir das temperaturas internas dos smartphones, que possuem sensores deste tipo em suas baterias para controle de carga e descarga. Utilizando uma aplicação proprietária em Android (*OpenSignal*), se extrai a informação da temperatura interna, bem como a localização e a hora da coleta, que pode ter a periodicidade ajustada. Esta ideia contornaria um dos principais problemas do monitoramento ambiental urbano: a baixa densidade da rede de coleta de dados ambientais. Os resultados observados apontam a presença de erro aleatório e sistemático nas leituras da temperatura, sugerindo que para este tipo de monitorização também há a necessidade de uma calibração individual para cada dispositivo. Entretanto, percebeu-se uma correlação

forte e positiva entre as temperaturas observadas pelos telemóveis e a temperatura do ar, em condições de não-utilização dos dispositivos.

A indústria dos *smartphones* nos anos de 2013 e 2014 foi peculiar (sob o ponto de vista deste trabalho), pois durante este período alguns dispositivos foram fabricados embutindo sensores ambientais em seu *hardware* como, por exemplo, o *Moto X* da *Motorola* e o *Galaxy S4*⁶, da *Samsung*. Apesar das gerações subseqüentes não apresentarem mais a mesma diversidade de sensores, existe ainda uma quantidade considerável destes dispositivos móveis com sensores ambientais em funcionamento na Europa (Open Signal, 2015). Partindo desta premissa, os autores em (de Araújo et al., 2017) investigaram o potencial de utilização destes *smartphones* ao monitoramento ambiental através de uma análise numérica da penetração social destes dispositivos na Europa e também através de alguns cenários de testes para avaliação da exatidão e precisão dos sensores de temperatura e humidade relativa do ar em amostras de *smartphones*. Foi verificado que as leituras de humidade relativa apresentam erros significativos em razão do não contato direto com o ar exterior, pois o sensor está localizado internamente no dispositivo. Por outro lado, as leituras de temperatura mostraram-se fiáveis. Ademais, verificou-se que em razão do manuseio típico dos aparelhos, exige-se que uma aplicação de deteção de contexto gerencie as leituras de maneira oportunista a fim de se evitar leituras de temperatura poluídas em razão da troca de calor das mãos ou partes do corpo. Apesar das dificuldades, viu-se que estes dispositivos podem se mostrar valiosos como uma alternativa para a discretização de pontos de coleta para temperatura do ar em centros urbanos, caso tomadas algumas medidas de suporte, sobretudo a deteção de contexto. Julga-se, portanto, que o retorno dos sensores ambientais aos novos *smartphones*, associado à utilização de uma aplicação de deteção de contexto, seriam valiosas atitudes em direção à ampliação das possibilidades de sensoriamento colaborativo do meio ambiente utilizando *smartphones*.

A possibilidade de se utilizar os *smartphones* como plataforma de recolha de dados, sejam ambientais ou sociais, mostrou-se com potencial quando adotada sob certos cuidados. Contudo, há um aspeto intimamente relacionado a isto, e que continua a ser um dos principais paradigmas: a motivação ao engajamento das pessoas. É preciso convencer os indivíduos a participar da malha de monitoramento de maneira voluntária, do contrário não haverá a alta densidade da malha de coleta, que é o ponto que traciona a ideia do sensoriamento colaborativo. A grande dificuldade é manter os usuários ativos e

⁶ Utilizou-se do sensor SHT1 para temperatura e humidade, e o BMP

participativos durante um longo tempo, embora atraí-los inicialmente seja mais simples. A simples utilização de recompensas físicas, além de aumentar o custo de gerenciamento da campanha, não é suficiente para manter os usuários a longo prazo, conforme demonstrou (Rodrigues et al., 2012). Os autores em (Zaman et al., 2014) elaboraram um modelo de gerenciamento de campanha, onde se identifica que um dos pontos que podem maximizar o sucesso de uma campanha colaborativa, inclusive na manutenção dos usuários, é o fato de que a campanha surja a partir de, e também englobe, uma preocupação em comum de uma comunidade ou grupo de pessoas. Em outras palavras, a taxa de adesão e manutenção de usuários é diretamente proporcional à importância que o fenômeno monitorizado tem para elas, independente da recompensa material (que possui um efeito transitório).

Apesar de os telemóveis serem equipamentos poderosos em termos de hardware, são exigidos muitos pormenores técnicos para determinadas áreas de monitoramento (e.g. ambiental) que estes dispositivos não podem cumprir (e.g. precisão numérica de um termómetro). Portanto, ainda é provável que em uma campanha de monitoramento móvel colaborativo os telemóveis não sejam utilizados como plataformas móveis de recolha de dados, apesar de sua elevada pervasividade, em razão de questões limitantes como as apontadas.

2.3 “Citizen Science” e “Smart Cities”

As questões supracitadas impulsionaram, portanto, o surgimento de soluções tecnológicas alternativas de baixo custo para o monitoramento ambiental de centros urbanos, tanto no seio acadêmico quanto junto aos indivíduos. Uma das consequências desta difusão, que ocorreu concomitantemente com a emergência das plataformas a microcontroladores ou microprocessadas, de hardware aberto, com suporte colaborativo ao público geral (e.g. *Arduino*, *Raspberry Pi*, *Asus Tinker Board*, etc.), foram criadas condições para descentralizar as iniciativas de monitoramento ambiental e habilitar esta modalidade também ao conceito de *Citizen Science*, que permite que pessoas comuns se envolvam ao meio científico sem um treinamento aprofundado, apenas participando da recolha de maneira voluntária, e também promovendo o compartilhamento de dados (Arnstein, 1969; Roy et al., 2012).

Com relação aos aparatos de hardware, é possível encontrar diferentes trabalhos com direcionamento ao monitoramento ambiental. Assim, considerando o custo das plataformas de referência como dificuldade sobressalente e a falta de possibilidade de acesso em tempo real aos dados obtidos por estas, os autores em (Ingelrest et al., 2010) apresentaram sua própria plataforma ambiental,

construída com sensores de baixo custo disponíveis e utilizando redes de sensores sem fio (ou WSN, do inglês “*Wireless Sensors Networks*”) para utilização autossuficiente de longo período mesmo em sítios remotos; já os autores em (Hu et al., 2016) avaliaram um artefacto, previamente desenvolvido e descrito em (Sivaraman et al., 2013), baseando-se em elementos de hardware de baixo custo e complexidade que podem ser facilmente embarcados em veículos, com conectividade GPRS e marcação de posição GPS. Por sua vez, em (Sinha et al., 2015), os autores utilizam sensores de baixo custo para temperatura, humidade e monóxido de carbono, caracterizando uma estação portátil e de baixo consumo elétrico, que disponibiliza as informações através da internet por um *Middleware* aberto. Os autores em (Fuentes et al., 2015) apresentam um sistema baseando-se em *Arduino* para monitoramento da qualidade do ar utilizando três sensores de poluentes de baixo custo, com conectividade *XBee* e georreferenciamento por GPS, permitindo as estampas geográficas das medições; de maneira similar, os autores em (Saini et al., 2016) basearam-se no *Arduino* para desenvolver uma estação meteorológica de baixo custo e portátil, com algoritmo proprietário para deteção e alertas meteorológicos em tempo real, a ser enviado a uma estação concentradora com raio de alcance de até um quilómetro (Figura 2-2). Os autores em (P. M. Santos et al., 2018) relataram as experiências de implantação e análise do projeto *PortoLivingLab*, no âmbito das *Smart-Cities*, onde monitoram não só o ambiente (clima e qualidade do ar), mas também fenómenos de mobilidade e de bem estar dos indivíduos através de sensoriamento móvel e voluntário colaborativo.



Figura 2-2. Artefacto eletrónico de recolha de dados ambientais baseado em Arduino proposto pelos autores em (Saini *et al.*, 2016).

As possibilidades que estes recursos abriram ao monitoramento ambiental são consideradas tão promissoras que uma seção do “*Institute of Electric and Electronics Engineers*” (IEEE), a qual uma das suas diversas atividades é a investigação e desenvolvimento de aplicações em *Internet of Things*, chegou a realizar um evento tutorial sobre a utilização de recursos *DIY* (acrônimo de “*Do It Yourself*”) na construção de sistemas de recolha de dados ambientais participativos em diversos níveis: do hardware à disponibilização da informação *online*⁷.

Além das investigações, que frequentemente apresentam caminhos diferentes para contornar o problema do alto custo na discretização de uma malha de coleta de dados ambientais, há também uma abordagem de mercado ao mesmo problema: já é possível encontrar diversos “kits” portáteis para aquisição, prontos para ligar e monitorar o ambiente interno ou mesmo externo, seja para uso pessoal ou para outros propósitos. Neste campo, convém mencionar o *Air Quality Egg* (“*Air Quality Egg*”, 2017), com foco no monitoramento colaborativo da qualidade do ar (sobretudo para monóxido de carbono e dióxido de azoto), é um dispositivo portátil e *plug and play*: oferece uma estrutura pronta para funcionar e possui conectividade para compartilhamento dos dados em tempo real, com georeferenciamento. Outro produto que apareceu sob as mesmas motivações discutidas aqui, mas que esgotou-se no mercado, é o *Cube Sensors* (CBSR, 2017). Apresenta-se sob a premissa de que as características ambientais em ambiente fechado afetam a qualidade de vida e a produtividade, portanto é conveniente estar a par de tudo que acontece ao nosso redor. O dispositivo, com dimensões pequenas, monitora parâmetros como qualidade do ar, temperatura, humidade relativa do ar e níveis de ruído e mantém tais informações atualizadas para visualização em um servidor *web*. A Figura 2-3 ilustra este dispositivo. Sua continuidade foi anunciada sob um novo nome: “*Koto*” (Koto Labs., 2017).

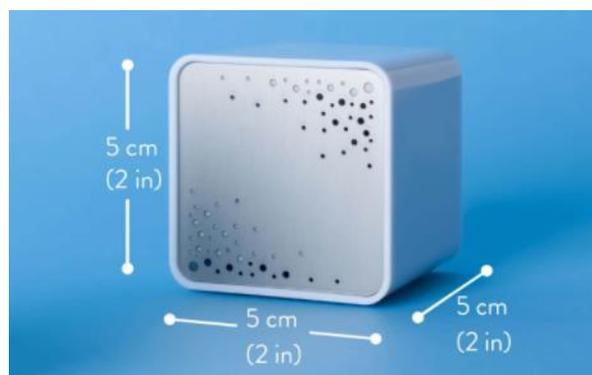


Figura 2-3. Imagem do antigo CubeSensor, hoje produzido pela Koto Lab.

⁷ Informação obtida na ligação: <http://sites.ieee.org/r2/event/build-an-internet-of-things-weather-station/> (Acessada em junho de 2017).

Oriundo do campo da investigação científica e fugindo um pouco do público alvo habilitado pelo “*Citizen Science*”, o projeto “*Sensorscope*”, originalmente descrito por (Ingelrest et al., 2010), atualmente apresenta soluções comerciais ao monitoramento climático e ambiental, através da observação de diversos parâmetros, sob a perspectiva de baixo custo e da “descomplicação” do processo de recolha e acesso aos dados (Sensorscope Sarl, 2017). Convém mencionar, contudo, que estas soluções comerciais geralmente não fazem referência à qualidade dos dados gerados por suas soluções, reforçando um dos paradigmas abordados nesta investigação.

A evolução deste conjunto de tecnologias, o aumento da conectividade, a contínua miniaturização de dispositivos eletrônicos e sensores, a ideia de sistemas e dispositivos inteligentes, conectados e pervasivos, em tempo real, também moldou o conceito de Internet das Coisas. Seja na seara acadêmica, industrial, ou individual, este paradigma – sempre junto às cidades inteligentes – trouxe também diferentes abordagens para o campo de investigação ambiental (Atzori et al., 2010). Deste modo, também se observam esforços de pesquisa e desenvolvimento nas diversas partes de um ecossistema de Internet das Coisas – conceito nascido neste âmbito de multiconectividade e portabilidade – e sob diversas escalas: de sensores à análise de dados; das geladeiras inteligentes, passando pelas casas automáticas e chegando às “*Smart Cities*”.

Especificamente com relação à implantação das cidades inteligentes, a Internet das Coisas atua como uma importante plataforma de sustentação deste conceito em um centro urbano. Tendo um olhar sistêmico das possibilidades abertas, uma cidade inteligente pode gerir de maneira eficiente, conectada e transparente suas ações de saúde pública, de mobilidade, de governança e de eficiência energética através do monitoramento, quer por sensores quer por participação cidadã, e do processamento adequado de sua realidade, facilitando e democratizando as tomadas de decisões ou, quando for o caso, automatizando-as (Zanella et al., 2014).

Exemplificando alguns pontos importantes, o tráfego e o consumo de energia são aspetos com impactos econômicos e ambientais significativos. A Internet das Coisas pode auxiliar no gerenciamento inteligente de rotas alternativas, evitando congestionamentos, ou em sistemas de estacionamento inteligentes através de sensores fixos ou móveis, evitando desperdício de tempo e reduzindo a emissão de poluentes (Bogatinoska et al., 2016; Ejaz et al., 2017).

O consumo inteligente de energia, que na Europa relaciona-se com emissão de CO₂, também está intimamente relacionado a deteção de contexto para tomada de decisões. Dentro das Cidades Inteligentes, ganham destaque os controles inteligentes de iluminação pública, que deteta a densidade

de pedestres e carros em vias públicas, e administra a iluminação nos arredores em que há ocupação e tráfego, reduzindo o desperdício de energia sobretudo durante as madrugadas, onde há iluminação total sem que haja trânsito ou tráfego de pessoas (Abhishek & Srikanth, 2015; Jagadeesh et al., 2015). Em escala local, também é possível controlar o aquecimento de salas através da detecção de ocupação das mesmas, evitando que os aquecedores funcionem quando a ocupação é nula, ou mesmo direcioná-los às áreas onde há detecção de ocupação (Ratti & Claudel, 2014), otimizando o consumo de energia.

Entretanto, tais progressos trazem consigo preocupações acerca da segurança da informação. Dada a transparência em que os sistemas de *IoT* foram concebidos, é importante preocupar-se com ataques ou invasões de terceiros, sobretudo quando os dispositivos que estão conectados geram informações, ou controlam processos, de relevância significativa seja para o proprietário, seja para o invasor. Os sistemas atuais, e futuramente cada vez mais, devem prever estes ataques e elaborar protocolos de defesa, que devem incluir a detecção do ataque em si e as contramedidas adequadas, como mudança do código ou redundância do sistema. Isto por si só é considerado um paradigma, dado que os requisitos computacionais para soluções desta natureza excedem o porte característico de um sistema de *IoT* (Stankovic, 2014).

2.4 Qualidade dos Dados

As possibilidades abertas atualmente para o monitoramento dos mais diversos fenômenos utilizando sensores com grande disponibilidade e acessibilidade é um advento que também requer ponderações sobre algumas consequências. Talvez a que mais levante preocupações e a que está relacionada com a maior quantidade de aspetos correlatos é a qualidade dos dados. Afinal não há vantagem alguma em implantar dispositivos de baixo custo, espalhados geograficamente, coletando dados continuamente sobre um determinado fenômeno, se estas informações não possuírem significância real. Nesta seção serão discutidos esforços em direção à melhoria e investigação da qualidade dos dados em sistemas colaborativos de baixo custo.

Usualmente pode-se verificar a exactidão de um sensor através de processos de calibração e aferição periódicos, utilizando instrumentos certificados. Há também a hipótese de sanitização – se valendo de técnicas que identificam e removem dados assinalados como ruins ou não construtivos. Contudo, estes recursos não são baratos nem triviais e pouco provavelmente seriam custeados ou desenvolvidos por indivíduos envolvidos em uma perspectiva de “*Citizen Science*”, por exemplo.

Com o objetivo de identificar e limpar os dados advindos de sensores distribuídos em uma rede de coleta, os autores em (Dua et al., 2009) propuseram um modelo de verificação de integridade e de validação via hardware periférico, intermediando a comunicação entre sensores remotos e o servidor com o intuito de garantir a privacidade da informação e evitar o “envenenamento” dos dados através de informações imprecisas. Caso o hardware detete as incoerências, utilizando um algoritmo proprietário, a informação do sensor sequer é publicada.

Em uma abordagem similar, compartilhando parte dos objetivos do caso anterior, os autores em (Radanovic & Faltings, 2015) estudaram a utilização do conceito de “*Bayesian Truth Serum*” como sistema de avaliação de sensores em uma campanha de sensoriamento colaborativo sem necessitar da utilização de um instrumento certificado como gabarito. Este conceito, resumidamente, recompensa a “honestidade”, ou a previsibilidade, dos sensores quando não se conhece o valor verdadeiro, uma vez que há uma tendência em haver dados de baixa qualidade. Quanto maior sua recompensa, mais confiável este sensor é. Espera-se que, em trabalhos futuros, utilizando esta técnica seja possível automaticamente selecionar sensores mais relevantes dentre uma grande quantidade deles.

Em outro escopo, porém ainda correlato, os autores em (Cai & Zhu, 2015) apontam a falta de técnicas padronizadas e métodos para lidar com a qualidade dos dados sob a perspectiva do *Big Data*. Neste artigo dedicam uma seção à revisão da literatura neste tópico e apontam esta questão como um paradigma, àquela altura, ainda sendo estudado em muitos centros de pesquisa. Apresentam, ainda, um modelo de trabalho para avaliação da qualidade dos dados, dividindo-se nos seguintes aspectos: disponibilidade, usabilidade, confiabilidade, relevância e qualidade na apresentação. Esta análise expande a interpretação de “qualidade dos dados” e, embora estejam em face ao *Big Data*, não seria razoável ignorar estes conceitos ao propósito deste trabalho.

Objetivando os sistemas participativos que possuem dados de baixa qualidade inerentes ao processo de recolha de informações por diversas razões, os autores em (Chang et al., 2015) estabeleceram um protocolo de regressão cega (sem um valor guia) com baixo custo computacional, viável para embarque em dispositivos móveis ou com limitação de processamento, para ajuste e sanitização dos dados identificando os potenciais *outliers* de conjuntos de dados independentes pela observação de uma variável. Este protocolo é executado tanto nos nós quanto no servidor que intermedia as leituras individuais e que também prevê a sabotagem da campanha através de usuários fornecendo informações imprecisas intencionalmente. Como resultados apresentaram um modelo com boa segurança, tolerância

a *outliers* e baixo custo computacional, tornando-se uma alternativa à melhoria da qualidade dos dados em sistemas de sensoriamento participativo.

Observando externamente um sistema de sensoriamento participativo em ambiente urbano, os autores em (L. Liu et al., 2015) estabeleceram uma métrica para avaliar a qualidade de um sistema urbano de sensoriamento móvel, seja ele colaborativo ou oportunista. Considerando que um determinado fenômeno em um centro urbano pode ter seu sinal representado em um plano bidimensional, ao qual chamam de imagem, estabelecem que a qualidade de um sistema de monitoramento urbano está relacionada com a qualidade desta imagem similar ao tratamento de processamento digital de imagens. Entretanto, ao invés de pixels, há nós de sensoriamento ou simples sensores. Deste modo, um primeiro passo – um tanto óbvio – em direção à qualidade dos dados seria uma boa discretização do ambiente urbano em termos de sensores.

Especificamente com relação ao monitoramento da qualidade do ar, também há esforços no sentido de mitigar o problema de baixa qualidade dos dados, sobretudo em sensores de baixo custo. Há um consenso implícito a encorajar os cientistas rumo à investigação da qualidade dos dados destes sensores antes que as agências de regulação, ou sistemas coletivos, estejam cheias de informações questionáveis, uma vez que a cada dia novos dispositivos são introduzidos portando apenas o baixo preço como característica (Lewis & Edwards, 2016). Neste sentido, os autores em (Hu et al., 2016) desenvolveram um procedimento robusto de calibração, utilizando aplicação controlada de gases, em sensores de baixo custo para monitoramento distribuído de monóxido de carbono e obtiveram resultados positivos. Frisa-se, no entanto, que ao adotar a perspectiva de sensoriamento colaborativo, tal abordagem delineada seria de eficácia limitada, pois em seu estudo se valem de um aparato que não é acessível aos indivíduos comuns, como câmaras herméticas, analisadores profissionais e cilindros de gás.

Os autores em (Duvall et al., 2016) investigaram o desempenho de sensores de baixo custo de uma marca específica (CairPol®) para medição da concentração de dióxido de azoto e ozono. Vale a pena salientar que a escolha dos autores não considera o preço destes dispositivos (que, inclusive, há apenas uma menção de faixa de preço: de U\$100 a U\$500; sugerindo uma subjetividade no termo “*low cost*” – termo este que será discutido mais adiante), mas sim por ser uma marca que tem sido recentemente utilizada pela agência norte-americana de proteção ambiental. Neste caso, os autores puseram estes elementos em co-localização com instrumentos oficiais de entidades norte-americanas para o monitoramento destes gases, e após uma janela de observação, puderam quantificar a qualidade destes sensores, onde – apesar de resultados positivos de correlação entre os sensores e os instrumentos de

referência – observaram leituras desconcorrelacionadas em um modelo de sensor de NO₂, sobretudo em baixas concentrações deste poluente, sugerindo um problema de sensibilidade mesmo em sensores consolidados no mercado, destacando o atual paradigma da qualidade dos dados em sensores de qualidade do ar.

Motivados pela crescente das iniciativas amigáveis para o monitoramento da qualidade do ar, os autores em (Castell et al., 2017) depuseram esforços para investigar a qualidade dos dados dos sensores de baixo custo para monitoramento da qualidade do ar. Foram investigadas 24 unidades de uma mesma plataforma de relativo baixo custo (*AQMesh*), e compararam suas leituras com as de instrumentos padrão em situações de ambiente controlado com alta reprodutibilidade, bem como em trabalho de campo. Como achados, apontaram: variações de resposta entre sensores idênticos, o que requer uma calibração individual para cada sensor; alta dependência das condições climáticas, onde a correção – mesmo que fornecido pelo fabricante – torna-se ineficaz em alguns momentos (encontraram altas correlações em laboratório, mas no teste de campo, mesmo com as correções sugeridas pelo fabricante, alguns sensores apresentaram coeficientes de correlação muito baixos, quando comparados com a referência); uma variação de longo termo considerável, para um mesmo sensor exposto em um ponto fixo, ao exterior; observaram que as incertezas das medições destes sensores expandem as metas estipuladas pela diretiva europeia para uma aferição adequada da qualidade do ar. No entanto – no momento – estas plataformas são capazes de sinalizar qualitativamente a qualidade do ar. Apesar da robusta análise, os autores não apresentaram técnicas de melhoria dos dados na ausência de instrumentos de referência para a certificação dos dados, sobretudo pelos sensores terem apresentado, quando comparados ao seu desempenho em laboratório, uma discrepância aleatória na avaliação de campo, em razão da variabilidade climática exterior.

Através de uma iniciativa conjunta multi-institucional, os autores em (Borrego et al., 2016) analisaram microssensores para diversos poluentes em comparação aos métodos convencionais, atestando a qualidade dos dados oriundos destes sensores. Com uma numerosa equipe, formada por membros de diferentes instituições, analisaram 130 sensores de diversos fabricantes (dentre os quais, os mais utilizados foram: *Shinyei* e *CAIR* para matéria particulada; *Alphasense* para CO, NO_x e O₃; *SGX* para NO₂ e O₃; *Sensirion* para temperatura e humidade) em medição exterior, lado a lado com instrumentos de referência para cada um dos poluentes e grandeza climática. O desempenho destes sensores foi avaliado por métricas estatísticas comparativas utilizando os dados dos instrumentos de referência como valores guia. Uma das observações realçadas, é a de que foram observadas discrepâncias significativas entre

sensores de mesmo tipo, muito embora alguns destes sensores tenham apresentado boa correspondência com o instrumento de referência. Os sensores de matéria particulada ($PM_{2.5}$ e PM_{10}) e dióxido de enxofre (SO_2) não apresentaram resultados satisfatórios, fornecendo uma fraca correlação (r^2) com os dados da referência. Já sensores como o dióxido de azoto, onde o dispositivo mais utilizado foi o *Alphasense* NO2-B4, apresentaram boa resposta para concentrações mais baixas (até 20 ppb), com ligeira elevação de discrepância em concentrações mais altas, ao passo que outros sensores idênticos, porém gerenciado por outros grupos, apresentaram resposta bastante dispersa em todo espectro de medição, sugerindo problemas de reprodutibilidade multi-amostra mesmo entre sensores de mesmo fabricante. Os sensores de monóxido de carbono, também da *Alphasense*, apresentaram resultados relativamente uniformes (baixa discrepância entre sensores) e correlação satisfatória, ao contrário dos modelos para NO_2 . Como recurso adicional, os autores aplicaram técnicas de redes neurais para avaliar padrões de comportamento dos sensores em comparação com os padrões obtidos dos instrumentos de referência através de Mapas de Kohonen. Estes mapas auto-organizáveis (usualmente abreviado como *SOM*, do inglês “*Self-Organizing Maps*”) agrupam dados multidimensionais por similaridade, resultando em uma matriz bidimensional, que também habilita a inspeção dos dados por análise visual dos padrões obtidos. Através deste recurso, foi possível reforçar os achados numéricos que apontavam para grandes discrepâncias observadas para o dióxido de azoto, bem como os bons resultados obtidos pelos sensores para monóxido de carbono. Entretanto, neste estudo (Borrego et al., 2016), não se considerou o preço ou facilidade de uso como critério de seleção dos sensores para a investigação. Isto pode implicar que parte dos sensores utilizados não atendam ao conceito de “baixo custo” estipulado como requisito do presente trabalho (onde o custo do sensor é o mais baixo possível, ou inferior à metade do custo de um sensor referencial). Reforce-se que é este conceito que viabiliza financeiramente a utilização destes sensores em larga escala, de maneira distribuída ou coletiva. Portanto, é neste nicho que este trabalho pretende focar a sua investigação.

CAPÍTULO 3

3 PRINCÍPIOS DE TRANSDUÇÃO

O avanço da eletrônica e das tecnologias de manufatura em semicondutores permitiram a reprodução em microescala de muitos instrumentos de medição outrora mecânicos. Além disso, também permitem que praticamente todo o equipamento que utilize algum recurso eletrônico possa ser miniaturizado. Sob esta ótica surgem os microssensores. Este capítulo dedica-se a relatar algumas das tecnologias utilizadas pelos sensores utilizados nesta investigação, com o intuito de apresentar um breve entendimento dos princípios de transdução de sinal dos sensores ambientais. Ou seja, como estes dispositivos são capazes de traduzir um estímulo externo - seja de natureza física ou química - em sinal elétrico. Espera-se que com isto seja possível abstrair mais conclusões acerca do desempenho destes ao final da análise dos dados.

Este capítulo divide-se entre os sensores climáticos e os de qualidade do ar, enquanto estes subdividem-se em função das grandezas envolvidas e em função do modo de transdução, respetivamente.

3.1 Sensores Climáticos

Os sensores climáticos apresentam elevados níveis de miniaturização e, portanto, um grande potencial para integração em dispositivos diversos em razão de suas pequenas dimensões físicas, baixo custo relativo e baixo consumo de energia.

Associada, sobretudo, à capacidade de miniaturização dos circuitos integrados, uma grande contribuinte para a consolidação dos microssensores é a tecnologia MEMS (um acrônimo do inglês "*Micro Electro-Mechanical Systems*"). Esta tecnologia permite a construção de estruturas eletromecânicas em escala microscópica utilizando materiais como, por exemplo, o silício e compostos cerâmicos, permitindo a construção de transdutores bastante miniaturizados. Nas subseções a seguir serão pontuadas algumas das principais tecnologias utilizadas na manufatura de microssensores climáticos atualmente utilizados, e os fenómenos de transdução em microescala.

3.1.1 Temperatura

A temperatura é, talvez, a grandeza física que mais possui alternativas para medição. É possível encontrar termômetro de mercúrio, de lâmina bimetálica, infravermelho e ainda a gama eletrônica de sensores de temperatura. No âmbito industrial, é comum encontrar circuitos eletrônicos que utilizam o termopar ou termistor (Figura 3-1) como meio de transdução de grandeza, sobretudo por suportar altas temperaturas e possuir curvas de resposta conhecidas. Seus princípios de funcionamento são relativamente simples: o termopar baseia-se no Efeito *Seebeck*, que estipula que a junção de dois metais diferentes, em temperaturas diferentes, gera uma diferença de potencial; o termistor, mais simples, apresenta uma variação negativa de sua resistência elétrica em função da temperatura submetida. Há ainda os termorresistores, ou RTD (acrônimo do inglês, "*Resistance Temperature Detectors*"), que usam o mesmo princípio dos termístores, porém sendo confeccionados de metal, dando-lhes uma resposta mais linear em função da temperatura.

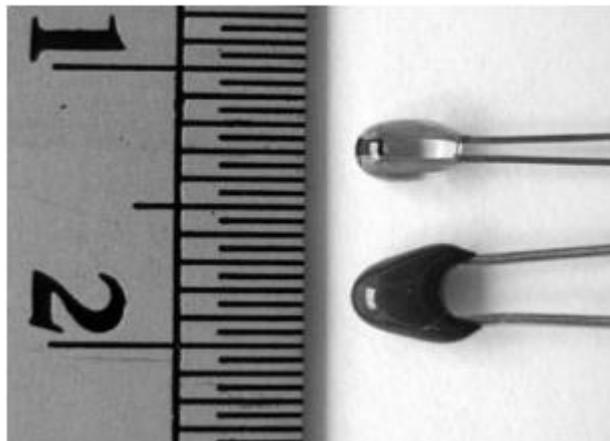


Figura 3-1. Termistor de vidro (superior) e epóxi (inferior). (Guadagnini & Barlette, 2005)

Na eletrônica, os sensores de temperatura "*on chip*" baseiam-se na dependência de temperatura da condutividade dos semicondutores. Em outros termos, são utilizados amplificadores de corrente e estes apresentam ganhos diferentes a temperaturas diferentes, permitindo estabelecer uma correlação entre a temperatura ambiente e o ganho observado em um circuito elétrico, uma vez que a diferença de potencial em uma junção P-N é diretamente proporcional à temperatura absoluta (Kester et al., 1999). Este fenômeno é conhecido como *Bandgap*, e é amplamente utilizado pois permite que sejam construídos termômetros muito pequenos em nível de circuito integrado a um baixo custo, baixo consumo de energia, alta confiabilidade e boa linearidade. Entretanto os circuitos convencionais geralmente não

são viáveis a aplicações industriais pela falta de robustez do elemento sensível, que não suporta temperaturas tão altas quanto os outros tipos.

Com o intuito de fornecer um sumário visual das diferentes características dos tipos de transdução para a temperatura, a Figura 3-2 exemplifica como se dá a resposta dos tipos de sensores. Em complemento à Figura 3-2, a Tabela 3-1 traz consigo algumas características que diferem os tipos de sensores de temperatura.

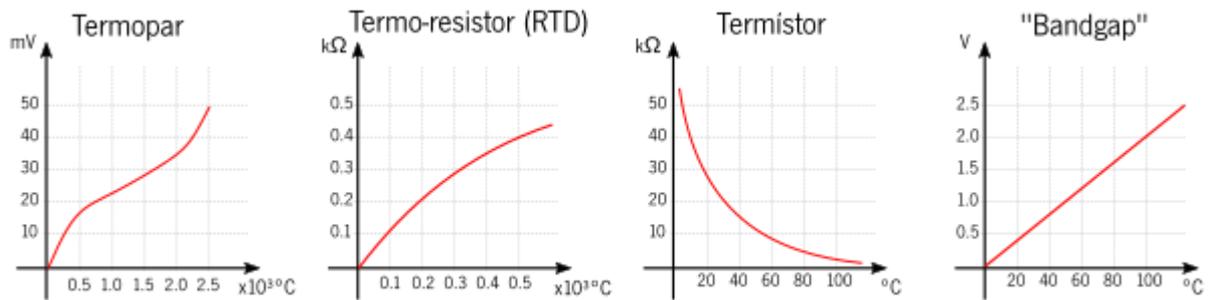


Figura 3-2. Comportamento das curvas de resposta de sensores de temperatura quanto ao seu modo de transdução. (Fonte: Adaptação própria⁸)

Tabela 3-1. Sumarização qualitativa de características de desempenho dos tipos de sensores de temperatura. (Adaptação de *Texas Instruments*⁹ e *Design World*¹⁰)

Critério	Termopar	Termo-resistor (RTD)	Termistor	"Bandgap"
Gama de operação	-270°C a +2300°C	-250°C a +750°C	-100°C a +500°C	-55°C a +200°C
Precisão	Boa	Muito boa	Depende de calibração	Boa
Resposta	Aproximação linear	Potencial	Exponencial	Linear
Sensibilidade	Média	Baixa	alta	Muito alta
Circuito auxiliar	Complexo	Complexo	Depende dos requisitos de precisão	Simple
Consumo de potência elétrica	Médio	Alta durante leitura	Alta durante leitura	Muito baixo
Estabilidade a longo prazo	Alta	Alta	Baixa	Média
Custo relativo	Médio-alto	Médio	Baixo - médio	Baixo

⁸ Adaptação da imagem como vista em <https://www.omega.com/prodinfo/Integrated-Circuit-Sensors.html> (Acessada em maio de 2018).

⁹ Disponível em https://e2e.ti.com/blogs_/b/analogwire/archive/2015/08/26/what-are-you-sensing-pros-and-cons-of-four-temperature-sensor-types (Acessada em maio de 2018).

¹⁰ Disponível em <https://www.designworldonline.com/designing-with-thermistors/> (Acessada em maio de 2018)

3.1.2 Humidade Relativa do Ar

A medição da humidade comumente é realizada em simultâneo à temperatura para que, juntas, permitam a determinação da sensação térmica, que trata de como o tempo está a interferir na sensação de bem-estar dos indivíduos. Como a humidade relativa é o percentual entre a quantidade de água presente no ar e a quantidade máxima que seria possível para aquela temperatura e pressão sem que houvesse precipitação, para medi-la é preciso, portanto, se valer de algum fenómeno de transdução que seja sensível à água. Os higrômetros mecânicos (Figura 3-3) funcionam com uma serpentina de um material higroscópico (alta afinidade com água) que se contrai ou expande em função da absorção de vapor de água que está presente no ambiente ao seu redor. Conforme realiza esta contração-expansão, movimenta um ponteiro – preso ao seu centro – ao longo de uma escala identificada para a leitura da humidade relativa correspondente.

Em grandes escalas geográficas, como nos estudos climáticos e meteorológicos, a medição da humidade relativa do ar ocorre através do sensoriamento remoto por imagem de satélite. As nuvens saturadas, ou seja, com humidade igual ou próxima aos 100%, emitem uma radiação em espectro infravermelho de amplitude conhecida e, portanto, permitem que através de câmaras fotográficas especiais, sensíveis a este espectro de frequência, seja possível estimar a humidade relativa em nível de solo através da análise das imagens obtidas a partir de satélites.



Figura 3-3. Higrômetro mecânico. (Fonte: FineTools¹¹)

No campo da eletrónica, o sensoriamento da humidade também ocorre pela observação de um parâmetro elétrico que varia em função da presença da humidade. Fundamentalmente os sensores humidade dividem-se entre capacitivos ou resistivos, quanto ao fenómeno de transdução, ou entre

¹¹ <http://www.fine-tools.com> (Acessada em maio de 2018)

cerâmicos (semicondutores), poliméricos-orgânicos e híbridos, quanto ao modo de manufatura (Farahani et al., 2014).

Os sensores capacitivos possuem de uma camada dielétrica de filme fino polimérico ou óxido metálico entre os eletrodos metálicos. O eletrodo superficial deve ser poroso de modo que a humidade consiga penetrar na camada dielétrica do arranjo, fazendo com que a capacitância varie em função da água absorvida (ou perdida) por esta camada. Esta técnica consegue atingir precisões de $\pm 2\%$ na humidade relativa, com muito pouco desvio de longo termo. Já os sensores resistivos possuem uma camada higroscópica (que pode ser de composto salino, polímero condutor ou substrato tratado) que altera a sua condutividade elétrica em razão da absorção da água. Conseguem atingir precisões de 0,1%, em estabilidade de temperatura, mas são muito mais suscetíveis à influência da temperatura e agentes externos, apresentando vida útil menor que os capacitivos (Kuo et al., 2011).

A Figura 3-4 ilustra graficamente estas diferenças na estrutura interna dos sensores quanto ao modo de transdução. A Figura 3-5, por sua vez, exhibe a curva de resposta típica de cada um destes métodos de transdução de humidade relativa.

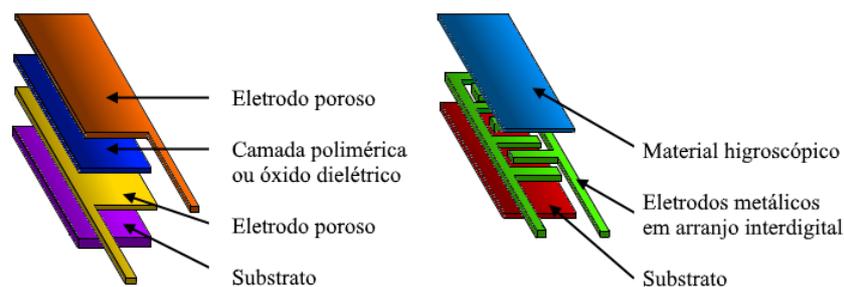


Figura 3-4. Ilustração de estrutura interna de um higrômetro eletrônico capacitivo (à esquerda) e resistivo (à direita). (Fonte: Adaptação própria¹²)

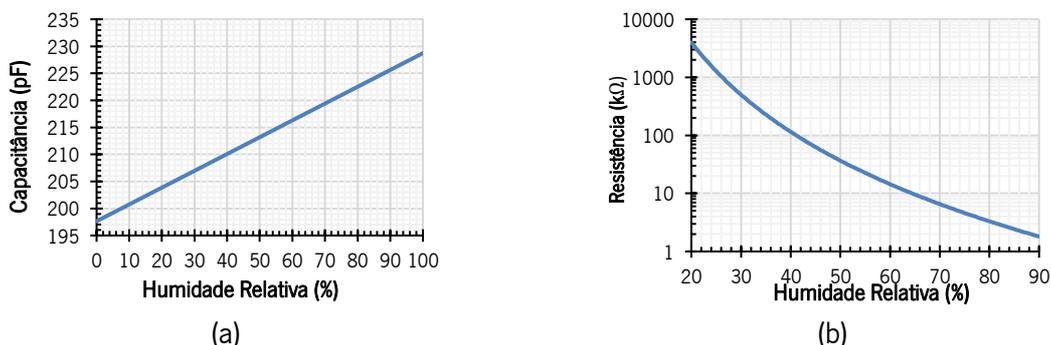


Figura 3-5. Exemplo de curva de resposta de sensor de humidade relativa: (a) capacitivo; (b) resistivo.¹³

¹² Adaptação da imagem como vista em <https://wisense.wordpress.com/2013/12/04/measuring-relative-humidity/> (Acessado em maio de 2018)

¹³ Adaptação da imagem como vista em <https://www.fierceelectronics.com/components/choosing-a-humidity-sensor-a-review-three-technologies> (Acessado em abril de 2020)

3.1.3 Pressão Atmosférica

Os instrumentos que medem os níveis de pressão atmosférica são conhecidos como barômetros. Estes dispositivos são importantes tanto na análise climática, onde a partir da observação de variações na pressão atmosférica pode-se identificar previsão de chuvas, quanto nas técnicas de posicionamento e navegação interior e exterior, onde assumem a função de altímetro, uma vez que a pressão barométrica pode ser um indicativo de variação da altitude. Em termos gerais, se tem: 1013 hPa em nível do mar, e 0.125 hPa de redução a cada metro de altitude (Meteorologisch Instituut, 2000) em temperatura estável.

A versão fundamental, mecânica, de um barômetro apresenta-se sob a nomenclatura de barômetro aneroide. Consiste da utilização de uma câmara a vácuo (ou semi-vácuo) construída com material maleável que se expande ou contrai conforme variações na pressão externa do ar. Esta câmara é presa a um sistema de alavancas que movimenta o ponteiro sobre uma escala gráfica no visor externo. A Figura 3-6 demonstra uma versão simplificada deste instrumento.

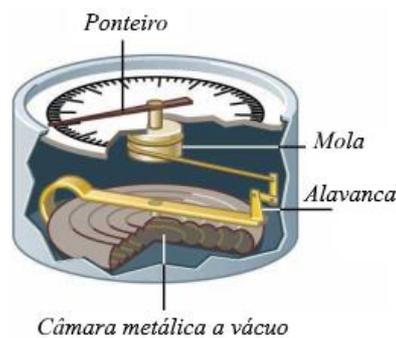


Figura 3-6. Estrutura interna de um barômetro aneroide.¹⁴

Este princípio de transdução é, inclusive, o reproduzido em microescala através das técnicas de construção de Sistemas Micro Eletromecânicos (*MEMS*) nos sensores atuais. No entanto, invés de um ponteiro móvel, há a adição de um elemento que mude um parâmetro elétrico em razão de deformação mecânica. Para esta função, a adição de um elemento piezoresistivo ou capacitivo à superfície da câmara a vácuo contorna o problema, e permite que se observe variação de tensão ou corrente em razão da variação na deformação da superfície da câmara. A Figura 3-7 exhibe uma retratação gráfica de um barômetro que se baseia neste princípio, proposto por (Minh-Dung et al., 2013), ao passo que a Figura 3-8 exhibe uma foto microscópica de um barômetro microfabricado comercial da Bosch Sensortech.

¹⁴ Adaptação de *The American Heritage Science Dictionary*: <http://www.dictionary.com/browse/aneroid-barometer> (Acessada em maio de 2018).

Convém realçar que os barômetros microeletrônicos comercializados atualmente atingem um consumo elétrico da ordem de microwatts (μW), e ocupam um pequeno espaço físico (da ordem de poucas unidades de milímetros), o que os habilitam – dentre várias aplicações – a figurar em quase totalidade dos novos smartphones, como recurso auxiliar dos sistemas de navegação e posicionamento (inclusive posicionamento em interiores, ou “*indoor*”). A Figura 3-9 exibe um destaque do posicionamento de um sensor de pressão barométrica dentro do aparato de *hardware* de um smartphone moderno.

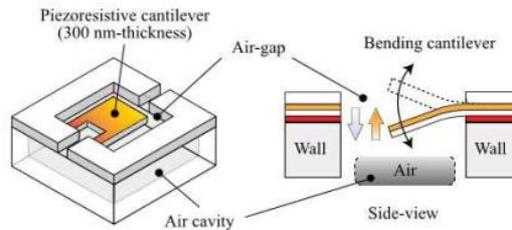


Figura 3-7. Proposta de barômetro microfabricado utilizando cantoneira móvel com elemento piezo-resistivo.

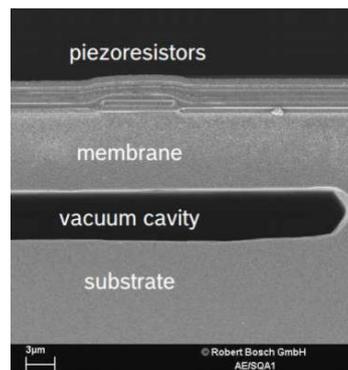


Figura 3-8. Fotografia microscópica de câmara a vácuo dos barômetros comerciais da Bosch Sensortech (O'Brien, 2011).



Figura 3-9. Barômetro (em destaque verde) na placa mãe do *smartphone* Samsung Galaxy S7.¹⁵

¹⁵ Adaptado de iFixit. Disponível em <https://www.ifixit.com/Teardown/Samsung+Galaxy+S7+Teardown/56686> (Acessada em maio de 2018)

3.2 Sensores de qualidade do ar

Ao contrário dos sensores climáticos, os sensores de qualidade do ar ainda não atingiram um nível de miniaturização capaz de torná-los embarcáveis em aplicações com restrições de projeto, como ocupação espacial e consumo de energia: muitos dos sensores de gases atuais ainda apresentam dimensões físicas na casa dos centímetros e consomem uma potência elétrica que não é desprezível. A título de exemplo, um sensor de óxido metálico semiconductor pode chegar a consumir 2 watts, enquanto um sensor de temperatura, por exemplo, usualmente demandaria poucos miliwatts.

Os subtópicos a seguir trazem consigo pontuações acerca dos principais modos de transdução utilizados pelos sensores de qualidade do ar: eletroquímicos, óxido metálico e óticos.

3.2.1 Sensores eletroquímicos

Os sensores eletroquímicos funcionam a partir do fenômeno de oxidação ou redução envolvendo o gás monitorado quando em contato com um elemento sensível que está em contato com um meio eletrolítico. O gás inicialmente passa por uma série de recursos mecânicos de filtragem e proteção, e entra em contato com um elemento sensível catalítico, oxidando ou reduzindo-o. Este processo desequilibra o sistema (criando íons), e faz com que elétrons se desloquem pelo meio eletrolítico interno entre o elemento sensível e o eletrodo de referência. Os contra-eletrodos se fazem necessários para balancear o processo de deslocamento iônico, fornecendo um caminho adicional para a corrente elétrica. A Figura 3-10 retrata um corte transversal de um sensor eletroquímico com apontamento dos elementos internos constituintes. A Figura 3-11 ilustra um conjunto de sensores eletroquímicos sob mesmo encapsulamento.

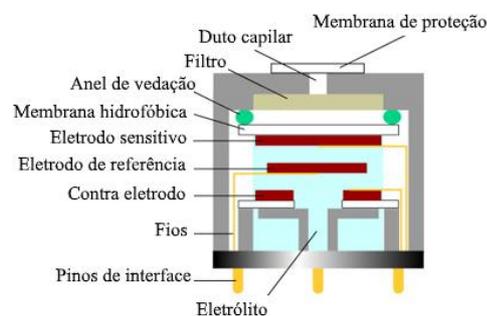


Figura 3-10. Diagrama de componentes internos de um sensor eletroquímico genérico.¹⁶

¹⁶ Adaptação e tradução de imagem como vista em <http://www.membrapor.ch/electrochemical-gas-sensors/> (Acessada em maio de 2018).



Figura 3-11. Encapsulamento tradicional para sensores eletroquímicos. (Fonte: *ApolloSense*¹⁷)

O ajuste de parâmetros como gama de operação e sensibilidade destes sensores pode ser feita tanto com mudança nas estruturas internas (duto capilar, eléctrodo sensitivo ou electrólito), quanto com circuitaria auxiliar. Por utilizarem um difusor, estes sensores podem, a depender da arquitetura empregada, necessitar de compensação do sinal em função da pressão atmosférica, obtendo assim uma relação linear entre a corrente eléctrica entre os terminais, e a concentração observada.

Um cuidado importante a se ter com estes tipos de sensores, é o processo de reidratação do meio electrólito. Quando expostos a ambientes com baixa humidade relativa do ar por períodos prolongados, o meio electrólito tende a se desidratar prejudicando a resposta do sensor. Situações abaixo de 30% de humidade são comuns de ocorrer durante meses, tanto no inverno, quando o frio excessivo congela o vapor de água presente no ar, quanto no verão, em climas áridos ou semiáridos. Alguns fabricantes fornecem roteiros para a reidratação dos sensores pelo próprio usuário, sem necessidade de intervenção profissional, quando o sensor for exposto a estes ambientes por mais de 3 ou 4 semanas. O processo é relativamente simples: coloca-se o sensor em um recipiente fechado junto de outro recipiente contendo água morna com sal (concentração saturada) de modo que o vapor de água não escape do recipiente maior e seja absorvido pelo sensor. O tempo de exposição recomendado é de aproximadamente 8 horas. A Figura 3-12 exhibe uma fotografia de uma etapa de processo de reidratação de um sensor eletroquímico para monóxido de carbono.

Os gases monitoráveis pelos sensores eletroquímicos limitam-se aos electroquimicamente ativos, ou seja, gases capazes de reagir por oxidação ou redução. Isto traz consigo o problema da interferência cruzada, que ocorre quando um gás fora da alça de interesse provoca excitação do elemento sensitivo, provocando eventos conhecidos como “falso positivo”. Há também a interferência negativa, em que o gás interferente inibe a sensibilidade do elemento sensitivo, fazendo com que ele não perceba a

¹⁷ Disponível em <http://apollosense.sell.everychina.com/p-99874588/showimage.html> (Acessada em junho de 2018)

incidência total do gás alvo. O efeito da interferência cruzada pode ser reduzido utilizando filtros químicos antes do elemento sensível catalítico do sensor. A Tabela 3-2 ilustra algumas interferências em sensores eletroquímicos para aplicações industriais (note que interferências negativas funcionam como inibidores ao gás alvo do sensor). Ademais, a exposição deste tipo de sensor a altas concentrações de elementos específicos tóxicos (*e.g.* amônia), ou mesmo ao gás alvo, caso em concentrações muito elevadas, pode causar um envenenamento do sensor, e tirar-lhe – em caráter definitivo – suas características originais, portanto carecem de um estudo do ambiente em que o sensor será posto para que sua vida útil seja prolongada.

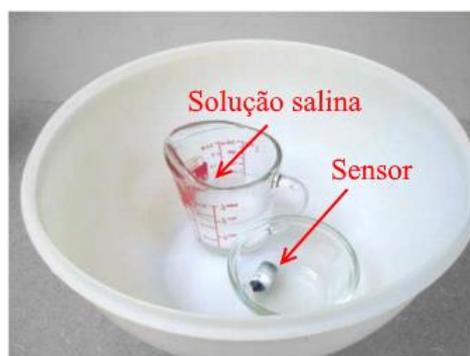


Figura 3-12. Ilustração do processo de reidratação de um sensor eletroquímico de monóxido de carbono utilizando vapor de solução saturada de água e sal. (Fonte: *TSI Instruments*¹⁸)

Tabela 3-2. Exemplos de interferências cruzadas, em nível percentual, em sensores de gases comumente utilizados no monitoramento da qualidade do ar exterior. (Fonte: *Industrial Scientific*¹⁹)

Sensor	Gás interferente										
	CO	SO ₂	NO ₂	NO	Cl ₂	HCN	HCl	PH ₃	H ₂ S	H ₂	NH ₃
CO	100%	1%	-	-	-	-	-	-	1%	20%	-
SO ₂	-	100%	-	-	-	-	40%	-1%	1%	-	-40%
NO ₂	-5%	-165%	100%	30%	45%	-70%	-	-11%	-24%	-	-10%
NO	25%	1%	5%	100%	-	5%	-	-	-	30%	-

¹⁸ Imagem obtida na Nota de Aplicação TSI-158 ("application note TSI-158") disponível em: http://www.tsi.com/uploadedFiles/_Site_Root/Products/Literature/Application_Notes/TSI-158_Rehydration_of_CO_Sensors-US.pdf?id=28010 (Acessada em maio de 2018)

¹⁹ Informação disponível em <https://www.indsci.com/Sensor-Cross-Interference-Level/> (acessada em junho de 2018)

3.2.2 Sensores de óxido metálico

Os sensores de óxido metálico semiconductor, conhecidos como MOS (acrônimo do inglês “*Metal Oxide Semiconductor*”) têm seu funcionamento explicado pela teoria das Bandas de Condução dos semicondutores, que trata de como estes elementos conduzem corrente elétrica, e pela reação química na superfície do elemento sensível à base de óxido metálico.

Em suma, o processo de transdução destes sensores ocorre a partir do monitoramento da resistividade elétrica da membrana de óxido metálico. O óxido metálico, à temperatura ambiente, é inerte e não conduz eletricidade. Entretanto, quando aquecido (podendo chegar a 300°C, a depender do material) passa a permitir a passagem de elétrons livres. Estes elétrons ligam-se eletronicamente ao oxigênio do ar (limpo) em contato com a superfície sensível, ocasionando um aumento na resistividade do material, já que o fluxo de elétrons livres diminui, e cria-se uma barreira de potencial. Quando um gás redutor entra em contato com esta camada aquecida, as moléculas de gás reagem com a superfície, liberando mais elétrons e reduzindo a barreira de potencial – o que aumenta o fluxo entre os terminais – e permitindo que se estipule uma correlação entre a concentração do gás e a variação do parâmetro. A Figura 3-13 exibe um diagrama estrutural típico de um sensor de óxido metálico, e a Figura 3-14 exemplifica um conjunto de sensores de gases a óxido metálico.

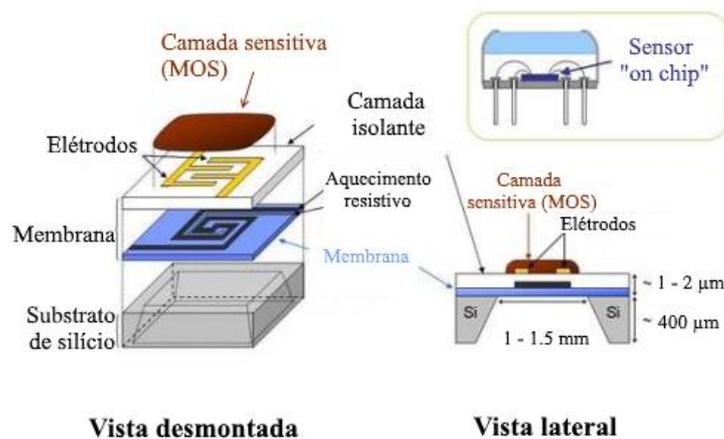


Figura 3-13. Diagrama de estrutura interna e vista lateral de um sensor de óxido metálico semiconductor (MOS).²⁰

Para cada gás a ser monitorado há um material óxido metálico semiconductor específico para reagir adequadamente. Estes materiais dividem-se entre óxidos de metais de transição e óxidos de metais de

²⁰ Imagem adaptada do original. Obtida em <http://www.electronics-base.com/general-description/gas-sensors/171-electronic-gas-sensors-and-detectors-classification-and-operating-principles> (Acessado em maio de 2018)

não-transição. Exemplos de óxidos metálicos de transição com resposta sensível à incidência gasosa quando aquecidos são o óxido de ferro (Fe_2O_3), óxido de níquel (NiO) e óxido de cromo (Cr_2O_3). Já óxidos metálicos de não-transição exemplificam-se com o dióxido de estanho (SnO_2 , um dos mais comuns pois é utilizado como monitor de gases combustíveis e monóxido de carbono), óxido de zinco (ZnO) e óxido de alumínio (Al_2O_3), dentre outros (Wang et al., 2010).



Figura 3-14. Conjunto de sensores de gases a óxido metálico em placas de interface analógica. (Fonte: *Emakefun*²¹)

Estes sensores, entretanto, por exigirem condições específicas de temperatura para efetuar a reação com o gás incidente, são muito suscetíveis aos fatores climáticos exteriores, pelo que – quando expostos ao exterior – pode ser necessária uma compensação de leitura em razão da temperatura e humidade relativa do ar ao momento em que se efetuou a medição.

Estes sensores também são afetados pela interferência cruzada. Um conhecido exemplo crítico é o do trióxido de tungstênio (WO_3) que responde bem tanto aos óxidos de azoto (NO_x) quanto ao ozono (O_3), sem conseguir distinguir-se quem excita o sensor. Nas demais situações, estudos mostraram que a combinação de materiais para estreitar a sensibilidade a um único gás tem se mostrado eficiente, apesar de não eliminar completamente as interferências cruzadas (Fine et al., 2010).

Outra característica peculiar a estes sensores é a exigência do tempo de pré-aquecimento para “limpeza” da camada sensitiva. Após algum tempo sem utilização, é possível ocorrer a oxidação da camada sensitiva. Portanto, recomenda-se deixar o sensor ligado por várias horas (até 24h) antes de tomar as leituras como confiáveis, pois durante este tempo está ocorrendo o tratamento térmico da camada sensitiva. Este processo é chamado de “*Warm-Up*”. Caso o sensor ainda não tenha sido

²¹ Disponível em <https://www.amazon.co.uk/Emakefun-Sensor-Tutorial-Arduino-Starterkit/dp/B077JVC9GB> (Acessada em junho de 2018)

utilizado, este tempo pode chegar a 48 horas, e nomeia-se este processo como “*burn-in*”. Uma implicação lógica deste tipo de sensor é o elevado consumo de energia elétrica, sobretudo em razão da necessidade de aquecimento.

3.2.3 Sensores óticos

Esta categoria de sensores de gases, ao contrário das outras enunciadas, não utiliza reação de oxidação ou redução do gás monitorado em seu princípio de transdução, nem carece de materiais reagentes ou catalisadores em sua estrutura interna. Monitoram o gás quer pela observação da “absorção” de espectros específicos, como o infravermelho (uma vez que cada gás responde a um comprimento de onda específico – com poucas sobreposições de espectro, como se vê na Figura 3-15), quer pela observação da luminescência sob estímulos químicos ou físicos provocados em uma câmara sensitiva, estes chamados de métodos de “não-absorção”.

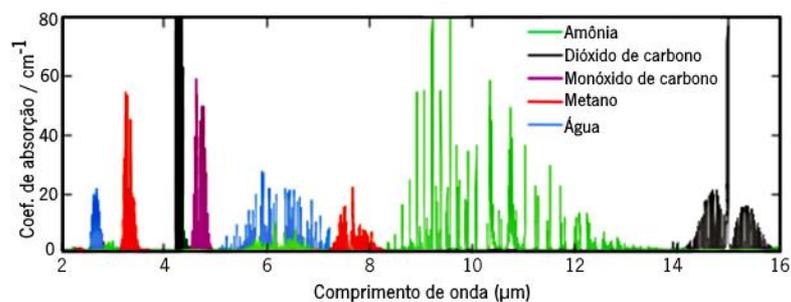


Figura 3-15. Coeficiente de absorção energética de alguns gases em função do comprimento de onda da gama de infravermelho.²²

Há um tipo específico de sensor ótico que é comumente utilizado no monitoramento dos gases: os sensores NDIR, acrônimo do inglês “*Non Dispersive Infra Red*”. Seu princípio de funcionamento pode ser resumido da seguinte maneira: o emissor emite pulsos de luz infravermelha, que pode ser em uma frequência específica ou não, e, estes feixes, na ausência do gás, chegam em sua intensidade máxima em um recetor ao final da câmara que, por sua vez, também está sintonizado ao comprimento de onda de interesse ou pode utilizar de um filtro ótico caso a emissão luminosa seja de banda larga (*e.g.* o dióxido de carbono apresenta absorção máxima em comprimento de onda de aproximadamente 4.2 μm,

²² Adaptação da imagem como vista em <http://lightsensetechnology.com/core-technology/> (Acesso em maio de 2018)

portanto é interessante que apenas este comprimento de onda incida sobre o recetor). É comum haver um segundo recetor, porém sintonizado em uma região vizinha que não há absorção do gás para que se verifique a intensidade esperada do emissor naquele comprimento de onda (em caso de variação na intensidade do feixe). Na presença do gás na câmara interna, este absorve – proporcionalmente – parte da energia emitida e enfraquece o sinal percebido no recetor, e, por comparação com o sinal observado no recetor de referência, permite que seja estabelecida uma função de transferência entre a concentração do gás e a tensão, ou corrente, elétrica monitorada nos terminais no fotorreceptor do sensor. A Figura 3-16 ilustra uma simplificação deste sistema de transdução pela absorção da luz infravermelha no gás monitorado, ao passo que a Figura 3-17 ilustra dois possíveis encapsulamentos para um sensor *NDIR*.

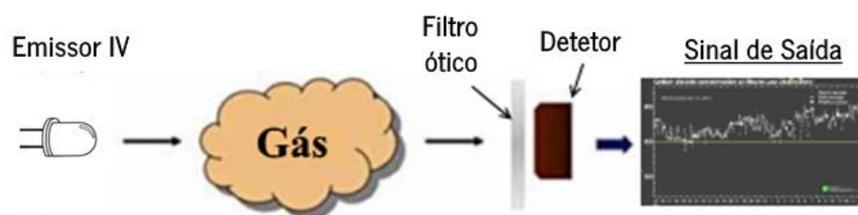


Figura 3-16. Processo de transdução simplificado por absorção, utilizado em sensores de infravermelho não dispersivo (Bogue, 2015).



Figura 3-17. Sensores óticos a infravermelho não-dispersivo em diferentes encapsulamentos (imagem fora de escala). (Fonte: *Alphasense*²³ e *Inteform*²⁴)

Alguns compostos gasosos, no entanto, não absorvem energia no espectro de infravermelho, mas sim no ultravioleta, uma região mais energética, que – em alguns casos – se torna pouco viável de ser reproduzida pelo método de absorção quando comparada aos métodos óticos de não-absorção. A esta gama de gases, portanto, apresentam-se técnicas adicionais como, por exemplo, a quimiluminescência (referida na literatura especializada como “*CL*”, acrônimo do inglês “*chemiluminescence*”) e a

²³ Disponível em <http://www.alphasense.com/index.php/products/ndir-air/> (Acesso em junho de 2018).

²⁴ Disponível em <http://www.inteform.com.br/portuguese/loja/sensor-co2-mh-z16-ndir.html> (Acesso em junho de 2018)

fluorescência ultravioleta (referida na literatura especializada como “UVF”, acrónimo de “*ultra violet fluorescence*”).

O monitoramento pela quimiluminescência ocorre a partir da observação instrumental da luminosidade emitida durante a reação do gás monitorado com um reagente químico posto em contato de modo controlado. Quanto maior a intensidade luminosa emitida na reação, mais energia foi desprendida e, portanto, maior é a concentração do gás monitorado, uma vez que a concentração do reagente é conhecida. Um exemplo pertinente de monitoramento por quimiluminescência é o processo de deteção de pequenas concentrações de óxidos de azoto (NO_x). O instrumento possui em seu interior ozono (O₃) que reage com, por exemplo, o monóxido de azoto incidente (NO), resultando em dióxido de azoto (NO₂) e oxigênio (O₂), e neste momento as moléculas excitadas de dióxido de azoto emitem luz na faixa de 1.2 μm, incluída na faixa infravermelho e então é detetada por recetores sintonizados a este comprimento de onda. No monitoramento do NO₂ este processo se acresce apenas da conversão do dióxido de azoto para monóxido, e então o processo descrito é efetuado da mesma maneira. A Figura 3-18 sumariza este procedimento de deteção de NO_x por quimiluminescência em um diagrama de fluxo.

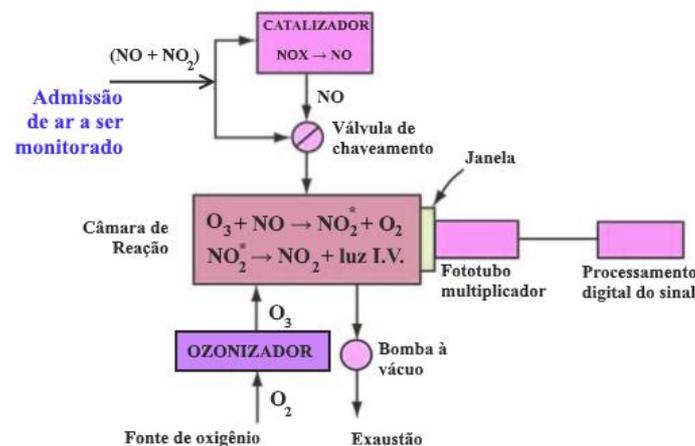


Figura 3-18. Diagrama do processo de deteção de óxidos de azoto por quimiluminescência.²⁵

A deteção de gases por fluorescência em ultravioleta (UVF) utiliza o estímulo físico de ondas em espectro de ultravioleta para excitar o gás, enquanto este absorve esta energia e emite-a em outro espectro. Exemplifica-se este processo utilizando a deteção de dióxido de enxofre (SO₂): este gás absorve a luz no espectro ultravioleta com comprimentos de onda entre 190 e 230 nm (10⁻⁹ m), e esta energia absorvida excita temporariamente as moléculas do gás. Contudo, em um processo de estabilização, para

²⁵ Adaptação das notas de aula do Prof. Bibhabasu Mohanty, disponível em <https://www.slideshare.net/bibhabasumohanty/air-quality-sampling-and-monitoring-m5> (Acessado em maio de 2018).

retornar a seu estado natural o gás emite a energia excedente em outro espectro, entre 230 e 420 nm (Bogue, 2015). É justamente nesta janela de frequências que o detetor deve estar sintonizado, uma vez que a quantidade de radiação UV emitida nesta faixa será diretamente proporcional à concentração do dióxido de enxofre. A fonte de luz ultravioleta, neste processo, pode ser a própria luz solar – dependendo da localização geográfica e do arranjo de filtros óticos. A Figura 3-19 exemplifica este processo de detecção por fluorescência ultravioleta.

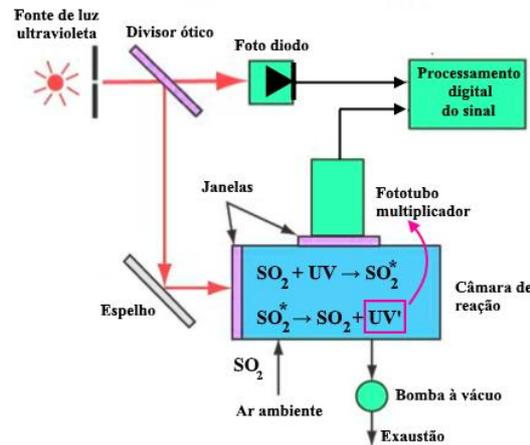


Figura 3-19. Diagrama de detecção de SO₂ por fluorescência ultravioleta.²⁵

A precisão destes métodos é considerada a mais adequada por órgãos competentes (e.g. agências nacionais de metrologia ou de monitoramento ambiental), pelo que são elencados como métodos em padrão oficial para o monitoramento, por exemplo, de ozono (quimiluminescência) e dióxido de enxofre (fluorescência ultravioleta). No entanto, em se tratar de um processo complexo, são equipamentos com custo financeiro muito elevado, tornando seu uso praticamente restrito às instituições de regulação e monitoração ambiental. A Figura 3-20 ilustra exemplares de equipamentos comerciais atualmente disponíveis para detecção de gases por quimiluminescência e radiação ultravioleta.



(a)



(b)

Figura 3-20. Equipamentos padrão para detecção de: (a) NO_x por quimiluminescência; (b) SO₂ por fluorescência ultravioleta.²⁶

²⁶ Altech USA. Disponíveis em <http://altechusa.com> (Acessado em maio de 2018)

CAPÍTULO 4

4 PREPARAÇÃO EXPERIMENTAL

Como dito na parte introdutória deste documento, o método adotado para conduzir esta investigação aos resultados consiste na submissão de sensores de baixo custo a roteiros experimentais específicos, extrair dados numéricos de leitura destes sensores e efetuar uma análise de desempenho à conveniência de métricas de avaliação específicas. Por início, é preciso identificar quais sensores seriam utilizados, dentro de um universo de disponibilidade de mercado e que, ao mesmo tempo, se enquadrem nos cenários descritivos de estado da arte de sensoriamento ambiental relatado no Capítulo 2.

Portanto, neste capítulo são descritos os preparativos para a execução do experimento tendo início na etapa de seleção dos sensores, incluindo as justificativas para as decisões de escolha. Em seguida são descritos os pormenores técnicos para a ligação dos sensores à plataforma *Arduino*, e – por fim – o planejamento de cada experimento avaliativo.

4.1 Seleção dos sensores

O ponto de partida para a seleção dos sensores deste trabalho considera aqueles que comumente integram a fauna de iniciativas “faça você mesmo” (“*Do it yourself*”), e que ao mesmo tempo se enquadrem no conceito de “baixo custo”. Foi preciso, portanto, estabelecer um método de seleção – empírico em sua concepção – para a seleção e aquisição de alguns sensores enquadrados nestes subconjuntos. Ademais, tendo em conta a existência de restrições de recurso tanto financeiro quanto técnico (como, por exemplo, a janela de tempo para utilização da câmara de ambiente controlado) para o desenvolvimento deste estudo e a numerosa quantidade de potenciais dispositivos disponíveis, foi preciso estabelecer um limite de unidades avaliadas, uma vez que quanto maior o número de sensores, mais tempo e recursos seriam exigidos para uma análise pertinente destes.

Os sensores foram identificados através de uma triagem em *websites* de fornecedores, utilizando palavras-chave correlatas ao monitoramento ambiental. Os sensores mais comuns na maioria dos fornecedores foram pré-selecionados e submetidos aos critérios de seleção delineado. Estes critérios, que objetivam uma lista final de sensores com certa relevância representativa, foram os seguintes:

funcionamento dentro da gama de interesse para cada grandeza ou poluente, **custo relativo**, **popularidade**, **precisão nominal** e **facilidade de integração** (ou “interfaceamento”). Os sensores foram submetidos a uma avaliação comparativa dentro dos referidos critérios, e receberam um escore relativo ao seu desempenho em relação àquela característica. Ao final, os sensores com as maiores pontuações foram escolhidos para integrar o conjunto de avaliação deste trabalho de investigação. Um sumário da árvore de decisão apresenta-se na Figura 4-1.

Uma observação pertinente adicional acerca da escolha dos sensores é a de que frequentemente vários novos sensores são disponibilizados no mercado e que, como o processo de seleção e compra teve uma restrição temporal, os sensores escolhidos aqui possuem uma data de referência do 2º semestre do ano de 2016, época em que a seleção ocorreu. Portanto, alguns sensores podem estar, à data da conclusão deste trabalho, indisponíveis ao mercado ou em versões obsoletas.

Durante a triagem aos sensores de qualidade do ar, foi percebida uma quantidade considerável de sensores distintos para cada grandeza. Outra vez o problema de limitação de recursos se torna restritivo e, diante da vasta gama de opções, se reforça a mesma necessidade de estipular medidas para reduzir a lista.

Em uma reflexão acerca dos sensores e dos fenómenos que estes investigariam decidiu-se descartar duas espécies de poluentes da lista: matéria particulada e dióxido de enxofre (SO₂). A matéria particulada foi apontada para ser removida sobretudo em razão da fragilidade deste tipo de sensor, de seu grande tamanho físico, e da complexidade no processo de medição. Os sensores de dióxido de enxofre, por sua vez, foram desconsiderados por dois motivos: dificuldade em encontrar estes sensores para aplicações “*Do It Yourself*”, e pela abrangência limitada deste poluente, pois não é muito incidente nas regiões onde os envolvidos neste trabalho se incluem, pois, é tipicamente oriundo de grandes polos industriais, o que não é o caso das cidades de Natal, no Brasil, e Guimarães, em Portugal. Ademais, atualmente os níveis de enxofre nos combustíveis estão cada vez mais baixos, reduzindo, portanto, a incidência deste poluente. Para ilustrar, é possível usar o QualAr como referência: das suas 68 plataformas, apenas 20 possuem sensores para o SO₂, dentre as quais somente a metade apresentam medições diferentes de zero²⁷. Com esta decisão, a lista de elementos foi ajustada para os sensores de: temperatura, humidade relativa do ar e pressão atmosférica, bem como monóxido de carbono, dióxido de carbono, ozono e dióxido de azoto.

²⁷ Informação obtida do monitoramento em tempo real no dia 8 de junho de 2017 no link: <http://qualar.apambiente.pt/?page=2>

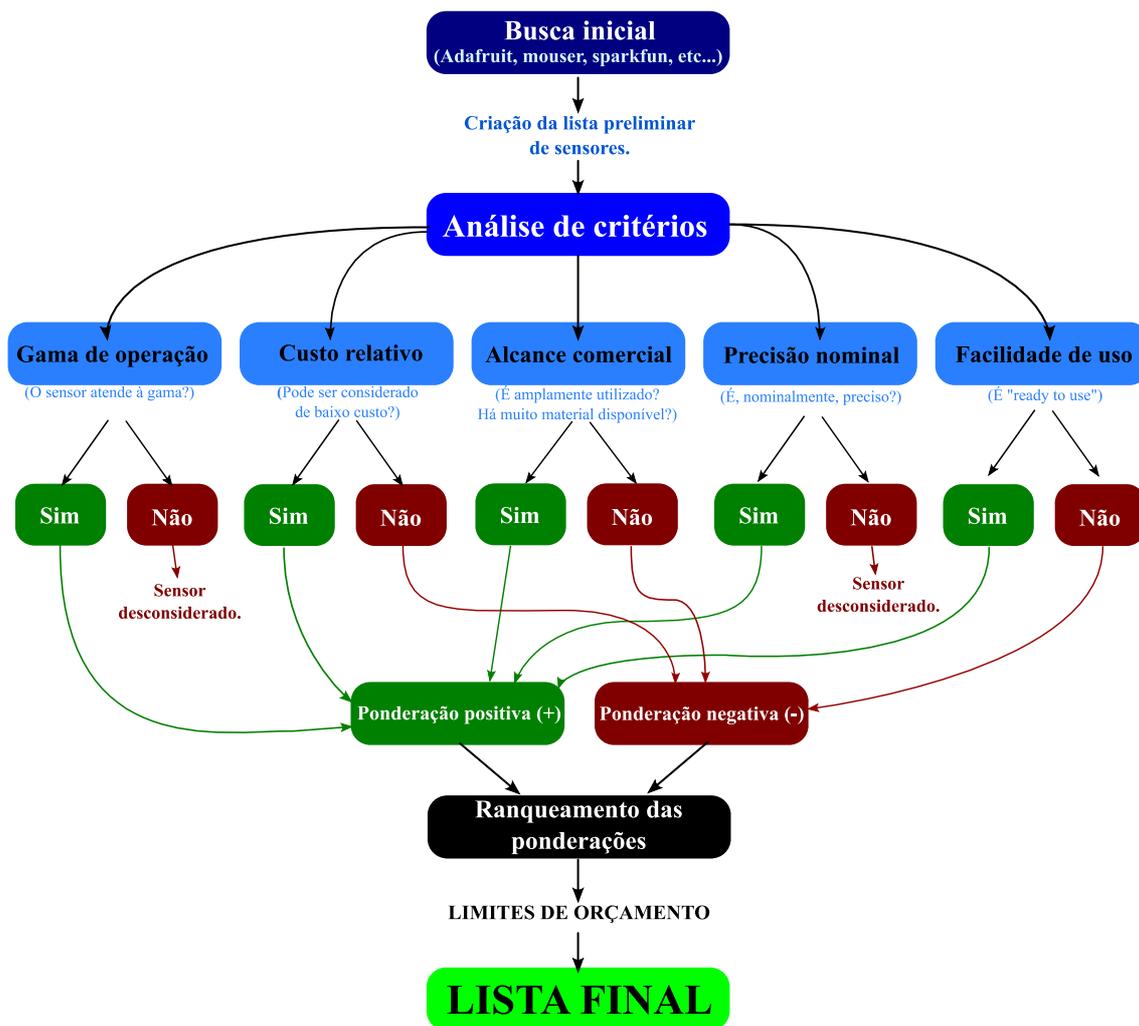


Figura 4-1. Árvore de decisões simplificada para a seleção dos sensores.

Os sensores resultantes do processo de triagem inicial listam-se nas Tabelas 4-1 e 4-2: a primeira inclui os sensores climáticos, as grandezas medidas por cada sensor, o fabricante, a gama de operação, precisão nominal, preço médio e loja *online* onde o preço foi obtido; a segunda lista os sensores de qualidade do ar, os fabricantes, a gama de operação nominal, tempo de resposta nominal, necessidade de calibração, preço estimado e loja *online* onde o preço foi obtido. Foram, portanto, estes os sensores submetidos à avaliação multicritério de seleção (já apresentada anteriormente na Figura 4-1). A Tabela 4-3 serve como complemento ao critério de seleção para a gama de operação por fornecer informações da Organização Mundial de Meteorologia sobre a resolução exigida para medições padrão.

Tabela 4-1. Listagem dos principais sensores climáticos obtidos na triagem inicial (preços de junho de 2016).

Grandeza ²⁸			Sensor	Fabricante	Gama de Op.	Exatidão Nom.	Preço	Distrib.
T	H	P						
X			DS18B20	<i>Maxim</i>	-25°C – 85°C	±0.5°C	€ 3	Sparkfun
X	X		DHT11	<i>OEM</i>	0° – 50°C (T) 20% - 90% (H)	±2.0°C (T) ±5% (H)	€ 5	Adafruit
		X	MPL115A2	<i>Freescale</i>	500 – 1150 hPa	± 10 hPa	€ 5	Farnell
X			TMP102	<i>TI</i>	-25°C – 85°C	±0.5°C	€ 5	Sparkfun
X	X		AM2302	<i>OEM</i>	-40°C – 125°C (T) 0 – 100% (H)	±0.2°C (T) ±2-5% (H)	€ 8	Adafruit
X		X	BMP180	<i>Bosch Sens.</i>	-40°C – 85°C (T) 300 – 1100 hPa (P)	±0.5°C (T) ±1 hPa (P)	€ 9	Adafruit
		X	BMP280	<i>Bosch Sens</i>	300 – 1100 hPa	±1 hPa	€ 10	Adafruit
X		X	MPL3115A2	<i>Freescale</i>	-40°C – 85°C (T) 500 – 1100 hPa (P)	±0.5°C (T) ±4 hPa (P)	€ 12	Sparkfun
X	X		HTU21D	<i>Measurement Specialities</i>	-40°C – 125°C (T) 0 – 100% (H)	±0.3°C (T) ±2% (H)	€ 15	Adafruit
X	X	X	BME280	<i>Bosch Sens.</i>	-40°C – 85°C (T) 300 – 1100 hPa (P) 0 – 100% (H)	±0.5°C (T) ±1 hPa (P) ±3% (H)	€ 20	Adafruit
X		X	SHT71	<i>Sensirion</i>	-40°C – 125°C (T) 0 – 100% (H)	±0.4°C (T) ±3% (H)	€ 32	Mouser

Tabela 4-2. Sensores de qualidade do ar obtidos na triagem inicial (preços de junho de 2016).²⁹

Gás	Sensor	Fabricante	Gama de Op.	t_{resp} (s)	Sensor Calibrado	Preço	Distrib.
CO	MQ-7	<i>Hanwei</i>	10 – 1000 ppm [12,3 – 1230 mg/m ³]	90	Não	€ 5	<i>Sparkfun</i>
	MQ307-A	<i>Hanwei</i>	30 – 1000 ppm [37 – 1230 mg/m ³]	120	Não	€ 5	<i>Aliexpress</i>
	MQ-2	<i>Hanwei</i>	200 – 1000 ppm [247 – 1230 mg/m ³]	?	Não	€ 5	<i>Digikey</i>
	MQ-9	<i>Hanwei</i>	10 – 1000 ppm [12,3 – 1230 mg/m ³]	90	Não	€ 10	<i>RobotShop</i>
	CO-B4	<i>Alphasense</i>	0 – 1000 ppm [0 – 1230 mg/m ³]	<i>n. inf.</i>	<i>n. inf.</i>	€ 100	<i>n. inf.</i>

²⁸ T – Temperatura; H – Humidade relativa do ar; P – Pressão atmosférica.

²⁹ Os sensores marcados com um asterisco (*) apresentam sensibilidade dupla com outro poluente, sem haver a distinção entre eles no sinal de saída (no caso do MiCS-VZ86F, a sensibilidade ocorre com os Compostos Orgânicos Voláteis; o MiCS-4515, por sua vez, apresenta sensibilidade cruzada com o monóxido de carbono).

Tabela 4-2. Sensores de qualidade do ar obtidos na triagem inicial (preços de junho de 2016).²⁹

Gás	Sensor	Fabricante	Gama de Op.	t_{resp} (s)	Sensor Calibrado	Preço	Distrib.
CO ₂	MiCS-VZ-86F*	SGX	400 – 2000 ppm [775 – 3875 mg/m ³]	5	Sim	€ 30	SGX Store
	MiCS-VZ-87	SGX	400 – 2000 ppm [775 – 3875 mg/m ³]	5	Sim	€ 45	SGX Store
	MG-811	Hanwei	400 – 10000 ppm [775 – 19 400 mg/m ³]	5	Não	€ 50	Sandbox Electronics
	MH-Z16	Zhengzhou Winsen	400 – 10000 ppm [775 – 19 400 mg/m ³]	30	Sim	€ 65	Sandbox Electronics
	T6713	Telaire	400 – 5000 ppm [775 – 9750 mg/m ³]	180	Sim	€ 120	Digikey
	CO2-D1	Alphasense	5000 – 20000 ppm [9750 – 39200 mg/m ³]	<i>n. inf.</i>	<i>n. inf.</i>	€ 120	AzoSensors
	IR11BD	SGX	400 – 3000 ppm [775 – 5820 mg/m ³]	20	Não	€ 200	SGX Store
NO ₂	MiCS-4514*	SGX	0,05 – 10 ppm [0,1 – 20,3 mg/m ³]	<i>n. inf.</i>	Não	€ 9	CDI
	MiCS-2714	SGX	0,05 – 10 ppm [0,1 – 20,3 mg/m ³]	<i>n. inf.</i>	Não	€ 8	SGX Store
	ME3-NO2	Zhengzhou Winsen	0 – 20 ppm [0 – 40,6 mg/m ³]	25	Sim	€ 90	Winsen Store
	4-NO2-20	Solidsense	0 – 20 ppm [0 – 40,6 mg/m ³]	30	Sim	€ 140	Cooking Hacks
	NO2-B4F	Alphasense	0 – 20 ppm [0 – 40,6 mg/m ³]	<i>n. inf.</i>	<i>n. inf.</i>	€ 100	<i>n. inf.</i>
O ₃	MiCS-2614	SGX	10 ppb – 1000 ppb [0,02 – 2,1 mg/m ³]	<i>n. inf.</i>	Não	€ 8	SGX Store
	MQ-131	Hanwei	10 ppb – 1000 ppb [0,02 – 2,1 mg/m ³]	<i>n. inf.</i>	Não	€ 20	SainSmart

Tabela 4-3. Recomendações de resolução para grandezas climáticas de acordo com a Organização Mundial de Meteorologia. (WMO, 2008)

Grandeza	Resolução
Temperatura	0.1 °C
Humidade relativa do ar	1%
Pressão atmosférica	0.1 hPa

4.1.1 Gama de operação

A Tabela 2-2, devidamente apresentada na subseção 2.1.1, expõe os valores limite recomendados para as grandezas que são de interesse à presente investigação – tanto climáticas quanto de qualidade do ar – e servem como baliza para este critério. No entanto, particularmente com relação às variáveis do clima, convém justificar uma maleabilidade na consideração destes valores: as recomendações ali apontadas são para instrumentos analógicos convencionais, com princípios de funcionamento diferentes. Para evitar que estes critérios – quando aplicados aos sensores pré-selecionados – sejam excessivamente excludentes (uma vez que estamos lidando com sensores eletrônicos de baixo custo), é preciso conceder uma tolerância que leve em conta, portanto, limites típicos hipotéticos de uma cidade que não possua exageradas variações do clima, ou seja, menos abrangentes em seus limites mínimo e máximo. Justifica-se: do contrário poucos sensores de baixo custo atenderiam os requisitos de gama de operação (quicá nenhum), dada a ampla gama recomendada (-35°C a 45°C). Como critério suplementar a este ponto, portanto, optou-se por descartar os sensores climáticos que não se enquadrassem em pelo menos um dos limites recomendados ou que não atendessem aos critérios de resolução recomendados pela Organização Mundial de Meteorologia (consultar Tabela 4-3).

Com relação aos sensores de qualidade do ar, aqueles que não fossem, nominalmente, sensíveis pelo menos aos limites máximos dos valores expostos na referida Tabela 2-2 também foram desconsiderados. Ressalta-se aqui o primeiro aspecto relacionado aos sensores de baixo custo: a sensibilidade nominal. Muitos sensores nominalmente não atendiam integralmente aos valores recomendados pelas instituições competentes para proteção da saúde e aferição da qualidade do ar.

Deste modo, após a primeira aplicação dos critérios, foram desconsiderados os seguintes sensores: o sensor DHT11 foi excluído dos sensores climáticos por possuir sua gama de operação restrita; os sensores CO2-D1 (CO₂), MQ307-A (CO), MQ-2 (CO) e MQ-131 (O₃) foram excluídos da lista dos sensores de gases por não atenderem pelo menos um dos limites de interesse estipulados.

4.1.2 Avaliação de custo

O segundo ponto considerado é a avaliação do custo dos sensores. Este critério traz consigo uma questão pertinente: a interpretação do termo “baixo custo” comumente utilizado. Em termos gerais, pode-se estipular como “custo” o impacto que a aquisição de algo tem no orçamento total. Deste modo, “baixo custo” seria algo que acarretaria um pequeno, ou nenhum, impacto significativo no orçamento

de um indivíduo ou instituição. No entanto, dada a diversidade de usuários e entusiastas envolvidos nestas iniciativas, não há um lastro para comparação relativa do custo e, portanto, é preciso remodelar este conceito para “baixo custo relativo”. A comparação de custo então foi feita entre os sensores do mesmo tipo que foram encontrados na triagem inicial, e receberam a ponderação positiva de “baixo custo” aqueles sensores incluídos no conjunto dos 50% mais baratos, com preços obtidos dos sites de referência para cada grandeza monitorada. Os sensores que se enquadrassem na faixa de preço superior (os mais caros) não são descartados, pois considera-se que o preço não é, por si só, um fator excludente, mas sim um fator que dificulta a sua utilização por indivíduos, e que não leva em conta seu desempenho e uma eventual análise de custo-benefício. Dos sensores climáticos, os modelos DS18B20, DHT22, BMP180, TMP102, BME280, BMP180 e MPL3115A2 receberam sinalização positiva por apresentarem custo relativo menor que seus semelhantes. Dos sensores de qualidade do ar, os sensores que receberam a sinalização positiva no critério foram: MiCS-VZ-86F, MiCS-VZ-87, MG-811, MQ-7, MiCS-4514, MiCS-2714, ME3-NO2, MiCS-2614, ME3-03.

4.1.3 “Popularidade” do sensor

A avaliação da “popularidade” de cada sensor foi concebida com o objetivo de se perceber quais sensores estão sendo mais utilizados pela comunidade, ou quais sensores são extremamente específicos e pouco utilizados sob as perspectivas de *crowdsensing*, de modo que ao final se incluam sensores mais relevantes aos usuários em detrimento a sensores mais específicos e restritos (frisa-se que este critério também possui uma vulnerabilidade temporal, tendo em vista que há enorme dinâmica nos resultados de busca do Google em razão de uma série de fatores – inclusive do mercado em si – de tal modo que os dados aqui relatados referem-se ao final do primeiro semestre de 2016). Tentando, portanto, quantificar de maneira objetiva o quanto um dispositivo é “popular”, cada um dos modelos disponíveis para triagem foi pesquisado na ferramenta de busca do Google, e teve como parâmetro comparativo o meta-dado “*totalResults*”. Para cada tipo de sensor (temperatura, humidade, etc.), o número adotado como referência aos demais é o maior, ou seja, o sensor que tiver a maior quantidade de resultados serve de guia para os sensores daquela grandeza. Os outros, portanto, recebem um escore relativo obtido pela comparação do seu número de resultados no meta-dado com aquele que for o maior. Por exemplo: para os sensores de temperatura, o sensor com mais resultados foi o DS18B20, com mais de 400 mil resultados, e o segundo com mais resultados foi o DHT22, com 373 mil resultados. Logo, o DS18B20

recebeu o escore máximo na ponderação positiva do critério, e o DHT22 recebeu um escore diretamente proporcional à sua quantidade de resultados (0.93, neste caso). Os outros sensores com mais resultados foram: DHT22 (humidade), BMP180 (pressão), MG-811 (CO₂), CO-B4 (CO), 4-NO2-20 (NO₂) e O3-B4 (O₃). Pensando em evitar alguma tendência (viés) com relação aos sensores mais antigos e que, porventura, estivessem a mais tempo disponíveis no mercado e conseqüentemente teriam mais resultados, a mesma busca foi repetida de modo que exibissem resultados apenas dentro de um limite temporal dos últimos 12 meses. Nos sensores climáticos não foram observadas alterações significativas. Porém, na busca dos sensores de qualidade do ar ocorreu de um sensor diferente receber escore máximo na busca com limitação de tempo. A nova lista dos sensores com mais resultados para a qualidade do ar é: MG-811 (CO₂), MQ-7 (CO), 4-NO2-20 (NO₂), O3-B4 (O₃). Ocorreram algumas mudanças nas posições relativas também (e.g. o MH-Z16 fora o segundo colocado na busca geral de CO₂, mas com restrição de tempo perdeu o posto para o MiCS-VZ-86F), o que sugere que há uma constante atualização no mercado de sensores de baixo custo para qualidade do ar.

4.1.4 Precisão nominal

O quarto critério para a seleção dos sensores diz respeito à precisão nominal. A Organização Mundial de Meteorologia recomenda em seu guia o cumprimento da “incerteza de medição” para uma medição meteorológica adequada (ver Tabela 4-4). Contudo, observou-se que os fabricantes não informavam as incertezas, e sim precisão nominal que, na realidade, é – no máximo – o dobro da incerteza da medição. Desta maneira, em um ambiente profissional, a precisão real do instrumento deve estar incluída nos limites definidos pela sua resolução (numericamente menor) e pela precisão estimada a partir da incerteza requerida (numericamente maior). Tendo em vista a natureza dos sensores avaliados – justamente para investigar seu potencial em circunstâncias que outros sensores, “profissionais”, são usados – este critério não foi considerado como exclusivo. Ademais, em se falando de sensores de temperatura e pressão, poucos possuíam precisão melhor (menor numericamente) que a estipulada na Tabela 4-4. Com relação aos sensores de humidade, todos se encaixaram na exigência. Este critério não foi aplicado aos sensores de gases pela falta da informação dos fabricantes.

Tabela 4-4. Incerteza de medição de acordo com Organização Mundial de Meteorologia e precisão estimada a partir destes valores (WMO, 2008).

Grandeza	Incerteza de medição máxima (σ)	Erro máximo (2σ)
Temperatura	0.2 °C	0.4 °C
Humidade relativa do ar	3 %	6 %
Pressão atmosférica	0.3 hPa	0.6 hPa

4.1.5 Usabilidade

O último ponto a ser avaliado para a escolha de quais sensores deveriam ser analisados trata de uma característica que leva em consideração a interação com o usuário, ou seja, a facilidade de uso. A ideia é priorizar sensores de fácil utilização, com bibliotecas de comunicação (software) prontas, intentando a potencial utilização destes sensores por indivíduos não especialistas que, naturalmente, não utilizariam sensores complexos demais em suas iniciativas não-profissionais, individuais ou coletivas. Adicionalmente, considerando um apelo de custo efetivo, sensores multivariáveis receberam uma ponderação positiva neste ponto (e.g. sensor de temperatura, humidade e pressão em simultâneo são considerados três sensores pelo preço de um). Entretanto, a sensibilidade múltipla vem a ser um problema em se tratando dos sensores a gases, que não conseguem distinguir a excitação dentre os poluentes, pois o elemento sensitivo é o mesmo para os gases monitorados nominalmente (vide sensores marcados com asterisco ‘*’ na Tabela 4-2). Por estas razões, prioriza-se os sensores com mais facilidade de ligação eletrónica e que sejam “mono-gases”. Este último requisito justifica-se pela simples razão de tentar se evitar ao máximo o fenómeno conhecido por interferência cruzada. Da lista exposta, a interferência cruzada é um fenómeno esperado nos sensores MiCS-VZ-86F e MiCS-4514 que, por terem alta sensibilidade cruzada, não distinguem o gás excitante.

4.1.6 Definição da lista final de sensores

Por conseguinte, após analisar os critérios supracitados para cada sensor, bem como para cada conjunto de sensores de mesma grandeza e, ainda, as questões logísticas para a aquisição dos sensores (local da compra, tempo de entrega, *etc.*), chegou-se à lista definitiva de sensores alvo deste estudo. Foram adicionalmente eliminados em razão do baixo desempenho nos critérios os sensores climáticos

TMP102 (temperatura), BMP280 (pressão) e SHT71 (temperatura e humidade), e os sensores de qualidade do ar: T6713 e IR11BD, de dióxido de carbono; CO-B4 de monóxido de carbono; ME3-NO2, 4-NO2-20 e NO2-B4F de dióxido de azoto; O3-B4 de ozono.

A Tabela 4-5 sumariza os sensores escolhidos para o monitoramento climático, as grandezas monitoráveis, e a respetiva faixa de preço de cada sensor. De cada sensor ali elencado foram adquiridas três unidades.

Tabela 4-5. Sensores climáticos adquiridos para experimento (T – Temperatura; H – Humidade; P – Pressão Atmosférica).

Sensor	Grandeza:			Preço médio ³⁰
	T	H	P	
DS18B20	✓	-	-	€ 3
AM2302	✓	✓	-	€ 8
HTU21D	✓	✓	-	€ 15
MPL3315A2	✓	-	✓	€ 12
BMP180	✓	-	✓	€ 9
BME280	✓	✓	✓	€ 20

Especificamente em relação aos sensores de qualidade do ar, alguns fortuitos influenciaram na redução imprevista da lista de gases monitoráveis e respetivos sensores. Julga-se que a razão maioritária foi a de se tratar de um mercado restrito, ainda emergente e, portanto, com disponibilidade limitada de produtos. Justificando, a lista final apresentava-se mais numerosa e contemplava todos os agentes poluentes elencados previamente na seção 2.1.2. Entretanto, após a etapa de compra ter início, alguns sensores encontravam-se indisponíveis nos principais fornecedores ou com custos de postagem elevadíssimos (em *websites* de pequenos fornecedores; como a aquisição dos dispositivos foi realizada de maneira institucional, havia a impossibilidade de se comprar sem facturamento). A exemplo de sensores que não foram possíveis de serem adquiridos, estão listados os seguintes: MICS-4514 e MICS-2714 para dióxido de azoto (indisponível nos revendedores confiáveis e elevados custos de postagem em vendedores alternativos); MICS-VZ-87 para CO2 (indisponível); ME3-O3 para ozono (indisponível nos vendedores confiáveis). Deste modo, a Tabela 4-6 contempla os sensores que foram encontrados

³⁰ Preço médio, convertido para euros, conforme observado no segundo semestre de 2016 nos principais revendedores de componentes eletrônicos para o segmento de desenvolvimento em sistemas microprocessados.

disponíveis para o monitoramento da qualidade do ar. Para estes sensores, pelo menos duas unidades de cada foram adquiridas.

Tabela 4-6. Sensores de qualidade do ar disponíveis para aquisição no segundo semestre de 2016.

Sensor	Gás	Preço médio
MQ-7	CO	€ 6
MQ-9		€ 10
MG-811	CO2	€ 50
MH-Z16		€ 60
MICS - 2614	O3	€ 8

Os sensores, em sua maioria, foram adquiridos dos seguintes revendedores: “*Mouse*”, “*SparkFun*” e “*SandBox Electronics*”. O custo total, considerando os custos de envio para Portugal, excedeu o patamar de 500 Euros. O envio das partes tomou entre duas semanas e um mês após a compra, durante o segundo semestre do ano de 2016. A Figura 4-2 ilustra uma unidade de cada sensor climático na seguinte ordem: DS18B20, AM2302 (DHT22), HTU21D, BMP180, BME280 e MPL3115A2. Note-se que, com exceção dos dois primeiros, os sensores apresentam-se em uma placa de interface pronta, apta para ligação ao dispositivo de aquisição (mais detalhes na seção seguinte). A Figura 4-3, por sua vez, exibe os sensores adquiridos para a investigação da qualidade dos dados para gases e poluentes do ar. Estão dispostos na seguinte ordem: MG811, MH-Z16, MQ7, MQ9, MICS-2614. Estes sensores também foram adquiridos tal qual estão sendo utilizados nas iniciativas participativas: com placa de interface pronta, de modo a se reduzir a complexidade final para a ligação do sensor.

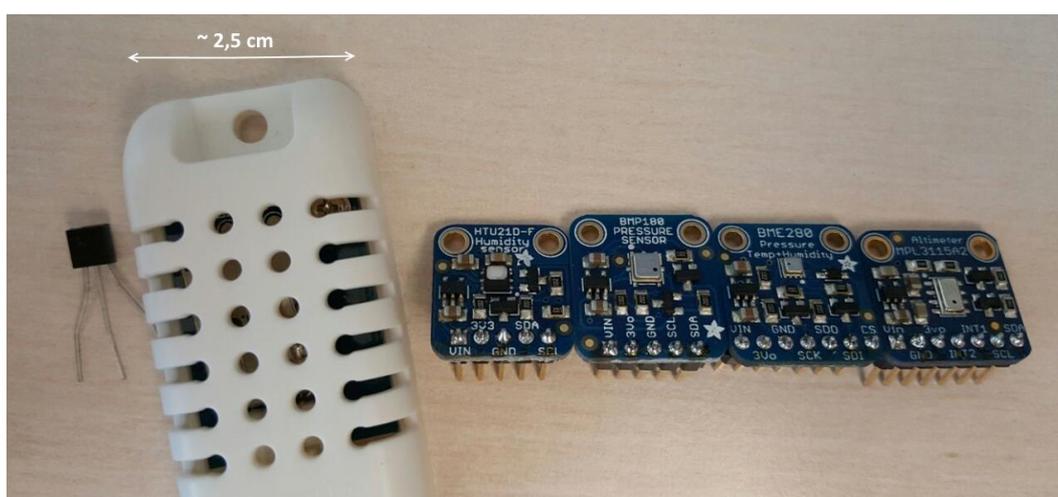


Figura 4-2. Sensores climáticos adquiridos para a investigação sobre a qualidade dos dados. Da esquerda para a direita: DS18B20, AM2302 (DHT22), HTU21D, BMP180, BME280 e MPL3115A2.

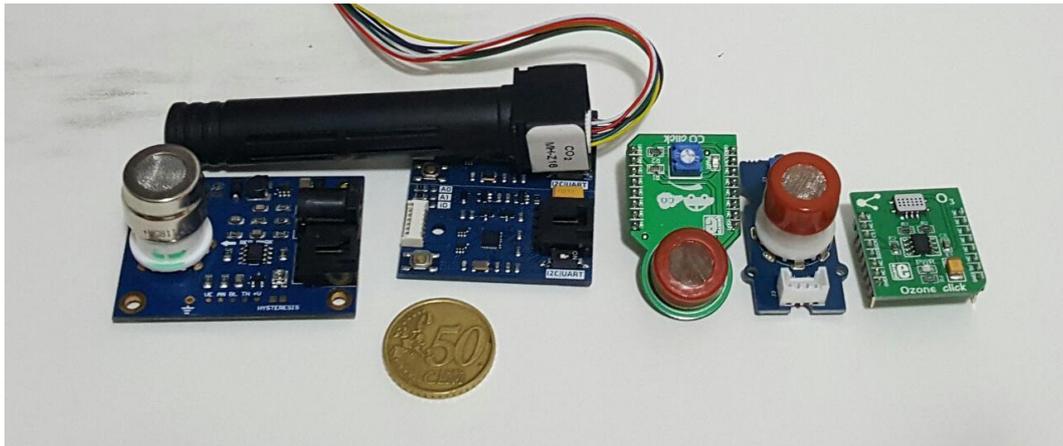


Figura 4-3. Sensores de qualidade do ar para investigação sobre a qualidade dos dados. Da esquerda para a direita: MG811, MH-Z16, MQ7, MQ9 e MiCS-2614.

4.2 Pormenores técnicos e de interface

Os sensores, conforme prevê a teoria da instrumentação eletrónica, são dispositivos capazes de converter uma grandeza física, ou um fenómeno, em sinais elétricos que possam ser interpretados e processados. Estes sinais, por sua vez, diferem enquanto sua natureza: podem ser analógicos ou digitais. Usualmente, um sensor cuja saída é um sinal analógico requer uma conversão por parte do usuário, de tal modo que se converta um patamar de tensão ou corrente elétrica na grandeza de interesse através de uma função de transferência dada pelo fabricante ou obtida por ensaios de calibração ou aferição. Ao oposto, os sensores digitais entregam em sua saída palavras binárias, de onde é possível já encontrar a grandeza de interesse por uma simples aplicação de um protocolo de comunicação (e.g. *I²C*, *SPI*, *1-wire*, etc.).

Com isto em mente, percebeu-se que seria preciso utilizar um dispositivo que fosse capaz de lidar com a heterogeneidade das interfaces dos sensores adquiridos (apresentados pelas Figuras 4-1 e 4-2), porquanto estes diferem entre si tanto em natureza quanto em protocolo utilizado (no caso dos digitais). Dentre as diversas opções de plataformas microprocessadas de código aberto, o *Arduino* mostrou-se a mais viável em razão dos seguintes motivos: suporte colaborativo; bibliotecas para os sensores fornecidas pelos próprios fabricantes; baixo custo (e consequente facilidade de reposição); portabilidade; fácil programação; capacidade de interface e disponibilidade de acessórios. No entanto, por ser um dispositivo com poder de processamento limitado, é preferível que qualquer processamento mais rebuscado seja executado após recolha, exigindo, portanto, um módulo de armazenamento de dados durante o processo

de aquisição de dados. Ainda, dadas as disponibilidades de *shields* (módulos de hardware capazes de agregar funcionalidades adicionais ao dispositivo) no mercado, optou-se por utilizar o *Arduino UNO* (Figura 4-4) em detrimento dos demais modelos.



Figura 4-4. Artefacto de hardware utilizado para recolha dos dados. (Fonte: Arduino.cc)

Este artefacto de hardware possui 14 portas digitais configuráveis para entrada ou saída (algumas reservadas para o sistema), 6 entradas analógicas, barramento I²C e SPI, capacidade de fornecimento de corrente em um total de 200 mA (onde há um máximo de 50mA por pino de E/S), barramento de tensão regulada de 5 V ou 3.3 V, memória flash de 32 KB (suficiente para a maioria das aplicações de baixo nível de abstração) e processador de 16 MHz. Suas características físicas lhe conferem o status de “portátil” por possuir aproximadamente 7x5 cm e pesar 25 gramas. Seu microcontrolador é capaz de suportar temperaturas entre -40°C e 85°C. Em acréscimo, utilizou-se um módulo de cartão SD para o armazenamento das leituras dos periféricos ao longo dos ensaios. O cartão utilizado é do tipo SHDC, de marca SanDisk, e suporta temperaturas de até 125°C.

Em relação aos sensores climáticos, a seguir é apresentado um breve resumo acerca de seus pormenores técnicos e de interface:

- **DS18B20:** fabricado pela *Maxim*, é um termômetro baseado no efeito de banda de energia em semicondutores (*bandgap*). Utiliza o protocolo *OneWire* (digital) como comunicação e requer apenas alimentação em 5 Volts, *ground* e um resistor *pull-over* entre o canal de saída (ligado a uma porta digital do *Arduino*) e a alimentação.
- **AM2302:** é a versão do DHT22 com interface pronta para uso (conhecido como “*wired*”). Possui um termômetro e higrômetro embutidos, cujo sinal é fornecido em um único canal

OneWire, que é ligado a uma porta digital do *Arduino*. É, alegadamente, calibrado de fábrica. Seus elementos sensitivos são um termistor e um higrômetro capacitivo hidrofílico. Este sensor é fabricado pela Aosong, empresa chinesa e vem sendo amplamente utilizado junto aos *kit's* para entusiastas iniciantes do *Arduino*.

- **HTU21D**: sensor digital OEM fabricado pela MEAS (*Measurement Specialities*), utiliza o protocolo I²C para comunicação. No *Arduino Uno*, este barramento localiza-se nos pinos analógicos A4 (SDA, canal de dados) e A5 (SCL, canal de sincronização; *clock*). A versão adquirida para o estudo é montada e distribuída pela *SparkFun*, e requer ligação em quatro pinos: Vcc (neste caso, também há o suporte a 3.3V), GND, SDA e SCL.
- **BMP180**: sensor integrado de temperatura e pressão barométrica que utiliza a tecnologia MEMS (abreviação de “*micro electro-mechanical system*”; ou, em tradução livre, “sistemas micro-eletromecânicos”) fabricado pela companhia alemã Bosch, em seu segmento de eletrônicos. Também é alegadamente calibrado de fábrica, e utiliza a tecnologia I²C. Seu termômetro utiliza o efeito *bandgap* enquanto que o barômetro utiliza um elemento piezoresistivo anexado a uma câmara que se deforma em função da pressão externa. Possui 5 pinos utilizáveis: Vin (5V), 3V3 (3.3 V; utiliza-se este ou o Vin), GND, SDA e SCL.
- **BME280**: também da alemã Bosch, é uma versão posterior ao BMP180 incluindo também um sensor de humidade relativa do ar e suporte ao protocolo SPI (do inglês “*Serial Peripheral Interface*”), o que acrescenta um pino a mais em sua placa.
- **MPL3115A2**: sensor altímetro de alta precisão e baixo custo desenvolvido pela NXP. Possui, assim como BMP180, temperatura e pressão embutidos com elementos sensitivos idênticos. Também é alegadamente calibrado de fábrica, e funciona pelo canal I²C. Adicionalmente, fornece dois pinos para gerenciamento de interrupções em função da pressão. Portanto, seus pinos úteis a este trabalho se assemelham aos demais *chips*: Vcc, GND, SDA e SCL.

Em complemento a estas informações, convém mencionar que os chips que funcionam com a tecnologia I²C utilizam um endereço lógico para serem identificados no barramento, razão pela qual é possível realizar a ligação de múltiplos sensores I²C em uma única porta (de maneira similar a um número de telefone, cuja mensagem contém em seu cabeçalho o código referente ao destinatário). Entretanto, como os sensores não permitem a configuração ou reprogramação de seu endereço pelo usuário, não há a possibilidade de ligação de mais de um sensor idêntico ao mesmo pino, sob pena de,

caso venha a ser realizada, ocasionar conflito nos dados e tornar as leituras ilegíveis. A única exceção é o sensor BME280, cujo endereço lógico é o mesmo do BMP180 e, prevendo isto, o fabricante acrescentou a reconfiguração do endereço do BME280 através da ligação do pino SDO em nível alto (5V) ou baixo (GND). Este recurso foi utilizado no experimento para evitar conflito entre os sensores durante a ligação do conjunto, após a observação da interferência em testes preliminares. Outra adenda conveniente diz respeito à alimentação dos sensores: por se tratar de dispositivos de consumo de energia extremamente baixo, não houve a necessidade de uma alimentação de suporte, pelo que foi possível por tudo a funcionar utilizando o próprio barramento de alimentação do *Arduino* que, por sua vez, utiliza uma fonte de alimentação externa ligada à rede elétrica. A Tabela 4-7 sumariza os parâmetros de desempenho nominal, fornecidos pelos respectivos fabricantes. A única ressalva a ser feita diz respeito à precisão nominal do barômetro MPL3115A2, que apresenta este valor apenas para variações de pressão sob temperatura constante.

Tabela 4-7. Desempenho nominal dos sensores constituintes do universo de análise.

Sensor	Faixa de operação	Resolução	Exatidão nominal	Protocolo
DS18B20	-55 a 125 °C	< 0.1 °C	± 0.5°C (de -10°C a +125°C)	<i>OneWire</i>
AM2302	-40 a 80 °C (T) 0 a 100 % (H)	0.1 °C 0.1 %	± 0.5°C ± 2%	<i>OneWire</i>
HTU21D	-40 a 125°C (T) 0 a 100 % (H)	< 0.1 °C < 0.1 %	± 0.3°C ± 2%	<i>I²C</i>
BMP180	-40 a 85 °C (T) 300 a 1100 hPa (P)	0.1 °C 0.01 hPa	± 0.5°C ± 0.12 hPa (950 a 1050 hPa @ 23°C)	<i>I²C</i>
BME280	-40 a 85 °C (T) 0 a 100 % (H) 300 a 1100 hPa (P)	0.1 °C 0.1 °C 0.01 hPa	± 0.5°C ± 3% ± 0.12 hPa (950 a 1050 hPa @ 23°C)	<i>I²C</i>
MPL3115A2	-40 a 85 °C (T) 500 a 1100 hPa (P)	0.1 °C 0.015 hPa	± 1°C ± 0.5 hPa (700 a 1100 hPa @ 25°C)	<i>I²C</i>

Antes de escrutinar os sensores de gases escolhidos, é necessário recordar sua natureza. Os sensores de gases atuam através de reações químicas, monitorando parâmetros elétricos que se alteram de acordo com essas reações. Podem ser dispostos em três principais categorias: óxido metálico, eletroquímico e ótico (além destas, ainda é possível encontrar sensores catalíticos e acústicos, contudo, em volume de mercado significativamente menor).

Cada categoria apresenta vantagens e desvantagens conforme a aplicação. Em resumo:

- **Óxido metálico:** são mais baratos, possuem uma alta interferência cruzada (que produz falsos positivos), alta sensibilidade, baixa linearidade, e elevado tempo de inicialização, pois

é preciso submeter os elementos sensíveis a uma galvanização antes de ter sua resposta de maneira adequada (este processo pode levar até 48 horas) o que, conseqüentemente, causa um elevado consumo de energia. Ainda, por se tratar de reações específicas, precisam de compensação de temperatura, uma vez que esta tem influência na reação ocorrida nos terminais sensíveis.

- **Eletroquímico:** grande variação de custo, mas ainda são mais caros que os sensores de óxido metálico, geralmente. Também apresentam uma alta interferência cruzada a outros gases (menor seletividade), uma boa linearidade e baixo tempo de inicialização, pois a reação química no fluido sensível ocorre poucos segundos após a inicialização. Apresentam um consumo de energia elétrica baixo.
- **Ótico:** alguns modelos (a depender do gás monitorado) chegam a custar centenas de dólares, sendo o tipo de sensor cujo preço médio é mais elevado. Possui baixa interferência cruzada, pois trabalha com a monitoração de um comprimento de onda específico relativo ao gás monitorado. Apresenta boa linearidade e tempo de inicialização baixo (poucos segundos). Apresentam consumo de energia moderado (menor que os sensores de óxido, porém consideravelmente maior que os sensores eletroquímicos).

A Figura 4-5 exibe uma ilustração acerca das eventuais faixas de aplicação dos sensores em função da tecnologia de sensoriamento empregada, bem como a região típica de algumas aplicações conhecidas apenas com o intuito de parametrizar a comparação.

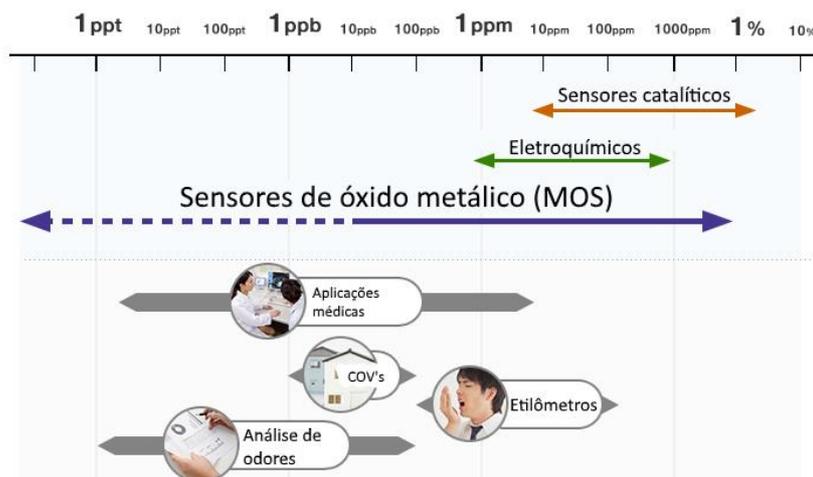


Figura 4-5. Área de operação de diferentes tipos de sensores de gases. (Adaptado de Figaro Japan Co.³¹).

³¹ Informação disponível em: <http://www.figaro.co.jp/en/technicalinfo/semiconductor.html> (acesso em julho de 2017)

Em complemento, algumas características são expostas de maneira qualitativa na Tabela 4-6, comparando as três tecnologias mencionadas para esta investigação (óxido metálico, eletroquímico e óptico). No entanto, os sensores adquiridos para este trabalho são, em sua maioria, sensores de óxido metálico semicondutor (MQ7, MQ9, MG811, MiCS-2614). Apenas um tipo é ótico (MH-Z16), que utiliza a tecnologia NDIR: uma abreviação para “infravermelho não dispersivo” (tradução de “*Non Dispersive Infra Red*”), que é uma espécie de “laser” no comprimento de onda não visível. Por sua vez, os sensores eletroquímicos disponíveis na faixa de preço conveniente ao limite orçamental deste trabalho não apresentavam sensibilidade nominal capaz de monitorar os patamares específicos, conforme ilustrado na Tabela 2-2, e explicou-se na seção 3.1, o que deteriorou a análise de custo-benefício e levou à decisão de optar por não os comprar.

Tabela 4-8. Sumarização das características dos sensores de gás quanto à sua tecnologia. (Com adaptação de informações contidas em Ozone Solutions³² e O.I. Analytical³³)

Parâmetro	Óxido Metálico	Eletroquímico	Ótico (infravermelho)
Aplicações de baixa precisão	<i>Útil</i>	<i>Útil</i>	<i>Muito útil</i>
Aplicações de alta precisão	<i>Útil</i>	<i>Útil</i>	<i>Muito útil</i>
Interferência de temperatura	<i>Média</i>	<i>Alta</i>	<i>Média</i>
Interferência de humidade	<i>Média</i>	<i>Alta</i>	<i>Média</i>
Vida útil	<i>Longa</i>	<i>Baixa</i>	<i>Muito longa</i>
Interferência cruzada	<i>Alta</i>	<i>Alta</i>	<i>Muito baixa</i>
Frequência de calibração	<i>Baixa</i>	<i>Alta</i>	<i>Muito baixa</i>
Tempo para inicialização	<i>Muito alto</i>	<i>Baixo</i>	<i>Muito baixo</i>
Linearidade	<i>Muito baixa</i>	<i>Alta</i>	<i>Muito alta</i>

³² Informação disponível em: <http://www.ozonesolutions.com/info/hmos-vs-electrochemical> (acesso em julho de 2017).

³³ Informação disponível em: http://global-controls.net/home/pdfs/OI_Analytical/SAM-MAX_Gas_Detection_Technologies.pdf (acesso em julho de 2017)

Com as devidas informações apresentadas, bem como uma adequada apropriação dos termos acerca das características de cada sensor, a seguir há uma breve explanação adicional dos pormenores técnicos e de interface de cada um dos sensores de gás adquiridos para o experimento.

- **MQ7:** Sensor de óxido metálico semiconductor para monóxido de carbono. Apresenta interface analógica e prevê um processamento não-trivial para converter sua saída, dada em volts, em concentrações de poluente (ppm ou $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Como o processo de reprodutibilidade na fabricação deste tipo de material é algo difícil de se atingir, não seria exagero dizer que cada sensor desta natureza responde de maneira diferente, razão pela qual se faz necessária uma análise individualizada.

Este sensor, em função da tecnologia empregada, requer um tempo de “*burn-in*” de até 48 horas para produzir suas leituras de maneira apropriada. Após este processo (que deve ser realizado pelo menos uma vez), sempre que o sensor for ligado, pode levar de 2 a 6 horas para estabilização das suas leituras. Portanto, não é um sensor utilizável em medidas instantâneas ou rápidas. Por apresentar um consumo elevado de energia, pode ser necessário utilizar alimentação de suporte para ligar mais de um elemento ao *Arduino*.

Utiliza 3 pinos de interface: Vcc, GND e sinal. O sensor adquirido para este experimento (consultar Figura 4-2) apresenta-se em uma placa de interface onde é possível alimentá-lo também em 3.3V.

- **MQ9:** Sensor do mesmo fabricante do MQ7, e com as mesmas características. Por apresentar folha de dados (*datasheet*) com data posterior ao MQ7, sugere-se que seja uma melhoria em termos de resolução. Todas as ressalvas dadas ao MQ7 são válidas para o MQ9, com exceção da placa de interface. Esta, por sua vez, apresenta uma disposição diferente, com interface para cabos analógicos de 4 pinos (*buckled cable*).
- **MG811:** Sensor de óxido metálico semiconductor sensível ao dióxido de carbono. Em razão de sua não-linearidade, típica da tecnologia empregada, apresenta sua saída analógica, em tensão (volts), exigindo uma conversão posterior para a unidade de ppm (ou mg/m^3). Por apresentar elevado consumo de energia, apresenta-se em uma placa de interface com alimentação em separado e os seguintes pinos: Vcc (utilizado para referência do amplificador de saída), GND, D_{out} (alarme, configurável por potenciômetro) e V_{out} (sinal de saída). O fabricante alerta para a elevada temperatura que o sensor pode atingir (podendo atingir

temperaturas acima de 50°C durante o funcionamento, em uma temperatura ambiente de 25°C).

- **MH-Z16:** Sensor de infravermelho não dispersivo com microprocessador embutido. Possui um emissor IR e um detetor semiconductor sensível a um comprimento de onda específico, que é atenuado na presença do dióxido de carbono. Sua saída é linear, e seu microprocessador fornece a saída, digital (I²C), com os patamares já em ppm. Ainda é capaz de se recalibrar automaticamente a cada 48 horas³⁴, aumentando sua vida útil e reduzindo os efeitos de desvio de leitura (*drift*). Apesar de ter sido relativamente mais caro que os demais sensores, quando comparado a outros sensores referência de CO₂ que utilizam a mesma tecnologia, o MH-Z16 chega a custar até 10 vezes menos. Por apresentar um consumo de energia elétrica mediano (sobretudo em razão do emissor IR e do microprocessador), recomenda-se a utilização de apenas um sensor por placa *Arduino*, caso se utilize a alimentação embarcada.
- **MiCS-2614:** Sensor de óxido metálico semiconductor construído sob tecnologia *MEMS*, que permite reduzir o tamanho de estruturas a escalas cada vez menores. Trata-se de um diafragma com um elemento resistivo aquecido que reage à presença do ozono. A miniaturização também consegue reduzir o consumo de energia: o consumo nominal máximo deste sensor é menor que 100mW, ao passo que os demais sensores dissipam pelo menos o dobro disto. O sensor adquirido apresenta-se em uma placa de interface que permite a comunicação SPI.

As sub-subsecções seguintes dedicam-se a ilustrar os diagramas de ligações elétricas destes dispositivos ao *Arduino*.

4.2.1 Diagrama elétrico dos sensores climáticos

As ligações elétricas demonstradas são estritamente idênticas às recomendadas pelos próprios fabricantes dos sensores, com informações e eventuais adaptações contidas nas respectivas folhas de

³⁴ Funcionalidade útil apenas caso o sensor fique exposto ao ar exterior continuamente. Para desligar esta funcionalidade (e.g. caso o sensor esteja em ambiente interior) basta forçar uma reinicialização, via comando I²C, a cada 24 horas.

dados, bem como as instruções da empresa que montou a placa de interface. Caso haja a necessidade de alguma alteração durante a execução, esta será explicada na seção da execução experimental.

As Figuras 4-6 e 4-7 contemplam os sensores DS18B20 e AM2302, que utilizam o protocolo OneWire. Assim, como referido anteriormente, este protocolo digital requer um resistor entre a linha de alimentação e a linha de sinal. Especificamente com relação ao AM2302, este resistor já vem embarcado de fábrica e é suficiente conectar os terminais disponíveis às entradas tipificadas.

As Figuras 4-8, 4-9, 4-10 e 4-11 ilustram os sensores que utilizam o protocolo I²C, correspondendo, respectivamente, aos diagramas dos sensores BMP180, BME280, HTU21D e MPL3115A2. A Figura 4-8 já apresenta a alteração necessária para se alterar o endereço lógico I²C do sensor BME280 (ligação do pino SDO à terra), necessário para liga-lo junto de outro sensor da Bosch Sensortech (mesmo barramento I²C).

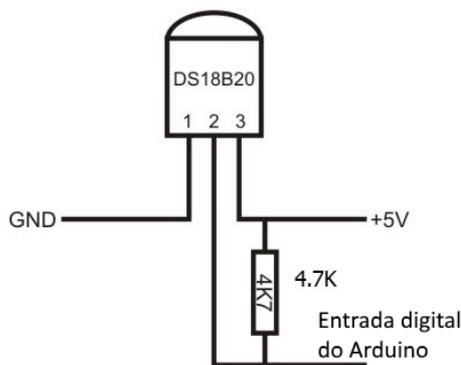


Figura 4-6. Esquema de conexão do sensor DS18B20.

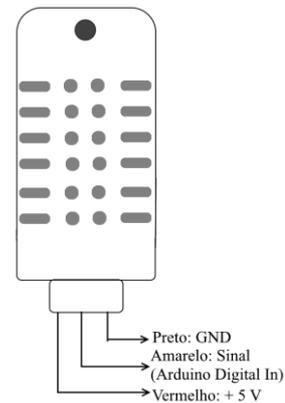


Figura 4-7. Esquema de conexão do sensor AM2302 (com DHT22 interno).

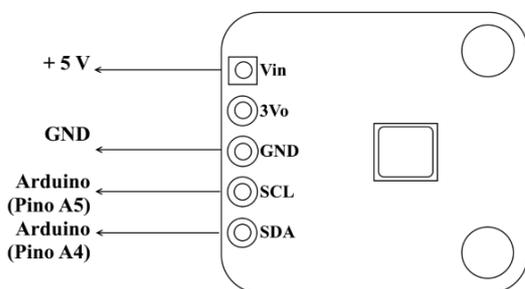


Figura 4-8. Diagrama elétrico do sensor BMP180.

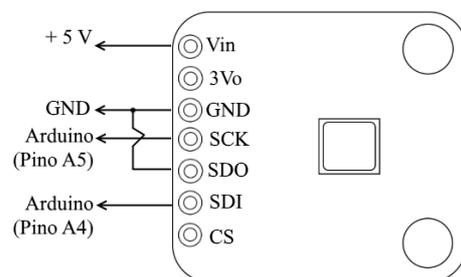


Figura 4-9. Diagrama elétrico do sensor BME280, com alteração de endereço lógico.

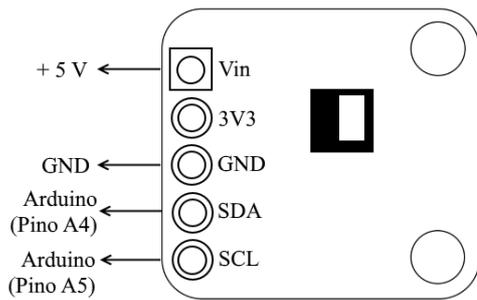


Figura 4-10. Diagrama de conexão do sensor HTU21D.

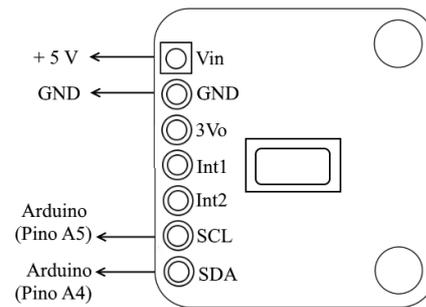


Figura 4-11. Diagrama de conexão do sensor MPL3115A2.

É conveniente realçar que os terminais que não possuem especificações de ligação nos diagramas apresentados são, de facto, inutilizados durante a ligação no modo apresentado. Muitos deles têm o propósito de funcionalidades adicionais que não são relevantes ao estudo, ou referem-se a outros modos de utilização, como, por exemplo, ligar um sensor em modo SPI.

4.2.2 Diagrama elétrico dos sensores de qualidade do ar

Em razão dos sensores de qualidade do ar terem sido adquiridos em diferentes sítios, seus diagramas diferem entre si consideravelmente. Entretanto, não há nenhuma complexidade na ligação, uma vez que utilizam – em sua maioria – interfaces analógicas. Na sequência, as Figuras 4-12, 4-13, 4-14, 4-15 e 4-16 ilustram os sensores³⁵ MQ7, MQ9, MG-811, MH-Z16 e MiCS1614.

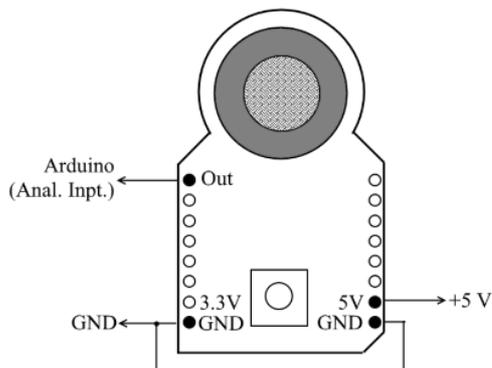


Figura 4-12. Diagrama de conexão da placa do sensor MQ7.

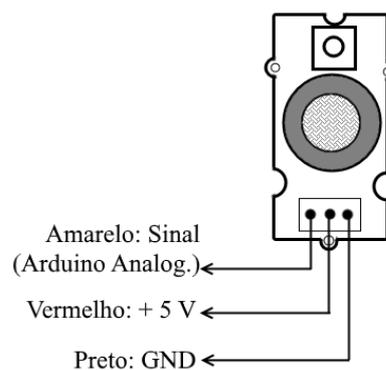


Figura 4-13. Diagrama de conexão da placa do sensor MQ9.

³⁵ A representação gráfica dos sensores foi feita pelo autor, e não se encontram em escala uniforme.

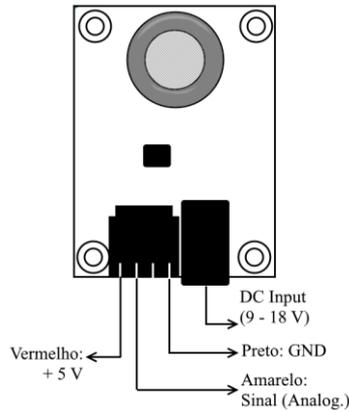


Figura 4-14. Diagrama de ligações elétricas do sensor MG-811.³⁶

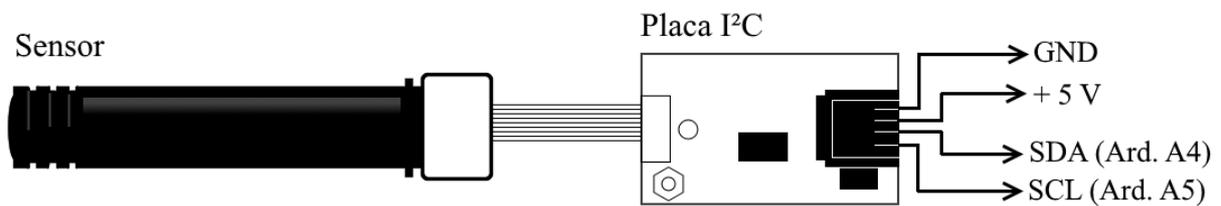


Figura 4-15. Diagrama de conexões elétricas do sensor MH-Z16. A figura apresenta seus dois segmentos: sensor e interface.

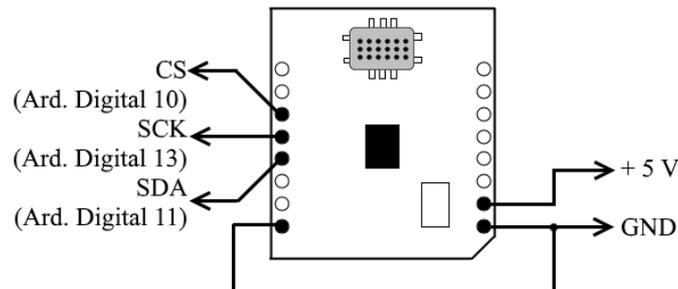


Figura 4-16. Esquema de ligações elétricas para o sensor MiCS-2614.

4.3 Planeamento prático

O planeamento prático segue a divisão das categorias dos sensores e, portanto, subdivide-se em: climático e de qualidade do ar. Todos os experimentos aqui relatados foram concebidos de tal modo que

³⁶ Note-se que este sensor exige uma alimentação externa dado seu elevado consumo de energia.

fosse possível extrair a maior quantidade possível de informações dos sensores – em face aos recursos disponíveis – e que a análise fosse capaz de evidenciar conclusões acerca da qualidade das medições geradas por estes elementos. A descrição detalhada destes roteiros, climáticos e de qualidade do ar, encontra-se nas subseções 4.3.1 e 4.3.2, respectivamente. Frise-se que este planeamento foi integralmente realizado antes de se dar início à execução de qualquer experiência laboratorial.

4.3.1 Sensores climáticos

Dos sensores climáticos deseja-se obter dois tipos de informações: as relacionadas com comportamento estático, e as relacionadas com o comportamento dinâmico. O comportamento estático fornece informações acerca da estabilidade e repetibilidade dos sensores em pontos específicos de sua gama de operação, e consiste em submeter os sensores a condições em que as grandezas medidas mantenham-se constantes durante janelas de tempo específicas. O teste dinâmico, por sua vez, permite observar o comportamento dos sensores durante as variações das grandezas em função do tempo, o que é o esperado em um ambiente real. Assim, com ambas abordagens, é esperado que sejam extraídos indicativos suficientes para embasar futuras conclusões acerca da qualidade dos dados destes sensores nas diversas métricas de desempenho.

A execução dos testes foi realizada com a câmara climática com controle de alta precisão *Fitoclimate 1500 ECP45*, da companhia *Aralab* (ver Figura 4-17), que pertence ao Instituto de Ciência e Inovação para Bio-Sustentabilidade (IB-S), vinculado ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho. Este equipamento é capaz de controlar temperatura e humidade de maneira independente, à exceção das temperaturas abaixo de zero graus Celsius, onde a câmara não controla a humidade relativa. Sua gama de operação nominal é de -45°C aos 180°C , com precisão nominal de $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ para temperatura, e de 10% a 98% com precisão nominal de $\pm 2\%$ para a humidade relativa. Sem carga térmica em seu interior, a câmara é capaz de aquecer seu ambiente interior a uma taxa de 3.6°C por minuto, e arrefecer a uma taxa de 1.9°C por minuto. Sua condição inicial será igual à temperatura e à humidade relativa exterior, uma vez que naturalmente a câmara, quando desligada, atinge o equilíbrio térmico com o ambiente. Ademais, por ser programável, é possível estipular intervalos de tempo e patamares específicos das variáveis, permitindo a simulação de diferentes ambientes, desde que se respeite as especificações supracitadas.



Figura 4-17. Câmara climática idêntica à disponibilizada para a execução experimental dos sensores climáticos (Divulgação, Aralab©).

Por outro lado, a câmara não é capaz de controlar a pressão interna. Como também não se teve acesso a um equipamento que fosse capaz de tal feito, os sensores de pressão atmosférica serão avaliados pelas condições exteriores no momento das execuções experimentais.

Referente à programação da máquina, e o conseqüente roteiro de testes, estipulou-se quatro patamares de temperatura e três patamares de humidade, bem como os gradientes entre os patamares. São valores que, quando combinados, tipicamente podem ser encontrados em centros urbanos em diferentes partes do globo. São eles: -5°C , 10°C , 25°C e 40°C para temperatura; 30%, 50%, 80% para humidade relativa. Assim, foi possível atingir 10 combinações climáticas diferentes, tendo cada estágio de temperatura 3 valores diferentes de humidade relativa (reforçando que durante temperaturas negativas, a humidade não pode ser controlada, por isto 10 combinações, e não 12).

As janelas de tempo para cada patamar são estipuladas da seguinte maneira: cada patamar de temperatura e humidade dura 3 horas (exceto em temperatura negativa, a qual dura 12 horas com humidade aleatória, porquanto esta não se controla abaixo de zero graus centígrados); a duração da variação entre as temperaturas adjacentes de 45 minutos, gerando, portanto, uma variação de 0.33°C por minuto; e variação de humidade durante 30 minutos. As variações de humidade também ocorrem somente quando a temperatura estiver estável, e de um patamar a outro adjacente garantindo que haja uma variação suave e gradual. A Figura 4-18 ilustra a seqüência de estágios planejados de modo que entre uma combinação e outra apenas uma grandeza seja alterada.

A duração total deste teste é de aproximadamente 44h ininterruptas em sua fase de planeamento, ou seja, sem considerar eventuais tempos de inicialização, estabilização, desligamento da máquina ou eventuais pormenores práticos que venham a aparecer durante a etapa de execução. Estes intervalos foram definidos empiricamente tendo como base a razoabilidade e a dinâmica da câmara (de acordo com suas especificações). Portanto, caso durante a execução prática estes patamares ou tempos se mostrem insuficientes para quaisquer finalidades, ou gerem alguma incerteza acerca dos dados, o experimento pode ser repetido com a adequação dos valores de modo que o eventual fortuito seja contornado.

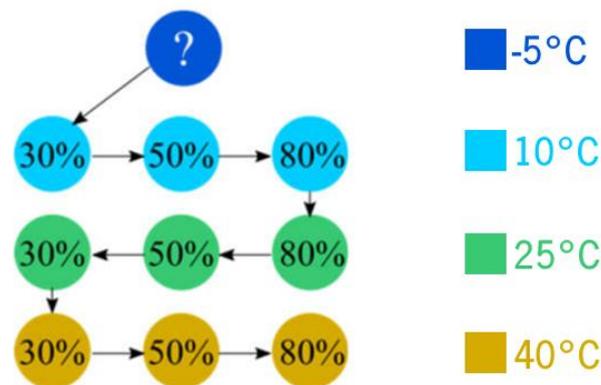


Figura 4-18. Planeamento de programação de estágios climáticos na câmara artificial. As cores correspondem à temperatura, e os textos internos aos patamares de humidade relativa.

Especificamente em relação aos sensores, cada qual será submetido pelo menos duas vezes à rotina experimental descrita (duplicata) conectado ao artefacto eletrónico, que, por sua vez, conecta um conjunto inteiro de sensores. Ou seja, um sensor de cada dos descritos previamente na Tabela 4-5 da seção 3.2, totalizando seis sensores diferentes em simultâneo. Por existirem 3 conjuntos de sensores (três unidades de cada sensor) e duas placas *Arduino Uno* disponíveis (com mais uma de reserva para o caso de alguma eventualidade negativa), o teste ocorre com combinações dois a dois dos três conjuntos. Portanto, inicialmente, planeia-se 3 utilizações da câmara climática executando o roteiro mencionado, salvaguarda da necessidade de execuções experimentais com acréscimos de tempo em razão de eventualidades observadas em uma análise prévia dos dados.

Por fim, para fins de obtenção de uma validação robusta posterior, além da própria precisão numérica da câmara se utilizará um instrumento adicional de gabarito para temperatura e humidade. O dispositivo *EL-USB-2* da companhia *Lasca Electronics* (ver Figura 4-19) apresenta precisão nominal de temperatura de 0.5°C e 2% de humidade relativa, tal qual a câmara climática.



Figura 4-19. Instrumento de referência para temperatura e humidade. (Fonte: *Lasca Electronics*)

A leitura de todos os elementos foi planeada para ocorrer a cada minuto e, ainda, há a necessidade de sincronia entre as amostras. Deste modo, com a amostragem em sincronia, evita-se tratamentos de dados adicionais que agreguem complexidades indesejáveis, como interpolação linear para corrigir assimetrias nas curvas de dados dos sensores. Em contraponto, dada a baixa dinâmica relativa da câmara (variação de $+0.33^{\circ}\text{C}$ por minuto na rotina especificada), alguns segundos de assincronia naturalmente não significam problemas e podem, eventualmente, ser irrelevantes ao processo de análise.

4.3.2 Sensores de qualidade do ar

O processo de planeamento dos sensores de qualidade do ar exige uma abordagem diferente, dado que não se teve acesso a equipamentos capazes de gerar os elementos alvo de estudo em ambientes de concentrações controladas e conhecidas. Entretanto, fazendo uso de instrumentos de referência como gabarito, é possível utilizar as variações oriundas de fenômenos naturais, rotineiros, dos gases em questão.

O monóxido de carbono possui um ciclo conhecido e previsível: por depender, dentre outras fontes, do tráfego de automóveis, espera-se maiores valores antes do horário comercial (início da manhã), valores medianos durante o almoço, e excitações esparsas ao fim da tarde e início da noite. Portanto, com um ponto de exposição correto, é possível observar alterações de concentração deste poluente em face aos horários citados, de preferência em pontos com baixa ventilação, favorecendo a concentração e acumulação do poluente durante os horários de maior concentração, além de valores próximos de zero durante horários de tráfego nulo (geralmente durante a madrugada).

O dióxido de carbono apresenta uma facilidade à investigação por ser gerado em processos biológicos e exalado pela respiração humana. Portanto, o CO_2 por estar correlacionado a ocupação humana, que faz com que diferentes concentrações possam ser obtidas durante o dia em ambientes fechados,

inclusive a “concentração de fundo”³⁷ (cerca de 400 ppm), é utilizada como um índice de qualidade do ar e/ou ventilação. Portanto, em um ambiente fechado, é possível observar variações que partem do nível de chão (após atingir o equilíbrio de CO₂ do ar exterior, seja por desocupação ou pelo sistema de ventilação) e que podem chegar a várias centenas ou milhares de ppm (ambiente fechado, com alta ocupação e baixa ventilação). Tais possibilidades facilitam a análise dos sensores sem a necessidade de um equipamento de ambiente controlado.

Para o ozônio, a lógica original se assemelha à do monóxido de carbono: há a correlação com atividade industrial e automotiva. Entretanto, por ser um poluente secundário e necessitar da incidência solar para ser catalisado, este poluente necessita de uma abordagem mais complexa em virtude de poder apresentar um deslocamento em tempo e em espaço. Em outras palavras, seus picos podem ser encontrados, no tempo, em horário oposto da maior intensidade de NO₂ (um dos poluentes que origina o ozônio ao nível do solo), e – ainda – espacialmente afastado em razão do movimento das massas de ar e de ser gerado a partir de uma reação fotoquímica não instantânea (US-EPA, 2020).

4.3.2.1 Dióxido de Carbono

A rotina experimental para o dióxido de carbono utilizará como instrumento de referência o monitor *Vaisala* de modelo *GM-70*, idêntico ao ilustrado na Figura 4-20. Trata-se de um monitor portátil para verificação *in-situ* de concentrações deste gás. Ainda é capaz de monitorar temperatura e humidade para eventual compensação, embora o fabricante estipule que esta compensação já é feita internamente. Utiliza internamente um sensor infravermelho, tecnologia idêntica à utilizada pelo sensor MH-Z16. Sua faixa de operação, com a ponta de prova adequada, é de 400 – 10 000 ppm, com precisão de 2% da escala, no caso ± 150 ppm. Como o dispositivo é desenvolvido para medições em ambientes internos, é razoável se considerar que valores em ambientes internos sem ventilação podem chegar a patamares acima de 5000ppm após algumas horas (Batog & Badura, 2013).

Uma etapa preliminar para os testes de dióxido de carbono é essencial, pois é importante observar o que se pode esperar destes dispositivos em termos de comportamento da interface de leitura, informações geradas e configuração e obtenção dos dados do instrumento de referência. O espaço físico delineado para esta observação preliminar foi o laboratório LID 3, no Departamento de Sistemas de Informação da Universidade do Minho, ao qual se tem acesso livre, dispõe dos pontos de energia

³⁷ “Concentração de fundo”, neste caso, denota o menor valor (em média temporal) em que é possível se encontrar o CO₂ na natureza. Estes sensores possuem, portanto, seu “zero” ajustados à concentração de fundo do CO₂.

necessários e está sempre alternando momentos de elevada e baixa ocupação, permitindo que se observe variações nas concentrações de CO₂. Assim, um par de cada sensor será posto, em um mesmo local, para coletar continuamente, de maneira sincronizada, com taxa de coleta de 1 amostra por minuto, os valores em simultâneo com o instrumento de referência. Adicionalmente, como o fabricante não estipula claramente a necessidade de um “*Burn-In*” dos sensores MG811, espera-se, ainda, observar alguma eventual homogeneidade no tempo de estabilização, denominado de “*Warm Up Time*”.



Figura 4-20. Instrumento de referência disponível para utilização no experimento de dióxido de carbono. (Vaisala)

Uma vez que o pré-teste ocorra sem percalços negativos, deseja-se ampliar a investigação do comportamento destes sensores em face a grandes variações de CO₂ no tempo. Foi cogitada a utilização de câmaras para cultivo de células, que utilizam CO₂ em seu ambiente interno. Entretanto, esta hipótese foi logo descartada em razão destas câmaras trabalharem com concentração constante de 5% de CO₂, o que é aproximadamente 50000 ppm, um patamar demasiadamente elevado para os propósitos deste trabalho. Diante, então, da falta de ambientes controláveis com concentrações programáveis, a opção que se mostra mais razoável é a de replicar o que foi desenhado para o pré-teste, alargando os intervalos de tempo com variações do ambiente. Deste modo, é planeado aumentar o tempo de exposição dos sensores no laboratório LID 3 para o máximo de tempo possível: 45h, em razão de limitações de armazenamento interno do instrumento de referência, quando configurado para uma amostra por minuto. Este teste pode ser repetido caso haja informações muito discrepantes, ou caso se sinta a necessidade de investigar algum comportamento anômalo observado durante o primeiro teste. Como complemento, deverá repetir-se este experimento durante a noite, em um ambiente fechado e habitado, como um quarto de dormir. Inicia-se a medição durante a tarde, de tal modo que os sensores se

estabilizem antes da ocupação da sala, e à noite já estejam estáveis e capazes de captar o pico de concentração. Este experimento será realizado na casa do autor em Guimarães, situada em Azurém, Guimarães, em um quarto com área aproximada de 10m² e volume estimado de 25m³, habitado por duas pessoas. Para garantir que a concentração se eleve ao longo da noite, as janelas serão fechadas durante o ensaio. Caso se sinta a necessidade de repetição, este teste é facilmente replicável, bastando apenas ter os sensores disponíveis. A amostragem para este ensaio também é de uma coleta a cada minuto.

Espera-se obter com estes roteiros para o dióxido de carbono as informações necessárias para conclusões acerca da precisão, repetibilidade e estabilidade destes sensores.

4.3.2.2 Monóxido de Carbono

Com as devidas ressalvas, para o monóxido de carbono planeia-se a exposição à atmosfera em local com atividade automotiva considerável na cidade de Guimarães, e que também seja possível se ter acesso frequente para monitoramento do processo e eventual manutenção. Como referência, o equipamento utilizado é o monitor de qualidade do ar de marca TSI, modelo *7575 Q-Trak Monitor*, idêntico ao ilustrado Figura 4-21.

Em sua ponta de prova, que é intercambiável, há um sensor eletroquímico para o CO com resolução de 1 ppm. Sua precisão nominal é de ± 3 ppm ou 3%, o que for maior. É capaz de medir de 0 a 500 ppm, majorando a faixa de interesse significativamente e sugerindo uma diluição na sensibilidade do aparelho (o que reforça o paradigma pela dificuldade latente de se monitorar patamares para qualidade do ar mesmo com sensores profissionais). Este instrumento é capaz de armazenar também temperatura e humidade relativa do ar. Estes dados são úteis para o pós-processamento, pois os sensores de óxido metálico para monóxido de carbono necessitam de correção para compensar os efeitos climáticos no elemento sensível.

Com o intuito de se averiguar o comportamento esperado dos sensores e do próprio instrumento de referência, um exame preliminar foi planeado para ser executado em ambiente interior, também no laboratório de pesquisa LID 3 do Departamento de Sistemas de Informação da Universidade do Minho. Espera-se com este teste obter informações sobre o comportamento dos sensores, processamento dos dados, extração das informações do instrumento de referência e, ainda, observar alguma excitação dos sensores em função da presença de traços de monóxido de carbono em ambiente interior. Entretanto, antes da primeira utilização destes sensores, o fornecedor recomenda que é necessário deixá-los ligados

por 48h ininterruptas, com o intuito de se remover eventuais impurezas que se acumularam durante o processo de fabricação e período de armazenamento e transporte, e também galvanizar o elemento sensível. Configura-se, empiricamente, a amostragem para ocorrer a cada minuto. Como garantia de que os sensores estão a fornecer as leituras, os dados podem ser monitorizados por um canal de dados serial³⁸.



Figura 4-21. Equipamento utilizado como referência para o monóxido de carbono.

Após a execução de carácter preliminar, os sensores (MQ7 e MQ9; um par de cada) e a ponta de prova da TSI serão expostos ao ar exterior em um sítio com maior proximidade possível a uma rua movimentada com alto tráfego de automóveis. Na cidade de Guimarães, de entre as opções possíveis, o local definido para o posicionamento dos sensores está ilustrado, em vermelho, na Figura 4-22. Situa-se na varanda de um apartamento de segundo andar (a cerca de 6 metros de altura) com face para a Rua Teixeira de Pascoais, na Quintã. Apesar de esta não ser a via mais congestionada da cidade, ainda é local de recorrentes congestionamentos ao início da manhã e foi o único sítio com as características necessárias para a execução em que se pode ter acesso irrestrito para verificação rotineira dos sensores.

³⁸ A própria IDE de programação do *Arduino* possui um monitor serial, onde apenas é preciso ter em código a função de envio dos valores à porta serial. Esta função pode ser desabilitada para a realização dos experimentos depois da verificação.

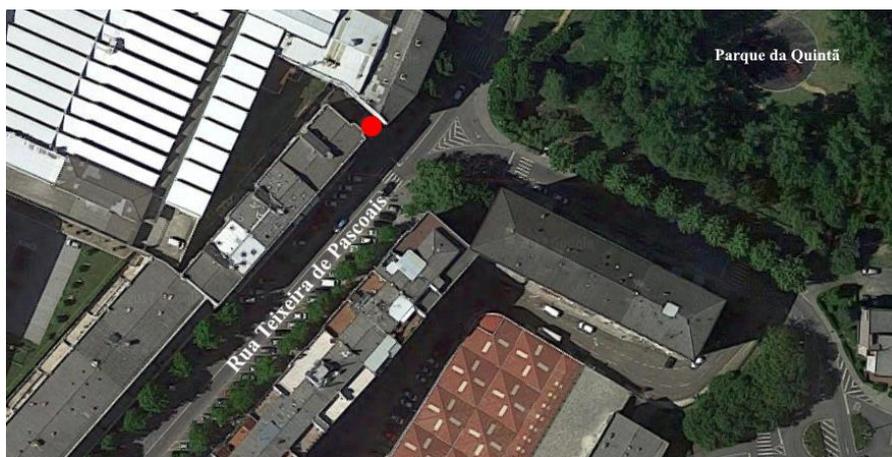


Figura 4-22. Ilustração do local planeado para o posicionamento dos sensores de monóxido de carbono. (Google Maps)

4.3.2.3 Ozono

Dos sensores adquiridos, o planeamento do roteiro de ozono demonstrou ser o mais complexo sobretudo em razão dos seguintes aspetos: ausência de um sensor de tipo diferente, ausência de instrumento de referência, baixa concentração esperada de ozono nas regiões geográficas em que os envolvidos do trabalho se situam e têm fácil acesso. Entretanto, replica-se a necessidade de um pré-experimento para estes sensores com os mesmos objetivos que os demais: investigar o comportamento destes dispositivos.

Por infortúnio, dada a indisponibilidade de um instrumento de referência de ozono até à data de escrita deste documento, a investigação deste sensor limita-se a averiguar a repetibilidade entre eles, e eventuais excitações quando expostos ao ar exterior, comparando-as com as curvas características do ozono, como as exemplificadas na Figura 4-23. Porquanto, planeia-se expor os sensores ao ar exterior, em um sítio seguro e protegido de intempéries, durante o período de uma semana para investigar eventuais excitações nos horários opostos aos de pico de tráfego automóvel, instantes em que se espera os maiores valores de ozono ao nível do solo. Dadas as características da gênese do ozono troposférico, requer-se ainda que o sítio esteja geograficamente localizado o mais distante possível das fontes emissoras de seus precursores e com vento favorável, para que se possa captar o ozono após a catalisação do NO_x pela ação dos raios solares.

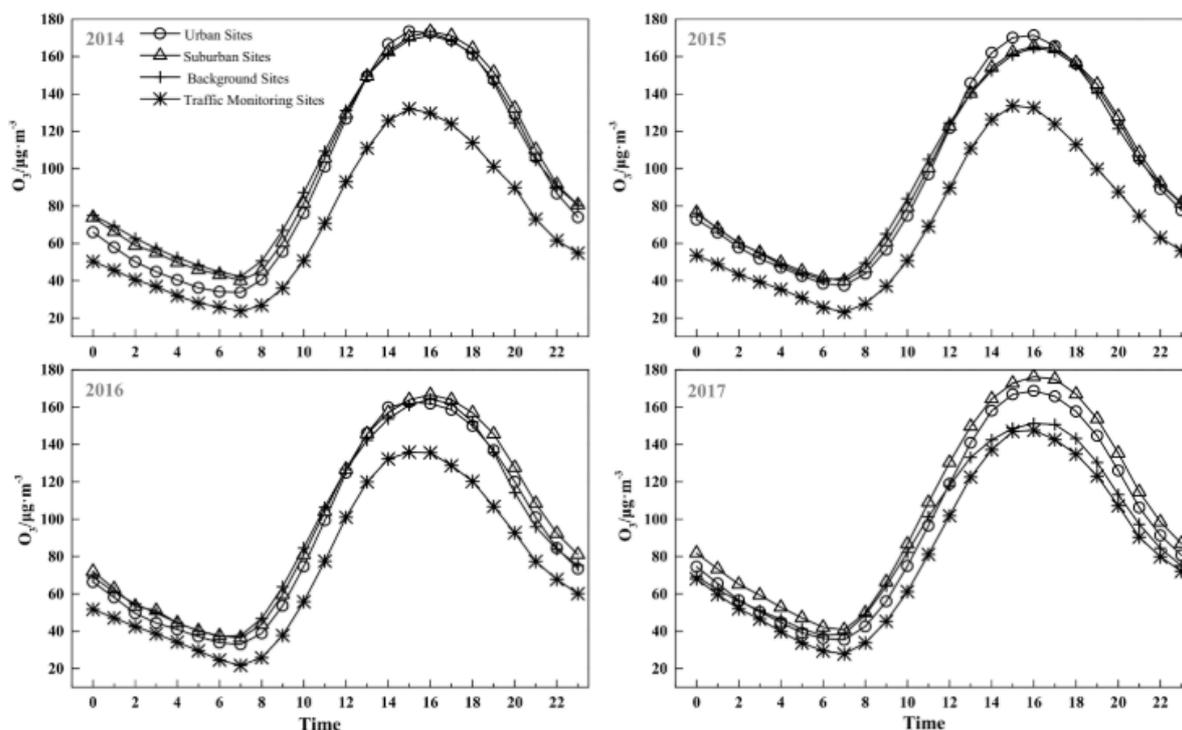


Figura 4-23. Valores diurnos médios de ozono em nível de solo em Pequim de 2014 a 2017 (Zhao et al., 2018).

Neste capítulo relatou-se o trabalho de preparação das experiências destinadas a avaliar um conjunto de sensores. Começou-se por selecionar os sensores alvo da avaliação experimental com base num conjunto de critérios objetivos, a que se seguiu a descrição dos detalhes técnicos relacionados com a utilização desses sensores para efetuar as medições e recolher os dados, e concluiu-se com o planeamento de cada uma das experiências. O capítulo seguinte é dedicado à descrição da realização dessas experiências.

CAPÍTULO 5

5 EXECUÇÃO EXPERIMENTAL

Este capítulo descreve os pormenores de execução dos experimentos cujos planeamentos foram descritos no capítulo anterior, bem como as estratégias adotadas para contornar eventuais obstáculos não previstos. Ainda, as ilustrações dos experimentos e informações necessárias para a análise dos dados também são devidamente apresentadas.

Seguindo a lógica dos capítulos anteriores, este capítulo também segmenta as avaliações experimentais entre sensores climáticos e de qualidade do ar, dada a diferente natureza destes conjuntos de sensores.

5.1 Sensores climáticos

Em conformidade com o planeamento experimental, dissertado no Capítulo 4, a programação lógica do equipamento de controle artificial do clima ocorre respeitando os valores e tempos previstos na Seção 4.3.1. A configuração da câmara se faz através do painel de interface sensível ao toque, que é bastante intuitiva. Nela é possível programar – de maneira sequencial – as etapas e seus intervalos de tempo. A Figura 5-1 exibe uma fotografia retirada deste painel durante uma execução preliminar para testar a câmara de ambiente controlado. É possível ver, em tempo real, a temperatura (que no caso específico da Figura 5-1 foi configurada para 10°C e estava, no momento, a 22.5°C) e humidade relativa (ajustada para 30% e estava em 51.2%), e também os botões de interface (parte inferior da imagem), por onde é possível efetuar os comandos.

A câmara ainda permite a extração dos dados experimentais (*log*) por protocolo RS-232 utilizando um *software* proprietário. Entretanto, a utilização deste recurso não foi possível em razão de não se ter acesso à licença desta aplicação à data da execução dos experimentos (final de fevereiro de 2017), sendo o único instrumento de leitura de referência o *datalog* da *Lasca Electronics* (previamente ilustrado na Figura 5-18). Ademais, mesmo sem a extração dos dados da câmara, é possível aferir a coerência das variáveis pela observação dos dados gerados pelo instrumento gabarito, uma vez que a programação foi feita com valores conhecidos e intervalos bem definidos.

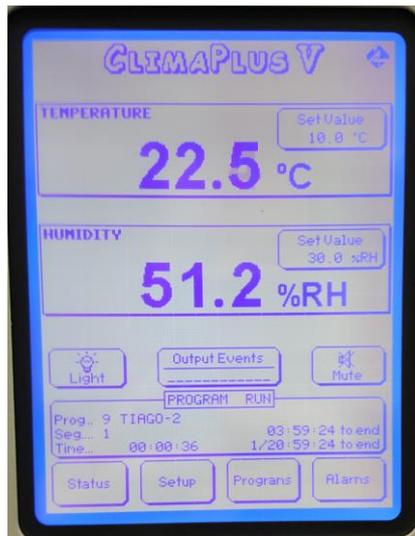


Figura 5-1. Interface e monitor sensível a toque da câmara de ambiente controlado.

A ligação dos sensores foi realizada em conformidade com os diagramas ilustrados, e devidamente conectados ao dispositivo microprocessado – *Arduino Uno* – com um sensor de cada tipo, o que é definido aqui como um conjunto. A Figura 5-2 demonstra o artefacto conectado e pronto para funcionamento, com a identificação dos sensores, os fios utilizados para efetivar as conexões, e o *shield* montado sobre o *Arduino* para a utilização do cartão SD.

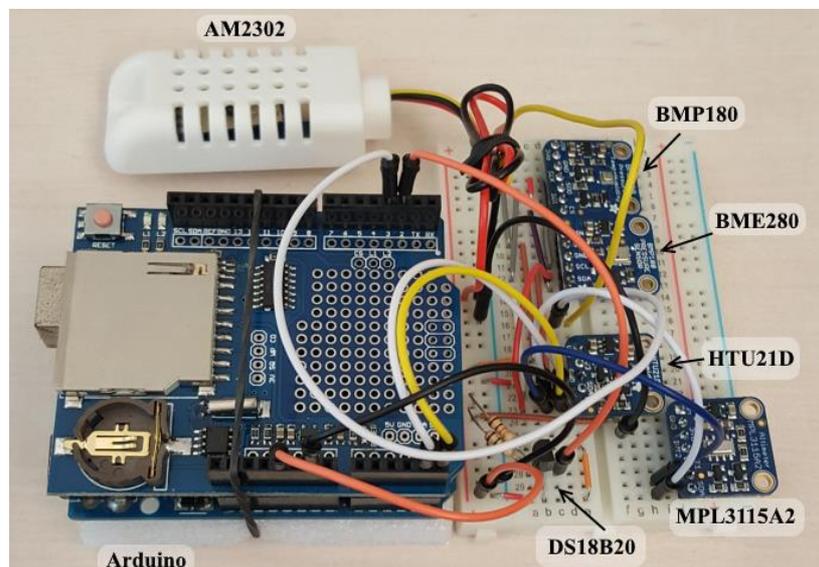


Figura 5-2. Artefacto final com sensores ligados ao *Arduino*.

A programação final da câmara, contabilizando um tempo de inicialização e desligamento, resultou em uma rotina com 48 horas de duração. O primeiro teste foi iniciado ao meio da manhã do dia 1 de

março de 2017, e levou consigo os conjuntos de sensores A e B (salienta-se que os sensores foram previamente separados em três conjuntos iguais, cada qual contendo uma instância dos 6 diferentes modelos). A Figura 5-3 exhibe o posicionamento dos artefactos no interior da câmara. Foi possível, ainda, passar os cabos de alimentação externa – os conectores estão visíveis na imagem – por um ponto de passagem com vedação na lateral da câmara. Os artefactos foram posicionados sobre uma caixa de papelão para evitar contacto com a superfície metálica do interior da câmara, e a uma distância de aproximadamente 15cm da parede lateral (distância limitada pelo comprimento dos cabos de alimentação). A Figura 5-4 exhibe os dispositivos dentro da câmara durante o funcionamento (a câmara possui uma janela com múltiplas camadas de vidro com tratamento térmico, tornando difícil uma captura fotográfica com clareza).

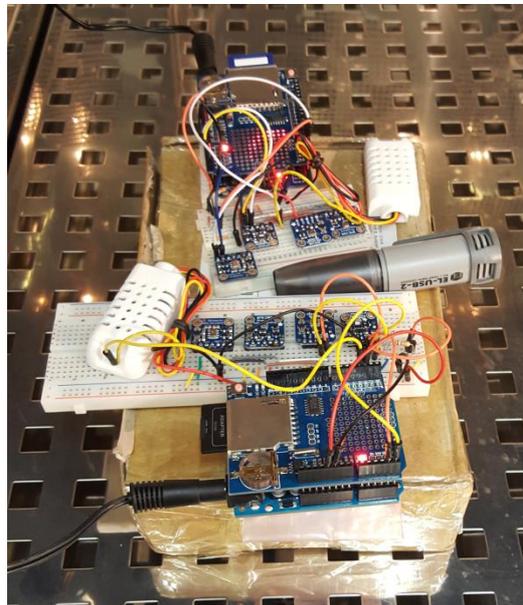


Figura 5-3. Artefactos em funcionamento no interior da câmara climática antes da rotina experimental.

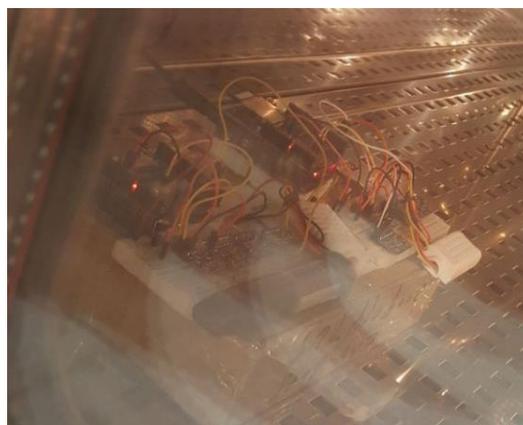


Figura 5-4. Artefactos em funcionamento no interior da câmara climática durante a execução experimental.

A ligação elétrica dos dispositivos ocorreu em simultâneo no mesmo ponto de energia, exatamente 60 segundos após a ativação do instrumento de referência (mesmo tempo de amostragem dos sensores, configurado em código). Este foi o artifício mais razoável que se encontrou para garantir a sincronia entre as leituras, sobretudo em razão do instrumento de referência ser ativado via software, usando uma porta USB.

Após o término da rotina experimental, a máquina é desligada automaticamente, e os artefactos precisam de intervenção manual para parar as leituras. Os dados dos sensores, que são armazenados em arquivo de texto com separação por vírgulas tanto pelo *Arduino* quanto pelo instrumento de referência, são então copiados para um disco rígido em um computador pessoal. Uma vez que o processo de guardar os dados esteja concluído, um conjunto de sensores é minuciosamente substituído, mantendo as ligações elétricas intactas (substitui-se apenas a peça, conectando-se a substituta aos mesmos terminais), e então o teste é rearranjado para a repetição da rotina. A primeira execução contou com os conjuntos A e B. A segunda – iniciada no dia 3 de março de 2017 – foi composta pelos conjuntos A e C. A terceira, e última, iniciada em 6 de março, submeteu os conjuntos B e C à rotina da câmara de ambiente controlado.

Convém mencionar que o processo de preparação pré-execução é metódico e repetitivo, ou seja, replica-se nas duas execuções subsequentes a mesma ordem de tarefas: *download* dos dados; reinserção dos cartões; substituição dos sensores; reposicionamento; sincronização entre os dispositivos; execução da rotina.

No final de cada experimento, os *Arduinos* apresentaram, em média, diferença de 3 amostras entre si, sugerindo que há uma discrepância em seus relógios³⁹ internos, embora considere-se um desvio irrelevante, já que 3 amostras em um universo de 2880 representa 0,1% do total. Na etapa de análise posterior, convém investigar se estas discrepâncias acarretam algum prejuízo aos dados.

Durante os seis dias de experimentos não houve interrupção imprevista. Ao todo, cada sensor foi submetido a 96 horas experimentais. Uma observação preliminar dos dados oriundos deste experimento indicou uma dificuldade no controle da humidade relativa, onde a câmara tinha dificuldades em estabilizar os patamares dentro de 3 horas, principalmente após uma mudança de temperatura. Como a disponibilidade da câmara se aproximara do fim, foi feito um ajuste na programação de modo que se prolongassem, no tempo, os patamares de humidade relativa. Foi eliminado o patamar em temperatura

³⁹ Cada *Arduino* possui em seu circuito um oscilador a cristal responsável pela contagem de tempo.

negativa pela impossibilidade de controle de humidade nesta situação, permitindo que o seu tempo fosse distribuído entre os outros níveis. Esta atitude garante que a humidade relativa seja averiguada de maneira mais confiável, pois reduz o impacto que o tempo de estabilização dos patamares de humidade possui no cenário programado. Como o foco deste ensaio de reforço, que também durou três dias com uma submissão individual de 96 horas experimentais, foi a humidade relativa, as informações em temperatura são apenas complementares e guardadas apenas para conferência. Todo o processo de *download* dos dados, substituição de sensores e religação da câmara foi rigorosamente repetido neste ensaio complementar de modo a garantir que todos os conjuntos sejam novamente avaliados em pares (A-B, A-C, B-C), assim como na versão planeada.

Os resultados obtidos por estes experimentos serão apresentados e discutidos no capítulo 6.

5.2 Sensores de qualidade do ar

Apesar da indisponibilidade de um aparelho controlável, confiável e programável para criação de ambientes com concentrações definidas de gases, assim como foi possível para os sensores climáticos, a execução experimental dos ensaios aos sensores de qualidade do ar foi realizada com recursos disponíveis, porém sem perder o objetivo de vista.

Os roteiros, por se tratar de agentes diferentes, serão divididos em subseções respetivas ao gás observado.

5.2.1 Dióxido de Carbono

O ensaio para os sensores de gás carbônico foi o primeiro a ocorrer. Os sensores foram ligados de acordo com os diagramas apresentados na seção 4.2.2, não havendo alterações ao planeamento inicial. Antes do processo experimental ser descrito, alguns pormenores técnicos observados durante a fase de pré-teste são discutidos. Neste caso, convém reforçar que o sensor MG811 requer uma alimentação externa, pois o *Arduino* não é capaz de fornecer a potência elétrica necessária para o aquecimento do elemento sensível, sendo, portanto, a ligação de 5 volts ao *Arduino* exclusiva para o amplificador de instrumentação à saída do sensor, que amplifica o sinal analógico gerado. O MH-Z16, por sua vez, utiliza o barramento de 5 volts do *Arduino* tanto para alimentação quanto para polarização de seus circuitos amplificadores.

Percebeu-se que ao ligar estes dois sensores a uma mesma placa, se requeria uma atenção especial à alimentação do *Arduino*. Este utiliza um regulador de tensão para 5V – em corrente contínua – que,

para funcionar adequadamente, ou aplica-se uma tensão estável de 5V, ou aplica-se tensões partir de 7V até um máximo de 18V. Entretanto o desempenho do regulador também tem um fator térmico, que depende de duas variáveis: a diferença entre a tensão aplicada e a tensão regulada de saída; e a corrente drenada para o circuito. Quanto maior for a diferença entre 5 volts e a tensão aplicada, e – também – quando maior for a corrente drenada, mais energia térmica se dissipa no regulador. Em outras palavras, o regulador de tensão só é capaz de dissipar uma potência fixa, determinada. Quanto maior for a tensão aplicada, menor a capacidade de fornecimento de corrente, e vice-versa. Como consequência de violar esta regra, o elemento suspende temporariamente a alimentação ao circuito. Caso haja excessos, há chances de o regulador ser danificado e propagar um surto de corrente por todo o circuito, pondo em risco elementos mais sensíveis, como o processador ou mesmo os sensores. Na prática, foi observado que alimentando o *Arduino* em 9 volts, com os dois sensores ligados (MG811 e MH-Z16), o seu regulador de tensão apresentou leve aquecimento, porém sem comprometimentos. Por segurança não foi testada tensão acima deste patamar e também não se recomenda por não haver garantias de que haja suporte para tal.

Um pormenor prático relevante diz respeito à temperatura do sensor de óxido metálico. Este apresenta-se em um invólucro metálico, que notoriamente é um material que ganha ou perde temperatura mais facilmente. Como o elemento sensível precisa atingir uma temperatura específica para operação, e nela permanecer, teoricamente expor o sensor em atmosferas demasiadamente frias sugere que haverá um comprometimento no desempenho deste sensor, e infere-se que haja a necessidade de um abrigo para aplicações exteriores. Por esta razão os testes foram planejados para ocorrer em ambiente fechado, ao abrigo de intempéries. Ainda sobre este sensor, notou-se que é mais conveniente armazenar as leituras analógicas em tensão para conversão em níveis “ppm” posteriormente por uma razão principal: o cálculo de conversão é não-linear, e cada sensor responde de uma maneira diferente, pelo que seria necessário observar ao longo do tempo quais são os níveis base de cada sensor. Também foi observado que este sensor apresenta uma variação em sua saída em função da orientação de posição do seu plano sensível. Por ter uma camada sensível granulada internamente, subentende-se que a orientação do sensor influencia diretamente em sua sensibilidade pelo fato dos grãos estarem soltos – embora confinados em uma camada – e, portanto, recomenda-se que todo o teste seja executado com o sensor inerte e com mesma orientação de posição. Por esta razão, já é possível concluir que este sensor em específico não é viável para aplicações móveis, como embarque em automóveis.

Ainda sobre cuidados tomados na fase de preparação, o fabricante do sensor MH-Z16 recomenda que se faça uma pré-calibração do sensor, expondo-o ao ar exterior por pelo menos 10 minutos, e então, prime-se o botão de calibração durante 10 segundos. Isto faz com que o sensor entenda que a média destas leituras corresponde à concentração de 400 ppm, valor estimado para uma atmosfera limpa de acordo com o manual, muito embora já se observe que este patamar tenha sido ultrapassado em 2016⁴⁰, estando atualmente por volta de 415 ppm⁴¹. É recomendável não expor o sensor a este processo em situações que o ar possa estar poluído ou com baixa, ou nenhuma, circulação, pois nesta situação é mais provável que haja concentrações elevadas de dióxido de carbono. Por esta razão, quando utilizado em ambientes fechados é preciso desligar o sensor pelo menos uma vez a cada 24h para que o mesmo não execute a rotina de autocalibração. Na prática isto pode ser feito via código, utilizando um contador como controle para enviar comando via I²C para que reinicie o sensor antes de atingir 24 horas em funcionamento contínuo (como se conhece o período de amostragem, é um intervalo de fácil determinação).

Após todas as observações preliminares e cuidados tomados, os sensores foram postos juntos da referência na sala LID 3, situada no Departamento de Sistemas de Informação da Universidade do Minho, com o intuito de colher dados do ar pelo tempo necessário. Os motivos para a escolha da sala foram: trata-se de uma sala ampla e bastante movimentada; normalmente ocupada, durante o dia, por quatro pessoas; é uma sala que costuma receber estudantes e professores para reuniões rápidas; a sala estava com a ventilação desligada, portanto, ambiente propício para acumulação de níveis de CO₂. Em razão destes fatores que caracterizam a dinâmica do ambiente, optou-se pela amostragem a cada minuto. Entretanto, esta ação restringiu o tempo em que o instrumento de referência pode guardar informações para 45 horas. Assim como no teste climático, os dispositivos foram sincronizados através do método da inicialização simultânea. A Figura 5-5 ilustra um sensor de cada tipo, bem como a ponta de prova do sensor de referência, em fase de configuração no laboratório. As Figuras 5-6 e 5-7, por sua vez, ilustram os dispositivos e acessórios – respetivamente – durante a execução prática.

⁴⁰ Informação obtida em: <https://www.scientificamerican.com/article/earth-s-co2-passes-the-400-ppm-threshold-maybe-permanently/> (Acesso em janeiro de 2018).

⁴¹ Informação obtida em: <https://www.co2.earth/> (Acesso em abril de 2020)



Figura 5-5. Um conjunto de sensores sendo testados em bancada na sala LID 3.



Figura 5-6. Conjunto experimental em execução em ambiente fechado do LID 3.



Figura 5-7. Fontes de alimentação necessárias para os dispositivos exemplificados na Figura 5-6.

Os testes no LID 3 ocorreram nos intervalos definidos nos dias 21 a 23, e 26 a 28 de março de 2017. Após estes, entre os dias 7 e 9 de abril, foi executado o experimento de monitoramento de níveis de concentração de CO₂ em quarto fechado habitado por duas pessoas. Este teste, como dito, teve como intuito verificar a capacidade de acompanhamento dos sensores a grandes variações, fruto da baixa, ou

inexistente, circulação de ar (provocada intencionalmente). A Figura 5-8 ilustra os dispositivos durante a execução deste teste, realizado em um quarto de residência na freguesia de Azurém, Guimarães. Após a ligação dos sensores, não houve manuseio ou intervenção.

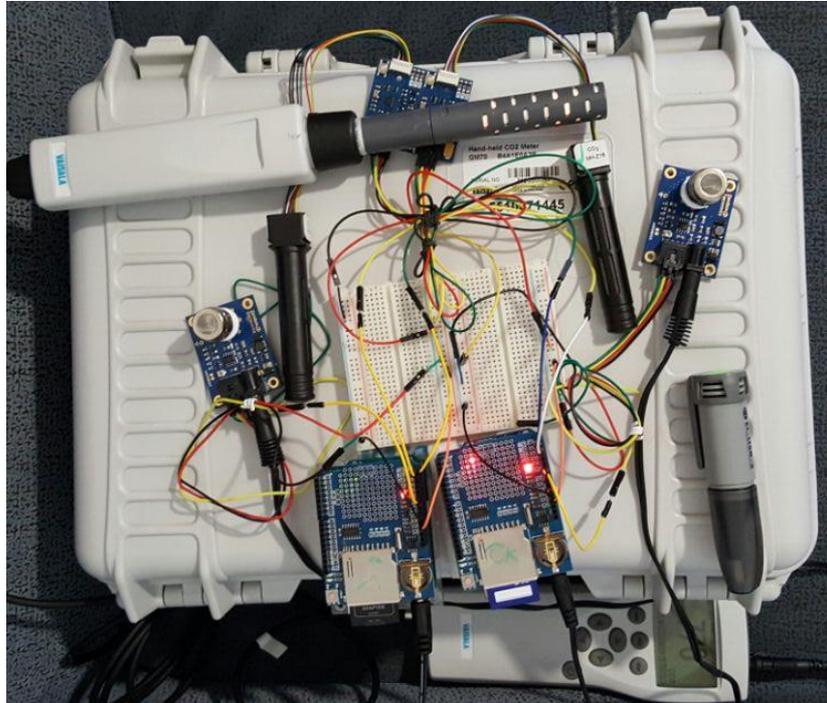


Figura 5-8. Sensores em funcionamento durante o experimento em quarto residencial.

Ao término de cada um dos experimentos, que também recolheu dados de temperatura e humidade com um instrumento de referência, a descarga dos dados ocorre como no roteiro adotado nos testes dos sensores climáticos: os dispositivos são desligados em simultâneo, e os cartões SD retirados para a descarga dos arquivos em computador pessoal. O instrumento *Vaisala*, por sua vez, utiliza um software proprietário para descarga dos dados, pelo que é possível exportar as leituras para formato “.csv” totalmente compatível com aplicações computacionais de cálculo e matemática computacional. Ressalva-se que, neste processo, as leituras do sensor de referência e do sensor MH-Z16 são geradas e armazenadas já em unidades de concentração de “partes por milhão” (ppm), ao passo que as informações oriundas do sensor MG-811 se encontram em valores de tensão que serão convertidas posteriormente utilizando um modelo de adequação de dados utilizando uma referência para gerar a função de transferência.

Cada sensor foi submetido a um total de 135 horas experimentais advindas das execuções descritas nesta seção.

5.2.2 Monóxido de Carbono

A execução dos experimentos para estes sensores, assim como para o dióxido de carbono, ocorreu preliminarmente em ambiente fechado, livre de intempéries, de tal modo que se adquira familiaridade com as ligações destes sensores, bem como observar preliminarmente o comportamento do sinal de saída, e o formato em que se apresentam, de tal modo que se possa chegar a uma amostragem adequada.

De início foi constatado que estes sensores consomem uma quantidade energia próxima do limite máximo que o *Arduino* é capaz de fornecer. Seria, portanto, necessária uma alimentação externa de suporte tendo em vista que seriam ligados 4 dispositivos em simultâneo (dois em cada *Arduino*). Foi utilizado um regulador de suporte, de marca *YwRobot* (Figura 5-9) para ser o responsável pela alimentação elétrica dos sensores. Além de contornar a questão da alimentação (pois este regulador é capaz de fornecer até 700mA, face aos 200mA do *Arduino*), este dispositivo traz as funcionalidades de uma chave de controle, que permite desligar os sensores sem desligar o *Arduino* (ou o oposto), ser capaz de fornecer tensões reguladas em 3.3V, além de ser possível utilizá-lo em encaixe à placa de prototipagem (*breadboard*), simplificando a montagem do circuito. Por outro lado, é fortemente recomendável interconectar os pontos de “terra” (Ground) do *Arduino* ao do regulador auxiliar para evitar erros na leitura das informações pelo *Arduino*, uma vez que este possui um conversor analógico/digital, que exige uma referência em 5 volts sem flutuações.



Figura 5-9. Alimentador auxiliar utilizado na ligação dos sensores MQ7 e MQ9.

Com as devidas ligações efetuadas, de acordo com os diagramas, e com as adaptações ao alimentador auxiliar, os sensores foram postos em ambiente interno, por 48h ininterruptas para realizar o “*burn-in*”, que é o processo de galvanização dos elementos sensitivos, eliminando vestígios de impurezas remanescentes da fabricação e armazenamento do sensor. As Figuras 5-10 e 5-11 exibem os artefactos em funcionamento no laboratório LID 3.

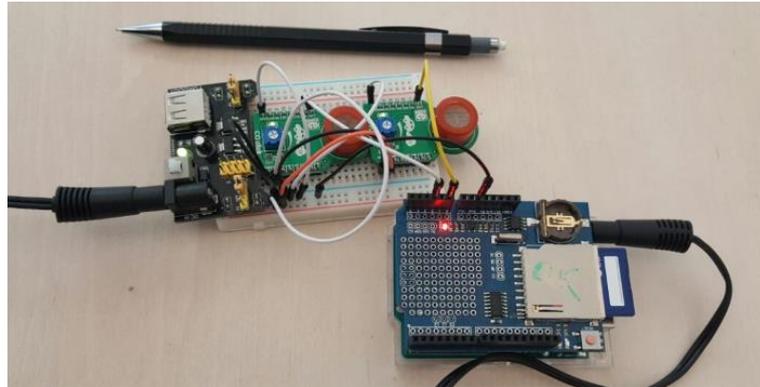


Figura 5-10. Artefacto construído com os sensores MQ7 durante o *burn-in*.

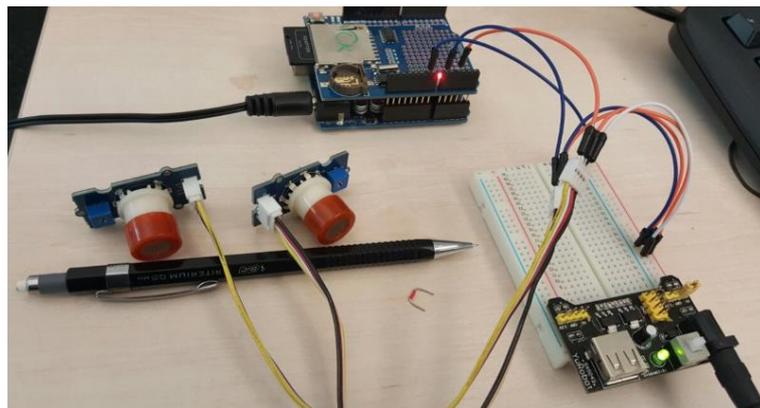


Figura 5-11. Artefacto construído com os sensores MQ9 durante o *burn-in*.

Após 48h, os dados começaram a ser colhidos – sem que os sensores fossem desligados – para observar algum evento de interesse durante este período e avaliar o comportamento dos sensores durante o *burn-in*. Constatou-se que durante este tempo, a média das leituras reduzia-se com o tempo, estabilizando-se à um “nível de chão” após 24h de *burn-in*. Ainda se observou que o sinal fornecido pelo sensor tem característica oscilante, pelo que é necessário elevar a amostragem de modo que se possa obter o valor médio adequado correspondente às concentrações de monóxido de carbono no ar. A Figura 5-12 exhibe um curto trecho das leituras de um dos sensores MQ-7, obtido durante o processo de *burn-in*, de modo a dar ênfase na oscilação do sinal analógico do sensor (traço pontilhado). A mesma figura ainda apresenta, em traço cheio, um filtro de média móvel deste mesmo sinal.

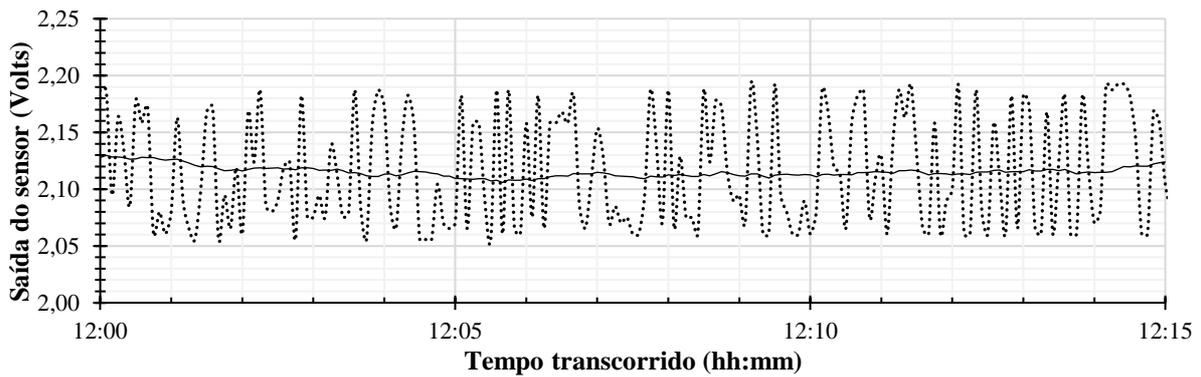


Figura 5-12. Recorte temporal da saída do sensor MQ-7.B, em níveis de tensão, obtido das primeiras 24h de *burn-in* (tempo de amostragem de 5 segundos).

Durante o *burn-in*, contudo, um facto chamou a atenção com relação à sensibilidade destes sensores: durante os horários de pico de tráfego rodoviário exterior (início da manhã e fim da tarde), os sensores apresentavam uma ligeira alteração de comportamento. Este ocorrido encorajou a investigação destes sensores para leitura de pequenas concentrações, uma vez que a sensibilidade destes sensores, nominalmente, não é capaz de observar concentrações tão baixas. Mais observações e detalhes acerca do comportamento do MQ-7 são descritos no capítulo 5.

A segunda execução em laboratório ocorreu de maneira idêntica à etapa de *burn-in* em termos de preparação. Ou seja, com os sensores posicionados em uma mesa. A mudança principal é a utilização simultânea do sensor de referência da TSI. Como ajuste, precisou-se apenas realizar o upload do código com nova amostragem, e resincronizar os dispositivos.

Para a execução de testes em ambiente exterior, os sensores foram posicionados de forma a ficarem expostos ao ar livre na sacada mais exposta de um edifício a uma via urbana que apresenta tráfego rodoviário moderado nas horas de pico. Um ponto de energia foi providenciado para dar suporte ao experimento, e os dispositivos foram inicializados em simultâneo. Os sensores foram postos sobre uma mesa, e duas vezes ao dia eram reposicionados para evitar incidência solar nos sensores. Durante as visitas de inspeção, observava-se – ao toque – a temperatura dos reguladores de tensão, dos sensores (lateral) e dos *Arduinos*, que deveriam estar quentes, porém ainda possíveis de se tocar. A primeira execução ocorreu – sem interrupções – entre os dias 11 e 14 de abril, totalizando 84 horas de medições contínuas.

Ao observar, superficialmente, os dados oriundos da primeira bateria de testes em ambiente exterior, decidiu-se repetir o ensaio, porém ao abrigo do sol. O fator preponderante para esta decisão foi o fato da elevação da temperatura perto do meio dia ter provocado um falso positivo nos sensores, poluindo as

medições (foram observados picos elevadíssimos em horários que não se esperava tal facto). Uma análise detalhada deste fenómeno é descrita no capítulo 6.

O ensaio no exterior (duplicata) foi executado entre os dias 21 e 25 de abril de 2017, no mesmo sítio. A Figura 5-13, tirada durante uma das visitas de inspeção, exhibe os sensores sobre a mesa na sacada do apartamento. A Figura 5-14 exhibe a vista da via pública na cidade de Guimarães. A Figura 5-15, por sua vez, exhibe o trânsito típico desta via de acordo com a ferramenta de monitoramento de tráfego do *Google Maps*. Foi configurado para exhibir o tráfego típico às sextas-feiras por volta das 18 horas, pelo que é possível perceber a indicação de tráfego de moderado a pesado (segmentos vermelhos mais escuros) nas imediações da Rua Teixeira de Pascoais.



Figura 5-13. Dispositivos durante execução ao ar livre. À esquerda as fontes de alimentação; ao centro, os artefactos eletrónicos; na parte inferior central, o instrumento de referência da marca TSI.

Após o segundo ensaio no exterior, foi observada um incidente: o *Arduino* responsável pelo controle e leitura dos sensores MQ-9 armazenou informações apenas durante 22h, tendo iniciado o armazenamento de dados às 14 horas do dia 21 de abril, junto com os demais dispositivos, porém encerrado ao meio dia do dia 22 de abril. Não se sabe ao certo o que ocasionou, uma vez que durante as visitas de rotina todos os aspetos apontavam para a normalidade dos dispositivos: tanto a temperatura quanto o funcionamento dos *LED*s indicativos. Esta ocorrência levanta a necessidade, para futuros artefactos, do acréscimo de um recurso *on line* para monitoramento em tempo real do estado do aparelho.



Figura 5-14. Vista da rua em horário de baixo movimento. À esquerda da imagem, o parque da Quinta.

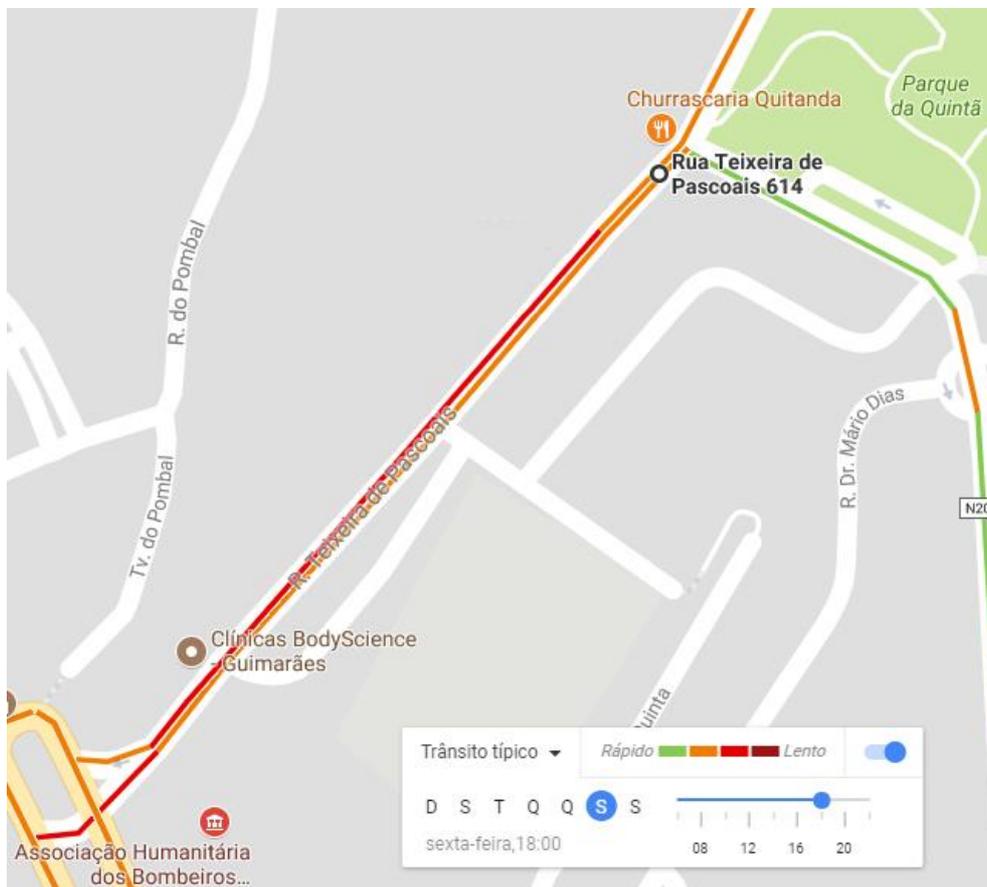


Figura 5-15. Indicativo de densidade de tráfego típico da região em horário de pico.⁴²

⁴² Obtida do Google Maps, 2017.

Ao perceber resultados promissores, adicionou-se ao planeamento experimental para estes sensores, em carácter excepcional, dois experimentos não descritos no plano de testes. Inicialmente, foi pensando uma medição *in situ* em um parque de estacionamento fechado com significativo tráfego de veículos no município de Guimarães com o intuito de verificar a resposta dos sensores a grandes concentrações, uma vez que não se observaram grandes excitações ao ar livre (situação típica de grandes metrópoles, que não é o caso da cidade de Guimarães). Entretanto, diversos problemas resultaram na não validação destas informações, como – por exemplo – questões de alimentação dos sensores pela falta de pontos de energia e problemas na sincronização dos dispositivos. A segunda situação, esta executada sem incidentes, seria a reprodução dos experimentos ao ar livre em um ambiente com maior tráfego. Das possibilidades, a única em que se teria total segurança para a execução dos testes, face ao calendário disponível, seria a execução em Natal, Brasil, a 200 metros da principal rodovia da cidade (ver Figura 5-16) na sacada da residência do autor. Apesar de estar localizado ao 11º piso (cerca de 30 metros de altura), a proximidade da via, bem como a quantidade de veículos presos em congestionamento diariamente, sugere que alguma excitação dos sensores pode ser captada. Os sensores foram postos ao abrigo de intempéries e com vento favorável – na maior parte do tempo, salvo momentos com baixa ocorrência de ventos, ou com variação do sentido das correntes de ar – na sacada do apartamento (Figura 5-17). Não houve alteração de código nestas execuções adicionais, e o único cuidado adicionalmente tomado foi o de acrescentar um sensor externo de temperatura e humidade relativa para compensação das leituras. Este teste foi executado durante os dias 15 e 20 de maio de 2017.

Cada sensor MQ-7 foi submetido a um total de 48 horas de preparação (*burn-in*; não será analisado no capítulo 6), 55 horas experimentais em ambiente fechado e 360 horas experimentais expostos ao ambiente exterior. Em razão da ocorrência de um incidente na realização da experiência duplicata ao ambiente exterior na cidade de Guimarães, em que o *Arduino* armazenou apenas uma parte dos dados, os sensores MQ-9 somam apenas 260 horas de exposição ao ar exterior. No entanto, apresenta a mesma carga horária nas demais situações.

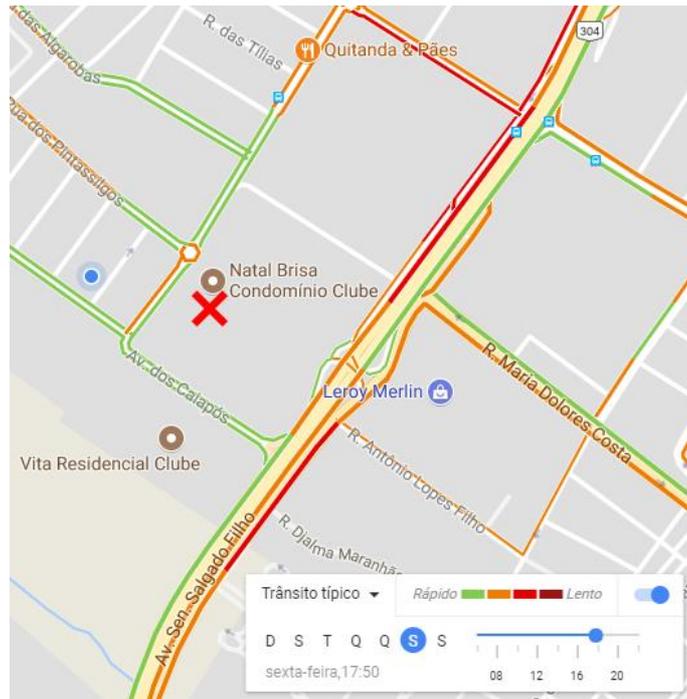


Figura 5-16. Tráfego típico nas imediações da localização em que os sensores foram expostos na cidade de Natal, Brasil. O local está marcado com um “X”.

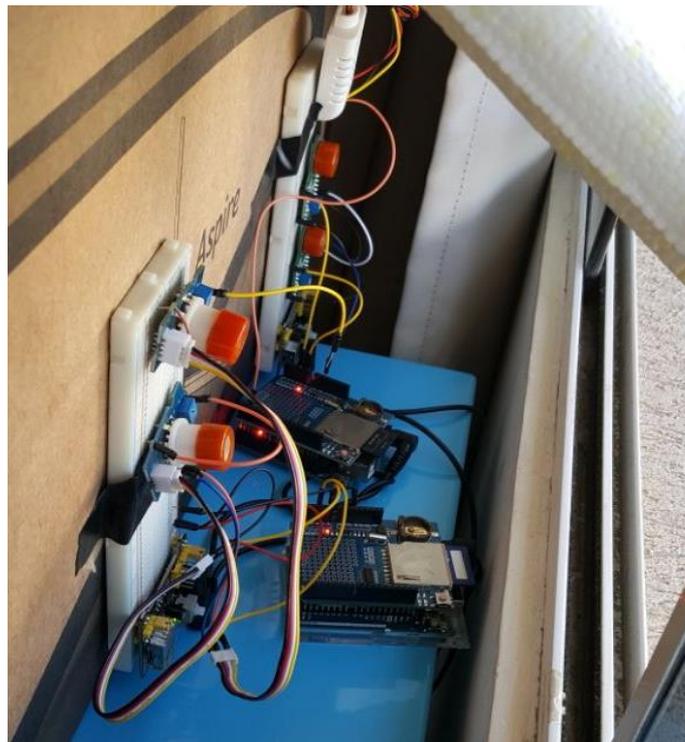


Figura 5-17. Artefactos durante exposição ao ar exterior em Natal, Brasil.

5.2.3 Ozono

O sensor de ozono MiCS-2614, apesar de analógico, foi adquirido em uma versão com interface digital fabricada por um distribuidor independente (*MikroElektronika*), que possui suas próprias placas de prototipagem, com controladores diferentes dos utilizados pelo *Arduino*. Isto representou uma dificuldade adicional para realizar as leituras dos sensores, uma vez que não havia suporte ou bibliotecas disponíveis para o sensor na comunidade *Arduino*, e o fabricante acabara de descontinuar este sensor, encerrando o seu suporte. A única informação a que se teve acesso era a de que o sensor utiliza a tecnologia SPI – *Serial Peripheral Interface*, e possui palavra binária de 12 bits. Esta, apesar de digital, pode apresentar até oito configurações diferentes, a depender dos ajustes de *clock* e sequência de bits: são 4 configurações de polaridade do *clock* (*clock* estável em nível baixo, ativo na subida de nível; *clock* estável em nível baixo, ativo na descida; *clock* estável em nível alto, ativo na descida; *clock* estável em nível alto, ativo na subida), e 2 configurações de sequência de bit (*“MSB first”* - o bit mais significativo é enviado primeiro; *“LSB first”* – o bit menos significativo é enviado primeiro) que podem resultar em 8 situações diferentes.

Como solução, foi preciso estudar qual o conversor A/D utilizado pela placa (uma inspeção visual permitiu isto). Com o conversor devidamente identificado (MCP3201), foi possível verificar na sua ficha técnica – fornecida pelo fabricante – o seu modo de funcionamento SPI e a quantidade de bits, para então poder começar a escrever o código de leitura dos sensores. Contudo, estas informações não foram suficientes, uma vez que o conversor A/D também é configurável para os diversos modos de funcionamento. Seria preciso saber como ele estava configurado na placa. Após contato com o fabricante, foi disponibilizado um código para microcontrolador *AVR* em linguagem C (o *Arduino* utiliza o *ATmega328*, e sua *IDE* é programada em *JAVA*). Neste, sim, foi possível identificar as configurações SPI necessárias para a leitura das informações. Portanto, o sensor funciona no modo “0” da SPI (*clock* em nível baixo, sensível à borda de subida), possui 12 bits (sendo o primeiro nulo, portanto, 11 bits úteis), enviados em dois pacotes de 1 byte (8 bits), com o bit mais significativo enviado primeiro (*“MSB first”*).

Uma vez que as dificuldades técnicas iniciais foram ultrapassadas, realizou-se um pré-teste em ambiente fechado com grande exposição ao ar exterior, boa ventilação e com proteção de intempéries. Convém, ainda, tomar o cuidado de converter os dados lidos para valores de tensão, uma vez que a leitura pela interface analógica do *Arduino* fornece apenas o valor numérico quantificado entre 0 e 1023 (quantificando os 5 V em 1024 patamares).

As conexões elétricas obedeceram o diagrama exemplificado anteriormente na Figura 4-15 da seção 4.2.2. Ambos sensores foram conectados ao barramento SPI de um único *Arduino* (que, neste caso, é capaz de fornecer a energia necessária para os sensores), e são controlados por duas portas digitais que ativam ou desativam os sensores de maneira intermitente (uma porta para cada sensor) através do pino CS (*chip select*), conforme a necessidade de leitura. A fotografia do artefacto em funcionamento é apresentada na Figura 5-18.

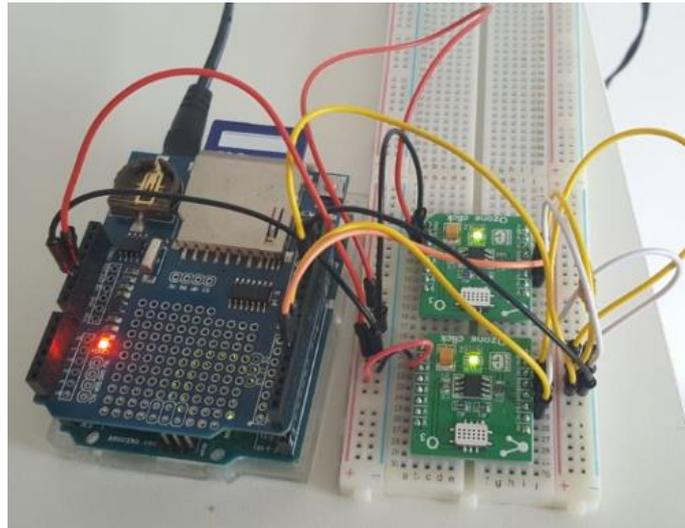


Figura 5-18. Artefacto eletrônico com os sensores MiCS-2614 em funcionamento no pré-teste.

Em uma breve análise nos dados obtidos do pré-teste, que durou dois dias ininterruptos, observou-se que, apesar de não estar explicitado no *datasheet*, este sensor leva um certo tempo a estabilizar-se (cerca de 24 horas). Ainda foram observadas algumas excitações em horários específicos, e isto encorajou a repetir a medição com duração prolongada, ao longo da semana útil, que teve início em 18 de setembro de 2017, e com as mesmas condições de posicionamento que se utilizaram no pré-teste. Com relação à concordância entre os sensores, percebeu-se uma breve tendência de aumento de discrepância com o passar do tempo.

Em virtude da ausência de um instrumento de referência, foi pensado um experimento adicional, não previsto, para verificar o “zero” dos sensores e ainda observar ocorrência de eventuais “falsos positivos”. Este teste consiste em manter os sensores continuamente em funcionamento e confinados dentro de uma caixa de esferovite, mantida em um cômodo residencial ao abrigo da exposição direta ao ar exterior. Assim, com os sensores confinados dentro de um espaço sem ventilação, e sem acesso direto ao ar

exterior, seria possível ver seu nível de saída estável e sem excitações, caso contrário não seria possível afirmar que as curvas observadas anteriormente vieram – maioritariamente – em função do ozono exterior, e não em razão de ruídos internos. Ao final deste experimento, em uma breve conferência visual dos dados salvos, observou-se que um dos sensores apresentou comportamento anômalo, que posteriormente veio a ser confirmado como uma falha total do dispositivo: o sensor passou a apresentar seu sinal elétrico na saída cada vez mais fraco (menor numericamente), até o ponto de apresentar saída nula. Neste ponto toma-se a liberdade de entrar no campo especulativo: esta falha repentina do sensor pode sugerir a razão pela qual este dispositivo foi descontinuado pelo seu fabricante sem a apresentação de um sucessor de mesmo tipo, uma vez que a *SGX Sensortech* não apresenta um sensor *MEMS* para ozono à data da escrita deste documento. Entretanto, houve contato com o fabricante, o problema fora relatado, e a única correção sugerida foi a substituição, via solda, do elemento sensor por outro novo. Este recurso, por sua vez, torna-se inviável pelo fato de o sensor MiCS-2614 estar descontinuado. Julgou-se prudente evitar a compra de novos sensores em razão da dilatação de prazos, e prosseguir com o experimento apenas com um sensor, agora com um novo objetivo: observar se este acompanha a curva característica do ozono. Em face às restrições expostas, o processo de avaliação do sensor de ozono restringe-se a medir continuamente o ar exterior e verificar se este comporta-se como esperado: com concentrações elevando-se ao início da manhã e atingindo o pico ao meio-dia, em seguida, diminuindo e chegando valores mínimos durante à noite e madrugada (Silva & Mendes, 2012). Eventuais conclusões acerca deste sensor, portanto, limitam-se à uma visão qualitativa sobre acompanhar – ou não – a curva típica de concentração de ozono.

No próximo capítulo são estipuladas as métricas de avaliação aplicada aos dados colhidos pelos experimentos aqui descritos, e as discussões decorrentes destas análises.

CAPÍTULO 6

6 ANÁLISE DOS DADOS

Este capítulo dedica-se a um estudo analítico dos dados gerados pelos sensores durante os diversos experimentos realizados no percurso desta investigação, e descritos no capítulo anterior. O intuito é extrair parâmetros numéricos que atuem como indicadores de qualidade e confiabilidade dos sensores de baixo custo examinados e, conseqüentemente, sirvam como embasamento para a utilização – ou não – destes sensores em determinadas aplicações de monitorização ambiental urbana. Como ferramenta de tratamento e análise, utilizou-se as aplicações *Microsoft Excel* e *Scilab*.

A organização deste capítulo, tal como os anteriores, obedece à divisão dos sensores quanto ao seu tipo: climáticos e de qualidade do ar. Com relação aos sensores climáticos, serão estudados os seus parâmetros de estabilidade e de dinâmica, e juntos resultarão em uma análise final sobre a qualidade destes tipos de sensores em função dos seguintes critérios: exatidão, precisão, justeza e facilidade de uso. Aos sensores de qualidade do ar, dada a natureza dos objetos de estudo – os gases – apenas serão estudados o comportamento dinâmico, a exatidão – quando comparados a uma referência, e a justeza entre sensores de mesmo tipo para o mesmo evento. Estas métricas estão em acordo com o Vocabulário Internacional de Termos de Metrologia Legal, ou “VIM” (Inmetro, 2012), e podem ser explicadas numericamente por parâmetros estatísticos, tal como se define a seguir:

- **Precisão (“precision”)** é o grau de concordância entre valores medidos em medições repetidas às mesmas condições. É expressa numericamente em razão do desvio padrão (equação 6-1) e do inverso do coeficiente de variação (equação 6-2; também conhecida por Relação Sinal-Ruído em grandezas cuja escala de medição apresente o zero absoluto, como a humidade relativa);

$$DP = \sqrt{\frac{\sum x_i - \bar{x}}{n}} \quad (6-1)$$

Onde,

- *DP* é o desvio padrão
- *n* é o total de amostras;
- *x* é a amostra atual;
- \bar{x} é a média dos valores.

$$SNR = \frac{\bar{x}}{DP} \quad (6-2)$$

Onde,

- **SNR** é a relação sinal ruído (ou inverso do coeficiente de variação, cv^{-1})⁴³;
 - \bar{x} é a média dos valores;
 - **DP** é o desvio padrão do conjunto de amostras de um dado sensor.
- **Exatidão (“accuracy”)**, que é o grau de concordância entre um valor medido e o um valor verdadeiro dum mensurando. É numericamente representada pelo erro. Nesta investigação será caracterizada pela análise do erro médio (equação 6-3) e do erro quadrático médio (equação 6-4);

$$EM = \frac{1}{n} \sum (\hat{x}_i - x_i) \quad (6-3)$$

Onde,

- **EM** é o erro médio (ou viés);
- **n** é o total de amostras;
- \hat{x}_i é a amostra do sensor de referência;
- x_i é a amostra do sensor avaliado.

$$EQM = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (\hat{x}_i - x_i)^2} \quad (6-4)$$

Onde,

- **EQM** é a raiz do erro quadrático médio (RMSE);
 - **n** é o total de amostras;
 - \hat{x}_i é a amostra do sensor de referência;
 - x_i é a amostra do sensor avaliado.
- **Justeza (“trueness”)** é o grau de concordância entre um número infinito de valores e o valor de referência. É inversamente proporcional à presença de viés nos dados. Nesta investigação será explicada pela correlação entre as leituras dos sensores e os valores de referência em condições dinâmicas. Um dos parâmetros utilizados para se avaliar a justeza é o coeficiente

⁴³ O termo “Relação Sinal-Ruído” é empregado em análises de grandezas que se apresentem em escala não-negativa com zero absoluto, como a humidade relativa. Entretanto, como a medida de temperatura aqui ocorre em Celsius, este parâmetro recebe o nome de “inverso do coeficiente de variação”.

de determinação, que, por sua vez, é o quadrado do coeficiente de Pearson, explicado na equação (6-5).

6.1 Sensores Climáticos

Os dados destes sensores, tal como são armazenados pelo *Arduino*, encontram-se dispostos em formato de texto separado por vírgulas sem necessidade de conversão de unidades. Os dados são então importados pelo *Microsoft Excel*, dispostos em colunas e organizados para o tratamento. A estampa de tempo é obtida a partir do instrumento de referência e é posteriormente verificada através de identificadores gravados, com periodicidade, no arquivo.

A premissa inicial para que a análise dos dados ocorra com coerência é que cada amostra de cada sensor tenha ocorrido em simultâneo com os demais dispositivos. Apesar da sincronia estar presa ao tempo de amostragem, em código, e garantida pelo cuidado de se ter ligado em simultâneo os dispositivos (ligados ao mesmo ponto de energia), ocorre que os cristais de relógio internos de cada *Arduino* podem diferir em longos prazos. Portanto, para certificar que não houve deslocamento significativo entre as amostras, verificou-se o coeficiente de correlação entre cada sensor e a referência considerando deslocamentos de até 5 amostras (escolhido empiricamente) para mais e para menos, correspondendo, portanto, a atrasos e adiantamentos de até cinco minutos entre os conjuntos de dados. O coeficiente de correlação de Pearson (r), utilizado para mensurar esta correlação, para dois conjuntos unidimensionais de amostras – x e y – é definido pela equação (6-5).

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (6-5)$$

Onde,

- n é o total de amostras;
- x_i e y_i são as amostras atuais;
- \bar{x} e \bar{y} são as médias de cada conjunto de amostras;

Neste caso, a verificação da sincronia é desempenhada mantendo fixa uma das amostras, enquanto se desloca o índice i da segunda amostra de -5 a 5 ($i+5$, $i+4$, etc.), repetindo-se ponto a ponto. O que é esperado ao se observar um conjunto em sincronia são variações irrelevantes no coeficiente de correlação em pequenos intervalos vizinhos à amostra síncrona (x , y), com decréscimos na correlação

nos valores mais deslocados (-5 e +5). O valor do coeficiente pode variar de -1 (correlação negativa perfeita) a 1 (correlação positiva perfeita), sendo, valores ideais para este caso, aqueles próximos da unidade positiva.

Convém ao momento reforçar que os experimentos ocorreram com dois conjuntos de sensores de cada vez, onde cada conjunto – por sua vez – foi submetido ao roteiro duas vezes, alternando os pares avaliados em simultâneo (A e B, A e C, B e C). Exemplificando, a Tabela 6-1 ilustra a verificação de sincronia de um dos conjuntos de sensores de temperatura em seu primeiro ensaio (considerando que cada conjunto foi submetido duas vezes), com desvio de ± 3 amostras. De mesmo modo, a Tabela 6-2 traz a mesma verificação para os sensores de humidade relativa, também com desvio de ± 3 amostras. Os sensores de pressão, por não possuírem um instrumento de referência, têm sua sincronia observada entre sensores de mesmo tipo, mas que foram controlados por *Arduinos* diferentes. Portanto, uma amostra da verificação de sincronia dos sensores de pressão é apresentada na Tabela 6-3.

Tabela 6-1. Correlação de Pearson (r) dos sensores de temperatura do Conjunto A para com o dispositivo de referência. Linha destacada corresponde à amostra síncrona.

Desvio de amostra	SENSORES (Conjunto A)					
	DS18B20	AM2302	HTU21D	BMP180	BME280	MPL3115A2
-3	0.9999	0.9998	0.9998	0.9997	0.9998	0.9998
-2	0.9999	0.9999	0.9999	0.9998	0.9999	0.9999
-1	0.9998	0.9998	0.9999	0.9999	0.9999	0.9999
0	0.9997	0.9997	0.9997	0.9998	0.9998	0.9998
+1	0.9995	0.9996	0.9996	0.9997	0.9997	0.9996
+2	0.9992	0.9993	0.9993	0.9995	0.9995	0.9993
+3	0.9988	0.9990	0.9990	0.9993	0.9992	0.9990

Tabela 6-2. Correlação de Pearson (r) dos sensores de humidade do Conjunto A para com o dispositivo de referência.

Desvio de amostra	SENSORES (Conjunto A)		
	AM2302	HTU21D	BME280
-3	0.9849	0.9871	0.9888
-2	0.9871	0.9894	0.9913
-1	0.9895	0.9916	0.9937
0	0.9914	0.9931	0.9956
+1	0.9929	0.9935	0.9964
+2	0.9934	0.9920	0.9955
+3	0.9922	0.9899	0.9939

Tabela 6-3. Correlação de *Pearson* (r) dos sensores de pressão barométrica de mesmo tipo entre os conjuntos A e B, na primeira execução experimental.

Desvio de amostra	SENSORES (Conjuntos A e B)		
	BMP180	BME280	MPL3115A2
-3	0.9993	0.9993	0.9983
-2	0.9994	0.9994	0.9985
-1	0.9997	0.9996	0.9987
0	0.9998	0.9998	0.9989
+1	0.9997	0.9997	0.9988
+2	0.9996	0.9996	0.9988
+3	0.9996	0.9996	0.9988

Considerando que as variações do coeficiente de correlação entre as amostras quando deslocadas mostraram ser insignificantes, conclui-se que há ausência de falhas de sincronia nos microcontroladores e que as eventuais discrepâncias entre os relógios dos *Arduinos* não afetaram a coleta, pelo que as análises podem ser desempenhadas como planejado e sem a necessidade de correções. Por esta mesma razão também decidiu-se omitir as tabelas correspondentes à verificação de sincronia dos demais conjuntos de sensores. Entretanto, caso sejam de interesse, podem ser consultadas no Anexo I.

Sem adentrar, por ora, nos méritos da análise, a Figura 6-1 exibe as leituras dos sensores de temperatura do Conjunto A ao longo da primeira execução experimental; a Figura 6-2, por sua vez, ilustra as leituras de umidade relativa do ar nesta mesma execução. Por não apresentarem, visualmente, diferenças significativas, as demais figuras (demais conjuntos e execuções de experimento) foram suprimidas aqui e remetidas ao Anexo I. Note que os dados apresentados pela figura 6-2 apresentam os patamares (platôs) comprimidos, pelo que a presença de ruído em razão da estabilização dos valores se faz muito significativo. Esta é a razão de um segundo perfil experimental dedicado à umidade relativa: corrigir o problema da instabilidade no controle da umidade relativa quando eram estipulados 4 patamares de temperatura.

A Figura 6-3 caracteriza as leituras de um conjunto de sensores de pressão atmosférica medidos durante uma das execuções na câmara climática. Convém ressaltar, novamente, o fato da impossibilidade do controle da pressão atmosférica, restringindo, portanto, os sensores à pressão atmosférica exterior à data da execução, razão pela qual a apresentação destas leituras se dá de maneira diferente para cada uma das execuções experimentais.

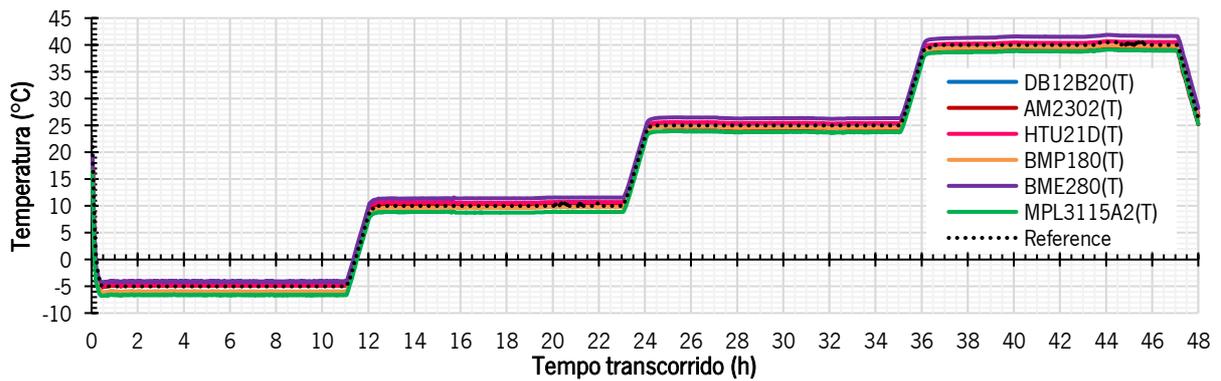


Figura 6-1. Leituras de temperatura do conjunto de sensores A durante a sua primeira execução experimental, ocorrida na primeira rotina.

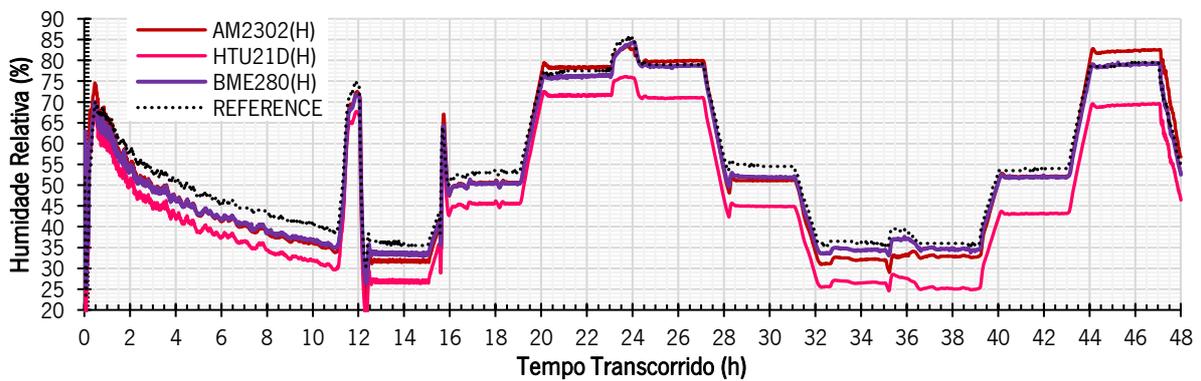


Figura 6-2. Leituras de umidade relativa do conjunto de sensores C, durante a sua primeira execução experimental, ocorrida na primeira rotina.

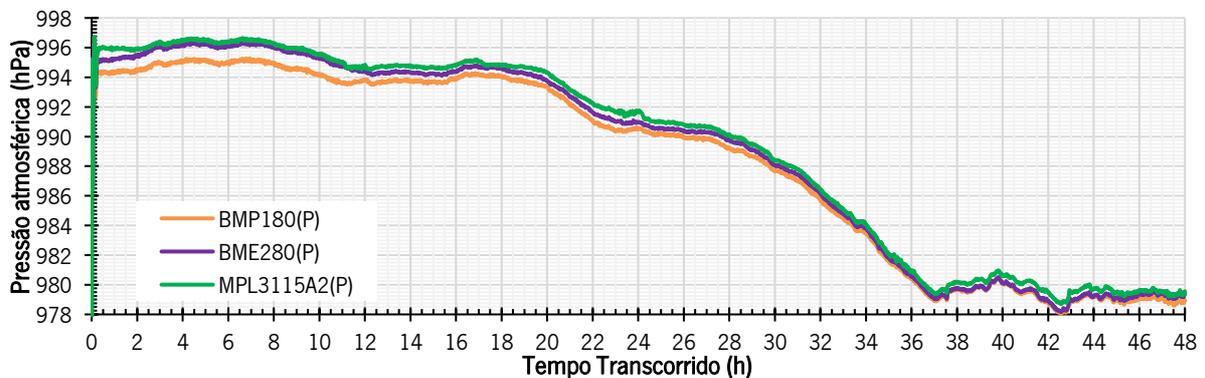


Figura 6-3. Leituras de pressão atmosférica obtidas pelo conjunto de sensores A, durante a sua primeira execução experimental.⁴⁴

Por inspeção visual dos gráficos exibidos pode-se asserir que há integridade, sincronia e coerência dos dados. Sendo assim, as subseções seguintes dedicam-se, finalmente, à análise individual

⁴⁴ Entre os dias 1º e 3 de março de 2017.

de cada uma das grandezas e seus respectivos sensores objetivando enumerar os parâmetros de desempenho individuais.

6.1.1 Temperatura

A análise dos conjuntos de dados de temperatura, ilustrados a título de exemplo na Figura 6-1, está exposta nas tabelas 6-4, 6-5 e 6-6. Estas apresentam os cálculos dos parâmetros estatísticos para a primeira, segunda e terceira execução experimental, respectivamente. As siglas utilizadas nas colunas se explicam por: Méd – média; DP – desvio padrão; cv^{-1} – inverso do coeficiente de variação; EM – erro médio; EMx – erro máximo; EQM – erro quadrático médio. O melhor desempenho individual para cada um dos parâmetros, em cada temperatura, está destacado em azul, ao passo que o pior se destaca em vermelho.

Tabela 6-4. Parâmetros estatísticos calculados para os conjuntos de sensores A e B em cada patamar de temperatura, a partir da primeira execução experimental na câmara de ambiente controlado.

Temperatura:		-5°C						10°C					
Sensor		Parâmetros											
		Méd	DP	cv^{-1}	EM	EMx	EQM	Méd	DP	cv^{-1}	EM	EMx	EQM
Referência		-5,0	0	∞	N/A	N/A	N/A	10,0	0,07	135,9	N/A	N/A	N/A
DS18B20	A	-4,4	0,05	81,1	0,56	0,75	0,56	10,6	0,08	134,8	0,59	0,75	0,60
	B	-4,2	0,09	45,0	0,85	1,06	0,85	11,2	0,06	195,4	1,16	1,25	1,17
AM2302	A	-4,8	0,06	78,3	0,17	0,30	0,18	10,1	0,07	143,4	0,07	0,20	0,12
	B	-4,1	0,05	82,0	0,92	1,10	0,93	10,7	0,06	192,0	0,66	0,80	0,66
HTU21D	A	-4,7	0,04	115,4	0,25	0,40	0,26	10,6	0,06	179,5	0,61	0,72	0,62
	B	-5,3	0,07	77,7	-0,35	-0,62	0,35	10,1	0,05	193,5	0,08	0,22	0,11
BMP180	A	-6,0	0,03	173,3	-0,96	-1,12	0,96	9,7	0,07	134,8	-0,32	-0,72	0,33
	B	-6,3	0,06	101,9	-1,27	-1,48	1,27	9,5	0,06	159,4	-0,48	-0,93	0,48
BME280	A	-4,1	0,04	110,3	0,94	1,06	0,94	11,5	0,08	151,1	1,44	1,58	1,45
	B	-3,0	0,05	61,8	2,03	2,18	2,03	12,2	0,06	217,9	2,17	2,31	2,17
MPL3115A2	A	-6,6	0,05	141,0	-1,60	-1,75	1,60	8,8	0,07	133,8	-1,17	-1,62	1,18
	B	-6,3	0,05	123,0	-1,33	-1,44	1,34	9,0	0,06	140,1	-1,03	-1,50	1,03
Temperatura:		25°C						40°C					
Sensor		Parâmetros											
		Méd	DP	cv^{-1}	EM	EMx	EQM	Méd	DP	cv^{-1}	EM	EMx	EQM
Referência		25,0	0	∞	N/A	N/A	N/A	40,1	0,17	239,5	N/A	N/A	N/A
DS18B20	A	25,3	0,07	363,1	0,29	0,44	0,30	40,1	0,14	293,1	0,03	0,50	0,15
	B	26,0	0,06	456,2	0,95	1,06	0,95	40,8	0,10	412,3	0,76	1,25	0,77
AM2302	A	24,6	0,08	319,8	-0,42	-0,50	0,43	39,2	0,05	766,3	-0,89	-0,90	0,90
	B	25,1	0,06	395,3	0,15	0,30	0,16	39,7	0,13	311,6	-0,38	-1,30	0,41
HTU21D	A	25,5	0,07	383,4	0,52	0,62	0,52	40,4	0,14	289,2	0,35	0,66	0,38
	B	24,9	0,06	386,9	-0,07	-0,18	0,10	39,8	0,11	347,5	-0,27	-0,75	0,30
BMP180	A	24,7	0,07	338,0	-0,33	-0,46	0,34	39,6	0,16	247,5	-0,43	-1,03	0,45
	B	24,6	0,07	346,7	-0,40	-0,53	0,41	39,7	0,14	293,1	-0,38	-1,18	0,40
BME280	A	26,4	0,07	354,8	1,40	1,51	1,40	41,5	0,18	234,9	1,48	1,52	1,49
	B	26,8	0,08	332,9	1,83	1,95	1,83	41,7	0,14	292,8	1,65	1,80	1,65
MPL3115A2	A	23,8	0,08	311,3	-1,17	-1,31	1,17	38,8	0,14	268,2	-1,23	-1,56	1,24
	B	23,8	0,07	330,0	-1,19	-1,31	1,19	38,7	0,14	266,7	-1,40	-2,19	1,40

Tabela 6-5. Parâmetros estatísticos calculados para os conjuntos de sensores A e C em cada patamar de temperatura a partir da segunda execução experimental na câmara de ambiente controlado.

Temperatura:		-5°C					10°C						
Sensor		Parâmetros											
		Méd	DP	cv ⁻¹	EM	EMx	EQM	Méd	DP	cv ⁻¹	EM	EMx	EQM
Referência		-5,02	0,10	49,29	n/a	n/a	n/a	10,08	0,19	53,87	n/a	n/a	n/a
DS18B20	A	-4,50	0,08	59,93	0,52	1,00	0,53	10,58	0,07	151,0	0,50	0,88	0,53
	C	-4,96	0,12	40,05	0,06	-1,25	0,12	10,30	0,05	196,1	0,22	0,69	0,28
AM2302	A	-4,72	0,06	74,68	0,30	0,80	0,31	10,10	0,07	137,3	0,01	-0,40	0,16
	C	-4,87	0,07	67,40	0,15	±0,60	0,17	10,20	0,07	148,1	0,11	0,50	0,21
HTU21D	A	-4,85	0,07	68,86	0,17	-0,70	0,19	10,57	0,06	191,2	0,49	0,84	0,52
	C	-5,17	0,12	44,49	-0,15	-1,48	0,17	10,34	0,05	215,6	0,25	0,70	0,31
BMP180	A	-6,07	0,07	90,23	-1,05	-1,71	1,05	9,64	0,06	151,1	-0,44	-0,84	0,47
	C	-6,06	0,11	56,55	-1,03	-2,29	1,03	9,76	0,05	201,8	-0,33	-0,72	0,37
BME280	A	-4,08	0,07	54,69	0,94	1,48	0,94	11,48	0,07	165,4	1,39	1,65	1,40
	C	-3,05	0,09	34,06	1,97	2,46	1,98	12,15	0,05	237,4	2,06	2,41	2,07
MPL3115A2	A	-6,67	0,07	89,05	-1,65	-2,50	1,64	8,82	0,06	141,0	-1,26	-1,69	1,27
	C	-6,25	0,08	74,40	-1,23	-2,25	1,22	9,24	0,06	165,3	-0,86	-1,25	0,86
Temperatura:		25°C					40°C						
Sensor		Parâmetros											
		Méd	DP	cv ⁻¹	EM	EMx	EQM	Méd	DP	cv ⁻¹	EM	EMx	EQM
Referência		25,00	0,00	∞	n/a	n/a	n/a	40,09	0,21	186,7	n/a	n/a	n/a
DS18B20	A	25,16	0,07	352,2	0,16	0,62	0,17	40,00	0,14	278,6	-0,09	-0,37	0,17
	C	24,97	0,05	476,4	-0,03	0,44	0,06	39,77	0,10	415,2	-0,32	-0,69	0,36
AM2302	A	24,55	0,09	261,5	-0,45	-0,60	0,46	39,19	0,17	227,9	-0,90	-1,20	0,91
	C	24,84	0,08	324,1	-0,16	-0,30	0,18	39,60	0,14	285,4	-0,49	-0,80	0,51
HTU21D	A	25,39	0,06	408,8	0,39	0,83	0,39	40,33	0,13	310,2	0,24	0,59	0,28
	C	25,16	0,05	491,3	0,16	0,58	0,17	40,06	0,12	344,5	-0,03	-0,35	0,15
BMP180	A	24,56	0,07	350,4	-0,44	-0,58	0,46	39,57	0,16	246,9	-0,52	-0,77	0,53
	C	24,73	0,06	416,1	-0,27	-0,40	0,28	39,75	0,14	292,7	-0,34	-0,63	0,37
BME280	A	26,35	0,07	370,9	1,35	1,76	1,35	41,53	0,18	233,3	1,44	1,73	1,45
	C	26,66	0,06	473,4	1,66	2,04	1,66	41,45	0,15	280,5	1,36	1,63	1,37
MPL3115A2	A	23,75	0,07	339,2	-1,25	-1,38	1,25	38,77	0,14	276,2	-1,32	-1,62	1,33
	C	24,08	0,07	337,7	-0,92	-1,06	0,92	39,04	0,16	243,6	-1,05	-1,31	1,06

Tabela 6-6. Parâmetros estatísticos calculados para os conjuntos de sensores A e C em cada patamar de temperatura a partir da terceira execução experimental na câmara de ambiente controlado.

Temperatura:		-5°C					10°C						
Sensor		Parâmetros											
		Méd	DP	cv ⁻¹	EM	EMx	EQM	Méd	DP	cv ⁻¹	EM	EMx	EQM
Referência		-5,0	0,00	∞	n/a	n/a	n/a	10,2	0,24	41,9	n/a	n/a	n/a
DS18B20	B	-3,7	0,06	61,1	1,31	2,31	1,31	11,5	0,07	165,7	1,34	2,12	1,36
	C	-4,8	0,07	68,1	0,24	1,12	0,25	10,4	0,06	162,3	0,17	0,94	0,26
AM2302	B	-4,0	0,06	65,4	0,96	1,60	0,97	10,9	0,07	149,9	0,67	1,10	0,70
	C	-4,9	0,05	94,8	0,13	0,60	0,14	10,2	0,05	189,4	0,04	-0,50	0,21
HTU21D	B	-5,1	0,05	100,9	-0,13	0,88	0,13	10,3	0,06	183,8	0,12	0,37	0,23
	C	-5,0	0,06	86,0	-0,01	0,92	0,06	10,4	0,07	150,7	0,21	0,45	0,28
BMP180	B	-6,2	0,05	120,2	-1,16	-1,26	1,16	9,7	0,07	143,9	-0,49	-0,83	0,53
	C	-6,0	0,06	99,1	-0,98	-1,10	0,98	9,8	0,10	95,7	-0,34	-0,78	0,39
BME280	B	-2,9	0,04	65,6	2,08	2,77	2,08	12,4	0,09	132,5	2,16	2,49	2,17
	C	-3,0	0,05	58,0	2,04	2,68	2,04	12,3	0,14	88,8	2,12	2,39	2,13
MPL3115A2	B	-6,3	0,06	113,0	-1,33	-1,44	1,33	9,2	0,10	95,3	-0,99	-1,44	1,01
	C	-6,2	0,04	149,8	-1,22	-1,31	1,22	9,3	0,08	111,3	-0,90	-1,31	0,92

Tabela 6-6. Parâmetros estatísticos calculados para os conjuntos de sensores A e C em cada patamar de temperatura a partir da terceira execução experimental na câmara de ambiente controlado.

Temperatura:		25°C						40°C					
Sensor		Parâmetros											
		Méd	DP	cv ⁻¹	EM	EMx	EQM	Méd	DP	cv ⁻¹	EM	EMx	EQM
<i>Referência</i>		25,0	0,00	∞	n/a	n/a	n/a	40,2	0,24	163,9	n/a	n/a	n/a
<i>DS18B20</i>	B	26,2	0,07	376,7	1,16	1,75	1,16	41,1	0,14	300,1	0,92	1,25	0,93
	C	25,0	0,05	475,8	0,03	0,44	0,06	39,9	0,11	353,1	-0,31	-0,62	0,34
<i>AM2302</i>	B	25,2	0,09	274,3	0,24	0,50	0,26	39,8	0,13	297,8	-0,32	-0,60	0,35
	C	24,9	0,08	330,8	-0,14	-0,50	0,16	39,6	0,13	313,9	-0,56	-0,90	0,58
<i>HTU21D</i>	B	25,0	0,07	369,6	0,01	0,37	0,07	39,9	0,16	255,9	-0,24	-0,57	0,28
	C	25,2	0,05	506,9	0,25	0,45	0,25	40,2	0,13	309,6	0,00	0,82	0,13
<i>BMP180</i>	B	24,6	0,07	337,7	-0,37	-0,74	0,38	39,8	0,17	237,4	-0,41	-0,66	0,43
	C	24,8	0,05	451,9	-0,15	-0,68	0,16	39,9	0,15	274,1	-0,30	-0,54	0,32
<i>BME280</i>	B	26,9	0,07	365,3	1,88	2,10	1,88	41,8	0,16	263,5	1,61	2,00	1,62
	C	26,8	0,05	511,5	1,84	1,92	1,84	41,6	0,14	292,1	1,45	2,58	1,46
<i>MPL3115A2</i>	B	23,9	0,07	339,6	-1,08	-1,44	1,08	38,8	0,15	251,3	-1,39	-1,69	1,40
	C	24,1	0,07	351,0	-0,87	-1,63	0,88	39,1	0,15	260,4	-1,09	-1,31	1,10

Para prover um melhor entendimento destes números, dar-lhes um significado relevante, os dados serão escrutinados nas subseções a seguir, que se dedicam à aplicação de métricas de desempenho previamente estabelecidas.

6.1.1.1 Precisão

A precisão dos sensores pode ser aferida a partir da interpretação de dois parâmetros especificados nas tabelas da seção anterior: o desvio padrão e a relação sinal-ruído (inverso do coeficiente de variação), esta para indicar se a temperatura ambiente possui influência na precisão do sensor, partindo do pressuposto que a precisão muda ao longo da sua escala de operação. Um sensor totalmente preciso apresentaria valores nulos de desvio-padrão e valores infinitos para a relação sinal-ruído. Isto diria que não há variação nas leituras para o mesmo valor esperado, e o quanto são insignificantes as variações observadas neste patamar. Portanto, quanto mais próximo destas condições o sensor estiver, é possível dizer que mais preciso ele é.

Munindo-se das Tabelas 6-4, 6-5 e 6-6 como dados referenciais, é possível por alguma luz sobre o desempenho dos sensores quanto à sua precisão. Portanto a Tabela 6-7 compila o desvio padrão e a relação sinal-ruído, relevantes para determinação da precisão dos sensores de temperatura. Foi suprimida a terceira casa decimal do desvio-padrão.

Tabela 6-7. Compilação de dados de desempenho para a análise de precisão dos sensores de temperatura.

Sensor	Instância	Ensaio	Desvio Padrão (DP)				Inverso do coeficiente de variação (cv ¹)			
			-5°C	10°C	25°C	40°C	-5°C	10°C	25°C	40°C
DS18B20	A	1	0,05	0,07	0,07	0,14	81,1	135,9	363,1	293,1
		2	0,08	0,07	0,07	0,14	59,3	151,0	352,2	278,6
	B	1	0,06	0,06	0,06	0,10	78,3	195,4	456,2	412,3
		2	0,06	0,07	0,07	0,14	61,1	165,7	376,7	300,1
	C	1	0,12	0,05	0,05	0,10	40,05	196,1	476,4	415,2
		2	0,07	0,06	0,05	0,11	68,1	162,3	475,8	353,1
AM2302	A	1	0,06	0,07	0,08	0,05	78,3	143,4	319,8	766,3
		2	0,06	0,07	0,09	0,17	74,68	137,3	261,5	227,9
	B	1	0,05	0,06	0,06	0,13	82	192,0	395,3	311,6
		2	0,06	0,07	0,09	0,13	65,4	149,9	274,3	297,8
	C	1	0,07	0,07	0,08	0,17	67,40	148,1	324,1	285,4
		2	0,05	0,05	0,08	0,13	94,8	189,4	330,8	313,9
HTU21D	A	1	0,04	0,06	0,07	0,14	115,4	179,5	383,4	289,2
		2	0,07	0,06	0,06	0,13	68,86	191,2	408,8	310,2
	B	1	0,07	0,05	0,06	0,11	77,7	193,5	386,9	347,5
		2	0,05	0,06	0,07	0,16	100,9	183,8	369,6	255,9
	C	1	0,12	0,05	0,05	0,12	44,49	215,6	491,3	344,5
		2	0,06	0,07	0,05	0,13	86,0	150,7	506,9	309,6
BMP180	A	1	0,03	0,07	0,07	0,16	173,3	134,8	338,0	247,5
		2	0,07	0,06	0,07	0,16	90,23	151,1	350,4	246,9
	B	1	0,06	0,06	0,07	0,14	101,9	159,4	346,7	293,1
		2	0,05	0,07	0,07	0,17	120,2	143,9	337,7	237,4
	C	1	0,11	0,05	0,06	0,14	56,55	201,8	416,1	292,7
		2	0,06	0,10	0,05	0,15	99,1	95,7	451,9	274,1
BME280	A	1	0,04	0,08	0,07	0,18	110,3	151,1	354,8	234,9
		2	0,07	0,07	0,07	0,18	54,69	165,4	370,9	233,3
	B	1	0,05	0,06	0,08	0,14	61,8	217,9	332,9	292,8
		2	0,04	0,09	0,07	0,16	65,6	132,5	365,3	263,5
	C	1	0,09	0,05	0,06	0,15	34,06	237,4	473,4	280,5
		2	0,05	0,15	0,05	0,14	58,0	88,8	511,5	292,1
MPL3115A2	A	1	0,05	0,07	0,08	0,14	141,0	133,8	311,3	268,2
		2	0,07	0,06	0,07	0,14	89,05	141,0	339,2	276,2
	B	1	0,05	0,06	0,07	0,14	123,0	140,1	330,0	266,7
		2	0,06	0,10	0,07	0,15	113,0	95,3	339,6	251,3
	C	1	0,08	0,06	0,07	0,16	74,40	165,3	337,7	243,6
		2	0,04	0,08	0,07	0,15	149,8	111,3	351,0	260,4

Embora já seja possível analisar numericamente a precisão dos sensores a partir das condições predefinidas, estes dados se apresentados graficamente através do Diagrama de Caixa tornam a interpretação mais amigável, permitindo a identificação visual de padrões de comportamento nas diferentes faixas de temperatura. Deste modo, as Figuras 6-19, 6-20, 6-21, 6-22, 6-23 e 6-24 ilustram diagramas auxiliares para avaliação do desempenho de precisão cada sensor (DS12B20, AM2302, HTU21D, BMP180, BME280 e MPL3115A2, respetivamente), sem distinção de conjunto ou

experimento, contendo tanto o desvio padrão quanto a relação sinal-ruído das leituras de temperatura. Como um bom indicativo de precisão, espera-se que as caixas sejam o mais próximo o possível do nível “0” (desvio nulo), bem como apresentar maiores valores para a relação sinal-ruído. O tamanho das caixas, por sua vez, indica qualitativamente a reprodutibilidade destes sensores: quanto mais estreita a caixa for, mais reprodutível aquele tipo de sensor é naquela faixa de temperatura.

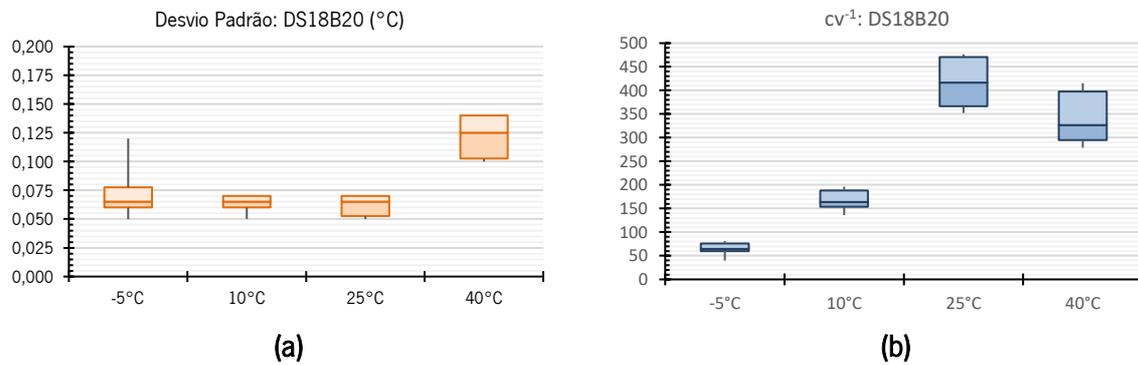


Figura 6-4. Diagrama de caixas para avaliação da precisão do sensor DS18B20. (a) Desvio padrão das leituras de temperatura; (b) cv^{-1} das leituras de temperatura.

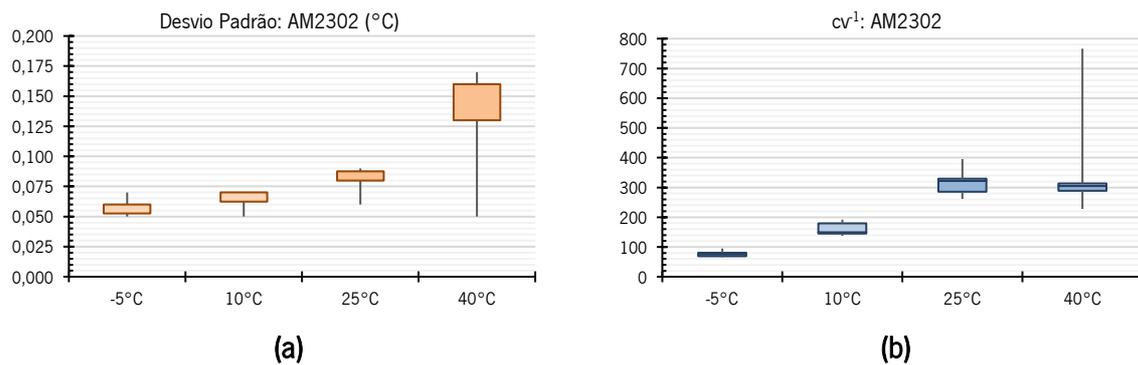


Figura 6-5. Diagrama de caixas para avaliação da precisão do sensor AM2302. (a) Desvio padrão das leituras de temperatura; (b) cv^{-1} das leituras de temperatura.

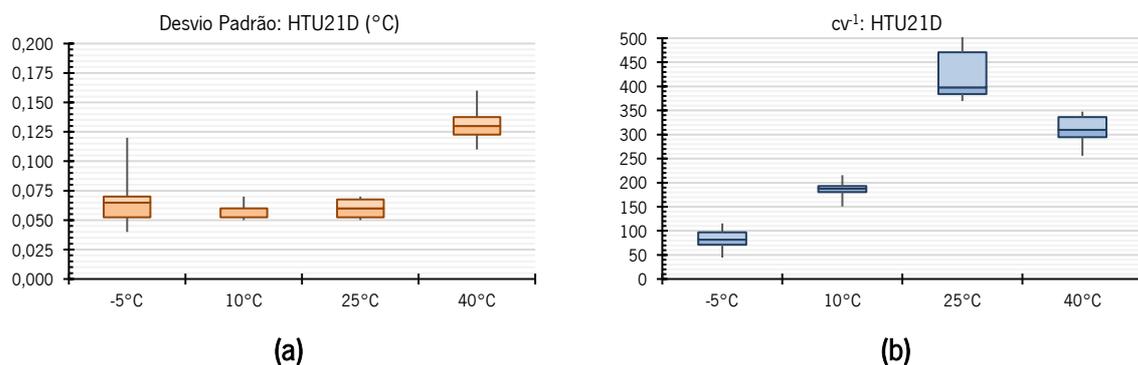
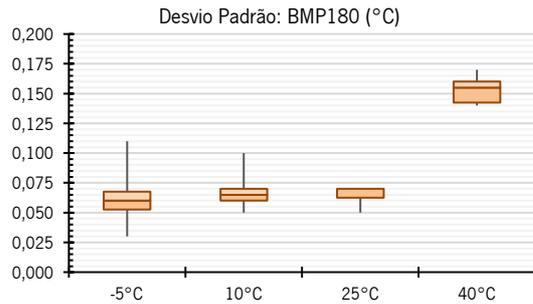
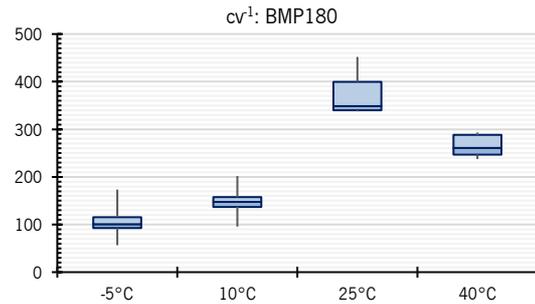


Figura 6-6. Diagrama de caixas para avaliação da precisão do sensor HTU21D. (a) Desvio padrão das leituras de temperatura; (b) cv^{-1} das leituras de temperatura.

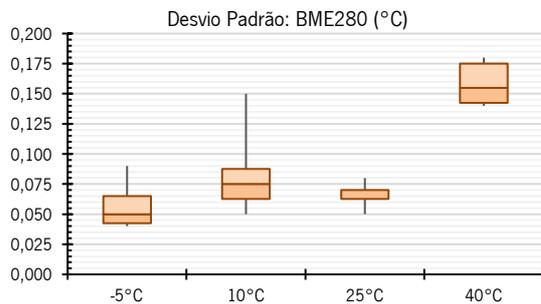


(a)

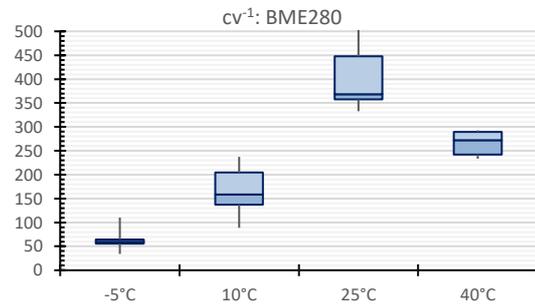


(b)

Figura 6-7. Diagrama de caixas para avaliação da precisão do sensor BMP180. (a) Desvio padrão das leituras de temperatura; (b) cv^{-1} das leituras de temperatura.

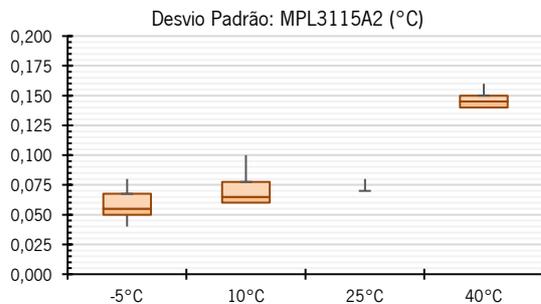


(a)

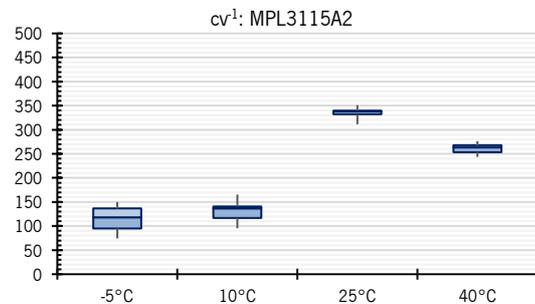


(b)

Figura 6-8. Diagrama de caixas para avaliação da precisão do sensor BME280. (a) Desvio padrão das leituras de temperatura; (b) cv^{-1} das leituras de temperatura.



(a)



(b)

Figura 6-9. Diagrama de caixas para avaliação da precisão do sensor MPL3115A2. (a) Desvio padrão das leituras de temperatura; (b) cv^{-1} das leituras de temperatura.

Por inspeção visual dos padrões nos diagramas acima, há evidência de que a precisão dos sensores sofre influência da temperatura, assim como a sua reprodutibilidade. Isso é justificado pelo fato de as caixas apresentarem distinções tanto nas distâncias do nível zero de desvio padrão quanto nas suas espessuras. Todos os sensores apresentaram menor precisão na faixa de 40°C, podendo-se dizer,

portanto, que a precisão dos sensores decai conforme a temperatura sobe, sendo mais evidente acima dos 25°C. Entretanto, apesar da presença de desvios nas quatro faixas de temperatura, em nenhuma situação foi observado um desvio padrão acima de 0.2°C, que é a incerteza limite conforme recomendação da Organização Mundial de Meteorologia para medições de temperatura do ar (WMO, 2008). A relação sinal-ruído, por sua vez, evidencia um decréscimo de desempenho acima dos 25°C, uma vez que na faixa de 40°C as caixas estão mais abaixo que as caixas de 25°C, interrompendo uma tendência de crescimento que se observa nas três primeiras faixas. Com relação à reprodutibilidade dos sensores, os melhores resultados foram observados em 10°C e 25°C, com exceção do sensor BME280, que apresentou desempenhos divergentes na faixa de 10°C, tendo seu melhor desempenho apenas em 25°C.

Diante dos dados obtidos, é possível dizer que os sensores avaliados apresentam precisão satisfatória e adequada aos padrões recomendados para medições de temperatura em aplicações ambientais urbanas (considerando uma variação hipotética de -5°C a 40°C).

6.1.1.2 Exatidão

A exatidão dos sensores é investigada pela análise dos erros, ou desvios, absolutos e quadrático médio dos sensores enquanto estáveis nos patamares configurados na câmara climática, uma vez que a exatidão está relacionada a proximidade entre um valor estimado e o valor real, neste caso, o valor medido pelo sensor e o valor da referência. Bons indicativos de exatidão são valores mínimos de erro médio e erro quadrático médio (*RMSE*), ou seja, um sensor idealmente exato apresentaria os erros médio absoluto e médio quadrático iguais a zero. Convém ressaltar que o erro médio absoluto também é utilizado na identificação de viés e, portanto, na avaliação da justeza dos dados dos sensores.

A Tabela 6-8 compila os números de todas as execuções experimentais que servirão à análise da exatidão dos sensores de temperatura. Como o comportamento da temperatura fora programado previamente, foi possível extrair estes dados em janelas específicas de tempo em intervalos de estabilidade dos patamares de temperatura (e, quando o caso, umidade).

Tabela 6-8. Compilação de dados de desempenho para análise de exatidão dos sensores de temperatura.

Sensor	Tipo	Ensaio	Erro Médio				Erro Quadrático Médio			
			-5°C	10°C	25°C	40°C	-5°C	10°C	25°C	40°C
DS18B20	A	1	0,56	0,59	0,29	0,03	0,56	0,60	0,30	0,15
		2	0,52	0,50	0,16	-0,09	0,53	0,53	0,17	0,17
	B	1	0,82	1,16	0,95	0,76	0,85	1,17	0,95	0,77
		2	1,31	1,34	1,16	0,92	1,31	1,36	1,16	0,93
	C	1	0,06	0,22	-0,03	-0,32	0,12	0,28	0,06	0,36
		2	0,24	0,17	0,03	-0,31	0,25	0,26	0,06	0,34
AM2302	A	1	0,17	0,07	-0,42	-0,89	0,18	0,12	0,43	0,90
		2	0,30	0,01	-0,45	-0,90	0,31	0,16	0,46	0,91
	B	1	0,92	0,66	0,15	-0,38	0,93	0,66	0,16	0,41
		2	0,96	0,67	0,24	-0,32	0,97	0,70	0,26	0,35
	C	1	0,15	0,11	-0,16	-0,49	0,17	0,21	0,18	0,51
		2	0,13	0,04	-0,14	-0,56	0,14	0,21	0,16	0,58
HTU21D	A	1	0,25	0,61	0,52	0,35	0,26	0,62	0,52	0,38
		2	0,17	0,49	0,39	0,24	0,19	0,52	0,39	0,28
	B	1	-0,35	0,08	-0,07	-0,27	0,35	0,11	0,10	0,30
		2	-0,12	0,12	0,01	-0,24	0,13	0,23	0,07	0,28
	C	1	-0,15	0,25	0,16	-0,03	0,17	0,31	0,17	0,15
		2	-0,01	0,21	0,25	0,00	0,06	0,28	0,25	0,13
BMP180	A	1	-0,96	-0,32	-0,33	-0,43	0,96	0,33	0,34	0,45
		2	-1,05	-0,44	-0,44	-0,52	1,05	0,47	0,45	0,53
	B	1	-1,27	-0,48	-0,40	-0,38	1,27	0,48	0,41	0,40
		2	-1,16	-0,49	-0,37	-0,41	1,16	0,53	0,38	0,43
	C	1	-1,03	-0,33	-0,27	-0,34	1,03	0,37	0,28	0,37
		2	-0,98	-0,34	-0,15	-0,30	0,98	0,39	0,13	0,32
BME280	A	1	0,94	1,44	1,40	1,48	0,94	1,45	1,40	1,49
		2	0,94	1,39	1,35	1,44	0,94	1,40	1,35	1,45
	B	1	2,03	2,17	1,83	1,65	2,03	2,17	1,83	1,65
		2	2,08	2,16	1,88	1,61	2,08	2,17	1,88	1,62
	C	1	0,94	2,06	1,66	1,36	1,98	2,07	1,66	1,37
		2	2,04	2,12	1,84	1,45	2,04	2,13	1,84	1,46
MPL3115A2	A	1	-1,60	-1,17	-1,17	-1,23	1,60	1,18	1,17	1,24
		2	-1,65	-1,26	-1,25	-1,32	1,64	1,27	1,25	1,33
	B	1	-1,33	-1,03	-1,19	-1,40	1,34	1,03	1,19	1,40
		2	-1,33	-0,99	-1,08	-1,39	1,33	1,01	1,08	1,40
	C	1	-1,23	-0,84	-0,92	-1,05	1,22	0,86	0,92	1,06
		2	-1,22	-0,90	-0,87	-1,09	1,22	0,92	0,88	1,10

Percebe-se nos dados expostos que há valores positivos e negativos no erro médio. Isto se deve ao fato de que o cálculo foi efetuado tomando-se o valor médio do sensor como base, e subtraindo-se o valor médio da referência. Portanto, valores positivos indicam que os valores médios são maiores que a referência, e valores negativos indicam valor médio abaixo da referência. Ou seja, o sinal indica a presença de um viés, que também será investigado na justeza.

A representação gráfica dos números expostos é apresentada na Figura 6-10, que mostra marcações dos erros absolutos médios de cada sensor unitário

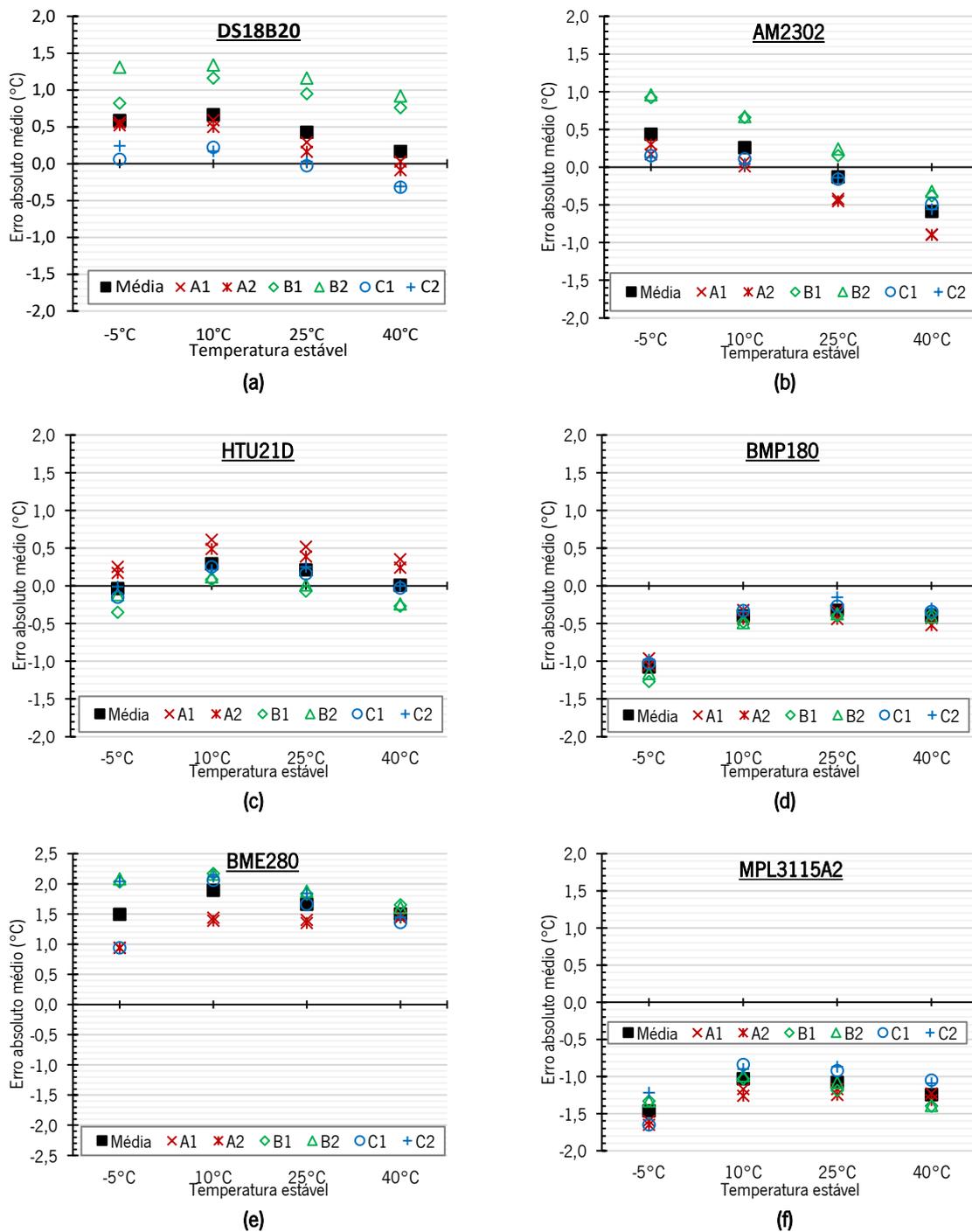


Figura 6-10. Erro Médio individual dos sensores de temperatura. (a) DS18B20; (b) AM2302; (c) HTU21D; (d) BMP180; (e) BME280; (f) MPL3115A2

O desempenho médio geral de cada modelo de sensor. A Figura 6-11, por sua vez, sobrepõe o desempenho geral de todos os sensores ao longo dos patamares medidos, podendo se observar a variação do erro médio conforme há mudança na temperatura ambiente.

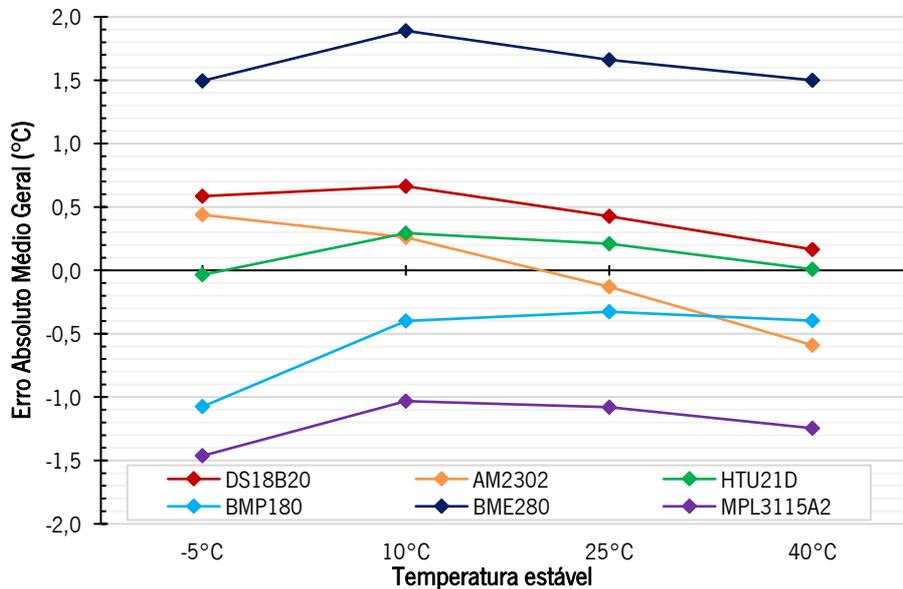


Figura 6-11. Comparativo geral dos erros absolutos médios dos sensores de temperatura.

A partir destes gráficos é possível notar a concordância de comportamento de um sensor individual em suas duas medições experimentais, tendo sido – entretanto – observada a maior discrepância para um mesmo sensor entre suas duas execuções no sensor DS18B20 em -5°C. Adicionalmente, nota-se que uma quantidade considerável de medições apresentou um erro que excede o máximo recomendado pela WMO, de 0,3°C. Ainda, alguns sensores excederam sua própria exatidão nominal, sugerindo que estes sensores podem não ter sido calibrados em fábrica, ou, ainda, ultrapassaram o prazo de vigência da calibração – caso tenha sido feita. Por outro lado, caso uma correção de desvio (“*offset*”) fosse introduzida, a maior parte dos sensores não violaria a recomendação da WMO. Para fins demonstrativos de análise, e já apontando uma possível técnica de correção, será utilizada a média total de desvios de cada sensor como fator de autocorreção. A Figura 6-12, portanto, exhibe o comportamento destes sensores em comparação com os requisitos de desempenho da WMO após este ajuste. A região destacada em verde é a região de interesse.

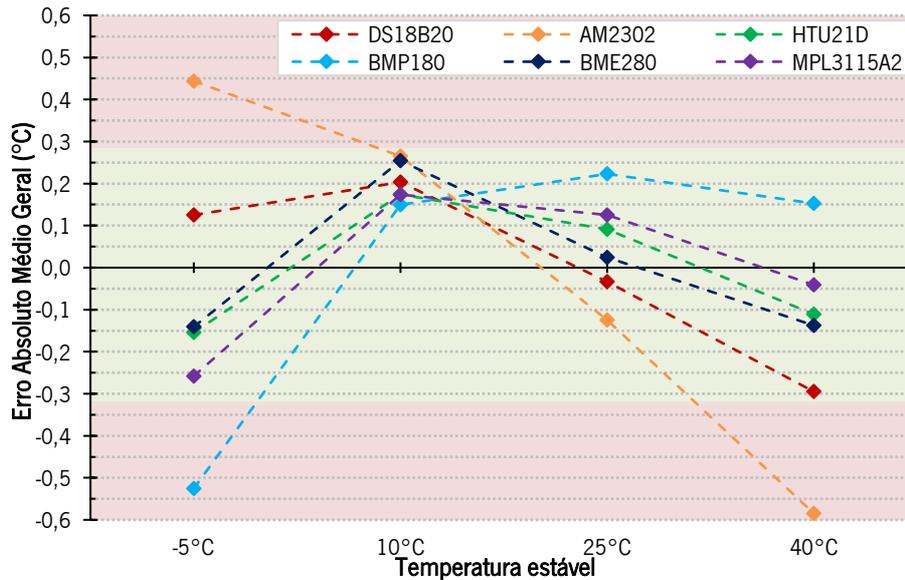


Figura 6-12. Comparativo geral de erros médios absolutos após compensação aritmética por desvio médio com visualização de concordância ao requisito de erro da Organização Mundial de Meteorologia.

Apesar de, visualmente, a maior parte das médias gerais estarem contidas dentro da região de interesse, esta correção ainda seria ineficaz caso houvesse uma inspeção individual aos sensores, uma vez que os valores individuais oscilaram em torno dos pontos médios anotados na figura. Ademais, foi aplicada correção em alguns sensores que não precisariam desta. De todo modo, este recurso foi exemplificado por poder ser utilizado por indivíduos não-treinados engajados em uma campanha de monitoramento, uma vez que não há complexidade matemática envolvida em uma simples operação aritmética aplicada à saída do sensor. O ponto chave seria identificar a correção de desvio necessária para cada sensor, em individual. No Capítulo 7 serão apresentadas propostas sobre estas correções. Dos 6 sensores corrigidos, 4 manteriam suas médias gerais de erro dentro da faixa recomendada de $\pm 0,3^{\circ}\text{C}$: DS18B20, HTU21D, BME280 e MPL3115A2. O sensor AM2302 excedeu os limites para temperaturas de operação de -5°C e 40°C . Como sua curva de erros assemelha-se a uma reta com coeficiente angular negativo, sugere-se que há a necessidade de uma correção de sensibilidade. O sensor BMP180 excedeu o limite recomendado em -5°C , mas manteve seu comportamento nas demais temperaturas dentro da região de interesse, o que sugere que poderia ser utilizado em centros urbanos de regiões tropicais ou subtropicais (onde não há temperaturas muito baixas), caso os requisitos oficiais pudessem ser flexibilizados em função das características do local de monitoramento.

Em sua redação específica sobre os termômetros elétricos, a WMO não faz menção aos termômetros semicondutores, e refere-se apenas aos termopares e termo resistores (RTD) (WMO, 2008). Destaca-se,

ainda, que apesar de explicitar a recomendação do erro máximo atingível de 0.3° , ela própria, em sua redação de “requisitos de exatidão” (ao qual utiliza o termo “*accuracy*” como uma combinação de outros parâmetros, como “incerteza” e “erro máximo”), assume que não é barato (nem simples) ter um termômetro que – naturalmente – atenda aos requisitos e sugere que os sensores possam ser utilizados com correções, desde que as leituras corrigidas estejam contidas dentro dos requisitos e que as correções respeitem algumas condições, como, por exemplo, a amplitude máxima de correção (diferença entre o menor e o maior ajuste) ser de 0.5°C . Esta afirmação sugere que os critérios recomendados são demasiadamente rigorosos, mas que, ainda assim, boa parte dos sensores aqui estudados conseguem atingi-los.

Por outro lado, se olharmos para a exatidão sugerida pelos fabricantes dos sensores (também apontada em sua folha de dados com o termo “*accuracy*”; consultar Tabela 4-1), verifica-se que os erros médios após a correção geral dos desvios atendem, em sua maioria, aos valores ali informados. A exemplo: os sensores DS18B20, AM2302, BMP180 e BME280 apresentam exatidão nominal de 0.5°C , e atingiram este desempenho à exceção do DS18B20 em -5°C e do AM2302 em 40°C . O HTU21D traz a exatidão nominal de 0.3°C , e atende ao esperado. O MPL3115A2, por fim, ilustra uma exatidão menos rigorosa, de 1.0°C , entretanto seu resultado médio o manteve dentro do patamar desejado de 0.3°C , significativamente melhor que o esperado.

Com relação à exatidão dos sensores durante o seu comportamento dinâmico, foi calculado o erro quadrático médio (ou “*RMSE*”, como encontrado na literatura em língua inglesa) dos sensores durante os segmentos em que há variação da temperatura (estes mesmos intervalos, inclusive, são utilizados para calcular os parâmetros de justeza na seção seguinte a esta). O erro quadrático médio obtido durante a dinâmica dos sensores é, portanto, comparado com os valores obtidos em estabilidade (já apresentados na Tabela 6-8), para investigar se o comportamento destes sensores, com relação à exatidão, é uniforme. Ou seja, se o sensor mantém seu nível de exatidão quer em estabilidade, quer em dinâmica. Esses resultados, para os vários sensores, apresentam-se na Tabela 6-9.

Tabela 6-9. Erros Quadráticos Médios dos sensores durante o comportamento dinâmico, e um comparativo com os parâmetros obtidos em comportamento estático.

Sensor	Erro Quadrático Médio dinâmico						Erro Quadrático Médio estático				Comparação das médias	
	A		B		C		geral				Dinâm.	Estát.
	1	2	1	2	1	2	-5°C	10°C	25°C	40°C		
DS18B20	0.68	1.27	1.20	1.74	1.09	0.59	0.60	0.70	0.45	0.45	1.09	0.55
AM2302	0.37	0.51	0.65	0.85	1.03	0.39	0.45	0.34	0.28	0.61	0.63	0.42
HTU21D	0.61	1.34	0.38	0.44	0.49	0.51	0.19	0.35	0.25	0.25	0.63	0.26
BMP180	0.64	0.38	0.78	0.39	0.49	0.35	1.08	0.43	0.33	0.42	0.50	0.57
BME280	1.28	2.10	1.77	2.18	2.43	1.99	1.67	1.90	1.66	1.51	1.96	1.69
MPL3115A2	1.19	0.60	1.49	0.82	0.72	1.09	1.39	1.05	1.08	1.26	0.99	1.19

Estes dados apontam que alguns sensores podem mudar sua exatidão quando há variação de temperatura. Se por um lado os sensores BMP180, BME280 e MPL3115A2 apresentaram resultados relativamente semelhantes nos dois cenários (estático e dinâmico), os demais sensores (DS18B20, AM2302 e HTU21D) diferiram, pelo menos, em mais de 20% entre as médias de EQM estático e dinâmico, com as maiores médias de valores sendo observadas no cenário dinâmico. Uma justificativa plausível para explicar uma deterioração da exatidão durante variações de temperatura seria a inadequada constante de tempo do sensor, fazendo com que este se atrase na resposta dinâmica. Como ao início deste capítulo a sincronia foi atestada por um teste (ver Tabela 6-1), foi rejeitada a hipótese de uma falha de sincronia ter influenciado negativamente no desempenho dinâmico da exatidão destes sensores.

6.1.1.3 Justeza

A justeza compreende o conceito de “veracidade” da informação. Neste estudo ela é representada pela verificação de o quanto os dados podem ser representados por um modelo matemático linear, que será obtido das leituras nas regiões em que há a variação controlada da temperatura. O modelo linear é representado na forma $y = \alpha + \beta x$, onde: y é a saída do modelo (temperatura lida pelo sensor); x é a entrada do modelo (temperatura “real”); α é a interseção no eixo y , ou viés quando a temperatura esperada é 0°C; β é o coeficiente angular da reta, relacionada à sensibilidade ou ganho (quando maior que 1, há uma majoração – pelo sensor – da temperatura lida; quando menor que 1 há uma minoração da temperatura lida). A Tabela 6-10 resume as interpretações possíveis para o modelo linear, considerando a expectativa de um sensor ideal com $\alpha=0$ e $\beta=1$, ou seja, uma relação descrita por $\hat{y} = 1.00x$, onde \hat{y} é a saída do sensor e x é o valor lido pela referência. As leituras dos sensores nos patamares estáveis de temperatura não foram incluídas desta análise, pelo que esta deseja aferir a

justeza utilizando dados dos sensores em períodos de variação (situação dinâmica). Os modelos obtidos serão utilizados para comparar sua saída (valores previstos) com os valores lidos das temperaturas nas faixas de estabilidade (-5°C, 10°C, 25°C e 40°C). Ainda será apresentada o coeficiente de determinação R^2 , que dita o quão fidedigno o modelo representa os dados analisados. Valores de R^2 próximos a 1 são tidos como excelentes índices de correlação, pois indicam o quanto os sensores acompanharam as leituras da referência. As Figuras 6-13, 6-14, 6-15, 6-16, 6-17 e 6-18 trazem agrupados os gráficos de dispersão dos sensores de temperatura (DS18B20, AM2302, HTU21D, BMP180, BME280 e MPL3115A2, respetivamente), separados por unidade, junto dos modelos lineares e coeficientes de determinação (para a primeira e segunda execução, respetivamente).

Tabela 6-10. Possíveis interpretações qualitativas dos modelos lineares a serem obtidos dos sensores, comparados com um modelo ideal para $\alpha=0$ e $\beta=1$.

α	β	Interpretação
(+) $\alpha > 0$	< 1	• Viés positivo quando a temperatura de referência é igual a 0°;
		• Erro em temperaturas negativas diretamente proporcional à magnitude de alfa;
	> 1	• Sensor com menor ganho que referência;
		• Erro em temperaturas mais elevadas diretamente proporcional à magnitude de alfa;
(-) $\alpha < 0$	< 1	• Sensor com maior ganho que referência
		• Viés negativo quando a temperatura de referência é igual a 0°;
	> 1	• Erro em temperaturas mais elevadas diretamente proporcional à magnitude de alfa;
		• Sensor com menor ganho que referência

A Tabela 6-11, por sua vez, contém os modelos lineares obtidos para cada série de dados pelo método dos mínimos quadrados, totalizando seis modelos para cada tipo de sensor, e seus respetivos coeficientes de determinação (R^2).

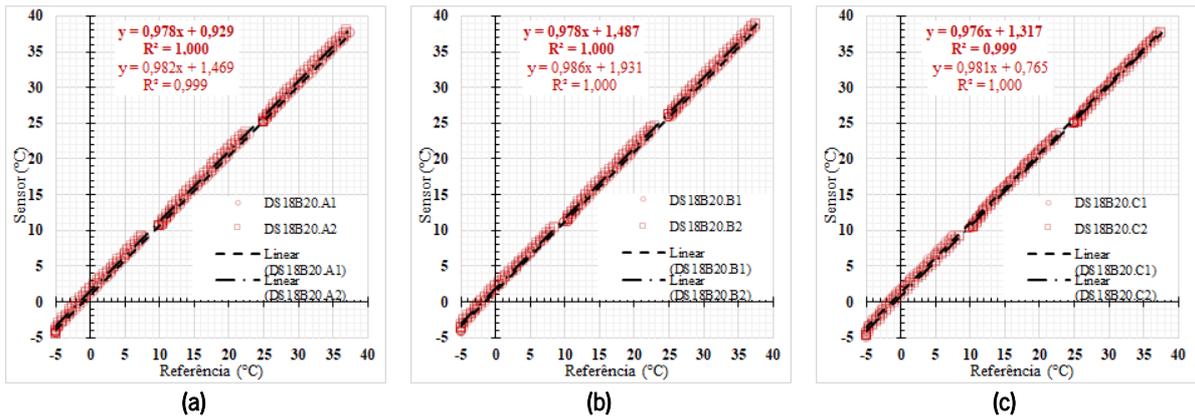


Figura 6-13. Gráficos de dispersão das unidades A (a), B (b) e C (c) do sensor de temperatura DS18B20 nas suas duas execuções experimentais (1 e 2).

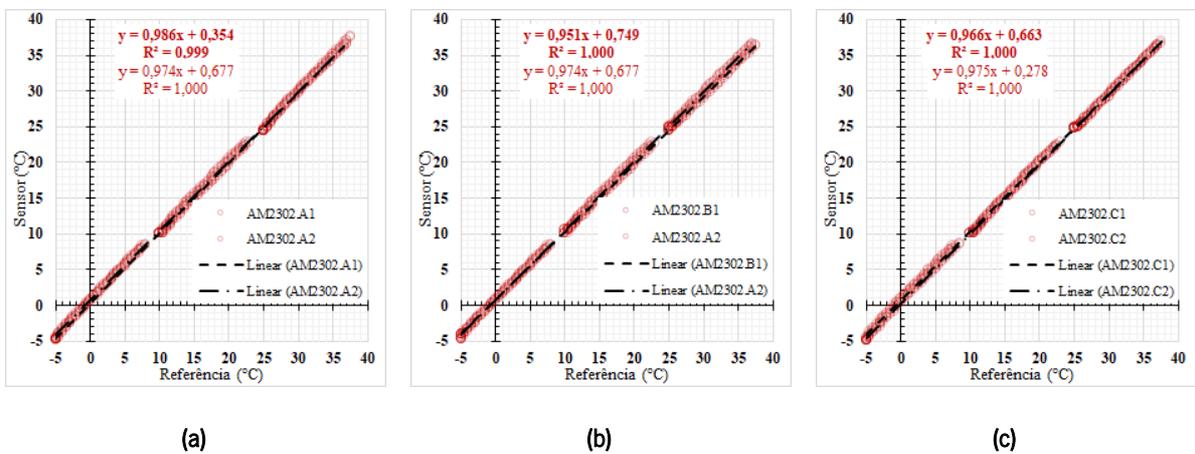


Figura 6-14. Gráficos de dispersão das unidades A (a), B (b) e C (c) do sensor de temperatura AM2302 nas suas duas execuções experimentais (1 e 2).

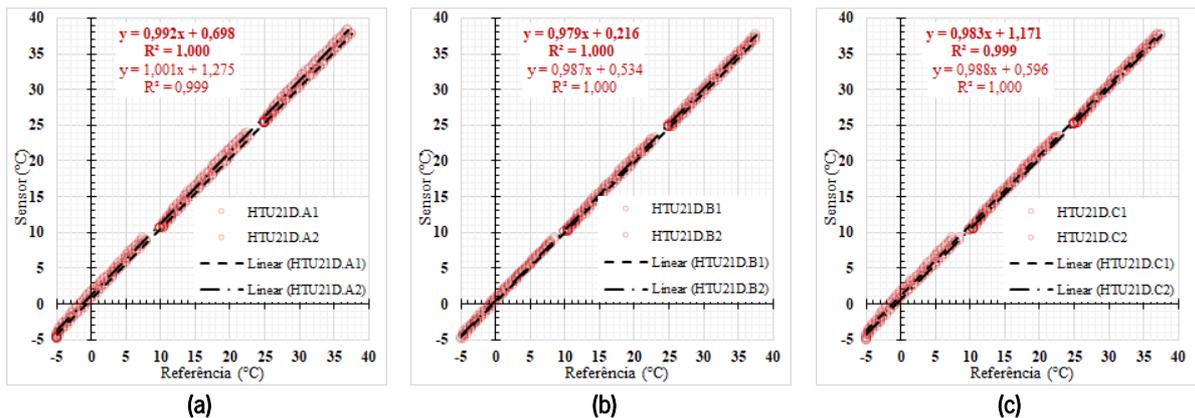


Figura 6-15. Gráficos de dispersão das unidades A (a), B (b) e C (c) do sensor de temperatura HTU21D nas suas duas execuções experimentais (1 e 2).

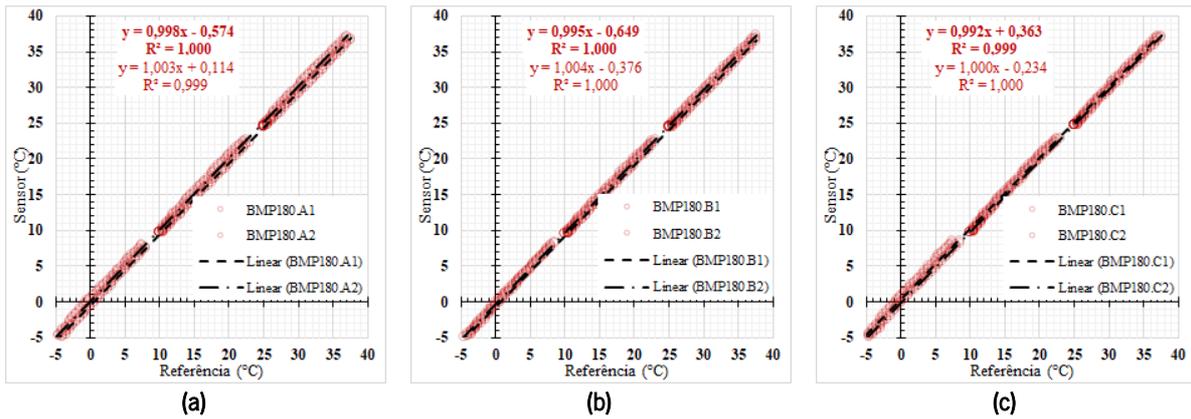


Figura 6-16. Gráficos de dispersão das unidades A (a), B (b) e C (c) do sensor de temperatura BMP180 nas suas duas execuções experimentais (1 e 2).

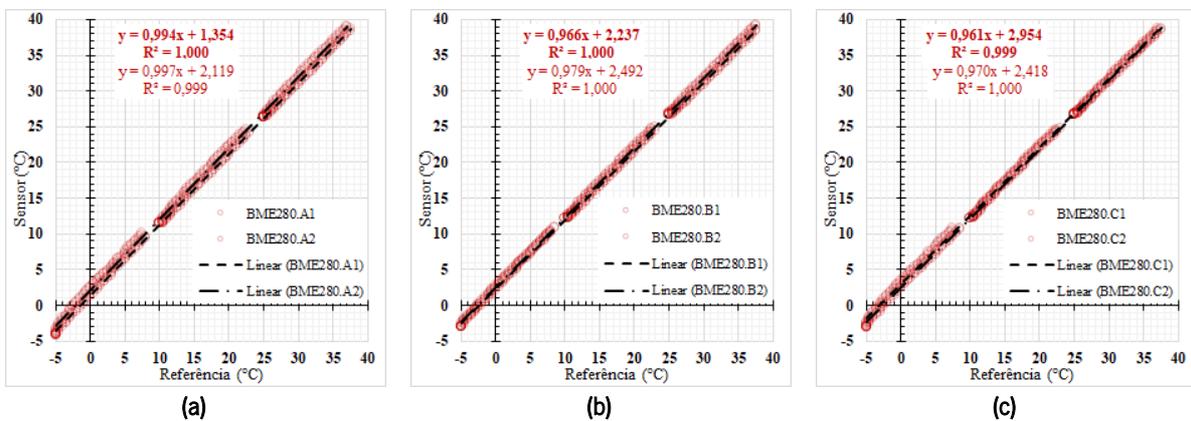


Figura 6-17. Gráficos de dispersão das unidades A (a), B (b) e C (c) do sensor de temperatura BME280 nas suas duas execuções experimentais (1 e 2).

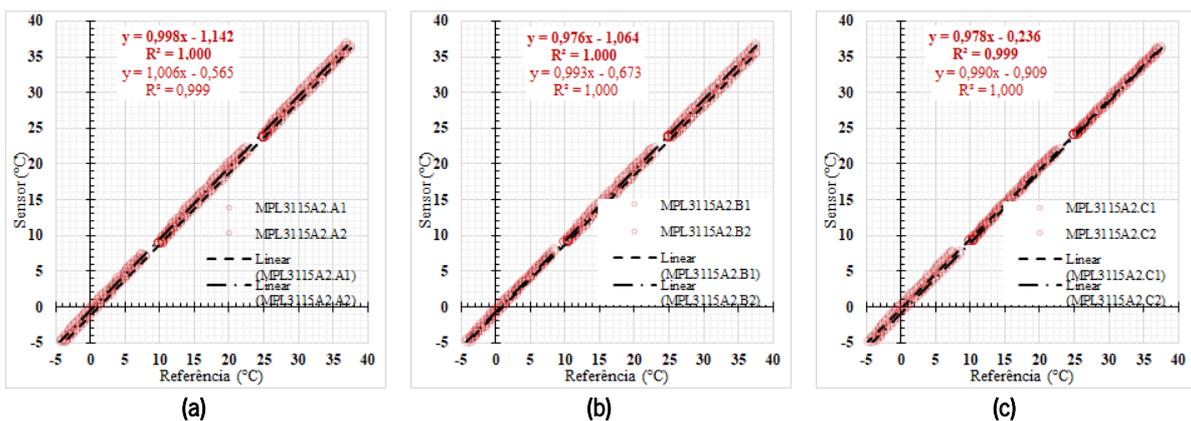


Figura 6-18. Gráficos de dispersão das unidades A (a), B (b) e C (c) do sensor de temperatura MPL3115A2 nas suas duas execuções experimentais (1 e 2).

Tabela 6-11. Parâmetros individuais e médios dos modelos lineares obtidos dos sensores de temperatura investigados a partir das execuções experimentais.

Sensor	Execução	α	β	R^2	
DS18B20	A	1	0.929	0.978	1.000
		2	1.469	0.982	0.999
	B	1	1.487	0.978	1.000
		2	1.931	0.986	1.000
	C	1	1.317	0.976	0.999
		2	0.765	0.981	1.000
	Média:	1,316	0,980	-	
AM2302	A	1	0.354	0.986	0.999
		2	0.677	0.974	1.000
	B	1	0.749	0.951	1.000
		2	1.238	0.966	1.000
	C	1	0.663	0.966	1.000
		2	0.278	0.975	1.000
	Média:	0.660	0.970	-	
HTU21D	A	1	0.698	0.992	1.000
		2	1.275	1.001	0.999
	B	1	0.216	0.979	1.000
		2	0.534	0.987	1.000
	C	1	1.171	0.983	0.999
		2	0.596	0.988	1.000
	Média:	0.748	0.988	-	
BMP180	A	1	-0.574	0.998	1.000
		2	0.114	1.003	0.999
	B	1	-0.649	0.995	1.000
		2	-0.376	1.004	1.000
	C	1	0.363	0.992	0.999
		2	-0.234	1.000	1.000
	Média:	-0.226	0.999	-	
BME280	A	1	1.354	0.994	1.000
		2	2.119	0.997	0.999
	B	1	2.237	0.996	1.000
		2	2.492	0.979	1.000
	C	1	2.954	0.961	0.999
		2	2.418	0.970	1.000
	Média:	2.262	0.983	-	
MPL3115A2	A	1	-1.142	0.998	1.000
		2	-0.565	1.006	0.999
	B	1	-1.064	0.976	1.000
		2	-0.673	0.993	1.000
	C	1	-0.236	0.978	0.999
		2	-0.909	0.990	1.000
	Média:	-0.765	0.990	-	

Um modelo estimador médio comum para cada tipo de sensor foi obtido a partir das médias dos parâmetros α e β . Este estimador médio comum é testado com os valores padrão (-5°C, 10°C, 25°C e 40°C) e comparado com as médias obtidas pelos sensores na análise estática. Espera-se, em termos

qualitativos de justeza, que as diferenças entre os valores estimados pelo modelo e os reais, lidos, sejam as menores possíveis. A Tabela 6-12 exhibe a comparação entre as temperaturas esperadas, estimadas (obtidas a partir dos modelos lineares, em que a leitura do sensor é uma função da leitura da referência) e as médias gerais observadas por cada tipo de sensor.

Tabela 6-12. Comparativo entre a temperatura esperada, temperatura estimada pelo modelo linear comum e a temperatura média geral lida por cada sensor nos experimentos.

SENSOR	ESTIMADOR MÉDIO COMUM	TEMPERATURA MÉDIA GERAL(°C)		
		Guia	Estimativa (modelo)	Observada (experimental)
DS18B20	$\hat{t} = 1.316 + 0.980t$	-5	-3.6	-4.4
		10	11.1	10.7
		25	25.8	25.4
		40	40.5	40.2
AM2302	$\hat{t} = 0.660 + 0.970t$	-5	-4.2	-4.6
		10	10.4	10.3
		25	24.9	24.9
		40	39.5	39.4
HTU21D	$\hat{t} = 0.748 + 0.988t$	-5	-4.2	-5.0
		10	10.6	10.3
		25	25.4	25.2
		40	40.3	40.0
BMP180	$\hat{t} = -0.226 + 0.999t$	-5	-5.2	-6.1
		10	9.8	9.6
		25	24.7	24.7
		40	39.7	39.6
BME280	$\hat{t} = 2.262 + 0.983t$	-5	-2.7	-3.5
		10	12.1	11.9
		25	26.8	26.7
		40	41.6	41.5
MPL3115A2	$\hat{t} = -0.765 + 0.990t$	-5	-5.7	-6.5
		10	9.1	9.0
		25	24.0	23.9
		40	38.8	38.8

Nota-se nestes números (Tabela 6-12) que os sensores mantiveram um comportamento razoavelmente previsível, ou seja, o estimador linear médio comum foi capaz de prever seu comportamento médio em estabilidade nos patamares não incluídos na obtenção do modelo, apesar de divergências terem sido percebidas na temperatura negativa. Em outros termos, o comportamento dinâmico dos sensores foi utilizado para prever o comportamento estático. Tendo em mente que os menores erros ocorreram nas temperaturas positivas, pode-se dizer que estes modelos são uma previsão razoável para o comportamento médio destes sensores em situações além das investigadas na câmara de ambiente climático controlado, e podem representar qualitativamente a justeza destes sensores. Uma situação hipotética em que o modelo estimador não fosse capaz de apontar as temperaturas

intermediárias significaria que o sensor se comporta de maneira diferente quando em estabilidade ou quando em variação de temperatura, situação que seria mais grave que a discutida acerca da constante de tempo do sensor, na seção de exatidão.

Outro indicador importante sobre o comportamento destes sensores é o coeficiente de determinação (R^2). Todos os sensores forneceram resultados próximos de 1, que significa uma correlação muito alta entre os dados do sensor e os dados da referência durante as variações de temperatura, dentro do esperado. Diante da pequena diferença entre as correlações, foi computada a distância média quadrática destes estimadores médios para a reta de sensor ideal ($y(x) = x$), de modo que se possa classificar os sensores em função de sua proximidade com a reta de referência, sendo os sensores mais justos aqueles com as menores distâncias. A Tabela 6-13 exibe, portanto, as distâncias médias quadráticas entre as retas estimadas de cada sensor e a reta referência.

Tabela 6-13. Distância quadrática média entre os modelos estimadores médios de cada sensor e a reta referencial.

Sensor	Distância Quadrática Média para a reta de referência (°C)
DS18B20	1.00
AM2302	0.41
HTU21D	0.56
BMP180	0.24
BME280	1.98
MPL3115A2	0.95

Estes dados estão em concordância com o erro quadrático médio já analisado na seção de exatidão (dinâmica e estática). Classificando estes sensores do mais justo ao menos justo, seguem a sequência: BMP180, AM2302, HTU21D, MPL3115A2, DS18B20 e BME280.

Em linhas gerais, apesar de bons indicativos em termos de justeza destes sensores, é notável que alguns deles precisem de um modelo de ajuste de dados (calibração) para que sua utilização seja mais adequada em termos de redução de erros (otimizando a exatidão). Este problema pode ser corrigido tendo-se em mãos um sensor atestadamente aferido. Contudo, na maioria das vezes, este não é o caso dos usuários (ou iniciativas coletivas) que se engajam por conta própria em um modelo colaborativo de monitoramento ambiental utilizando sensores de baixo custo. Modelos empíricos de ajuste de sensores de temperatura serão discutidos no Capítulo 7.

6.1.2 Humidade

A análise dos sensores de humidade ocorre de maneira mais segmentada, pois em razão da sensibilidade destes sensores ser, nominalmente, dependente da temperatura, estes exigem uma análise em separado para cada patamar de temperatura. Que seja enfatizado que a humidade é uma grandeza mais difícil de ser controlada pela câmara climática, e, por isso, espera-se observar desvios relativos e ruídos mais significativos para esta grandeza que os observados para a temperatura. Por último, mas não menos importante, é conveniente resgatar a informação de que a câmara utilizada não é capaz de controlar a humidade em temperaturas negativas nem durante variações de temperatura e que por esta razão uma nova rotina experimental foi programada na câmara com ênfase nos tempos de manutenção e mudança da humidade relativa.

Combinando as diferentes situações criadas para humidade, são nove cenários diferentes a analisar: 30%, 50% e 80% vs. 10°C, 25°C e 40°C. Optou-se por suprimir a exibição da tabela resumo geral dos dados de humidade em razão da grande quantidade de dados numéricos que seriam apresentados em simultâneo, tornando sua compreensão pouco intuitiva. Entretanto, os dados respetivos aos indicadores qualitativos serão apresentados em suas subseções adequadas.

A janela temporal em que se observou estabilidade das amostras no patamar especificado é de aproximadamente 200 amostras, ou seja, 200 minutos. Este intervalo amostral em cada combinação de patamar humidade x temperatura será o utilizado para os cálculos seguintes.

6.1.2.1 Precisão

Tal qual fora desempenhado na análise dos sensores de temperatura, a precisão dos sensores de humidade relativa do ar será investigada pela observação dos desvios e ruídos de suas leituras ao redor do patamar esperado e em comparação com a referência. Uma importante mudança no entendimento da análise deste indicativo para a humidade é que dada a fluidez do ar, e da relativa complexidade em se controlar a humidade, é esperado que também a referência apresente ruídos, ou desvios aleatórios, em suas leituras. Assim, as Tabelas 6-14, 6-15 e 6-16 trazem os números que embasam a análise de precisão destes sensores em função da temperatura ambiente (10°C, 25°C e 40°C respetivamente), contendo o desvio padrão dos sensores em estabilidade e a relação Sinal-Ruído.

Tabela 6-14. Dados de precisão dos sensores de humidade quando em 10°C.

Sensor		Desvio Padrão em			Relação Sinal-Ruído em			
		30%	50%	80%	30%	50%	80%	
AM2302	A	1	1.03	0.30	0.12	32.9	178.7	683.0
		2	0.48	0.28	0.14	72.8	194.3	598.0
	B	1	0.48	0.41	0.14	68.6	127.3	581.8
		2	0.86	0.35	0.17	40.1	150.0	480.7
	C	1	0.49	0.34	0.14	69.9	158.7	586.1
		2	0.43	0.29	0.19	81.6	185.3	439.8
HTU21D	A	1	0.87	0.27	0.10	34.1	178.4	788.6
		2	0.55	0.26	0.12	55.1	189.1	627.3
	B	1	0.59	0.34	0.13	52.4	147.6	595.8
		2	0.90	0.29	0.11	35.2	172.6	722.6
	C	1	0.58	0.32	0.12	55.3	161.4	667.3
		2	0.56	0.27	0.14	56.6	186.5	576.0
BME280	A	1	0.77	0.29	0.21	45.8	180.8	377.2
		2	0.44	0.26	0.16	81.2	206.8	525.6
	B	1	0.52	0.39	0.20	67.4	135.1	406.5
		2	0.76	0.31	0.23	46.2	170.3	359.4
	C	1	0.50	0.35	0.21	67.0	151.1	378.6
		2	0.43	0.29	0.27	77.6	178.3	296.5

Tabela 6-15. Dados de precisão dos sensores de humidade quando em 25°C

Sensor		Desvio Padrão em			Relação Sinal-Ruído em			
		30%	50%	80%	30%	50%	80%	
AM2302	A	1	0.27	0.07	0.12	122.4	734.3	669.7
		2	0.30	0.10	0.12	113.0	547.8	681.1
	B	1	0.25	0.11	0.09	126.5	464.6	901.2
		2	0.24	0.11	0.15	130.4	477.7	516.8
	C	1	0.25	0.06	0.12	128.6	805.3	686.5
		2	0.28	0.09	0.12	116.3	597.9	708.7
HTU21D	A	1	0.26	0.07	0.09	106.6	708.2	832.5
		2	0.30	0.07	0.11	94.6	716.0	656.3
	B	1	0.26	0.09	0.09	113.8	565.8	854.3
		2	0.25	0.10	0.13	117.0	496.8	570.4
	C	1	0.27	0.07	0.09	112.8	734.2	841.8
		2	0.30	0.08	0.09	103.2	627.8	832.0
BME280	A	1	0.24	0.11	0.11	146.9	473.5	753.7
		2	0.28	0.11	0.13	128.0	495.8	654.6
	B	1	0.26	0.15	0.11	135.6	369.4	723.0
		2	0.25	0.17	0.17	141.2	318.4	481.0
	C	1	0.26	0.11	0.09	129.8	462.8	868.9
		2	0.30	0.14	0.11	114.2	369.0	758.7

Tabela 6-16. Dados de precisão dos sensores de humidade quando em 40°C.

Sensor		Desvio Padrão em			Relação Sinal-Ruído em			
		30%	50%	80%	30%	50%	80%	
AM2302	A	1	0.16	0.08	0.15	207.3	672.9	568.4
		2	0.21	0.05	0.13	162.6	1029.8	669.0
	B	1	0.14	0.08	0.20	222.1	613.3	393.0
		2	0.18	0.08	0.21	175.1	640.4	374.9
	C	1	0.12	0.06	0.11	251.1	850.3	721.7
		2	0.17	0.08	0.21	183.1	660.6	389.5
HTU21D	A	1	0.14	0.05	0.09	182.7	878.1	831.4
		2	0.18	0.04	0.08	145.6	1282.4	855.2
	B	1	0.13	0.05	0.12	218.4	857.4	611.8
		2	0.16	0.06	0.13	176.9	756.1	558.2
	C	1	0.13	0.05	0.09	224.8	913.4	852.7
		2	0.18	0.04	0.11	162.2	1094.1	644.9
BME280	A	1	0.17	0.08	0.20	203.5	631.2	421.8
		2	0.19	0.11	0.18	185.3	510.5	474.0
	B	1	0.15	0.09	0.25	230.5	576.7	323.0
		2	0.18	0.12	0.28	190.4	450.3	292.4
	C	1	0.15	0.11	0.21	217.8	484.1	379.1
		2	0.19	0.09	0.25	174.3	561.4	328.1

Em termos de níveis de humidade relativa do ar, os níveis mais precisos foram observados para o patamar de 50%, seguidos por 80% e 30%. A exceção foi observada na temperatura de 10°C, onde as melhores precisões ocorreram quando a humidade esteve em 80%, seguidas por 50% e 30%. Em termos de temperatura, os melhores resultados de precisão foram observados a 40°C, seguidos dos desempenhos em 25°C e 10°C.

Para observar individualmente cada sensor, e também por se tratar de uma análise que depende de duas variáveis, estes dados são segmentados e compilados nas Figuras 6-20, 6-21 e 6-22, que ilustram um mapa de cor representando o desempenho de precisão – através da relação Sinal-Ruído – dos sensores AM2302, HTU21D e BME280, respetivamente. Nestas figuras, as cores mais claras indicam uma melhor precisão relativa, e os tons mais escuros exibem valores inferiores de precisão relativa.

A análise visual destes mapas permite não só ter uma interpretação mais intuitiva do comportamento destes sensores quanto à sua precisão, como também identificar facilmente padrões de comportamento comuns (ou opostos, se fosse o caso). Por exemplo, a predominância de menor desempenho quando em 30% em todas as temperaturas, e também em 50% em 10°C é facilmente percebida pelas cores

mais escuras formando um padrão nas três figuras, assim como o pior cenário para estes sensores ocorre em baixas temperaturas e baixos valores de humidade relativa do ar. Por outro lado, pode-se dizer que a situação ótima para estes sensores, em termos de precisão, ocorre em humidades acima de 50% quando em 25°C – ou mais – e em humidades mais elevadas independente da temperatura. Dos três sensores avaliados, o que se apresentou mais estável e, portanto, mais preciso foi o HTU21D; a menor precisão, ainda que considerada adequada, foi percebida no sensor BME280. Como não há distinção de tecnologia utilizada na transdução dos sensores investigados, as discrepâncias observadas se justificam por outros fatores, como diferentes tolerâncias do processo de fabricação em si.

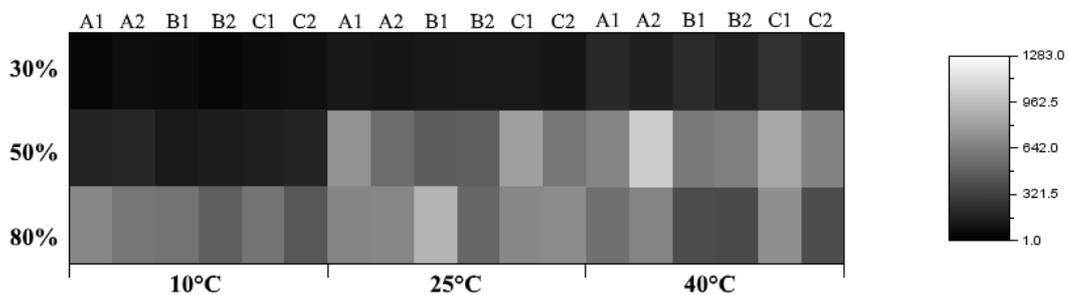


Figura 6-19. Mapa de cor com a Relação Sinal-Ruído do sensor AM2302.

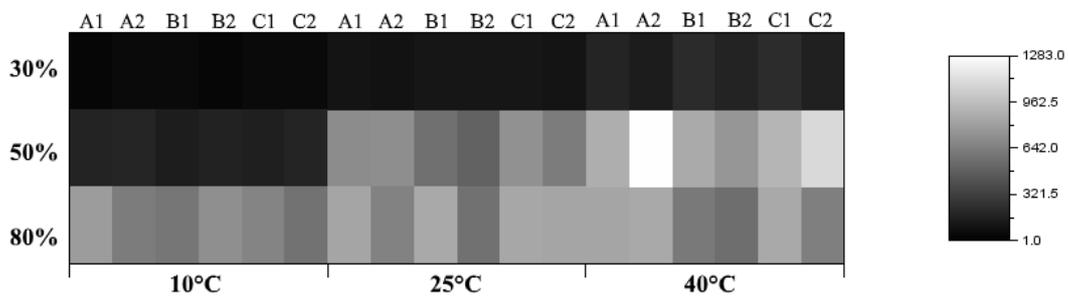


Figura 6-20. Mapa de cor com a Relação Sinal-Ruído do sensor HTU21D.

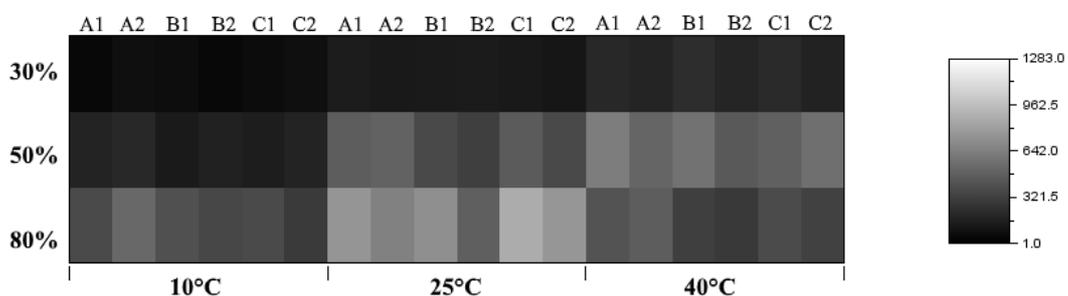


Figura 6-21. Mapa de cor com a Relação Sinal-Ruído do sensor BME280.

Com uma análise mais generalista destes sensores, a Figura 6-22 exibe, em cores, o desempenho médio geral em cada combinação de temperatura e humidade. A cor azul escura representa o fundo da

escala e, portanto, o cenário limítrofe (correspondente ao desvio padrão de 2); os tons em vermelho escuro representam a máxima relação percebida nos sensores. Neste caso, com mudança no matiz das cores, o comportamento fica evidenciado em azul.

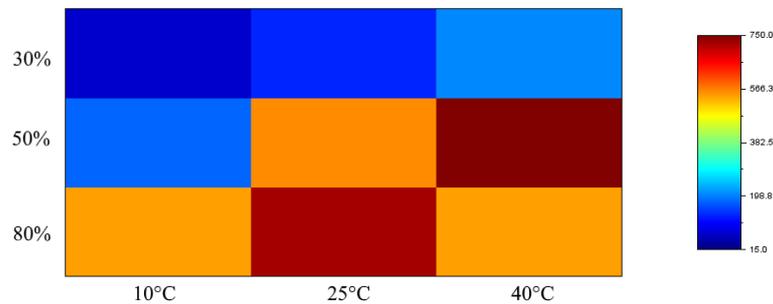


Figura 6-22. Valores médios gerais da Relação Sinal-Ruído dos sensores de humidade nas execuções experimentais.

Apesar dos números mais escuros do mapa de cor das Figuras 6-19, 6-20 e 6-21, e dos tons azuis na Figura 6-22, representarem os menores valores para relação sinal-ruído, estes valores ainda correspondem aos desvios-padrão que estão contidos na faixa adequada para a incerteza das medições, o que leva à conclusão de que os sensores investigados podem ser assinalados como precisos, e que as melhores precisões foram observadas, em linhas gerais, nos pares 25°C/80% e 40°C/50%.

6.1.2.2 Exatidão

À análise da exatidão dos sensores de humidade faz-se uma observação importante: apesar da programação na câmara ter sido feita com referência aos patamares de 30%, 50% e 80%, percebeu-se uma discrepância entre o valor observado pelo instrumento de referência e o valor programado na câmara. Então aqui são considerados dois tipos de erro médio: teórico e prático. O erro médio teórico é o desvio entre a média das leituras do sensor e o valor programado, hipotético, na câmara. O erro médio prático é tido como o desvio entre a média das leituras do sensor e a média das leituras da referência em um patamar específico.

Os indicadores de exatidão dos sensores de humidade são apresentados em três tabelas separadas – uma para cada patamar de temperatura. Em cada tabela são expostos os erros médios e quadráticos médios. Assim, as Tabelas 6-17, 6-18 e 6-19 mostram os números referentes à exatidão dos sensores de humidade para as temperaturas de 10°C, 25°C e 40°C respetivamente.

Tabela 6-17. Dados de desempenho de exatidão dos sensores de humidade relativa do ar para a temperatura de 10°C.

Sensor	Erro Médio						Erro Quadrático Médio				
	<i>Teórico</i>			<i>Prático</i>			<i>Prático</i>				
	30%	50%	80%	30%	50%	80%	30%	50%	80%		
AM2302	A	1	3.8	3.3	1.6	-4.7	-2.8	1.1	4.7	2.8	1.2
		2	4.6	5.1	3.3	-5.0	-2.2	1.8	5.1	2.2	1.8
	B	1	3.1	1.7	-1.0	-4.5	-3.0	-0.6	4.5	3.1	0.7
		2	4.3	2.7	-0.2	-4.1	-3.3	-0.7	4.1	3.3	0.8
	C	1	4.2	4.0	4.10	-3.3	-0.8	4.6	3.3	0.9	4.6
		2	5.0	4.5	4.3	-4.7	-2.7	2.8	4.7	2.7	2.8
HTU21D	A	1	-0.2	-1.3	-4.5	-8.7	-7.3	-5.0	8.7	7.3	5.1
		2	0.5	0.1	-3.4	-9.2	-7.2	-4.9	9.3	7.2	4.9
	B	1	1.0	0.0	-3.4	-6.6	-4.8	-2.9	6.6	4.9	3.0
		2	1.6	0.7	-2.7	-6.9	-5.3	-3.2	6.9	5.3	3.3
	C	1	2.1	1.4	-1.8	-5.4	-3.4	-1.3	5.4	3.5	1.4
		2	1.6	1.3	-1.9	-8.0	-6.0	-3.4	8.1	6.0	3.4
BME280	A	1	5.2	3.0	0.9	-3.3	-3.0	0.4	3.3	3.0	0.5
		2	5.5	4.3	2.6	-4.1	-2.9	1.1	4.2	2.9	1.2
	B	1	5.0	3.0	0.8	-2.6	-1.8	1.3	2.6	1.9	1.3
		2	5.2	3.2	1.1	-3.2	-2.8	0.6	3.3	2.8	0.6
	C	1	3.7	2.4	1.2	-3.9	-2.4	1.7	3.9	2.4	1.7
		2	3.5	2.0	0.5	-6.2	-5.2	-0.8	6.3	5.3	1.0

Tabela 6-18. Dados de desempenho de exatidão dos sensores de humidade relativa do ar quando em 25°C.

Sensor	Erro Médio						Erro Quadrático Médio				
	<i>Teórico</i>			<i>Prático</i>			<i>Prático</i>				
	30%	50%	80%	30%	50%	80%	30%	50%	80%		
AM2302	A	1	3.1	3.0	2.2	-3.9	-3.2	0.7	3.9	3.3	0.7
		2	3.7	4.0	3.4	-3.4	-2.7	1.6	3.4	2.7	1.6
	B	1	1.1	0.2	-1.9	-5.7	-5.7	-2.9	5.8	5.7	2.9
		2	1.6	0.9	-1.0	-5.3	-5.4	-2.5	5.4	5.4	2.5
	C	1	2.3	2.2	3.0	-4.6	-3.8	2.0	4.6	3.8	2.0
		2	2.5	2.3	2.8	-4.6	-4.4	1.0	4.7	4.4	1.0
HTU21D	A	1	-1.8	-2.6	-5.9	-8.7	-8.9	-7.4	8.7	8.9	7.4
		2	-1.3	-1.8	-5.0	-8.4	-8.5	-6.8	8.4	8.5	6.8
	B	1	-0.5	-1.2	-4.2	-7.3	-7.1	-5.3	7.3	7.1	5.3
		2	-0.2	-0.8	-3.8	-7.1	-7.0	-5.3	7.1	7.1	5.3
	C	1	0.6	0.0	-3.1	-6.3	-6.0	-4.1	6.3	6.0	4.1
		2	0.8	0.2	-3.0	-6.3	-6.5	-4.7	6.3	6.5	4.7
BME280	A	1	5.5	4.2	3.1	-1.4	-2.0	1.6	1.5	2.1	1.6
		2	5.7	4.9	4.3	-1.4	-1.8	2.5	1.5	1.9	2.6
	B	1	4.8	3.8	2.4	-2.0	-2.1	1.4	2.1	2.1	1.4
		2	4.7	3.8	2.5	-2.2	-2.5	1.0	2.2	2.5	1.0
	C	1	3.7	3.0	2.4	-3.2	-2.9	1.4	3.2	2.9	1.4
		2	4.0	3.3	2.5	-3.1	-3.4	0.7	3.1	3.4	0.8

Tabela 6-19. Dados de desempenho de exatidão dos sensores de humidade relativa do ar quando em 40°C.

Sensor		Erro Médio						Erro Quadrático Médio			
		<i>Teórico</i>			<i>Prático</i>			<i>Prático</i>			
		30%	50%	80%	30%	50%	80%	30%	50%	80%	
AM2302	A	1	3.7	3.5	3.1	-2.3	-0.9	3.0	2.3	1.0	3.0
		2	4.2	4.0	3.8	-1.9	-0.4	3.7	2.0	0.4	3.7
	B	1	0.4	-1.1	-2.6	-5.7	-5.4	-2.3	5.7	5.4	2.3
		2	0.8	-0.5	-2.4	-5.2	-4.9	-2.5	5.2	4.9	2.6
	C	1	1.1	0.3	1.0	-5.0	-4.0	1.3	5.0	4.0	1.3
		2	1.2	0.3	0.8	-4.9	-4.1	0.7	4.9	4.1	0.7
HTU21D	A	1	-3.6	-5.0	-8.7	-9.6	-9.4	-8.9	9.6	9.4	8.9
		2	-3.2	-4.6	-8.4	-9.3	-9.0	-6.5	9.4	9.0	8.5
	B	1	-2.2	-3.6	-7.2	-8.2	-7.9	-6.9	8.2	7.9	6.9
		2	-2.0	-3.3	-6.9	-8.0	-7.7	-7.1	8.0	7.7	7.0
	C	1	-1.2	-2.5	-6.2	-7.3	-6.9	-6.0	7.3	6.9	6.0
		2	-1.0	-2.3	-6.0	-7.1	-6.7	-6.1	7.1	6.7	6.1
BME280	A	1	5.6	3.9	3.0	-0.4	-0.5	2.9	0.5	0.5	2.9
		2	5.8	4.4	4.3	-0.3	0.0	4.2	0.4	0.2	4.2
	B	1	4.5	2.9	1.4	-1.5	-1.4	1.7	1.5	1.4	1.7
		2	4.5	2.9	1.6	-1.5	-1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
	C	1	3.5	2.2	1.3	-2.6	-2.1	1.5	2.6	2.1	1.5
		2	3.9	2.6	1.3	-2.2	-1.8	1.2	2.2	1.8	1.3

Como já discutido, o erro médio permite observar a presença do viés nos sensores (erro sistemático), ao passo que o erro quadrático médio observa – de uma maneira geral – como os sensores apresentaram seus erros. Concordâncias entre o valor absoluto do Erro Médio e o Erro Quadrático Médio indicam baixa influência, ou ausência, de erros aleatórios. Observando estes dados, portanto, pode-se dizer que há ausência de erros aleatórios significativos nos sensores de humidade relativa em situação de estabilidade ou baixa dinâmica, independente do cenário em que a leitura foi feita. Tendo sido a maior discordância observada entre o módulo do erro médio e o erro quadrático médio nunca superior a 0.2. Uma informação peculiar desta análise é a discrepância observada entre os erros práticos e teóricos. Estes desvios podem ter as seguintes origens: problemas de exatidão do instrumento de referência; problema de exatidão no sensor de controle da própria câmara climática; questões com o posicionamento dos sensores dentro da câmara. A determinação da causa, entretanto, não pôde ser apontada com os recursos disponíveis, pois a metodologia planeada não previa este fenómeno.

Agrupando estes dados por cada sensor, criou-se um mapa de cores de Erro Quadrático Médio nas diversas situações de temperatura e humidade, possibilitando uma análise visual para identificação geral do comportamento, assim como foi feito para a análise da precisão destes sensores. As Figuras 6-23, 6-

24 e 6-25 mostram o desempenho de exatidão dos sensores AM2302, HTU21D e BME280, respectivamente. Cores frias indicam os menores erros, ao passo que as cores quentes indicam desvios mais elevados.

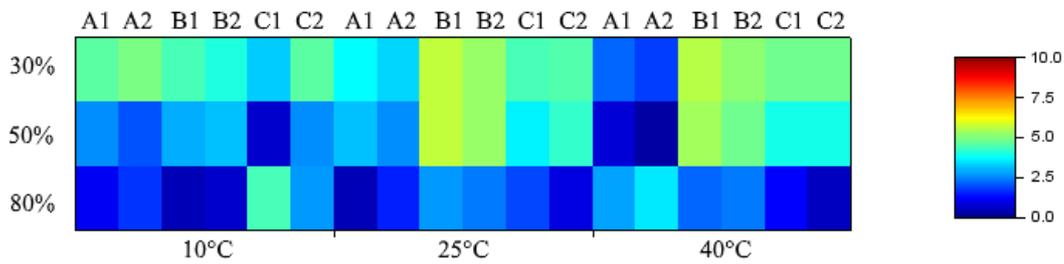


Figura 6-23. Mapa de cor referente à exatidão do sensor AM2302.

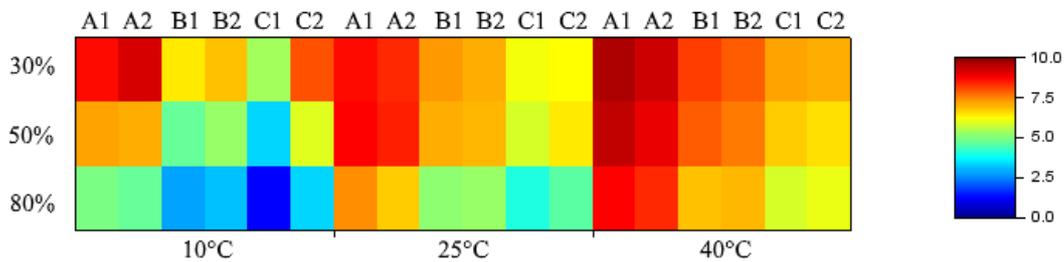


Figura 6-24. Mapa de cor referente à exatidão do sensor HTU21D.

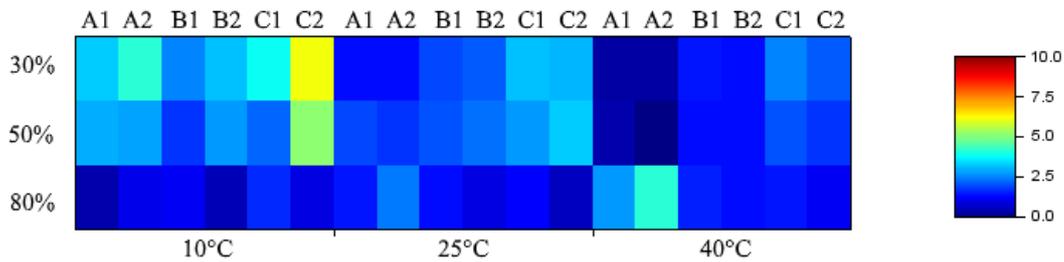


Figura 6-25. Mapa de cor referente à exatidão do sensor BME280.

Em termos de humidade relativa, a situação em que foram observadas as maiores exatidões (menor erro quadrático médio) ocorre com a humidade de 80%. Falando-se em temperatura, a exatidão foi uniforme para o sensor AM2302, ao passo que foi mais acentuada em 10°C para o sensor HTU21D e em 40°C para o sensor BME280. Ademais, os tons em azul podem ser considerados como valores ideais, pois representam erros de até 2% na escala de humidade relativa, conforme recomendação da Organização Mundial de Meteorologia. Portanto, é possível concluir que dos três sensores avaliados, aquele que apresentou o melhor desempenho para a humidade relativa do ar, em termos de exatidão, foi o BME280.

6.1.2.3 Justeza

A justeza destes sensores, assim como feito para as leituras de temperatura, será avaliada em função de um modelo matemático, linear, que seja capaz de representar fidedignamente o comportamento destes sensores em função da referência. A análise aqui utiliza os dados completos – quer nos patamares, quer nas transições – uma vez que neste experimento há uma maior quantidade de variações, se comparado à análise de temperatura, reduzindo assim o impacto dos valores estáveis na extração do modelo matemático final. Antes de adentrar a análise dos sensores, foi realizado um teste de correlação entre a referência nas diferentes execuções experimentais, em razão de ter se observado que a câmara apresentou mais dificuldade em controlar a humidade do que a temperatura. A comparação entre as leituras do instrumento de referência está apresentada na Figura 6-26 e a tabela com os modelos lineares e coeficientes de determinação (r^2) estão na Tabela 6-20.

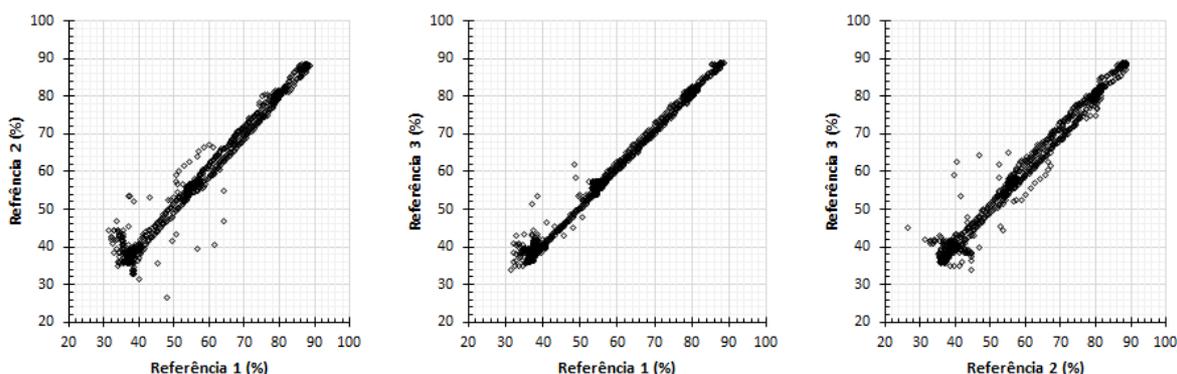


Figura 6-26. Gráfico de dispersão para verificar reprodutibilidade das leituras da mesma referência de humidade relativa em três execuções experimentais distintas. Da esquerda para a direita: 1ª execução x 2ª execução, 1ª execução x 3ª execução, 2ª execução x 3ª execução.

Tabela 6-20. Verificação de reprodutibilidade entre as leituras da referência nas três execuções experimentais.

<i>Par de referências</i>	<i>Relação linear</i>	<i>R²</i>
<i>Ref. 1 x Ref. 2</i>	<i>$y(x) = 0.998x + 0,67$</i>	<i>0.99</i>
<i>Ref. 1 x Ref. 3</i>	<i>$y(x) = 1.000x + 0.99$</i>	<i>0.99</i>
<i>Ref. 2 x Ref. 3</i>	<i>$y(x) = 0.997x + 0.66$</i>	<i>0.99</i>

É possível observar a presença de *outliers* quando os dados da segunda execução experimental estão envolvidos na comparação (primeiro e último gráficos). Isto ocorre durante o período de inicialização da câmara, quando ela parte dos valores ambiente para o primeiro patamar controlado (temperatura de 10°C e humidade relativa de 30%).

As leituras da referência de humidade entre as três leituras apresentaram um coeficiente de determinação de 0.99 em todas as combinações, permitindo a assertiva de que as diferenças entre as condições nas medições são irrelevantes e as execuções experimentais promoveram as mesmas condições aos sensores. Portanto, nenhuma ação adicional precisou ser tomada.

Os gráficos de dispersão dos sensores de humidade, utilizando as leituras da referência como dados de entrada (eixo x) estão apresentados nas figuras 6-27, 6-28 e 6-29, correspondendo aos sensores AM2302, HTU21D e BME280, respetivamente. As figuras mostram, ainda, exibições separando os sensores por tipo (A, B e C) e, em cada sub exibição, a identificação dos dados da primeira e segunda execução daquele tipo.

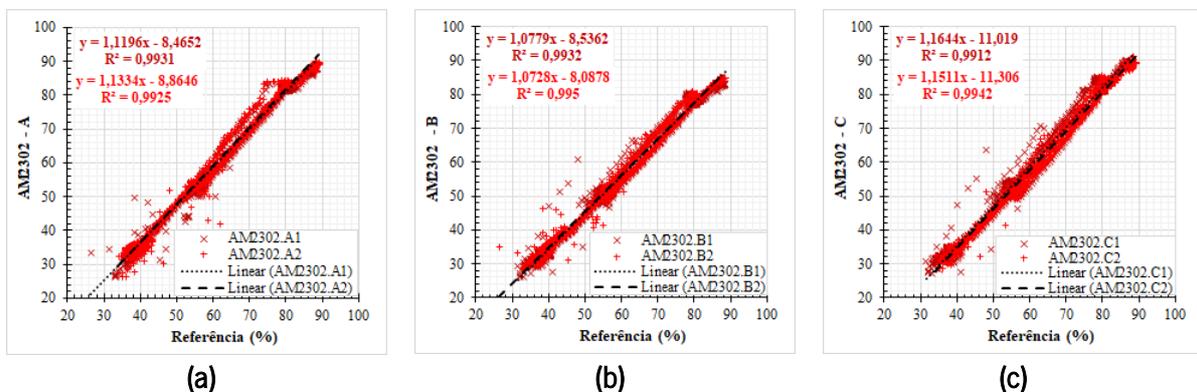


Figura 6-27. Gráficos de dispersão para obtenção do modelo linear e coeficiente de determinação do sensor AM2302, nas unidades A, B e C.

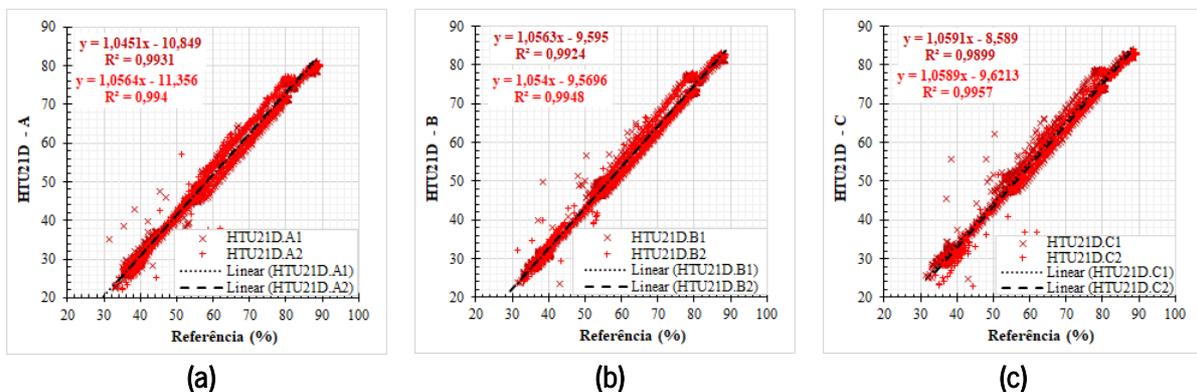


Figura 6-28. Gráficos de dispersão para obtenção do modelo linear e coeficiente de determinação do sensor HTU21D, nas unidades A, B e C.

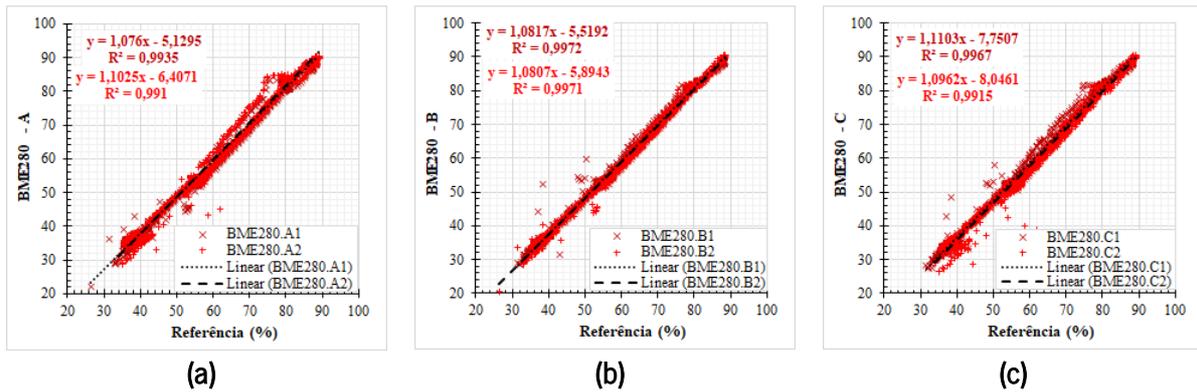


Figura 6-29. Gráficos de dispersão para obtenção do modelo linear e coeficiente de determinação do sensor BME280, nas unidades A, B e C.

Todos os sensores, em todas as execuções, obtiveram um coeficiente de determinação elevado, indicando correlação positiva muito forte, adequada ao monitoramento ambiental e sinalizando que estes sensores apresentam uma justeza adequada. Por outro lado, foram observados desvios na sensibilidade dos sensores, ainda que pequenos. A sensibilidade dos sensores é representada pelo coeficiente angular das equações retratadas nas figuras, onde o esperado era um fator igual à unidade. Todas estas alterações majoraram a unidade, o que sugere que estes sensores possuem ganho maior que a referência. A Tabela 6-21 mostra a compilação com a média das relações lineares para cada sensor.

Tabela 6-21. Modelos lineares descritivos médios dos sensores de humidade em comparação com sensor de referência.

Sensor	Modelo linear descritivo médio
AM2302	$H(x) = 1.12x - 9.55$
HTU21D	$H(x) = 1.05x - 9.93$
BME280	$H(x) = 1.09x - 6.46$

O sensor com o ganho mais próximo da unidade foi o HTU21D (1.05), seguido do BME280 (1.09) e do AM2302 (1.12). Outro parâmetro importante a se observar nestes modelos é a constante, pois indica a presença de erro sistemático (tal qual na análise da exatidão). Todos os sensores apresentaram uma constante negativa, o que significa que estão, nos menores valores, minorando o valor absoluto. O sensor com menor constante foi o BME280, seguido de AM2302 e HTU21D, tal qual fora observado pela análise dos erros. Convém mencionar que estes gráficos de dispersão compreendem todos os dados do experimento, sem segmentação. Visualmente, os resíduos (distância entre a leitura do sensor e o gráfico linear) aparentam ser aleatórios, no entanto são função da temperatura e humidade, e podem, portanto, serem previstos em função da combinação destes parâmetros, conforme mostrado pela análise de exatidão.

Como o conceito de justeza refere-se ao fato de um dado “reproduzir a verdade”, ou veracidade, pela análise numérica destes dados é possível classificar os sensores em função de sua proximidade com o valor esperado. Como as correlações sempre indicaram valores acima de 0.98 , esta classificação dos sensores pode ser determinada pelos parâmetros descritivos médios do modelo linear já apresentado na Tabela 6-21 através das distâncias (ou desvios) quadráticas média dos resíduos entre estas retas e a reta ideal, em que $y(x) = x$ onde, portanto, o sensor mais próximo apresenta o menor valor numérico. Os valores utilizados para a classificação são apresentados na Tabela 6-22 e o intervalo definido para o cálculo ocorreu entre 30% e 80% ($30 \leq H \leq 80$).

Tabela 6-22. Desvio quadrático médio computado entre o descritor linear médio de cada sensor de umidade relativa e a reta de referência.

Sensor	Desvio Quadrático Médio (%)
AM2302	3.42
HTU21D	7.21
BME280	1.99

Se há, portanto, a necessidade de uma classificação destes sensores em razão de sua justeza, ela deve levar em consideração tanto o coeficiente de determinação (que foi praticamente idêntico a todos os sensores) quanto a distância média quadrática exposta na Tabela 6-22. Portanto, a sequência de sensores, do “mais justo” ao “menos justo”, levando em consideração o cenário geral, dinâmico e heterogêneo (no sentido de englobar, na sua totalidade, as combinações de temperaturas e umidades relativas, bem como os períodos de variação) é: BME280, AM2302, HTU21D.

6.1.3 Pressão Atmosférica

A análise dos sensores de pressão atmosférica se dá de uma maneira diferente em razão da não controlabilidade desta grandeza durante as execuções experimentais. Os sensores leram, durante os processos, a pressão atmosférica ambiente. Em virtude deste cenário, o processo de análise destes dados ocorrerá pela verificação de inter-correlação entre os sensores que estiveram em simultâneo em uma execução, e pela verificação da exatidão nominal, onde os intervalos de confiança nominais são exibidos e sobrepostos graficamente, de modo que seja possível verificar se, em algum momento, um sensor deixou de estar na região de confiança do outro.

Como compensação à ausência de ambiente controlado para pressão (que permitiria uma análise segmentada tal qual fora desempenhada nos sensores de umidade relativa) foram colhidos dados de

pressão tanto nas execuções com foco na temperatura quanto nas execuções para captação de dados de humidade. Deste modo, são 6 análises diferentes, com situações diferentes onde cada uma delas é relativa a uma execução experimental e compreende dois conjuntos de sensores em simultâneo. A sequência de pares de sensores testados (BMP180, BME280 e MPL3115A2) é a seguinte: A e B, A e C, B e C, B e C, A e B e, por fim, A e C.

6.1.3.1 Correlação e concordância

Os testes de correlação são feitos entre sensores de mesmo modelo, porém de conjuntos diferentes que tenham sido submetidos às mesmas condições, para verificar a reprodutibilidade daquele modelo de sensor entre diferentes unidades. As Figuras 6-30, 6-31, 6-32, 6-33, 6-34 e 6-35 exibem os comparativos obtidos nas execuções entre pares de conjuntos, devidamente sinalizados.

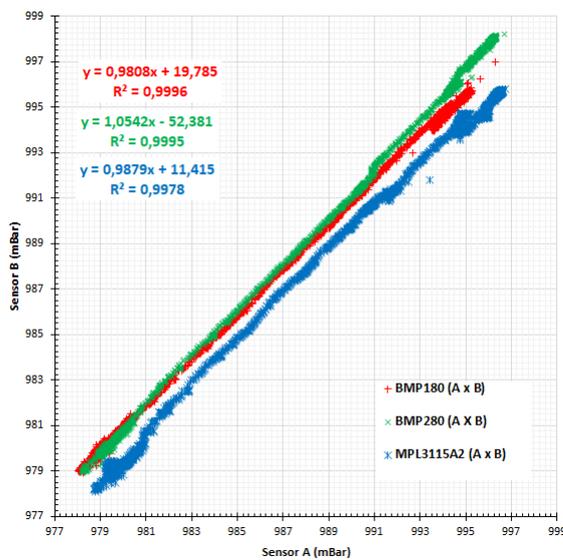


Figura 6-30. Comparação entre sensores A e B durante primeira execução experimental.

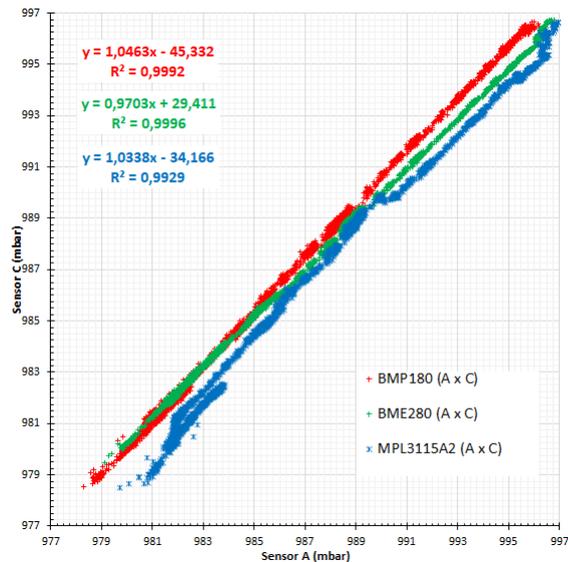


Figura 6-31. Comparação entre A e C durante a segunda execução experimental.

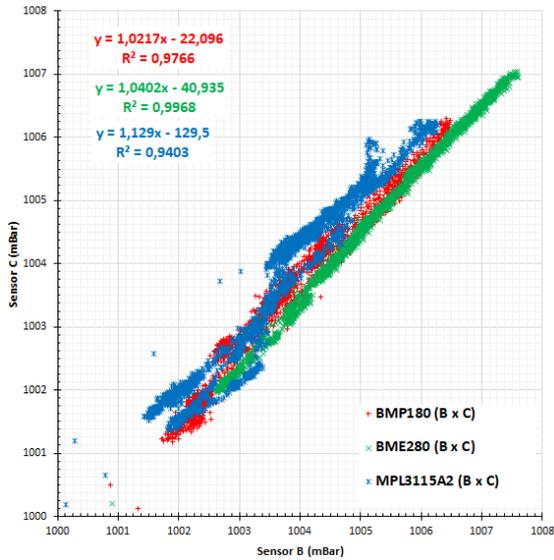


Figura 6-32. Comparação entre sensores B e C durante terceira execução experimental.

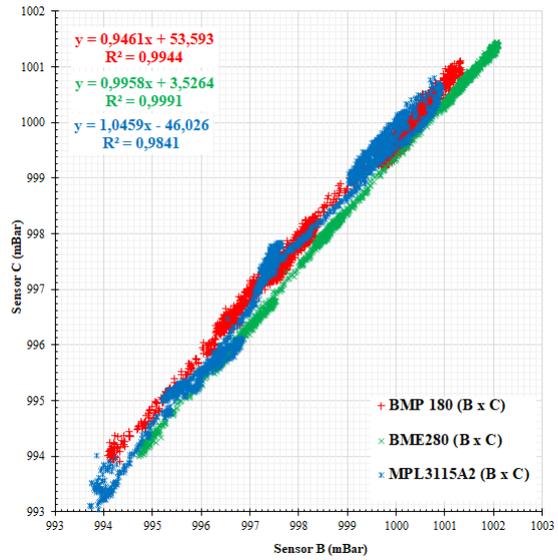


Figura 6-33. Comparação entre sensores B e C durante a quarta execução experimental.

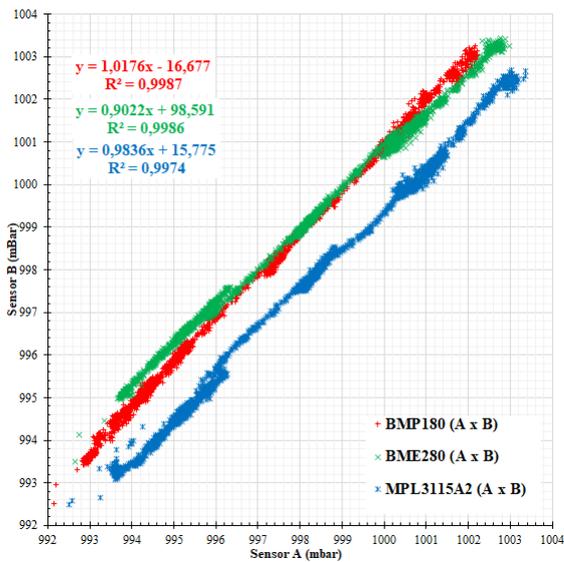


Figura 6-34. Comparação entre sensores A e B durante a quinta execução experimental.

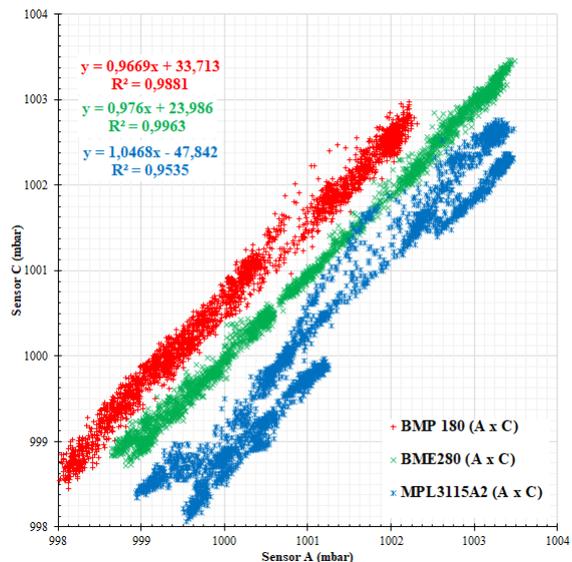


Figura 6-35. Comparação entre sensores A e C durante a sexta, e última, execução experimental.

Cada par de conjuntos foi testado duas vezes e para cada uma delas, estabeleceu-se uma correlação linear por regressão. As condições experimentais de temperatura e humidade foram iguais nas três primeiras execuções (com quatro patamares de temperatura e três de humidade) e nas três últimas (com três patamares de temperatura de maior duração, e três de humidade relativa). Os valores para a pressão atmosférica lidos acima ocorreram nos dias dos experimentos, e nada pode ser feito para controlar a

variação entre cada dia, por isso cada imagem apresenta uma escala diferente, onde há maiores e menores variações de pressão atmosférica.

É possível aferir que há grande concordância entre os sensores de mesmo modelo, dada a sua correlação positiva muito forte ($R^2=0.99$), no entanto não se pode desconsiderar a presença de desvios, uma vez que percebe-se um espalhamento das leituras ao redor da reta linear (o que sugere a presença do ruído, ou erro sistemático).

Para obter as menores distâncias entre os sensores de mesmo modelo e, portanto, atestar a melhor reprodutibilidade, são calculados os desvios médios quadráticos entre unidades de sensores iguais. Valores menores do desvio implicam em maior proximidade e concordância entre eles. A Tabela 6-23 exibe o desvio quadrático médio entre os pares de sensores que foram submetidos às mesmas condições experimentais nas duas baterias experimentais.

Tabela 6-23. Desvio quadrático médio geral entre pares de sensores de mesmo modelo, sob mesmas condições experimentais.

Sensor	Bateria de testes 1			Bateria de testes 2		
	A x B	A x C	B x C	A x B	A x C	B x C
BMP180	0.7829	0.4636	0.3689	0.8498	0.6292	0.2935
BME280	1.2942	0.1908	0.5374	0.9898	0.1041	0.6499
MPL3115A2	0.6335	0.8780	0.3810	0.5762	0.9905	0.3434

A partir destes dados, pode-se dizer que o par de sensores que apresentou a menor distância entre suas leituras foi o do sensor BME280, unidades A e C. Entretanto, de maneira contraditória, o par A e B deste mesmo sensor apresenta as maiores discordâncias, embora de pequena magnitude (inferior a 2hPa) nas duas baterias de testes, o que elimina a possibilidade de ter sido ocasionada em razão de eventuais variações de pressão atmosférica no momento da execução.

Os números mantiveram o padrão, nas duas baterias de testes, em termos de classificação de desvios (menor para maior). Para o BMP180, os pares, com desvios crescentes entre si, são: B x C, A x C, A x B. Para o BME280, a sequência se apresenta como: A x C, B x C e A x B. Por fim, para o MPL3115A2, a sequência é: B x C, A x B e B x C.

Em termos gerais, pela média destes desvios entre os pares, pode-se classificar estes sensores em termos de concordância entre pares, do menor para o maior. Assim, em sequência do menor desvio quadrático médio entre pares ao maior, pode se classificar os sensores na seguinte ordem: BMP180 ($\overline{EQM} = 0.5647$), BME280 ($\overline{EQM} = 0.6277$) e MPL3115A2 ($\overline{EQM} = 0.6338$).

6.1.3.2 Intervalo de confiança (sobreposição gráfica)

Esta análise tem caráter puramente visual, e permite observar se, em alguma situação, algum dos sensores excedeu a margem de confiança dos demais e, neste caso, fornecer alguma informação útil sobre o que possa ter causado isto. A principal informação para a elaboração deste gráfico é o intervalo fornecido pelo fabricante como sendo a exatidão nominal. As informações do fabricante em situações de estabilidade são de ± 0.12 hPa para os sensores Bosch (BMP180 e BME280) e ± 0.5 hPa para o MPL3115A2, e de ± 1 hPa para todos os sensores considerando situações gerais (exatidão absoluta). Como os testes não foram executados em situações de estabilidade, a região de sobreposição considerará o intervalo de ± 1 hPa. Os traços de cada um dos sensores estão em vermelho (BMP180), verde (BME280) e azul (MPL3115A2), e a interseção entre todas as áreas são as regiões mais escuras. Para não tornar a análise visual confusa, são expostos um conjunto de sensores em cada imagem e foram omitidos, por questão de redundância, as imagens da segunda bateria de testes. Assim, as análises de sobreposição de exatidão nominal são agrupadas por unidade de sensor, e não por ordem cronológica de execução. As Figuras 6-36 e 6-37 mostram as leituras do conjunto A nas suas duas execuções; as Figuras 6-38 e 6-39 mostram as leituras do conjunto B; as Figuras 6-40 e 6-41 mostram as leituras do conjunto C. Novamente é reiterado que devido a impossibilidade de controle da pressão atmosférica, as imagens contemplam – em sua escala – os patamares percebidos nos dias em que foram realizados os experimentos.

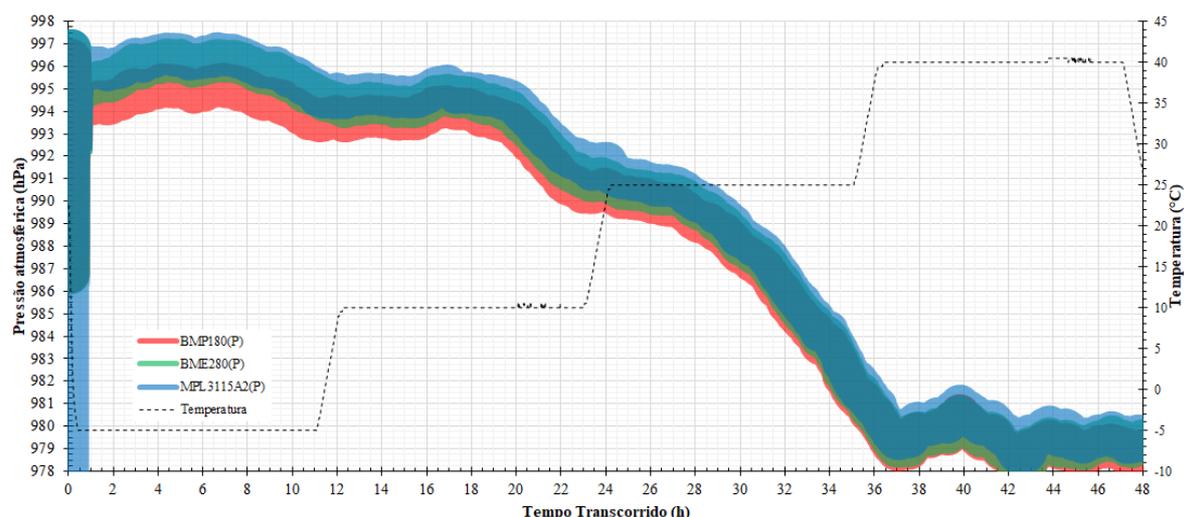


Figura 6-36. Sobreposição de exatidão nominal dos sensores de pressão atmosférica da unidade A em sua primeira exposição experimental.

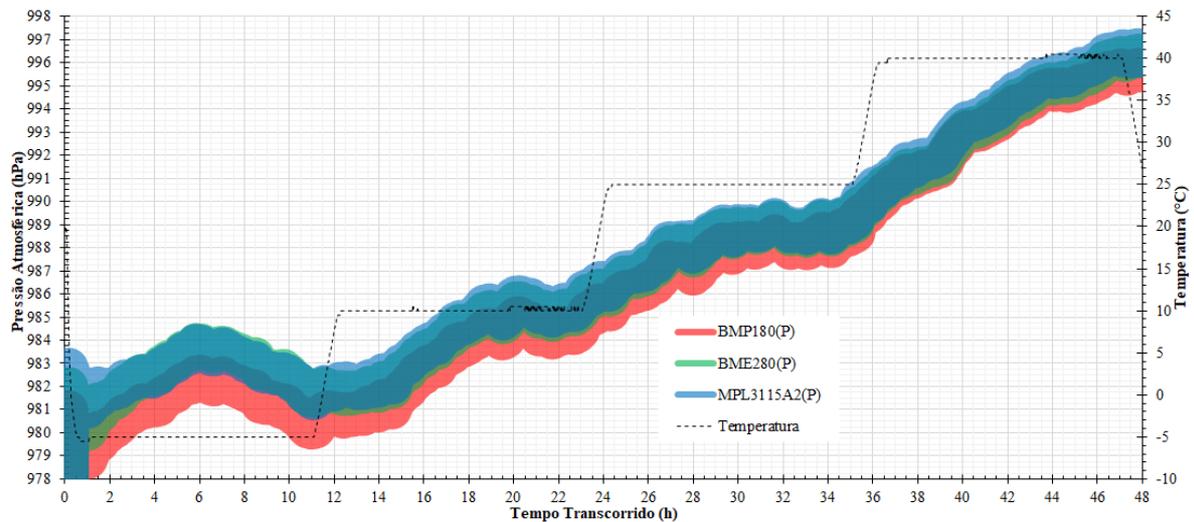


Figura 6-37. Sobreposição de exatidão nominal dos sensores de pressão atmosférica da unidade A em sua segunda exposição experimental.

Estas figuras denotam um padrão comum, em que nos momentos iniciais há uma sobreposição entre os sensores BME280 e MPL3115A2 (verde e azul, respetivamente), enquanto que o BMP180, em vermelho, apresenta parte de seu intervalo abaixo da área de sobreposição dos outros dois. Ao passo em que o tempo passa e, a temperatura aumenta (estes dados foram obtidos dentro da câmara climática), os sensores do conjunto A tendem a convergir.

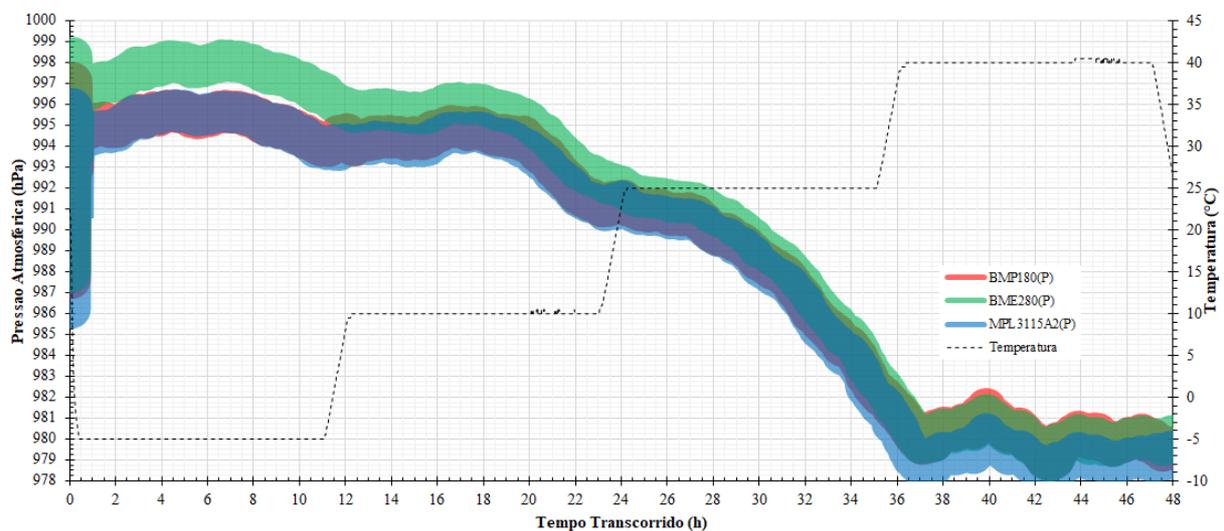


Figura 6-38. Sobreposição de exatidão nominal dos sensores de pressão atmosférica da unidade B em sua primeira exposição experimental.

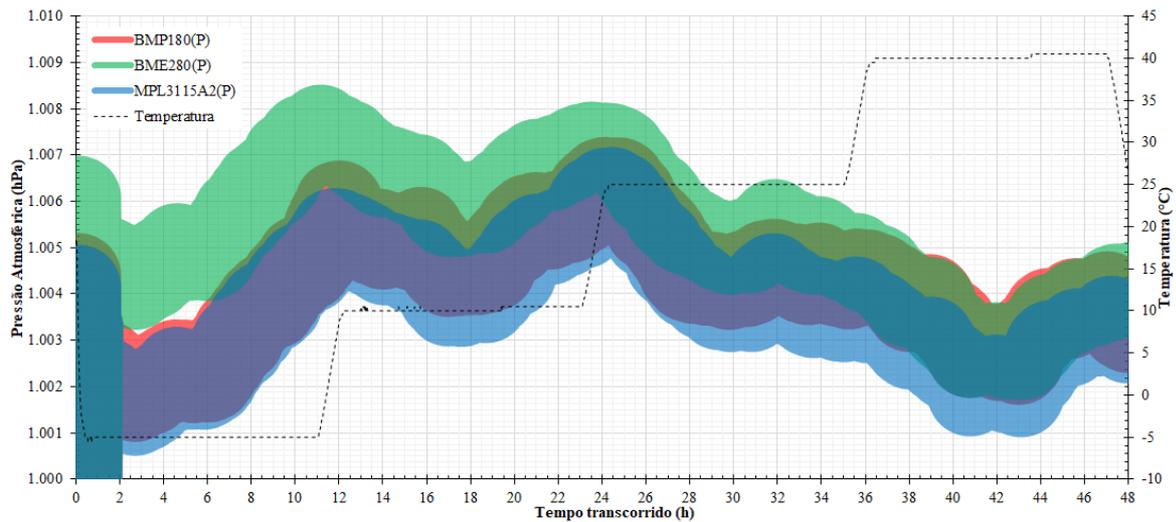


Figura 6-39. Sobreposição de exatidão nominal dos sensores de pressão atmosférica da unidade B em sua segunda exposição experimental.

As Figuras do conjunto B, em suas duas primeiras execuções, também evidenciam um padrão comum. Nota-se que o traço verde (BME280), ao começo do experimento, majora as áreas de sobreposição dos demais sensores, situando-se fora da área de exatidão nominal. Fato curioso, uma vez que nomeadamente os sensores BMP180 e BME280 compartilham da mesma tecnologia para seus barômetros e, neste experimento, excederam – um do outro – as regiões nominais de exatidão.

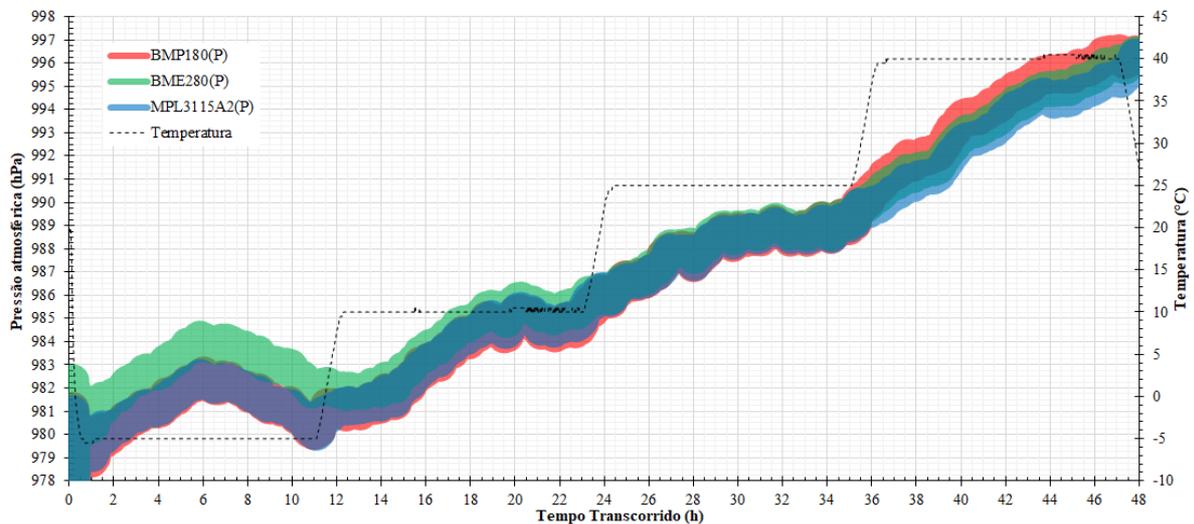


Figura 6-40. Sobreposição de exatidão nominal dos sensores de pressão atmosférica da unidade C em sua primeira exposição experimental.

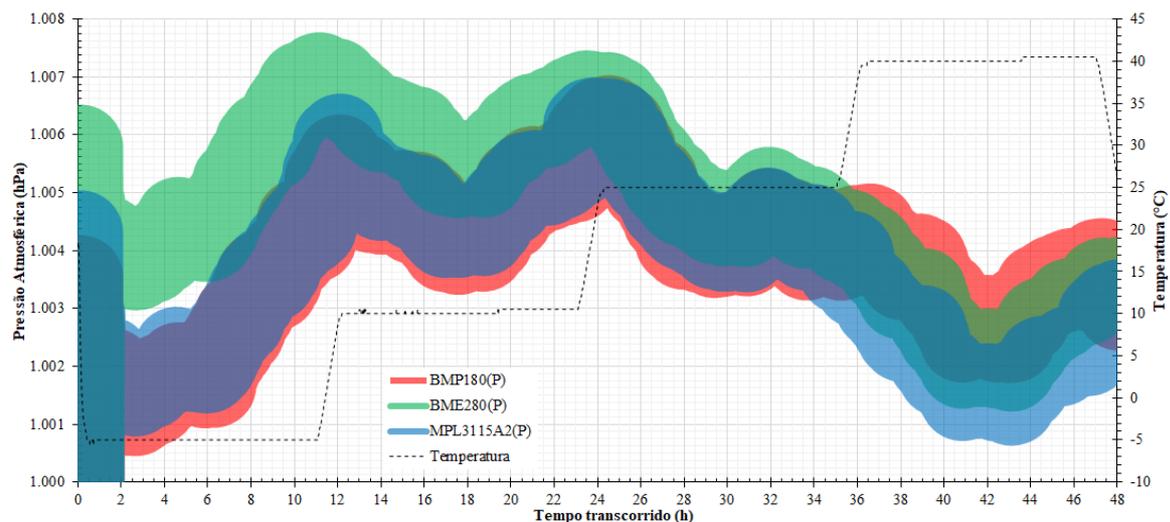


Figura 6-41. Sobreposição de exatidão nominal dos sensores de pressão atmosférica da unidade C em sua primeira exposição experimental.

Por fim, os sensores do conjunto C também mantiveram um padrão de comportamento similar em suas duas execuções, onde o BME280 (em verde), nas menores temperaturas mantém sua faixa de exatidão nominal maioritariamente fora das demais áreas, e há uma tendência de convergência nas maiores temperaturas. Isto significa que em climas frios (abaixo de 10°C) estes sensores podem apresentar erros que excedem sua região de tolerância nominal absoluta (que é de ± 1 hPa). O maior percentual de concordância ocorre à temperatura de 25°C na maioria dos casos (no intervalo entre 24 e 36 horas transcorridas).

A conclusão que pode ser tirada acerca desta análise para os sensores de pressão atmosférica é que a temperatura tem papel preponderante na exatidão destes sensores, fazendo com que sensores de mesmo fabricante, que compartilham – em teoria – das mesmas tecnologias de fabricação, divergem completamente entre si as regiões de confiança em temperaturas mais baixas. Estes dados abrem margem para uma discussão acerca das aplicabilidades destes sensores nas considerações finais, contida Capítulo 7.

Diante da ausência de uma referência fiável para balizar as análises dos sensores de pressão atmosférica, não é possível estabelecer uma classificação em termos de desempenho como fora feito para temperatura e pressão.

6.2 Sensores de Qualidade do Ar

Para a análise dos dados da qualidade do ar, alguns parâmetros serão estudados com uma abordagem ligeiramente diferente daquelas da temperatura e humidade, sobretudo pela não controlabilidade dos gases. Ademais, apenas os sensores de CO₂ forneceram dados robustos para uma análise próxima do planeado. Os sensores de CO apresentaram dados inconsistentes, o que limita a análise, mas que podem fornecer algumas considerações interessantes. O sensor de Ozono não apresentou leituras relevantes, e sobre ele, justificam-se apenas algumas considerações de cunho técnico.

6.2.1 Dióxido de Carbono

A análise dos dados de CO₂ decorre da comparação dos dados medidos pelos sensores com a referência. Deste modo é possível estimar a exatidão destes sensores. A justeza pode ser analisada ao se comparar as equações de relação entre os sensores e a referência, por gráficos de dispersão. Os dados dos sensores de óxido metálico precisam passar por um tratamento antes de serem analisados. O processo é discutido na subsecção 6.2.1.1. Os sensores MH-Z16 não precisam de conversão de dados.

As situações a que os sensores foram submetidos geraram as leituras referência exibidas nas Figuras 6-42, 6-43 e 6-44. Reforça-se a informação de que as concentrações de CO₂ percebida nas leituras foi gerada exclusivamente pela ocupação dos ambientes durante as medições.

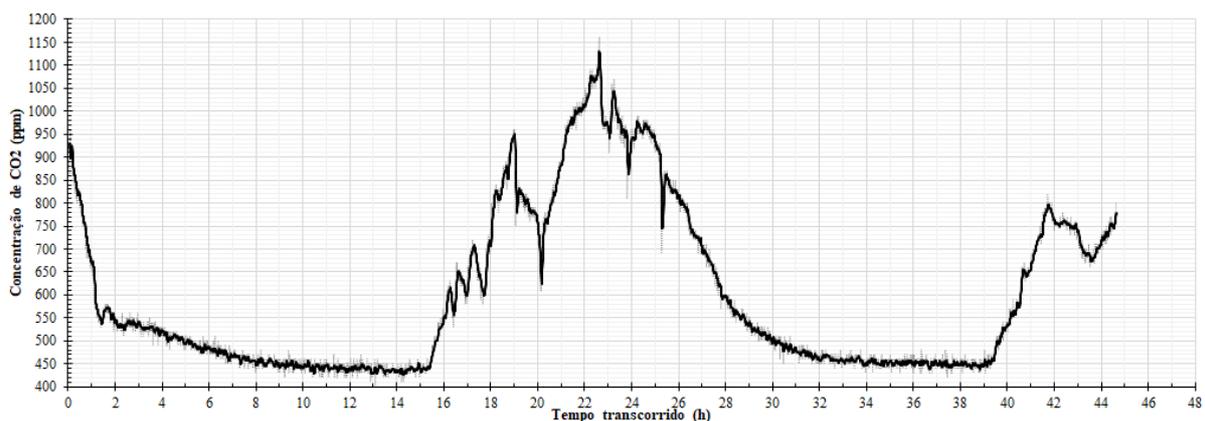


Figura 6-42. Leituras do sensor de referência para dióxido de carbono colhidas no primeiro experimento em ambiente interior, realizado na sala LID3, no DSI da Universidade do Minho.

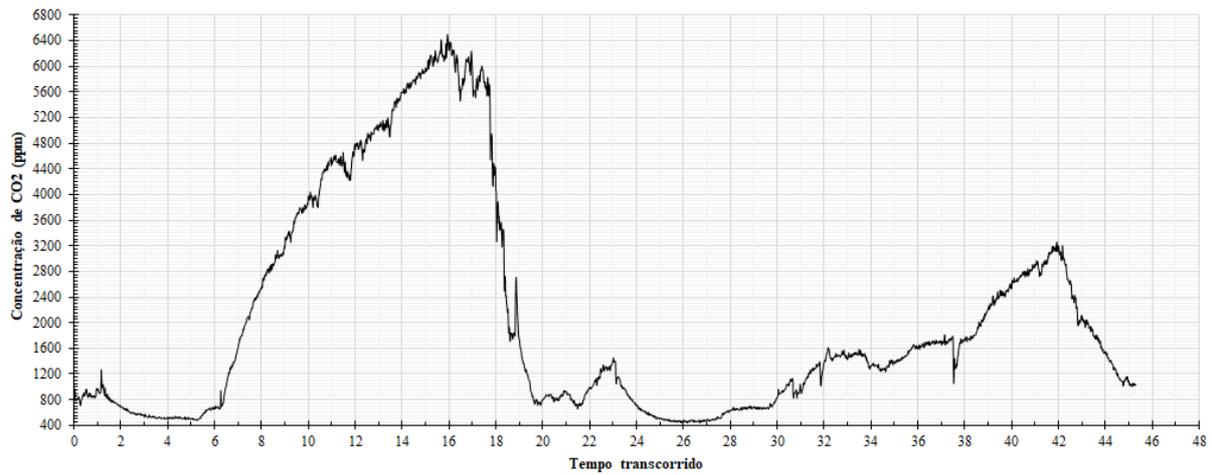


Figura 6-43. Leituras do sensor de referência para dióxido de carbono colhidas no segundo experimento em ambiente interior em cômodo residencial.

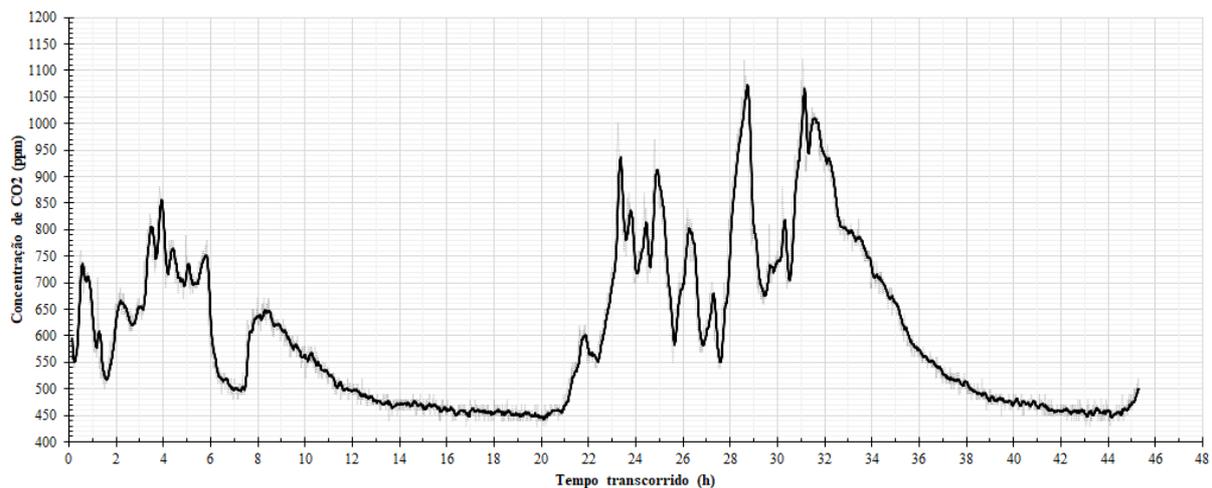


Figura 6-44. Leituras do sensor de referência para dióxido de carbono colhidas no terceiro experimento em ambiente interior, realizado na sala LID3, no DSI da Universidade do Minho.

6.2.1.1 Conversão dos dados brutos do sensor MG-811

Antes de avaliar a qualidade dos dados dos sensores de CO₂, é preciso levantar uma discussão sobre a extração dos dados do sensor de óxido metálico. Este sensor fornece suas leituras em valores de tensão, por ter sua interface analógica. Portanto é preciso converter estes dados para o equivalente em “partes por milhão” (ppm). O fabricante fornece dados vagos sobre como este sensor comporta-se e, inicialmente, a informação oficial para a conversão de tensão para ppm é a que está ilustrada na Figura 6-45, que foi retirada do manual do sensor e mantida a resolução em que se apresenta.

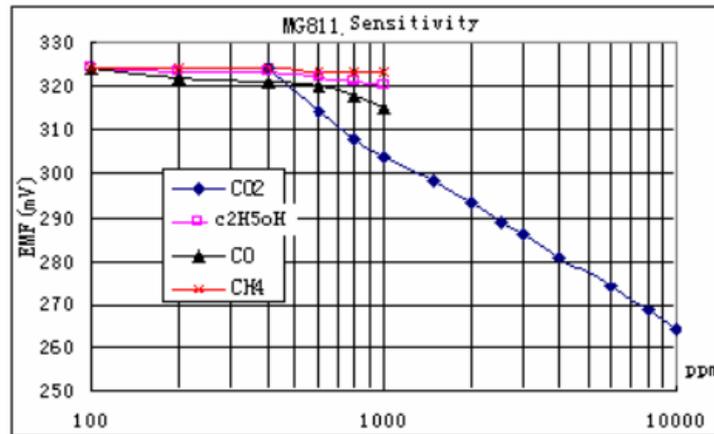


Figura 6-45. Curva de resposta do sensor MG-811 fornecida pelo fabricante (Hanwei Electronics, 2016).

Note que o valor mínimo, equivalente a 400ppm, é de aproximadamente 325mV, e decai cerca de 5mV a cada década de concentração. Para que estes dados possam ser convertidos – seja em tempo real, pelo *Arduino*, ou posterior em um aplicativo de tratamento matemático – é necessário extrair uma equação equivalente inicialmente invertendo os eixos do gráfico, onde a tensão é o dado de entrada, e a concentração é o dado de saída. Esta conversão está ilustrada na Figura 6-46.

Portanto, para converter a saída de tensão para partes por milhão, basta aplicar o valor à fórmula apresentada na Figura 6-46. Entretanto, isto do ponto de vista de hardware, apesar de ser possível, é oneroso computacionalmente pois requer o carregamento de bibliotecas matemáticas ao microcontrolador, que, por sua vez, tem espaço de memória reduzido (o *Arduino Uno*, por exemplo, torna-se instável caso o programa carregado ultrapasse 75% de sua memória total). Optou-se, portanto, para fazer a conversão póstuma, e comparar este modelo com o ajuste obtido pelas leituras da referência. O fabricante também exibe as dependências de temperatura e humidade para este sensor, mas as curvas não exibem uma dependência nominal significativa, e, portanto, considerando que não há variações bruscas destes parâmetros na prática (sobretudo em ambientes interiores), estas compensações não são consideradas. Para o sensor MH-Z16 não foi exigida nenhuma conversão, e o sensor já vem pronto para uso.

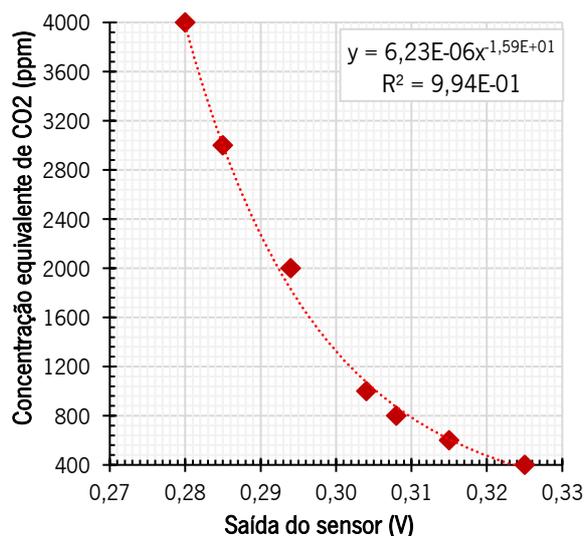


Figura 6-46. Ajuste de dados nominal para o sensor MG-811.

Os dados dos sensores MG-811 foram postos em um gráfico de dispersão com o intuito de se obter uma equação real para cada sensor deste tipo e compará-los com o valor nominal. Os resultados mostraram que cada sensor responde de maneira diferente, e estes, por sua vez, também diferem do valor nominal. As Figuras 6-47 e 6-48 exibem os dados para estes sensores, quando confrontados com os valores da referência no primeiro teste, mostrados previamente na Figura 6-42.

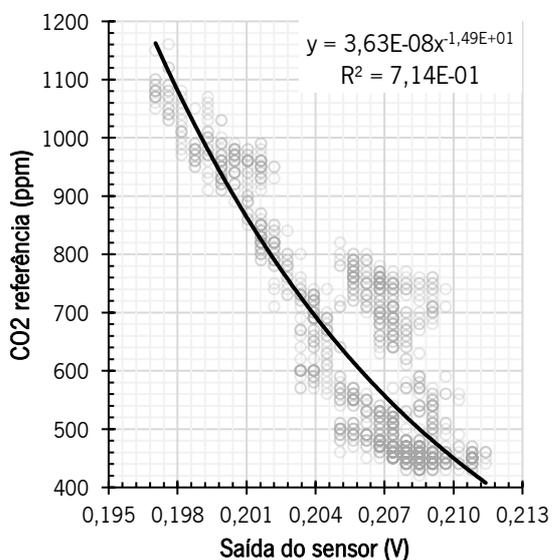


Figura 6-47. Conversão de dados do sensor MG-811, unidade A, com dados do sensor referência como gabarito.

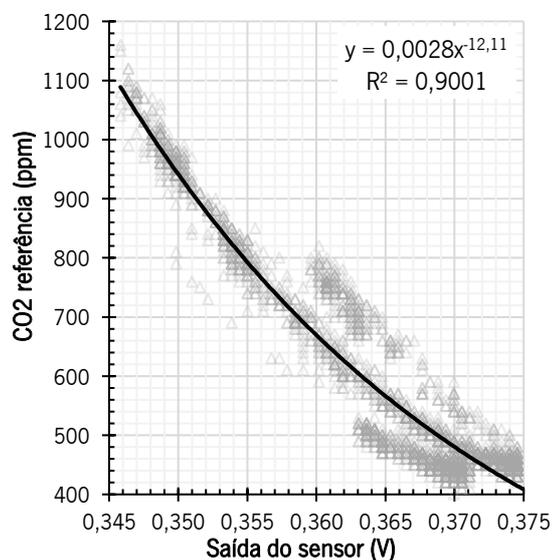


Figura 6-48. Conversão de dados do sensor MG-811, unidade B, com dados do sensor referência como gabarito.

Note que a curva de ajuste obedece, de facto, ao padrão potencial decrescente exibido pelo fabricante. Entretanto os coeficientes de ajuste extrapolam o valor nominal em ordens de grandeza. Enquanto os

valores nominais previam uma conversão que obedecesse à relação de $ppm = 6.23 \cdot 10^{-6} \cdot v^{-15.91}$, um sensor MG-811, ao ser comparado com as leituras da referência apresentou sua conversão através da relação $ppm_{s1} = 3.63 \cdot 10^{-8} \cdot v^{-14.91}$, tendo sua resposta bastante compactada, e o outro através da relação $ppm_{s2} = 2.8 \cdot 10^{-3} \cdot v^{-12.11}$, com coeficientes de determinação (r^2) iguais a 0.714 e 0.900, respetivamente. Esta discrepância do valor oficial permite concluir que estes sensores não são recomendados para aplicações “*Do It Yourself*” pelo fato de se precisar de uma calibração técnica e individual para cada sensor, o que já extrapola a natureza destas iniciativas, onde predomina maioritariamente o entusiasmo não-técnico e a simplicidade de uso dos sensores.

Outro aspeto a assinalar sobre este sensor, é que sua orientação física é capaz de influenciar diretamente os patamares de tensão na saída. Ou seja, a posição em que o elemento é colocado muda a tensão de saída em sua interface, alterando até as curvas exibidas nas Figuras 6-47 e 6-48. Portanto, também permite-se concluir que estes sensores se mostram igualmente inviáveis para aplicações móveis, pois torna impossível estipular uma função de conversão adequada em razão da constante movimentação do sensor embarcado em algum dispositivo móvel (pessoas, bicicletas, veículos, etc.).

Para cada etapa de medição foram estimados os parâmetros da função de conversão mais adequados e, então, os cálculos dos parâmetros de qualidade são aplicados.

6.2.1.2 Exatidão

A análise de exatidão dos sensores de CO₂ pode ser calculada em caráter geral, uma vez que há um equipamento de referência (*Vaisala GM70*) fornecendo valores para balizar os dados oriundos dos sensores. As variações lidas pelos sensores nestas medições são exclusivas a ambientes interiores. Não foi necessária nenhuma compensação de parâmetros climáticos, dada a baixa dinâmica climática observada. Convém mencionar que os sensores de óxido metálico (MG-811) necessitam de um tempo elevado para estabilizar as leituras (podendo chegar até 12 horas, dependendo do sensor). Em razão disso, é possível que em algumas medições estes sensores comecem a apresentar informações relevantes com algum atraso pois algum sensor pode não estar estável no momento que as medições foram iniciadas, mesmo tendo sido ligado com antecedência.

As leituras dos sensores obtidas na primeira recolha de dados estão ilustradas na Figura 6-49, que mostra também a leitura da referência. Os sensores MG-811 foram ajustados conforme as equações

exibidas nas Figuras 6-47 e 6-48. Foi aplicado um filtro de suavização de média móvel para atenuar as oscilações dos sensores.

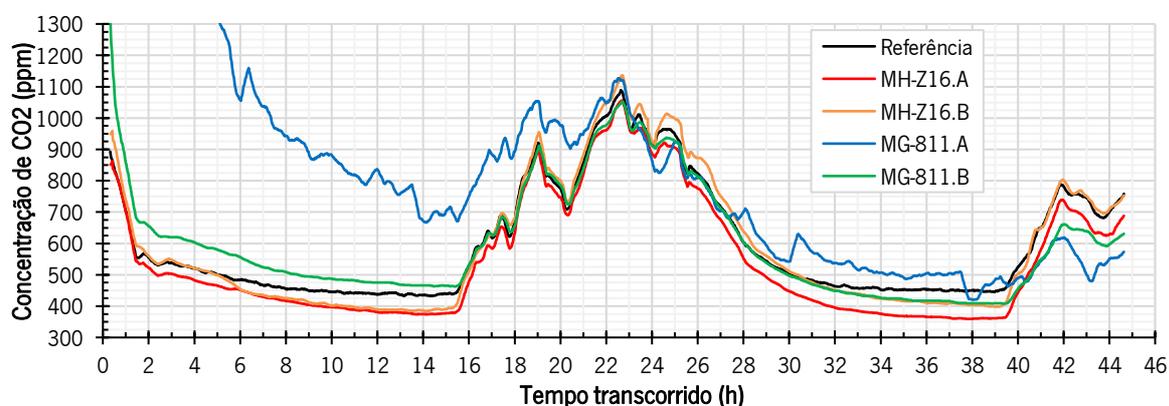


Figura 6-49. Leituras dos sensores de CO₂ na primeira coleta de dados.

O sensor MG-811 tipo A, apresenta maior dificuldade em se estabilizar, pois mesmo aparentemente acompanhando alguns eventos percebidos pela referência, nunca chega a acompanhá-la de perto (exceto pelo intervalo entre as 20h e 28h, que foi o segmento usado para a conversão dos dados deste sensor). O sensor MG-811, instância (unidade) B, entretanto, acompanha bem a referência, apesar da observância de erro absoluto em alguns momentos. Para além disso, seu erro inicial é inferior ao observado no sensor “A”. Na análise de erros não serão considerados o tempo de estabilização dos sensores. E como “tempo de estabilização”, estipula-se aqui, o tempo até que o sensor entre em uma região de cerca de 100 ppm de diferença entre si e a referência, e lá permaneça de maneira estável (o tempo foi cerca de 20 horas para o sensor “A” e 2 horas para o sensor “B”). Portanto, para os sensores MH-Z16 não serão necessários ajustes nesta análise. Para os sensores MG-811, a instância “A” terá seu início considerado a partir das 19 horas de experimento, ao passo que sua instância “B” terá o início considerado a partir das 2 horas de experimento. Os erros quadráticos médios obtidos a partir dos dados válidos apresentam-se na Tabela 6-24.

Tabela 6-24. Erro quadrático médio dos sensores de dióxido de carbono em primeiro experimento.

Sensor	EQM (Total)
MH-Z16	A <u>58</u>
	B <u>38</u>
MG-811	A <u>100</u>
	B <u>54</u>

Para a segunda execução, foi observado que os sensores de óxido metálico já não concordavam tanto com a referência quando convertidos pelas equações de ajuste do primeiro experimento. Portanto, foi obtida uma nova curva de ajuste para estes sensores nesta leitura. São eles: $ppm_{S1} = 1.14 \cdot 10^{-6} \cdot v^{-13.84}$ e $ppm_{S2} = 11.5 \cdot 10^{-3} \cdot v^{-10.81}$ com coeficientes de determinação (r^2) iguais a 0.77 e 0.98, respectivamente. Portanto, as leituras obtidas por estes sensores em uma segunda execução experimental estão exibidas na Figura 6-50.

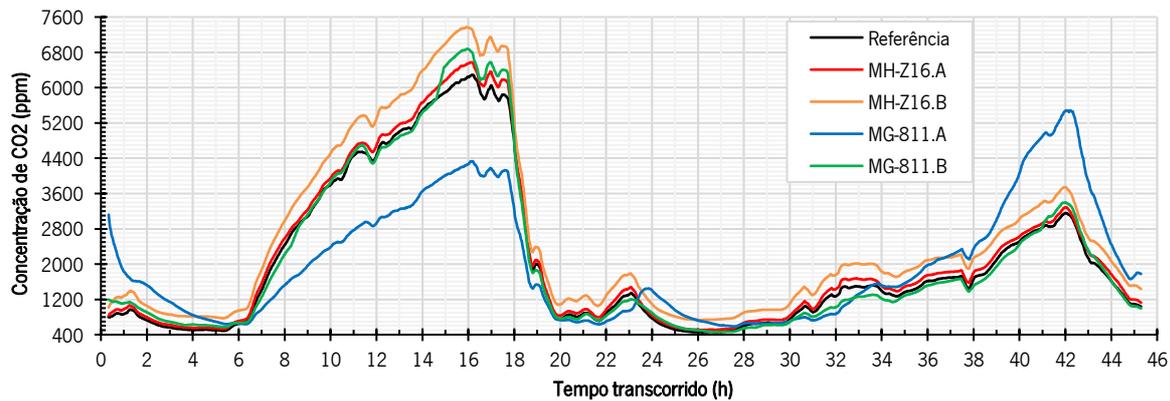


Figura 6-50. Leituras dos sensores de CO₂ na segunda execução experimental.

Nesta execução observou-se que o sensor MG-811 “A” apresentou, em sua conversão, uma curva que se assemelhava a uma histerese, com duas aglomerações de pontos. Como uma calibração heterogênea (ou adaptativa) é algo que excede bastante o escopo deste trabalho (considerando que as iniciativas que o motivaram incluem justamente o envolvimento de pessoas sem conhecimento técnico muito aprofundado no monitoramento), estas técnicas foram descartadas, e foi considerada uma conversão única. Conversão esta, que – como pode ser constatado – subvaloriza os maiores patamares, e supervaloriza patamares moderados, terminando a incursionar em erros mais significativos que no experimento anterior. Os dados obtidos destas medições estão exibidos na Tabela 6-25. Considera-se que o sensor MG-811 “A” veio estabilizar novamente suas leituras após 18 horas do início do experimento, ao passo que o MG-811 “B” convergiu durante seu tempo de preparação, e terá todo seu escopo considerado.

Tabela 6-25. Erro quadrático médio dos sensores de dióxido de carbono em segundo experimento.

Sensor		EQM (Total)
MH-Z16	A	<u>150</u>
	B	<u>557</u>
MG-811	A	<u>857</u>
	B	<u>204</u>

Realce que, apesar de numericamente os erros terem se apresentados maiores, ao normalizá-lo ao valor máximo do experimento (6500 ppm), obtém-se percentuais semelhantes aos do primeiro experimento. O sensor MG-811 carece de uma análise cautelosa: enquanto o sensor “A” apresenta erros elevados e comportamentos que visualmente podem ser classificados como anômalos, a instância “B” acompanha bem a referência durante as medições. Ainda, foi notada uma histerese neste sensor, o que exigiria uma calibração adaptativa (uma equação de conversão para cada momento em separado) ao invés de uma curva única, como foi aplicado. Com este resultado em específico, este tipo de sensor adquire fortes ressalvas negativas à sua aplicação nas iniciativas “*Do It Yourself*”, ressalvas estas que serão pontuadas com mais detalhe no Capítulo 7.

A terceira, e última, execução destes sensores, totalizando 135 horas experimentais (mais os períodos de preparação dos sensores de óxido metálico), é ilustrada na Figura 6-51. Assim como na segunda execução, também foi necessária uma nova calibração para os sensores de óxido metálico. As equações utilizadas foram: $ppm_{s1} = 6.36 \cdot 10^{-16} \cdot v^{-29.34}$ para o sensor “A”, e $ppm_{s2} = 4.55 \cdot 10^{-3} \cdot v^{-14.60}$ para o sensor “B” (a discrepância de magnitude entre os coeficientes da curva de ajuste dos sensores denota um provável problema na instância “A” deste sensor).

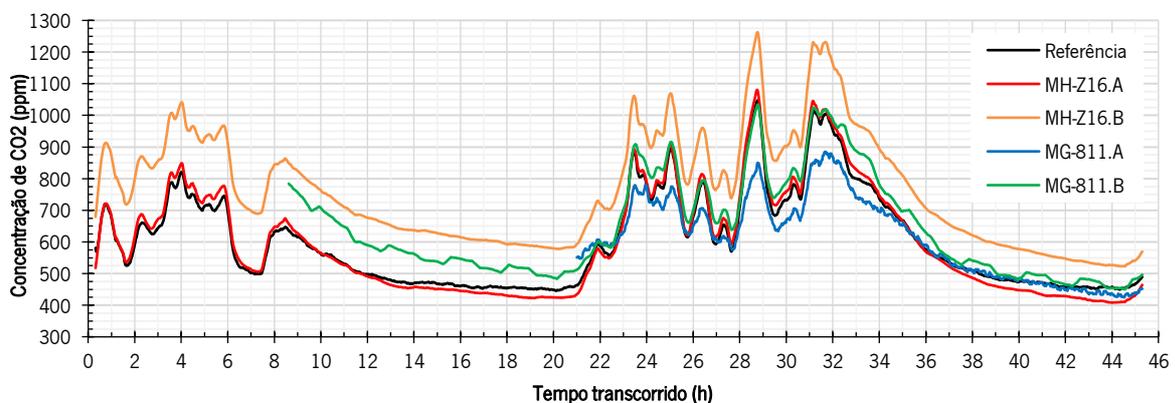


Figura 6-51. Leituras dos sensores de CO₂ na terceira execução experimental.

Assim como nos ensaios anteriores, os sensores de óxido metálico levaram um tempo a estabilizar suas leituras. A instância “A” deste sensor levou cerca de 21 horas a estabilizar, que é quando começou a acompanhar a referência com maior proximidade. O sensor “B” levou poucas horas a estabilizar-se, inclusive reduzindo seu erro sistemático gradativamente com o decorrer do experimento. Para efeitos de cálculo, o Erro Quadrático Médio destes sensores será computado após 21 horas para o sensor “A”, e após 16 horas para o sensor “B”. Estes indicadores, junto aos do MH-Z16, estão representados na Tabela 6-26.

Tabela 6-26. Erro quadrático médio dos sensores de dióxido de carbono em terceiro experimento.

Sensor		EQM (Total)
MH-Z16	A	<u>23</u>
	B	<u>164</u>
MG-811	A	<u>59</u>
	B	<u>40</u>

Neste experimento houve uma boa exatidão do sensor MH-Z16 “A”, apresentando ao final um erro quadrático médio total de 23 partes por milhão, estando contido em seu intervalo de exatidão nominal. O sensor “B” apresentou um vício, ou erro sistemático, considerável, tal como já havia sido observado no segundo experimento. Quanto aos sensores de óxido metálico, neste experimento mostraram-se relativamente exatos, caso sejam desconsideradas as leituras durante o período de estabilização que, particularmente, é um desafio peculiar, uma vez que em cada execução percebeu-se um período diferente. Ademais, em cada experimento, estes sensores mostraram curvas de calibração diferentes, tendo sido o sensor “B” mais “constante”, uma vez que nos três experimentos não houve variação de ordem de grandeza dos coeficientes da curva de ajuste. Deste modo, os sensores tipo MH-Z16 mostraram ser mais exatos que os MG-811, embora possam apresentar erros em situações com maiores concentrações. Uma vantagem destes sensores é que eles possuem, embebidos no seu circuito auxiliar, um módulo de recalibração que pode ser ativado na presença do ar limpo. Os sensores MG-811, por sua vez, podem demonstrar boa exatidão sob circunstâncias específicas, como: ter disponibilidade de um instrumento de referência para calibrar o sensor face às suas leituras, desconsiderando completamente os valores das folhas de dados; o sensor se mantenha em inércia total (portanto, este sensor não se qualifica para aplicações móveis); haja a possibilidade de pós processamento para identificar o tempo de estabilização.

6.2.1.3 *Justeza*

A análise de justeza confronta os dados, em “ppm”, dos sensores com a referência através dos gráficos de dispersão. Para esta análise, serão considerados os dados utilizados para o cálculo dos erros quadráticos médios, ou seja, serão descartados os dados de estabilização dos sensores. Valores do coeficiente de determinação próximos da unidade indicam que os sensores explicam bem a referência e, portanto, são justos com as grandezas medidas. Portanto, os gráficos de dispersão de cada um dos sensores ilustram-se nas Figuras 6-52, 6-53, 6-54 e 6-55, correspondendo aos sensores MH-Z16.A, B, MG-811.A e B, respetivamente.

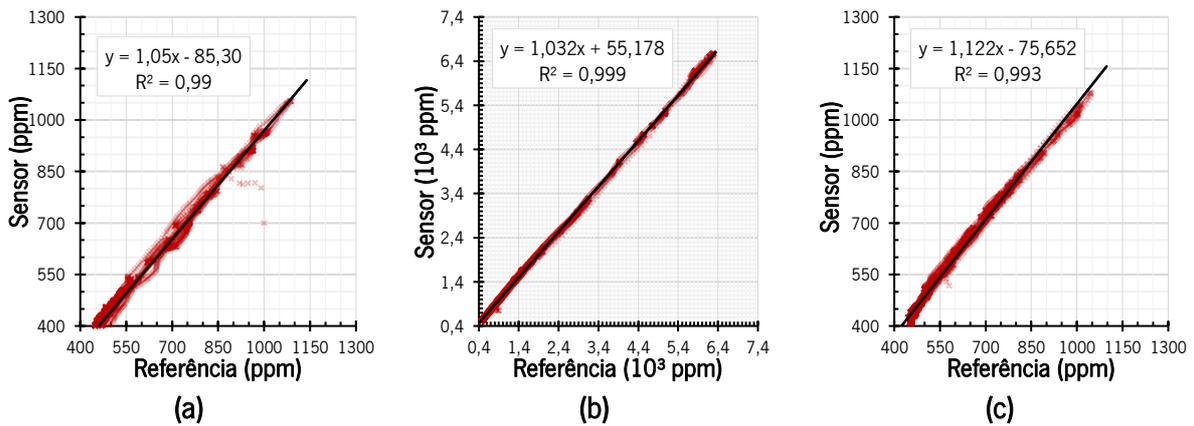


Figura 6-52. Gráficos de dispersão para avaliação de justeza do sensor MH-Z16, unidade “A” em sua: (a) primeira execução, (b) segunda execução e (c) terceira execução.

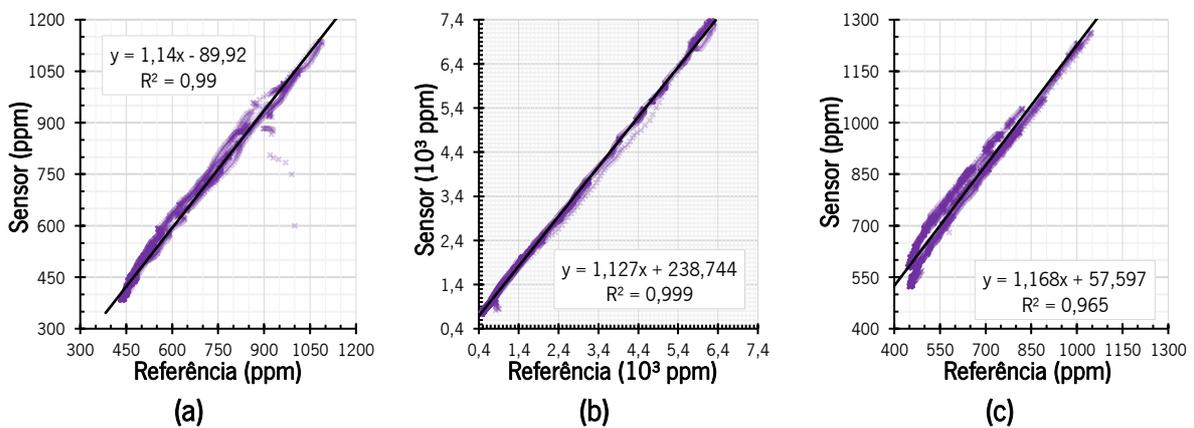


Figura 6-53. Gráficos de dispersão para avaliação de justeza do sensor MH-Z16, unidade “B” em sua: (a) primeira execução, (b) segunda execução e (c) terceira execução.

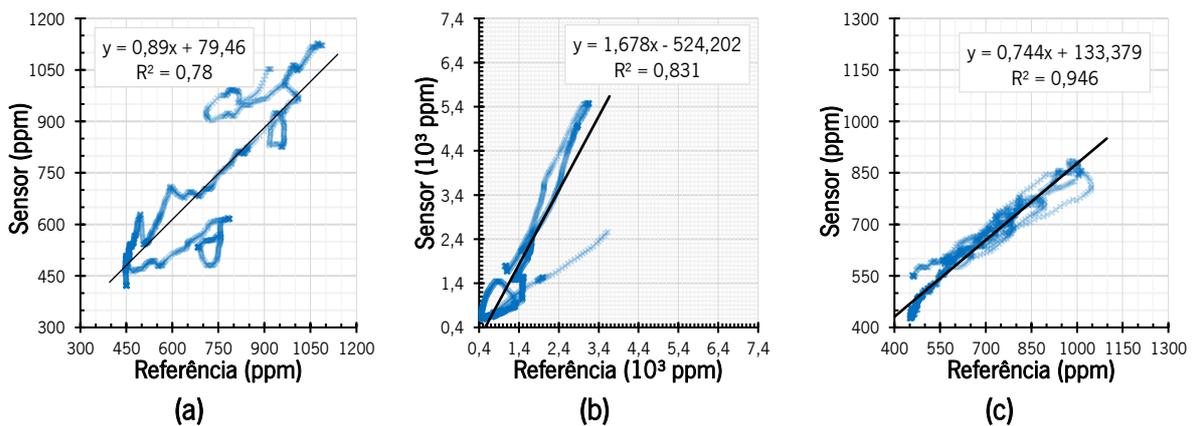


Figura 6-54. Gráficos de dispersão para avaliação de justeza do sensor MG-811, unidade “A” em sua: (a) primeira execução, (b) segunda execução e (c) terceira execução.

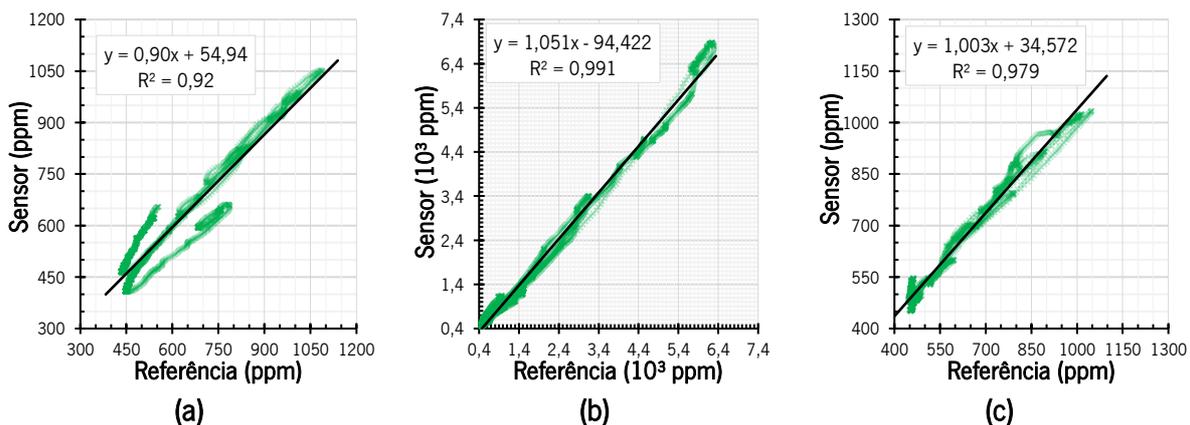


Figura 6-55. Gráficos de dispersão para avaliação de justeza do sensor MG-811, unidade “B” em sua: (a) primeira execução, (b) segunda execução e (c) terceira execução.

Como nos gráficos supra os coeficientes de determinação variaram, não se vê a necessidade de calcular as distâncias quadráticas médias das regressões lineares para com a reta de referência, uma vez que a própria classificação de justeza pode ocorrer pelo ranqueamento dos coeficientes de determinação. Deste modo, do mais justo ao menos justo: MH-Z16.A, com r^2 médio de 0.99; MH-Z16.B, com média r^2 igual a 0.98; MG-811.B, com valor médio de r^2 igual a 0.96, mas com a ressalva de descartar os tempos de estabilização; por fim, MG-811.A com valor médio de r^2 igual a 0.85, com elevados tempos de estabilização e erros absolutos consideráveis. Esta classificação reforça o ranqueamento feito em função da exatidão destes sensores.

6.2.2 Monóxido de Carbono

Ao contrário dos sensores já estudados até aqui, os dados gerados nos experimentos de recolha de informações para os sensores de monóxido de carbono situaram-se no limite inferior de deteção dos dispositivos, em razão da não controlabilidade das fontes emissoras. A título de exemplo: o valor máximo aceitável para média diária de exposição é de 8 ppm, ao passo que os sensores avaliados, nominalmente, responderiam a concentrações que partem dos 10 ppm (ressalva-se que, quase por serendipidade, foi percebido que os sensores demonstravam excitações durante o horário de maior tráfego rodoviário mesmo quando estavam sendo manuseados em ambiente fechado, longe da exposição direta. Fato que encorajou o teste destes dispositivos para tal fim). Por esta razão a análise ocorre de maneira limitada com relação à exatidão e justeza dos sensores.

Outra peculiaridade a ser discutida é o processo de conversão dos dados destes sensores. São analógicos, e sua saída é lida em valores de tensão. Entretanto é necessário efetuar uma conversão

indireta, pois o fabricante não fornece a relação “tensão *vs.* ppm CO”, mas sim “Resistência interna equivalente *vs.* ppm”. Além deste aspeto, há também a dependência destes sensores em termos de temperatura e humidade, pelo que esta foi equacionada em função dos dados oferecidos pelo fabricante (que, por sua vez, não fornece a conversão; apenas exhibe gráficos). Por isto, nesta seção também consta um subtópico dedicado ao processo de conversão do sinal destes sensores.

6.2.2.1 Conversão dos dados brutos dos sensores de CO

Apesar de, nominalmente, serem dois sensores diferentes, não há indícios de grandes diferenças entre os sensores MQ7 e MQ9, ao se analisar as folhas de dados fornecidas pelo fabricante. A similaridade entre eles também inclui a dificuldade do processo de conversão, que será aqui descrito. Por ora já é possível adiantar a afirmação de que estes sensores não podem ser usados em aplicações colaborativas, dada a complexidade da conversão de dados destes sensores. Os pontos de complexidade serão elencados na sequência da redação.

A primeira limitação ocorre com o tempo de aquecimento do sensor: nunca inferior a 48 horas. O obstáculo seguinte está na curva de conversão do sensor, que, como mencionado, não exhibe a conversão em função dos níveis elétricos, mas sim em função da variação da relação entre a resistência do elemento sensível em exposição para com o valor dela ao ar limpo. As relações nominais fornecidas pelo fabricante para os referidos sensores constam na Figura 6-56.

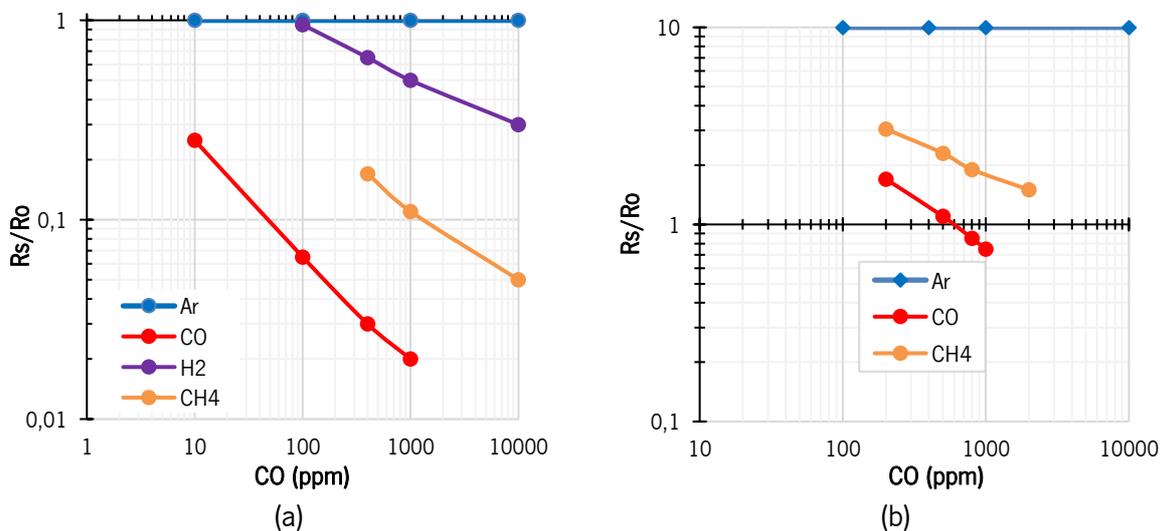


Figura 6-56. Curva de sensibilidade dos sensores MQ7 (a) e MQ9 (b).⁴⁵

⁴⁵ Adaptação do manual disponibilizado pela Zhengzhou Winsen Electronics Co. Ltd.

A conversão nominal desta relação para os valores em “ppm” é obtida pela inversão dos eixos do gráfico, de modo que a relação R_s/R_o seja o parâmetro de entrada e a concentração seja a saída da função. Entretanto, como neste experimento recorreu-se a um instrumento de referência, o processo de conversão será feito pela comparação das relações de resistência elétrica equivalente destes sensores em face às leituras de referência. Entretanto, é necessário, para a calibração, garantir que os sensores se estabilizem, deixando-os ligados por 48h em um ambiente com pouca influência de intempéries e poluição para que seja observado o nível base do sensor sem interferências dos poluentes.

Considerando que a leitura da interface se dá em patamares de tensão, e que, conforme rege o manual dos sensores, esta tensão é recolhida em um resistor fixo posto em associação série com outro elemento resistivo que tem sua resistência variável em função da concentração de CO, e esta associação é submetida à tensão de 5 volts, os níveis de resistência sensitiva relativa são obtidos pela relação exibida na Equação 6-6.

$$R_s/R_o = \frac{5 - V_{out}}{V_{out}} \quad (6-6)$$

Onde:

- R_s é a resistência do elemento sensitivo;
- R_o é a resistência do elemento sensitivo em uma situação conhecida (e.g. $R_s/R_o = 1$ em ar puro para o MQ-7);
- V_{out} é a tensão elétrica obtida na saída do sensor;

É preciso ainda aplicar a compensação de temperatura e humidade relativa para estes sensores, pois estes apresentam dependência significativa destes parâmetros, conforme bem indica a Figura 6-57, obtida do manual. Nota-se que a dependência da temperatura é aproximadamente uma relação nominal que obedece a uma estrutura linear, podendo ser representada por $y = aX + b$. Entretanto, percebe-se – também – que tanto a inclinação da reta (a) quanto o ponto de interseção (b) são dependentes da humidade relativa do ar. Assim, pode-se reescrever a então relação linear como uma função dependente da temperatura e humidade: $F(T, H) = a(H)T + b(H)$. A dependência em humidade dos coeficientes da relação linear, obtidos a partir da Figura 6-57, está explícita na Figura 6-58.

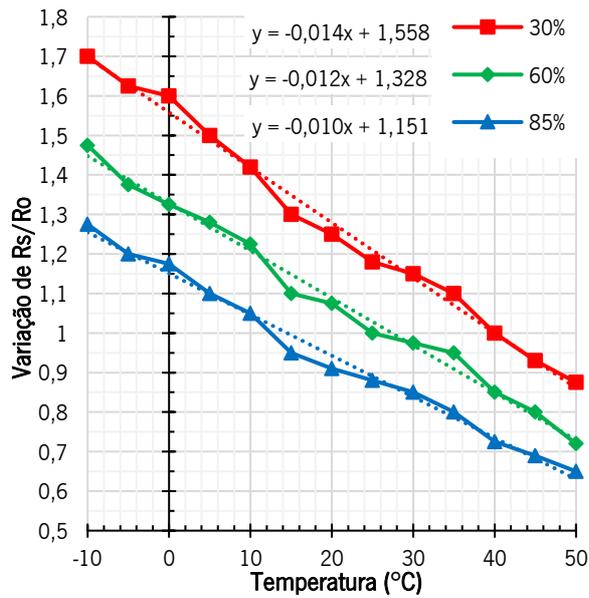


Figura 6-57. Dependência ambiental nominal da resistência sensível dos sensores MQ7 e MQ9.

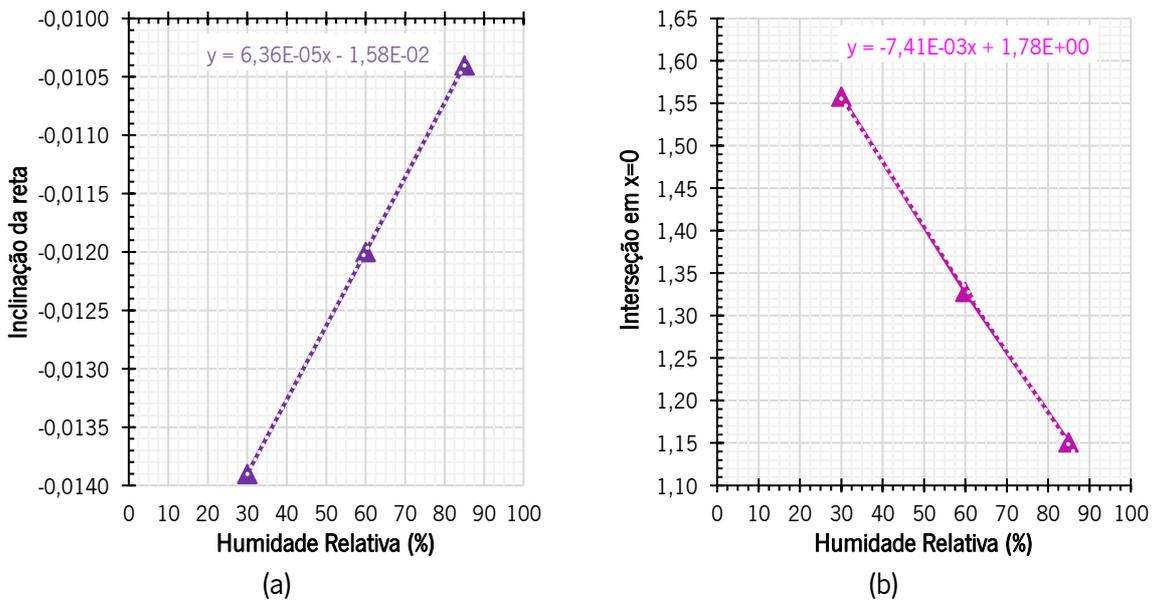


Figura 6-58. Dependência dos coeficientes lineares em função da umidade relativa do ar.

Efetuada a composição numérica destes indicadores é obtido o fator de compensação ambiental para a resistência sensível dos sensores de monóxido de carbono (que, obviamente, carece da leitura de temperatura e umidade em simultâneo, para o caso de ambientes com dinâmica climática significativa). A relação de dependência nominal é exposta na Equação 6-7, e a compensação dos valores é, portanto, calculada pela Equação 6-8.

$$F_{(T,H)} = (63,6 \times 10^{-6} \cdot H - 15,8 \times 10^{-3}) \cdot T - 7,41 \times 10^{-3} \cdot H + 1,78 \quad (6-7)$$

$$(R_s/R_o)' = \frac{R_s/R_o}{F_{(T,H)}} \quad (6-8)$$

É imprescindível que a correção demonstrada pelas equações 6-3 e 6-4 sejam efetuadas a todo o conjunto de dados, antes da obtenção do valor $R_{Sm\acute{a}x}$ (valor correspondente à situação de ar “limpo”, utilizado para obter a curva de resposta do sensor) uma vez que o gráfico 6-57 se aplica à relação R_s/R_o .

Prosseguindo o processo de conversão, é preciso então identificar o valor de R_o para cada um dos sensores. O valor R_o é obtido quando a relação R_s/R_o é máxima (consultar Figura 6-56), ou seja, quando R_s for máximo (considerando que R_o é um valor fixo). Estes sensores, por natureza, fornecem leituras oscilantes em função do tempo. Após a recolha dos dados, é recomendado aplicar um filtro de média móvel com intervalo suficiente para remover estas oscilações. Empiricamente foi observado que uma janela entre 15 e 30 minutos é suficiente para amenizar significativamente tais oscilações (considerando amostragem entre 30 e 60 segundos). Desconsidere-se, então os dados das primeiras 48 horas de coleta, e aos demais que seja anotado o maior valor de R_s . Este será correlato, portanto, a um ar limpo, sem CO (e demais poluentes interferentes), e, portanto, o valor de R_o é obtido a partir dele, respeitando as relações de cada sensor, conforme anotado no traço azul da Figura 6-56 (para o sensor MQ7, o máximo valor de R_s é igual a R_o ; para o MQ9, divide-se este valor por 10).

Considerando as experiências prévias com os sensores de óxido metálico, reforçada pela observação visual dos valores fornecidos pelos sensores durante as etapas de aquecimento, conclui-se que cada sensor responde de maneira diferente, e foge à conversão nominal ilustrada anteriormente na Figura 5-56. Destaca-se aqui outro problema: a escassez em produzir, ou expor os sensores a CO em quantidades significativas. Uma vez que são poluentes oriundos exclusivamente da queima de combustíveis, a exposição dos sensores e do instrumento de referência limita-se às circunstâncias locais de fontes emissoras, no caso desta investigação, o tráfego rodoviário. E esta exposição, na maior parte do tempo, é de pequena intensidade, situando-se abaixo do limiar de detecção nominal dos sensores. Usando dados da primeira exposição ao exterior (a ser explicitada no subtópico seguinte), foi obtido o modelo de conversão para *ppm* utilizando a relação R_s/R_o normalizada (entre 0 e 1), e corrigida pelo fator de compensação em função da temperatura e humidade, conforme ilustra a Figura 6-59. A leitura de referência que gerou esta conversão é ilustrada na Figura 6-60.

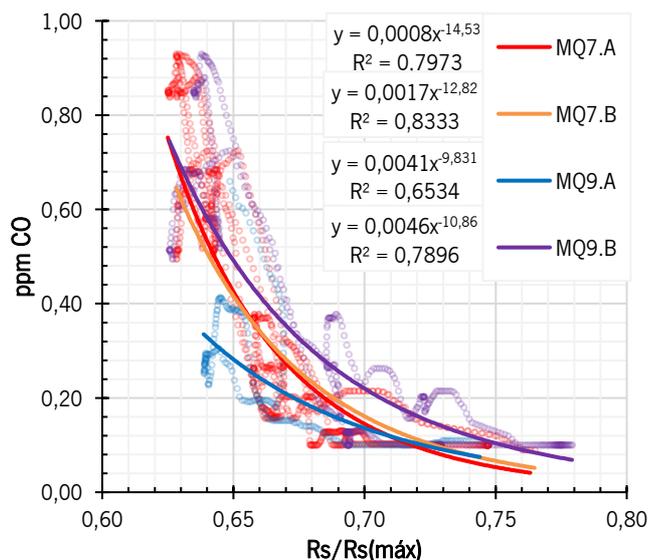


Figura 6-59. Curvas de ajuste para os sensores de CO em função da variação da resistência sensível normalizada.

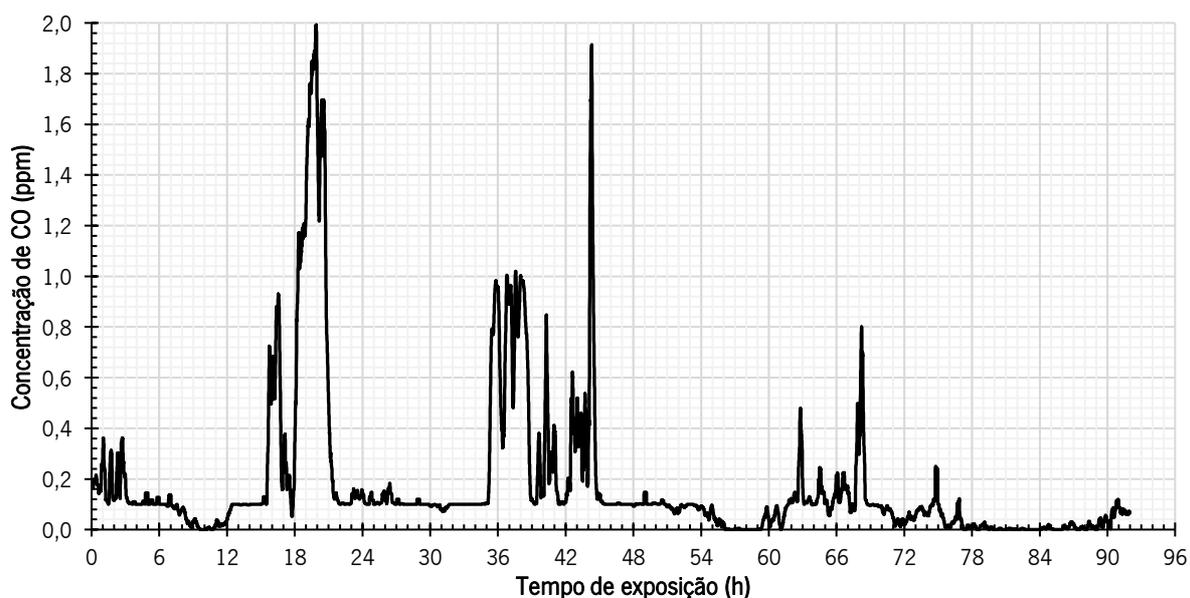


Figura 6-60. Leituras de CO fornecidas pela referência TSI em exposição ao ar exterior nas proximidades da Universidade do Minho.

Convém ressaltar que as curvas exibidas na Figura 6-59 foram obtidas de uma região específica do experimento, onde percebeu-se que houve excitação dos sensores e da referência em simultâneo, sem falsos positivos ou falsos negativos (a ser discutido mais adiante). Neste caso, o recorte de dados que forneceu a curva de ajuste está compreendido entre as 16 e 18 horas de experimento. A relação de ajuste para os sensores é apresentada na Tabela 6-27. O modelo matemático em base potencial foi escolhido respeitando o tipo de resposta sugerida pelo fabricante na sua folha de dados.

Tabela 6-27. Sumário de calibração dos sensores de monóxido de carbono em primeira exposição experimental.

Sensor	Conversão [$x = R_s/R_{s(max)}$]	r^2
MQ7.A	$ppm_{CO} = 0.8 \cdot 10^{-3} \cdot x^{-14.53}$	0.797
MQ7.B	$ppm_{CO} = 1.7 \cdot 10^{-3} \cdot x^{-12.82}$	0.833
MQ9.A	$ppm_{CO} = 4.1 \cdot 10^{-3} \cdot x^{-9.83}$	0.653
MQ9.B	$ppm_{CO} = 4.6 \cdot 10^{-3} \cdot x^{-10.86}$	0.790

Destaca-se, aqui, que estes sensores se comportaram tal qual os sensores de óxido metálico para dióxido de carbono, com relação à calibração: para cada execução se faz necessária uma conversão individual, onde cada uma dela gera novos coeficientes para as funções apresentadas supra. As razões pelas quais estes sensores comportam-se de tal maneira não ficaram claros ao final dos experimentos.

6.2.2.2 Exatidão

Antes que os cálculos de exatidão sejam apresentados, convém evidenciar que há uma expectativa de erros significativos, uma vez que foram observados, repetidamente, a incidência de falsos negativos e falsos positivos. Que se destaque estes dados estão muito aquém do limite de detecção nominal informado pelo fabricante (10 ppm) e, ainda assim, percebe-se que os sensores foram capazes de acompanhar, em alguns momentos, as leituras do sensor de referência.

Utilizando as conversões apresentadas anteriormente na Tabela 6-27, a Figura 6-61 exibe as leituras dos sensores de monóxido de carbono referentes à primeira exposição experimental. As curvas foram amaciadas por média móvel de 15 amostras para melhor visualização.

Há picos de CO observados pela referência próximos das 19 horas e das 44 horas que não foram percebidos pelos sensores. Nestes horários foram observados as maiores temperaturas e menores humidades relativas durante o experimento. Como o instrumento de referência utiliza um sensor eletroquímico, mais sensível a este tipo de interferência, julga-se, portanto, que estes picos são falsos positivos em razão de interferência climática no elemento sensível de sua ponta de prova. Por outro lado, os falsos positivos dos sensores serão mantidos, pois devem ser incluídos em sua análise. Os valores obtidos pelo erro quadrático médio nesta exposição experimental estão representados na Tabela 6-28.

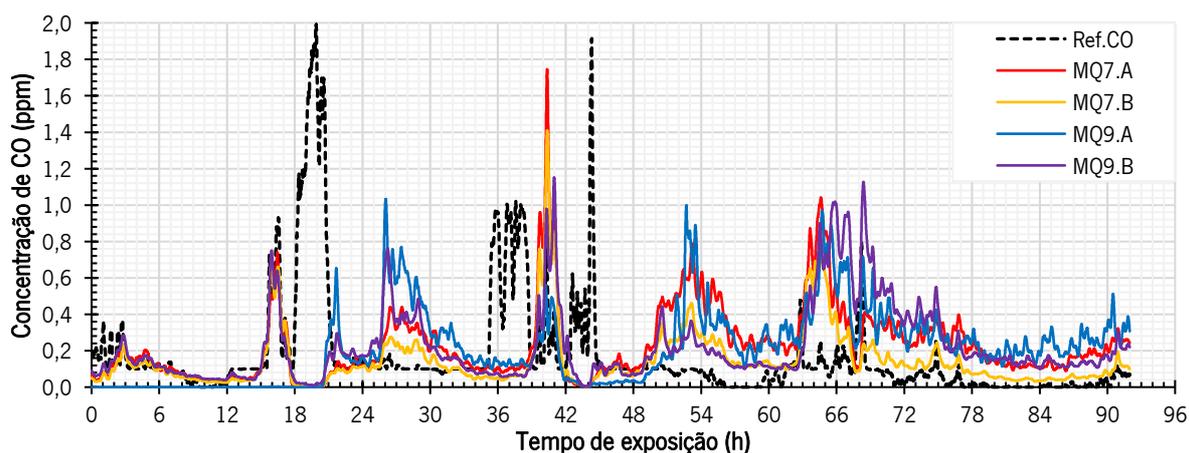


Figura 6-61. Leituras dos sensores de monóxido de carbono obtidas da primeira exposição experimental ao ar exterior após aquecimento.

Tabela 6-28. Erro Quadrático Médio dos sensores de monóxido de carbono obtido na primeira exposição experimental.

Sensor	Erro Quadrático Médio (<i>RMSE</i>)
MQ7.A	0,27
MQ7.B	0,21
MQ9.A	0,29
MQ9.B	0,27

Estes dados não mostram qualquer diferença significativa entre os sensores, tampouco que haja um erro relativo impactante. Por outro lado, a análise destes números precisa ter em consideração que a referência captou pequena incidência, apontando um máximo um pouco abaixo de 1.0 ppm (os falsos positivos foram removidos, e as leituras foram comprimidas para a média entre os valores imediatamente antes da subida e os valores imediatamente após a descida).

Em caráter de duplicata, os sensores foram novamente expostos ao ar exterior às mesmas condições (à exceção de uma redução na janela temporal). Para mitigar os (até então imprevisíveis) falsos positivos ocasionados pela elevação da temperatura, e associada à redução da humidade relativa, foi providenciada uma caixa auxiliar para proteger os sensores da incidência solar indireta e um guarda-sol para reforçar esta proteção. Nesta nova exposição, foi necessário aplicar um novo ajuste dos dados, fenómeno que também ocorreu com os sensores de óxido metálico para dióxido de carbono. As curvas de ajuste para esta exposição apresentam-se na Figura 6-62, o sumário de calibração na Tabela 6-29, e as leituras, devidamente convertidas, na Figura 6-63.

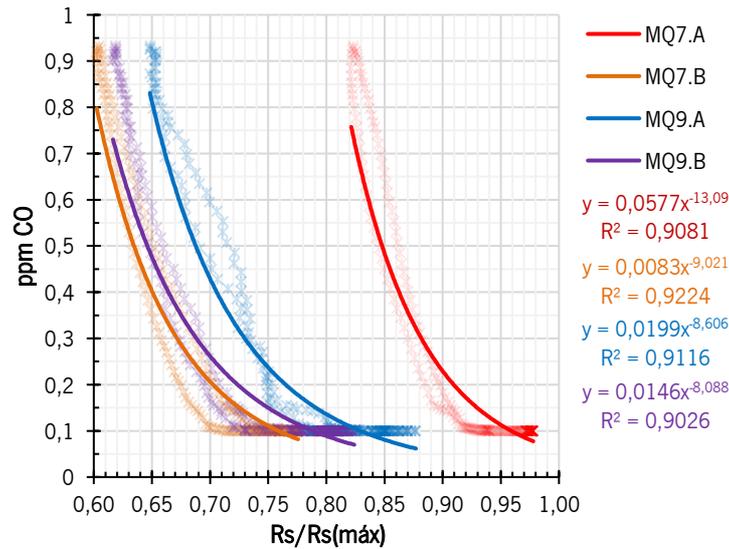


Figura 6-62. Curva de ajuste dos sensores de CO em função da resistência sensível normalizada durante segunda exposição experimental ao ar exterior.

Tabela 6-29. Sumário de calibração dos sensores de monóxido de carbono em segunda exposição experimental.

Sensor	Conversão [$x = R_s/R_{s(máx)}$]	r^2
MQ7.A	$ppm_{CO} = 57.7 \cdot 10^{-3} \cdot x^{-13.09}$	0.908
MQ7.B	$ppm_{CO} = 8.3 \cdot 10^{-3} \cdot x^{-9.02}$	0.922
MQ9.A	$ppm_{CO} = 19.9 \cdot 10^{-3} \cdot x^{-8.61}$	0.912
MQ9.B	$ppm_{CO} = 14.6 \cdot 10^{-3} \cdot x^{-8.09}$	0.903

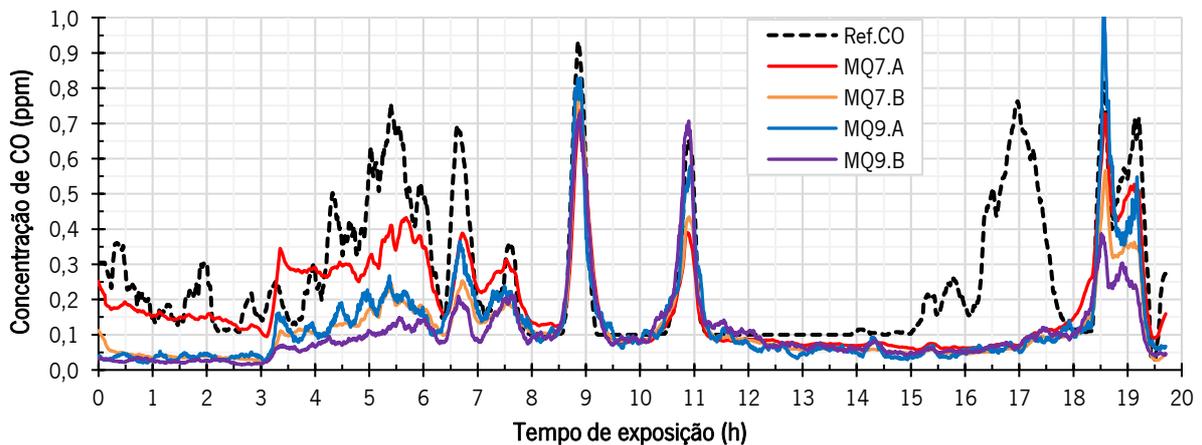


Figura 6-63. Leituras dos sensores de monóxido de carbono obtidas da segunda exposição experimental ao ar exterior.

Assim como ocorreu com os sensores de óxido metálico para dióxido de carbono, estes sensores apresentaram uma relação diferente com a referência, como bem mostrou o sumário com as curvas de

ajuste na Tabela 6-29. Há, portanto, indícios que a curva de ajuste de um experimento é invalidada quando os sensores são desligados por muitas horas. Isto é, particularmente, algo problemático, uma vez que a curva de ajuste é obtida após os sensores estarem ligados e após uma recolha significativa de dados. Para contornar este problema, sugere-se aqui que, para a calibração de sensores de óxido metálico, os dados sejam extraídos sem que os sensores sejam desligados. Ainda, é importante frisar que apesar da observância de divergências, estas são de pequena magnitude (< 1.0 ppm).

Para a análise da exatidão, como neste experimento não foi observado um falso positivo significativo associado à incidência solar, não se faz necessária uma adaptação no conjunto de dados das referências. Deste modo, o erro quadrático médio calculado para cada um dos sensores está exibido na Tabela 6-30.

Tabela 6-30. Erro Quadrático Médio dos sensores de monóxido de carbono obtido na primeira exposição experimental.

Sensor	Erro Quadrático Médio (<i>RMSE</i>)
MQ7.A	0.11
MQ7.B	0.15
MQ9.A	0.18
MQ9.B	0.27

Os erros mantiveram-se numericamente menores, se comparados à primeira execução. Entretanto, o tempo de exposição foi reduzido e foram percebidas, portanto, menos excitações dos sensores. Do ponto de vista técnico, os dados aqui analisados sugerem que estes sensores podem atuar como detetores também em menor qualidade, uma vez que não foi possível averiguá-los em altas concentrações.

Uma observação de carácter técnico foi percebida sobre estes sensores somente após os experimentos, é a de que há a necessidade de uma alimentação elétrica rigorosamente estável, uma vez que as leituras destes sensores se dão em razão da tensão nos terminais de um elemento resistivo. Alterações na tensão de alimentação dos sensores, quer para mais ou para menos, alteram não só a temperatura no elemento sensitivo, como também o valor em Volts no elemento em que há a coleta de tensão, mascarando – portanto – a leitura dos sensores. Por exemplo, surtos de tensão podem provocar valores demasiadamente altos na leitura, sugerindo que a resistência do elemento sensitivo diminuiu em razão da alta concentração de monóxido de carbono, provocando um falso positivo em razão de perturbações na entrada. Portanto, sugere-se que estes sensores sejam alimentados utilizando um regulador de tensão em 5 volts, em uma fonte de tensão nunca inferior a estes 5 volts.

Concluindo a análise de exatidão destes sensores, pode-se dizer que são promissores quanto ao seu funcionamento para pequenas concentrações, embora o ruído seja significativo nesta região. Nenhum sensor destacou-se do outro, tendo eles sido semelhantes entre si com relação ao erro quadrático médio, ainda que os sensores MQ7 tenham apresentado erros ligeiramente inferiores.

Seria interessante a submissão destes sensores, em simultâneo com a referência, a concentrações mais significativas de modo que se permita obter uma curva de ajuste mais adequada para toda a gama de interesse das aplicações de monitoramento da qualidade do ar.

6.2.2.3 Justeza

A justeza dos sensores de CO tem claras condições delimitantes, uma vez que há uma presença significativa de ruído produzido nos sensores, o que levaria a uma deterioração nos coeficientes de determinação calculados, quando comparados à referência, que é mais estável. Portanto, os gráficos de dispersão contendo as leituras dos sensores para aferição dos seus coeficientes de determinação são gerados considerando apenas os intervalos em que há excitação legítima da referência, ou seja, em que não há incidência de falsos positivos e que tanto a referência quanto os sensores são excitados.

Os gráficos obtidos da primeira e segunda exposição experimental são ilustrados na Figura 6-64, as quais incluem os coeficientes de determinação (r^2) para cada sensor, como resultado da aplicação das curvas de ajuste apresentadas anteriormente nas Tabelas 6-27 e 6-29.

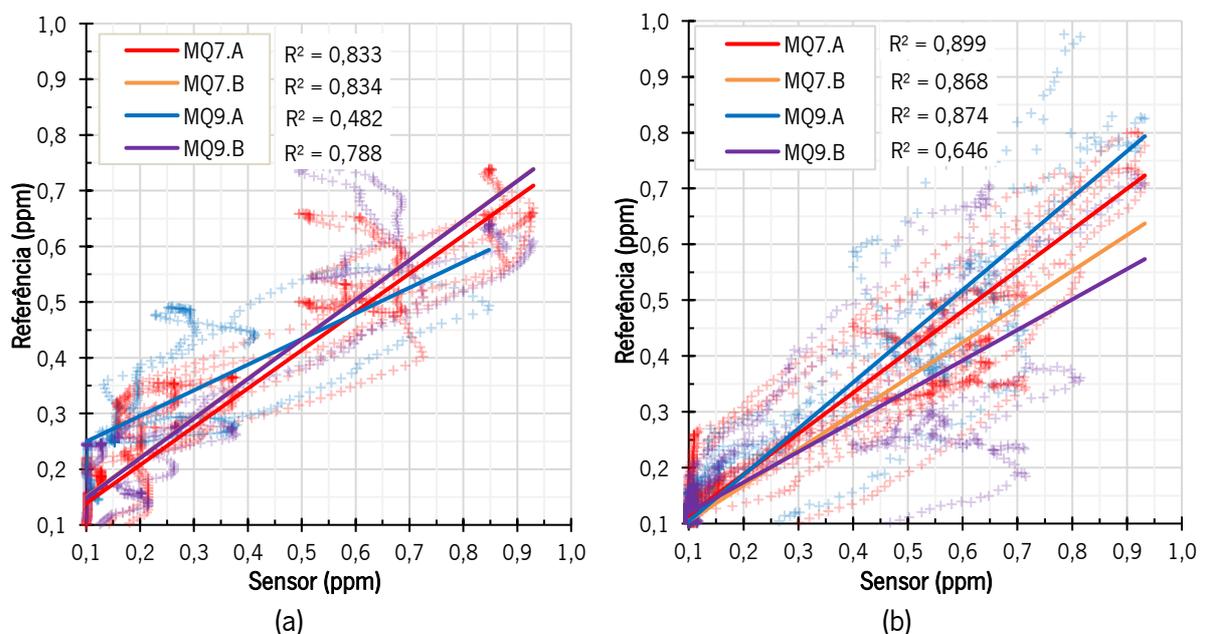


Figura 6-64. Gráficos de dispersão para avaliação de justeza dos sensores referentes à primeira (a) e segunda (b) exposição experimental em situações de baixa concentração de monóxido de carbono.

O sumário dos coeficientes de determinação está contido na Tabela 6-31. Devido aos espalhamentos significativos observados nestas figuras, julga-se que os modelos lineares não são satisfatórios para efeitos comparativos nesta análise.

Tabela 6-31. Sumário com coeficientes de determinação computados em cada exposição experimental.

Sensor	r^2	
	1 ^a Exec.	2 ^a Exec.
MQ7.A	0.833	0.899
MQ7.B	0.834	0.868
MQ9.A	0.482	0.874
MQ9.B	0.788	0.646

Os sensores MQ7 foram mais consistentes nas duas exposições, tendo mantido sua resposta similar. Os valores de r^2 acima descrevem uma forte explicação da referência pelos sensores MQ7, e pelo sensor MQ9.B na primeira execução, e MQ9.A na segunda execução. Entretanto é importante ter em vista que um elevado coeficiente de determinação pode não ser suficiente para indicar uma boa veracidade dos dados, sobretudo se houver um grande espalhamento, como estes que foram observados para estes sensores.

Portanto, sobre estes sensores no que toca à justeza, é prudente dizer que são sensores promissores, com a salvaguarda de que alguns aspetos técnicos sejam respeitados, como a estabilidade da tensão, a compensação de temperatura e humidade, e a calibração “*on the run*” (colher os dados sem desligar os sensores da energia e obter a curva de ajuste). Com as evidências encontradas neste trabalho, pode-se apontar que estes sensores podem funcionar adequadamente, por ora, como bons detetores de gases, e como promissores sensores para – pelo menos – baixas concentrações. A elucidação do quão bons estes sensores de monóxido de carbono podem ser requer esforços adicionais em trabalhos futuros com experimentos dedicados à exposição controlada a uma gama mais ampla deste gás.

6.2.3 Ozono

Os sensores de ozono foram ligados ao Arduino obedecendo aos esquemas de ligação referidos na seção 4.2.2. Como os sensores da família MiCS da SGX Sensortech são desenhados especificamente para uma plataforma microcontrolada proprietária, foi preciso escrever uma biblioteca compatível com a linguagem C interpretada pela IDE do Arduino baseando-se no código fornecido pelo fabricante para a família de microcontroladores da família AVR.

O plano experimental para estes sensores se assemelhara ao para o monóxido de carbono: tomar vantagem da incidência natural deste gás oriundo das fontes poluentes (neste caso, pela conversão do NO_x em O₃ após incidência prolongada de radiação ultravioleta). Entretanto, com intervalo de poucos dias, o sinal-base dos sensores (valor estável quando há ausência do gás), em valores de tensão elétrica, passou a diminuir gradativamente até atingir o zero, sugerindo uma avaria elétrica. Ao tentar verificar unidades para reposição, observou-se que este sensor foi descontinuado pelo fabricante.

Portanto, dada a quantidade reduzida de amostras obtidas antes da avaria, não foi possível obter informações relevantes acerca de seu desempenho. Por outro lado, as avarias encontradas nas duas unidades adquiridas não podem ser interpretadas como indício de um problema geral deste modelo de sensor, uma vez que este continua sendo recomendado no *site* "aqicn.org"⁴⁶ que exibe em tempo real valores de qualidade do ar monitorados exclusivamente por sensores de baixo custo espalhados pelo mundo.

6.3 Resumo

Considerando que este capítulo analisou diferentes sensores em seu curso, uma seção final reunindo breves considerações técnicas e individuais para cada modelo de sensor se faz pertinente.

6.3.1 Sensores climáticos

A síntese dos dados de desempenho dos sensores de temperatura, de todos os experimentos, encontra-se na Tabela 6-32.

Tabela 6-32. Sumário de dados de desempenho obtidos dos sensores de temperatura.

Sensor	Desv. Pad (°C)	Erro Médio Absoluto (°C) ⁴⁷	Coeficiente de Determinação (r ²)	Linearidade (a + bx)	
				a	b
DS18B20	0.05 – 0.14	0.03 – 1.34	0.99+	0.765 – 1.931	0.976 – 0.982
AM2302	0.05 – 0.17	0.04 – 0.96	0.99+	0.278 – 1.238	0.951 – 0.986
HTU21D	0.04 – 0.16	0.00 – 0.61	0.99+	0.216 – 1.275	0.983 – 1.001
BMP180	0.03 – 0.17	0.15 – 1.27	0.99+	-0.649 – 0.363	0.992 – 1.004
BME280	0.04 – 0.18	0.94 – 2.17	0.99+	1.354 – 2.954	0.961 – 0.997
MPL3115A2	0.04 – 0.16	0.84 – 1.64	0.99+	-1.142 – -0.236	0.976 – 1.006

⁴⁶ <http://aqicn.org/sensor/> (Acessado em dezembro de 2018)

⁴⁷ Foi calculado o módulo a partir dos resultados apresentados para a análise de viés dos sensores (erro médio).

Conclui-se que sensores de temperatura foram satisfatoriamente precisos, lineares e apresentaram pouca influência do erro aleatório. Entretanto, a presença do erro sistemático (viés) foi mais significativa.

A síntese dos dados de desempenho dos sensores de humidade relativa, de todos os experimentos, encontra-se na Tabela 6-33.

Tabela 6-33. Sumário de dados de desempenho obtidos dos sensores de humidade relativa.

Sensor	Desv. Pad (%)	Erro Médio Absoluto (%) ⁴⁸	Coeficiente de Determinação (r ²)	Linearidade (a + bx)	
				a	b
AM2302	0.05 – 1.03	0.6 – 5.7	0.99+	-11.3 – -8.1	1.07 – 1.16
HTU21D	0.04 – 0.90	1.3 – 9.6	0.99+	-11.4 – -8.6	1.05 – 1.06
BME280	0.09 – 0.77	0.0 – 6.2	0.99+	-8.0 – -5.1	1.08 – 1.11

Os sensores de humidade relativa tendem a apresentar precisão inferior em valores mais baixos de humidade relativa. Observou-se presença significativa do erro sistemático, que tende a diminuir em humidades mais elevadas. Também apresentaram boa linearidade, apesar de eventualmente carecerem de correção de sensibilidade (ganho), o que pode levar à majoração de variações relativas.

A síntese dos dados de desempenho dos sensores de pressão atmosférica, de todos os experimentos, encontra-se na Tabela 6-34. Note que estes sensores não tiveram sua precisão e exatidão avaliadas como os demais sensores em razão da indisponibilidade de um instrumento de referência. Todos os valores exibidos na tabela correspondem à comparativos entre instâncias diferentes de um mesmo modelo de sensor.

Tabela 6-34. Sumário de dados de desempenho obtidos dos sensores de pressão atmosférica.

Sensor	Erro Quadrático Médio (hPa)	Coeficiente de Determinação (r ²)	Linearidade (a + bx)	
			a	b
BMP180	0.294 – 0.850	0.99+	-45.33 – 53.59	0.946 – 1.046
BME280	0.104 – 1.294	0.99+	-52.38 – 98.59	0.902 – 1.054
MPL3115A2	0.343 – 0.991	0.99+	-129.5 – 15.75	0.984 – 1.129

Estes sensores apresentaram elevado grau de correlação entre instâncias de um mesmo modelo ($r^2 > 0.99$), bem como boa linearidade. Foram observados, entretanto, valores significativos de Erro Quadrático Médio (RMSE) entre sensores de mesma marca.

⁴⁸ Foi calculado o módulo a partir dos resultados apresentados para a análise de viés dos sensores (erro médio).

6.3.2 Sensores de qualidade do ar

A síntese dos dados de desempenho dos sensores de dióxido de carbono, de todos os experimentos, encontra-se na Tabela 6-35. Estes sensores foram avaliados entre 400 e 6300 ppm.

Tabela 6-35. Sumário de dados de desempenho obtidos dos sensores de dióxido de carbono.

Sensor	Erro Quadrático Médio (ppm)	Coeficiente de Determinação (r^2)	Linearidade ($a + bx$)	
			a	b
MH-Z16	23 – 557	0.965 – 0.999	-89.9 – 238.7	1.03 – 1.17
MG-811	40 – 857	0.780 – 0.991	-524 – 133.4	0.74 – 1.68

Os sensores de infravermelho não dispersivo (NDIR) para CO₂ apresentaram melhor desempenho que os sensores de óxido metálico semiconductor (MOS). Entretanto, sugere-se que o uso de técnicas avançadas de calibração (e.g. aprendizado de máquina) possam elevar a qualidade dos dados dos sensores de óxido metálico.

A síntese dos dados de desempenho dos sensores de monóxido de carbono, de todos os experimentos, encontra-se na Tabela 6-36. Note que estes sensores foram avaliados em concentrações entre 0 e 2ppm.

Tabela 6-36. Sumário de dados de desempenho obtidos dos sensores de monóxido de carbono.

Sensor	Erro Quadrático Médio (ppm)	Coeficiente de Determinação (r^2)
MQ-7	0.11 – 0.27	0.833 – 0.899
MQ-9	0.18 – 0.29	0.482 – 0.874

Apesar de os números obtidos dos sensores de monóxido de carbono não serem conclusivos de uma maneira geral, demonstraram que estes sensores são promissores para o monitoramento deste gás em baixas concentrações (<10ppm), chegando a apresentar coeficientes de determinação acima de 0.8 neste cenário.

CAPÍTULO 7

7 DISCUSSÃO E CONCLUSÃO

Neste capítulo serão apresentadas as conclusões advindas das discussões apresentadas no curso das análises do Capítulo 6. Apesar de muitos apontamentos conclusivos já terem sido postos ao longo do capítulo anterior, aqui os resultados são sumarizados e, em alguns casos, acrescidos de considerações pertinentes quanto aos achados sobre o desempenho dos sensores.

7.1 Resumo dos Resultados

Frise-se que os resultados e discussões reunidos nesta seção culminaram de um processo longo de investigação e análise, consequência da sensibilidade em identificar a qualidade dos dados dos sensores de baixo custo em campanhas colaborativas de monitoramento ambiental como um problema pouco elucidado até então. Durante o curso metodológico o trabalho permeou tanto um ambiente semi-empírico, ao ter de se escolher quantos e quais sensores investigar (em razão das limitações), quanto científico, ao delinear um plano experimental e uma análise numérica de desempenho que permitissem uma avaliação adequada dos dispositivos investigados.

Ademais, esta investigação permitiu, até o atual momento, a elaboração de três artigos científicos. Dos quais: um, já publicado em conferência, trata do uso de sensores ambientais embutidos em *smartphones* (de Araújo et al., 2017); o segundo, submetido e sob análise em uma revista (*Journal of Sensors*, Hindawi), contempla os achados sobre o uso de sensores ambientais de baixo custo usando a qualidade das leituras como baliza; o terceiro, também publicado em uma conferência (de Araújo et al., 2020), trata do uso de um algoritmo de *Machine Learning* para identificar grandezas interferentes e assim prever o desvio das leituras dos sensores de pressão atmosférica, sendo alimentado pelos dados de sensores de temperatura e humidade relativa posicionados em proximidade. Este artigo veio a ganhar o prêmio de “*Best Student Paper Award*”.

As subseções a seguir, portanto, intendem a apresentar de forma objetiva os principais pontos conclusivos que puderam ser identificados nesta análise.

7.1.1 Sensores climáticos

Das conclusões observadas para estes sensores, elencam-se:

- Os sensores climáticos escolhidos podem ser considerados suficientes para o monitoramento colaborativo em centros urbanos, pois apresentaram valores de exatidão, precisão e justeza satisfatórios quando comparados ao instrumento de referência. Por outro lado, alguns deles seriam considerados insuficientes caso fossem comparados com requisitos “profissionais”, como os elencados pela Organização Mundial de Meteorologia.
- Dos problemas encontrados nos sensores de temperatura, o mais evidente – detetado nos ensaios – é a presença de um viés (*bias*) constante em alguns sensores. Este viés não seria difícil de ser identificado por um indivíduo que esteja engajado em uma campanha de sensoriamento ambiental colaborativo, uma vez que se pode, por exemplo, detetar o ponto de ebulição da água expondo o sensor ao vapor da fervura e verificando sua leitura, que deve ser de 100°C (se ao nível do mar). Entretanto, não se exclui a possibilidade de que campanhas colaborativas em funcionamento estejam utilizando leituras enviesadas. Por outro lado, dos sensores avaliados, os de temperatura foram os que obtiveram os melhores indicadores de desempenho.
- Os sensores de humidade apresentam dependência de desempenho em função tanto da própria humidade relativa do ar quanto da temperatura. Portanto é provável que um mesmo sensor apresente desempenho diferente em estações diferentes do ano, ou em pontos diferentes do mesmo centro urbano (p. ex.: dois sensores idênticos na mesma campanha de monitoramento, sendo um utilizado em uma área fresca, e outro em uma zona de ilha de calor). As melhores precisões foram observadas em humidades mais elevadas (patamar de 80%). Os menores erros – ao se levar em consideração as temperaturas – foram observados em 10°C e 80% de humidade relativa. Conforme a temperatura se eleva, o erro também cresce nas humidades relativas mais baixas. É preciso ressaltar que o sensor HTU21D teve um desempenho pobre em termos de exatidão.
- Os sensores de pressão apresentaram resultados concordantes entre diferentes instâncias do mesmo modelo. Também demonstraram a existência da dependência em temperatura. Olhando

para a tecnologia de fabricação, que é – basicamente – uma estrutura microfabricada que se dilata ou expande em razão da pressão atmosférica, a dependência da temperatura pode ser explicada por esta causar este mesmo efeito na estrutura: a de dilatação ou contração. Os ruídos percebidos nestes sensores podem vir a ser um fator negativo em seu emprego como altímetros ou ferramentas para posicionamento em interiores, onde é necessária a exatidão da ordem de 0.125hPa, variação correspondente a cada 1m de altitude.

7.1.2 Sensores de qualidade do ar.

Das conclusões gerais acerca dos sensores de qualidade do ar investigados, elenca-se que:

- Há uma reprodutibilidade muito pobre para os sensores de óxido metálico. Pelas observações tomadas, conclui-se que é muito pouco provável que dois sensores de mesmo modelo – e comprados do mesmo fornecedor – respondam de maneira idêntica. Portanto, é necessário que – individualmente – se faça um confronto com um instrumento de referência, pois mesmo as curvas de resposta fornecidas pelo fabricante são insuficientes para a tradução das leituras em valores de concentração. Entretanto, o modo de conversão por variação relativa utilizado pelo MQ-7 e MQ-9 tendem a minimizar essa discrepância, mas ainda assim há uma diferença significativa, conforme constata-se pelas curvas de conversão apresentadas.
- Particularmente sobre os sensores de monóxido de carbono, há evidências promissoras da possibilidade de ajuste para que estes consigam monitorar abaixo de seu limiar nominal de detecção. Entretanto os dados sugerem que estes sensores, quando ajustados para uma faixa de operação específica, não podem ser utilizados com a mesma exatidão para outras faixas. Por exemplo, a curva de ajuste para pequenas concentrações acrescenta erros significativos em níveis mais elevados, e vice-versa. De maneira conclusiva, pode-se dizer por ora que estes sensores – desde que adequadamente observados – podem atuar como detetores de monóxido de carbono, apontando se há ou não a presença do gás.
- Foram observadas muitas interferências não previstas para o sensor de dióxido de carbono a óxido metálico (MG-811). Este sensor sofre forte influência da posição em que o sensor é posto. O sensor também é sensível ao movimento, e tem sua saída alterada caso haja inclinação de sua camada sensitiva, o que impossibilita a este sensor a sua aplicação em – por exemplo –

sensoriamento móvel, por qualquer que seja a natureza da mobilidade. Sua exposição ao exterior a baixas temperaturas também compromete seu monitoramento adequado. Com relação ao seu desempenho, os dados foram inconclusivos, uma vez que um dos sensores mostrou bom resultado e o outro não.

- Os sensores de Infra-Vermelho Não Dispersivo (*NDIR*) para dióxido de carbono apresentaram resultados satisfatórios, ainda que sugerindo a necessidade de calibração. No entanto estes sensores encontram-se disponíveis com um recurso de autocalibração, que permite ao usuário – mesmo sem treino específico – calibrar o sensor por si. Acompanharam a referência com índice de correlação muito forte, e obtiveram os melhores resultados em termos de exatidão. Isto habilitou a utilização destes sensores por alunos do Instituto Federal do Rio Grande do Norte em um trabalho para monitoramento de níveis de dióxido de carbono em sala de aula, que culminou em uma apresentação em um congresso de iniciação científica (Laurentino et al., 2018). Não foram encontrados impeditivos, técnicos ou de desempenho, para a aplicação do MH-Z16 em qualquer que seja a aplicação de monitoramento – seja ela interior ou exterior.

7.2 Limitações do trabalho

Apesar dos resultados promissores, em maior parte, garantindo a recomendação de utilização de alguns destes sensores em aplicações de monitoramento ambiental urbano, algumas reflexões sobre as limitações deste trabalho merecem ser pontuadas. São elas:

- A seleção dos sensores ocorreu em uma janela de tempo finita, datada. Dada a grande evolução (e renovação) deste nicho de mercado, há a probabilidade de que alguns destes sensores já não sejam mais tão utilizados à data da conclusão deste documento (muito embora não tenha havido mudanças significativas nas tecnologias empregadas para o fabrico destes dispositivos neste interstício de tempo). O caso mais eminente desta condição é o sensor de Ozono, que à presente data não é mais comercializado.
- A diversidade, e modelos, de sensores escolhidos podem não ser universalmente representativos. Diante de uma ampla gama disponível no mercado, pode ser que a análise aqui empregada não tenha representatividade estatística para qualificar (nem positivamente nem

negativamente) todos os sensores de baixo e ultrabaixo custo para monitoramento ambiental (seja clima ou qualidade do ar). Entretanto esta limitação não foi uma escolha de planejamento, e sim o melhor cenário possível.

- A baixa variedade de sensores de Ozono que se enquadravam no critério também merece um realce, pois o único modelo escolhido ao final não apresentou nenhum resultado viável ao monitoramento participativo.
- A ausência de um instrumento de referência para pressão atmosférica não permitiu que os sensores de pressão fossem escrutinados da mesma maneira como foram os sensores de umidade relativa e temperatura.
- A ausência de uma câmara ou ambiente com controle para o monóxido de carbono seria de grande valia para dados mais conclusivos sobre o comportamento destes sensores de baixo custo na faixa de operação de interesse do monitoramento urbano, que é de até 10ppm.

7.3 Trabalhos futuros

As possibilidades abertas por esta investigação para futuros trabalhos incluem, mas não se limitam a:

- Empregar esta análise de qualidade de dados em sistemas de monitoramento em funcionamento que utilizem sensores de baixo custo e possuam plataforma aberta de dados.
- Desenvolver e aplicar ferramentas para monitoramento ambiental utilizando os sensores investigados que obtiveram bons resultados.
- Avaliar, oportunamente, os sensores de CO para baixas concentrações utilizando as técnicas de conversão expostas em ambientes em que haja ou a possibilidade de controle do monóxido de carbono, ou haja conhecida incidência em concentrações elevadas.
- Observar o desempenho em longo prazo dos sensores avaliados, para identificar a dependência das métricas de desempenho em relação ao tempo de uso dos dispositivos.

7.4 Considerações finais

De acordo com (Gitzel, 2016), a baixa qualidade dos dados em aplicações de sensoriamento pode ter diversas origens, dentre as quais podem ser citadas: perda de leituras (falha na transmissão ou gravação), grandezas fora do escopo de funcionamento nominal do sensor, leituras com arredondamento numérico, estampas de tempo erradas, formato de dados, ruído e falta de confiabilidade da fonte. Isto reforça o quão abrangente é o paradigma da investigação na qualidade dos dados. Este trabalho abordou apenas uma parte destas causas.

Há uma concordância dos resultados obtidos com os sensores climáticos e o trabalho apresentado por (Mwangi, 2017) em conferência das Nações Unidas sobre aplicações para redução de riscos ambientais: a utilização de sensores de baixo custo como plataformas de coleta de dados ambientais em países subdesenvolvidos. Na referida apresentação há menção a dois sensores em comum: o BMP180 como sensor de pressão e o HTU21D como temperatura e humidade. Para validação dos dados, o autor posicionou as plataformas de baixo custo em proximidade de plataformas convencionais e observou que os dados da plataforma de baixo custo tiveram bom desempenho de correlação. Além do resultado numérico em si, é importante observar a solução de elevado valor social que o uso dos sensores de baixo custo pode ter.

Em específico aos sensores de temperatura, estes tendem a apresentar mais o erro sistemático que o erro aleatório. Apresentam uma precisão considerada como muito boa. Mais observou-se que o erro sistemático se distribuiu aleatoriamente entre os sensores avaliados, e que, quando utilizados em conjunto (como propõe-se nas *smart cities* e nas campanhas de sensoriamento colaborativo), o valor médio do erro, considerando todos os sensores, aproximou-se de zero. Os sensores de humidade relativa demonstraram um desempenho dependente tanto de sua gama de operação quanto da temperatura: são mais precisos e exatos em humidades relativas mais elevadas; quanto à sua dependência de temperatura, entretanto, não foi observada nenhuma predominância dentre os modelos observados. Os sensores de pressão atmosférica, por sua vez, demonstraram uma reprodutibilidade satisfatória considerando sensores de um mesmo modelo. Um estudo utilizando Machine Learning nos dados dos sensores de pressão desta investigação observou que tanto a temperatura quanto a humidade relativa apresentam interferência nas leituras destes sensores, e podem ser compensados, aumentando a exatidão entre pares de sensores diferentes (de Araújo et al., 2020).

Com relação aos sensores de baixo custo para qualidade do ar, foi observado através do experimento com os sensores de monóxido de carbono (de óxido metálico semiconductor), que a exposição ao ar exterior causa interferências significativas nas leituras destes sensores. Investigadores encontraram indicadores semelhantes com relação ao potencial de utilização destes dispositivos em campo. O resultado obtido por (Munir et al., 2019), identificou, portanto, que o baixo desempenho dos sensores em campo está relacionado à grande dependência das variáveis climáticas, assim como também bem apontou (Mijling et al., 2018), que, em seu trabalho sobre calibração em campo, percebeu que a consideração das variáveis climáticas pode melhorar o desempenho dos sensores de baixo custo. Entretanto, esta dependência é conhecida apenas de maneira nominal. Como foi observado que os dados nominais destes sensores muitas vezes são imprecisos, é preciso investigar mais a fundo a real influência das intempéries nestes sensores. Um bom recurso para tal tarefa é a utilização de algoritmos de Machine Learning (Zimmerman et al., 2018).

Quanto aos sensores de monóxido de carbono, um dos desafios era fazê-los serem capazes de detectar concentrações de monóxido de carbono abaixo de 10ppm. Os resultados obtidos, apesar de não conclusivos, são promissores quanto a esta possibilidade. Os sensores foram capazes de acompanhar excitações percebidas pelo instrumento de referência durante alguns momentos do experimento. Entretanto, seriam necessárias exposições mais longas a concentrações variadas para se ter achados mais conclusivos.

Os sensores de dióxido de carbono que utilizam a tecnologia de infravermelho não dispersivo (*NDIR*) obtiveram resultados bastante satisfatórios, cabendo apenas a menção de recomendação de uso destes em qualquer aplicação. Entretanto, podem vir a apresentar desvio monótono através da presença de viés, caso não seja utilizado seu recurso de calibração com frequência. O sensor de óxido metálico semiconductor para dióxido de carbono, utilizando-se apenas os dados nominais, produzem informação pobre e complexa de ser obtida. A dependência ambiental destes sensores parece ser relevante, mas não há informação direta e clara neste sentido, no manual do sensor.

Em linhas gerais, a maior parte dos sensores de baixo custo investigados aqui, se manuseados com cuidado, podem, sim, serem considerados fiáveis e vir a contribuir positivamente com o monitoramento distribuído do ambiente em espaços urbanos, ou até mesmo rurais (caso haja a estrutura adequada para proteção do artefacto). Os sensores de qualidade do ar a óxido metálico semiconductor, entretanto, apresentaram dificuldades quanto à extração de informação de seus dados, pelo que isto pode ser mesmo um impeditivo na utilização “não profissional”.

Se os critérios de avaliação destes sensores forem tomados seguindo requisitos profissionais, tais como as recomendações da Organização Mundial de Meteorologia, alguns destes sensores, pontualmente, podem cumprir tais requisitos. Portanto, recomenda-se uma atenção individual, em termos de calibração, caso se deseje atingir altos níveis de qualidade dos dados (e.g. em termos de exatidão).

Mais sugere-se, a partir dos dados analisados, que uma base de dados pública que caracterizasse os sensores comerciais em função de seu modelo e respetiva confiabilidade seria de grande valia, pois ajudaria futuros indivíduos engajados em monitoramento voluntário a escolher os melhores sensores, e não a considerar tão somente o preço e obter dispositivos com desempenho inferior a outros.

Espera-se que os contributos deste trabalho possam servir positivamente a trabalhos futuros que estudem um ou mais tópicos correlatos aos sensores de baixo custo e monitoramento urbano colaborativo.

BIBLIOGRAFIA

- Abhishek, K. H. S. ., & Srikanth, K. (2015). Design of Smart Street Lighting System. *International Journal of Advances in Engineering*, 1(1), 23–27.
- Agência Portuguesa do Ambiente. (2017). QualAr - Qualidade do Ar. Retrieved April 24, 2017, from <http://qualar.apambiente.pt/>
- Air Quality Egg. (2017). Retrieved March 17, 2017, from <http://airqualityegg.com/>
- Allen, J. G., MacNaughton, P., Satish, U., Santanam, S., Vallarino, J., & Spengler, J. D. (2016). 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*, 124(6), 805–812. <https://doi.org/10.1289/ehp.1510037>
- Argos System. (2016). Satellite Tracking for Environmental Applications. Retrieved June 27, 2016, from http://www.argos-system.org/files/Publication/public/r1679_f34_3606-CLS_ARGOS-HD.pdf
- Arnstein, S. R. (1969). A Ladder of Citizen Participation. *JAIP - Journal of American Institute of Planners*, 35(4), 216–224.
- Atzori, L., Iera, A., & Morabito, G. (2010). The Internet of Things: A survey. *Computer Networks*, 54(15), 2787–2805. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2010.05.010>
- Batog, P., & Badura, M. (2013). Dynamic of changes in carbon dioxide concentration in bedrooms. *Procedia Engineering*, 57, 175–182. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.04.025>
- Bogatinoska, D. C., Malekian, R., Trengoska, J., & Nyako, W. A. (2016). Advanced sensing and internet of things in smart cities. *2016 39th International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics, MIPRO 2016 - Proceedings*, 632–637. <https://doi.org/10.1109/MIPRO.2016.7522218>
- Bogue, R. (2015). Detecting gases with light: a review of optical gas sensor technologies. *Sensor Review*, 35(2), 133–140. <https://doi.org/10.1108/SR-09-2014-696>

- Borrego, C., Costa, A. M., Ginja, J., Amorim, M., Coutinho, M., Karatzas, K., ... Penza, M. (2016). Assessment of air quality microsensors versus reference methods: The EuNetAir joint exercise. *Atmospheric Environment*, *147*(2), 246–263. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.09.050>
- BRASIL. (1988). *Constituição da República Federativa do Brasil*. Brasília, DF.: Senado Federal: Centro Gráfico.
- Burke, J., Estrin, D., Hansen, M., Parker, A., Ramanathan, N., Reddy, S., & Srivastava, M. B. (2006). Participatory Sensing. *WSW'06 at SenSys '06*. Boulder, Colorado, USA.
- Cai, L., & Zhu, Y. (2015). The Challenges of Data Quality and Data Quality Assessment in the Big Data Era. *Data Science Journal*, *14*, 2. <https://doi.org/10.5334/dsj-2015-002>
- Campbell, A. T., Eisenman, S. B., Lane, N. D., Miluzzo, E., & Peterson, R. a. (2006). People-centric urban sensing. *Proceedings of the 2nd Annual International Workshop on Wireless Internet - WICON '06*, 18-es. <https://doi.org/10.1145/1234161.1234179>
- Castell, N., Dauge, F. R., Schneider, P., Vogt, M., Lerner, U., Fishbain, B., ... Bartonova, A. (2017). Can commercial low-cost sensor platforms contribute to air quality monitoring and exposure estimates? *Environment International*, *99*, 293–302. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.12.007>
- CBSR. (2017). CubeSensors. Retrieved March 17, 2017, from <https://cubesensors.com/>
- Chang, S., Zhu, H., Zhang, W., Lu, L., & Zhu, Y. (2015). PURE: Blind Regression Modeling for Low Quality Data with Participatory Sensing. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, *PP*(99), 1–1. <https://doi.org/10.1109/TPDS.2015.2427805>
- Choi, S., Kim, N., Cha, H., & Ha, R. (2009). Micro sensor node for air pollutant monitoring: hardware and software issues. *Sensors (Basel, Switzerland)*, *9*(10), 7970–7987. <https://doi.org/10.3390/s91007970>
- D'Hondt, E., Stevens, M., & Jacobs, A. (2013). Participatory noise mapping works! An evaluation of participatory sensing as an alternative to standard techniques for environmental monitoring. *Pervasive and Mobile Computing*, *9*(5), 681–694. <https://doi.org/10.1016/j.pmcj.2012.09.002>

- de Araújo, T. C., Silva, L. T., & Moreira, A. C. (2017). Data Quality Issues on Environmental Sensing with Smartphones. *Proceedings of the 6th International Conference on Sensor Networks: SENSORNETS*, 59–68. <https://doi.org/10.5220/0006201600590068>
- de Araújo, T. C., Silva, L. T., & Moreira, A. C. (2020). Deviation Prediction and Correction on Low-Cost Atmospheric Pressure Sensors using a Machine-Learning Algorithm. *Proceedings of the 9th International Conference on Sensor Networks - Volume 1: SENSORNETS*, 41–51. <https://doi.org/10.5220/0008968400410051>
- Dua, A., Bulusu, N., & Feng, W. (2009). Towards Trustworthy Participatory Sensing. *4th USENIX Workshop on Hot Topics in Security (HotSec-09)*.
- Duvall, R., Long, R., Beaver, M., Kronmiller, K., Wheeler, M., & Szykman, J. (2016). Performance Evaluation and Community Application of Low-Cost Sensors for Ozone and Nitrogen Dioxide. *Sensors*, *16*(10), 1698. <https://doi.org/10.3390/s16101698>
- Ejaz, W., Naeem, M., Shahid, A., Anpalagan, A., & Jo, M. (2017). Efficient Energy Management for Internet of Things in Smart Cities. *IEEE Communications Magazine*, (January), 84–91. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2017.1600218CM>
- Environmental Protection Agency. (2017). Carbon Monoxide (CO) Pollution in Outdoor Air. Retrieved June 1, 2017, from EPA website: <https://www.epa.gov/co-pollution>
- European Union. (2008). Diretiva 2008/50/CE. In *European Journal of Operational Research*.
- Farahani, H., Wagiran, R., & Hamidon, M. N. (2014). Humidity sensors principle, mechanism, and fabrication technologies: A comprehensive review. In *Sensors (Switzerland)* (Vol. 14). <https://doi.org/10.3390/s140507881>
- Fine, G. F., Cavanagh, L. M., Afonja, A., & Binions, R. (2010). Metal oxide semi-conductor gas sensors in environmental monitoring. *Sensors*, *10*(6), 5469–5502. <https://doi.org/10.3390/s100605469>
- Fuertes, W., Carrera, D., Villacis, C., Toulkeridis, T., Galarraga, F., Torres, E., & Aules, H. (2015). Distributed System as Internet of Things for a New Low-Cost, Air Pollution Wireless Monitoring on Real Time. *2015 IEEE/ACM 19th International Symposium on Distributed Simulation and Real Time*

- Applications (DS-RT)*, 58–67. <https://doi.org/10.1109/DS-RT.2015.28>
- Giordano, S., & Puccinelli, D. (2015). When sensing goes pervasive. *Pervasive and Mobile Computing*, 17(PB), 175–183. <https://doi.org/10.1016/j.pmcj.2014.09.008>
- Gitzel, R. (2016). Data quality in time series data: An experience report. *CEUR Workshop Proceedings*, 1753, 41–49.
- Goldman, J., Shilton, K., Burke, J., Estrin, D., Hansen, M., Ramanathan, N., ... Samanta, V. (2009). *Participatory Sensing - A Citizen-powered approach to illuminating the patterns that shape our world*. Los Angeles, California, USA: Center for Embedded Networked Sensing.
- Guadagnini, P. H., & Barlette, V. E. (2005). Um termômetro eletrônico de leitura direta com termistor. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 27, 369–375. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1590/S1806-11172005000300011>
- Hanwei Electronics. (2016). *MG811 Datasheet*. Retrieved from <https://cdn.instructables.com/ORIG/FGM/YEQF/GAPV32J2/FGMYEQFGAPV32J2.pdf>
- Hu, K., Sivaraman, V., Luxan, B. G., & Rahman, A. (2016). Design and Evaluation of a Metropolitan Air Pollution Sensing System. *IEEE Sensors Journal*, 16(5), 1448–1459.
- Ingelrest, F., Barrenetxea, G., Schaefer, G., Vetterli, M., Couach, O., & Parlange, M. (2010). Sensorscope: Application-Specific Sensor Network for Environmental Monitoring. *ACM Transactions on Sensor Networks*, 6(2), 1–32. <https://doi.org/10.1145/1689239.1689247>
- Inmetro. (2012). *Vocabulário Internacional de Termos de Metrologia Legal - VIM*.
- IPMA. (2017). Instituto Português do Mar e da Atmosfera. Retrieved February 17, 2016, from <https://www.ipma.pt/pt/index.html>
- Jagadeesh, Y. M., Akilesh, S., Karthik, S., & Prasanth. (2015). Intelligent Street Lights. *Procedia Technology*, 21, 547–551. <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2015.10.050>
- Kanhere, S. S. (2011). Participatory Sensing: Crowdsourcing Data from Mobile Smartphones in Urban Spaces. *2011 IEEE 12th International Conference on Mobile Data Management*, 3–6.

<https://doi.org/10.1109/MDM.2011.16>

Kester, W., Bryant, J., & Jung, W. (1999). TEMPERATURE SENSORS. In W. Kester (Ed.), *Practical Design Techniques for Sensor Signal Conditioning* (pp. 7.1-7.39). Retrieved from <https://www.analog.com/en/education/education-library/practical-design-techniques-sensor-signal-conditioning.html>

Koto Labs. (2017). Koto: Your home's best friend. Retrieved March 17, 2017, from <http://koto.io/>

Kotovirta, V., Toivanen, T., Tergujeff, R., & Huttunen, M. (2012). Participatory Sensing in Environmental Monitoring – Experiences. *2012 Sixth International Conference on Innovative Mobile and Internet Services in Ubiquitous Computing*, 155–162. <https://doi.org/10.1109/IMIS.2012.70>

Kuo, L.-S., Huang, H.-H., Yang, C.-H., & Chen, P.-H. (2011). Real-Time Remote Monitoring of Temperature and Humidity Within a Proton Exchange Membrane Fuel Cell Using Flexible Sensors. *Sensors*, *11*(12), 8674–8684. <https://doi.org/10.3390/s110908674>

Lane, N. D., Eisenman, S. B., Musolesi, M., Miluzzo, E., & Campbell, A. T. (2008). Urban Sensing Systems: Opportunistic or Participatory? ‡. *Proc. ACM 9th Workshop on Mobile Computing Systems and Applications (HOTMOBILE '08)*.

Laurentino, L. F. L., de Oliveira, L. M., & de Araújo, T. C. (2018). Investigação de níveis de CO2 em sala de aula: um estudo no campus Parnamirim com sensores eletrônicos de baixo custo. *XIV Congresso de Iniciação Científica Do IFRN*.

Lewis, A., & Edwards, P. (2016). Validate personal air-pollution sensors. *Nature*, *535*(7610), 29–31. <https://doi.org/10.1038/535029a>

Liu, L., Wei, W., Zhao, D., & Ma, H. (2015). Urban Resolution: New Metric for Measuring the Quality of Urban Sensing. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, *14*(12), 2560–2575. <https://doi.org/10.1109/TMC.2015.2404786>

Liu, M. (2013). A study of mobile sensing using smartphones. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, *2013*. <https://doi.org/10.1155/2013/272916>

- Magli, S. ., Lodi, C. ., Contini, F. M. ., Muscio, A. ., & Tartarini, P. . (2016). Dynamic analysis of the heat released by tertiary buildings and the effects of urban heat island mitigation strategies. *Energy and Buildings*, *114*, 164–172. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.05.037>
- Manlio, B., Franca, D., Erina, F., & Alberto, G. (2017). Environmental Monitoring for Smart Cities. *IEEE Sensors Journal*, *17*(23), 7767–7774. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2017.2722819>
- Marjovi, A., Arfire, A., & Martinoli, A. (2015). High Resolution Air Pollution Maps in Urban Environments Using Mobile Sensor Networks. *2015 International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems*, 11–20. <https://doi.org/10.1109/DCOSS.2015.32>
- Martins, T. A. L., Adolphe, L., Bonhomme, M., Bonneaud, F., Faraut, S., Ginestet, S., ... Guyard, W. (2016). Impact of Urban Cool Island measures on outdoor climate and pedestrian comfort: Simulations for a new district of Toulouse, France. *Sustainable Cities and Society*, *26*, 9–26. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2016.05.003>
- McKercher, G. R., Salmond, J. A., & Vanos, J. K. (2017). Characteristics and applications of small, portable gaseous air pollution monitors. *Environmental Pollution*, *223*, 102–110. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.12.045>
- Meteorologisch Instituut. (2000). *Handbook for the Meteorological Observation*. Koninklijk: KNMI.
- Mijling, B., Jiang, Q., De Jonge, D., & Bocconi, S. (2018). Field calibration of electrochemical NO₂ sensors in a citizen science context. *Atmospheric Measurement Techniques*, *11*(3), 1297–1312. <https://doi.org/10.5194/amt-11-1297-2018>
- Minh-Dung, N., Takahashi, H., Uchiyama, T., Matsumoto, K., & Shimoyama, I. (2013). A barometric pressure sensor based on the air-gap scale effect in a cantilever. *Applied Physics Letters*, *103*(14), 103–106. <https://doi.org/10.1063/1.4824027>
- Munir, S., Mayfield, M., Coca, D., Jubb, S. A., & Osammor, O. (2019). Analysing the performance of low-cost air quality sensors, their drivers, relative benefits and calibration in cities—a case study in Sheffield. *Environmental Monitoring and Assessment*, *191*(2). <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7231-8>

- Mwangi, C. (2017). Low Cost Weather Stations for Developing Countries (Kenya). *7th United Nations International Conference on Space-Based Technologies for Disaster Risk Reduction*, (October). Retrieved from <http://www.un-spider.org/sites/default/files/21. UNSPIDER Presentation - Mwangi.pdf>
- O'Brien, G. (2011). *New MEMS devices aimed at emerging consumer and automotive applications*. SEMICON West.
- Open Signal. (2015). Android Fragmentation Visualized (August, 2015). Retrieved June 24, 2016, from http://opensignal.com/assets/pdf/reports/2015_08_fragmentation_report.pdf
- Overeem, A., R. Robinson, J. C., Leijnse, H., Steeneveld, G. J., P. Horn, B. K., & Uijlenhoet, R. (2013). Crowdsourcing urban air temperatures from smartphone battery temperatures. *Geophysical Research Letters*, *40*(15), 4081–4085. <https://doi.org/10.1002/grl.50786>
- Penney, D., Benignus, V., Kephelopoulos, S., Kotzias, D., Kleinman, M., & Agnes Verrier. (2010). Guidelines for indoor air quality. In *WHO Guidelines* (Vol. 9). <https://doi.org/10.1186/2041-1480-2-S2-11>
- PORTUGAL. (1976). *Constituição da República Portuguesa*. Retrieved from <https://www.parlamento.pt/ArquivoDocumentacao/Documents/CRPVIIrevisao.pdf>
- Qaid, A., Bin Lamit, H., Ossen, D. R., & Raja Shahminan, R. N. (2016). Urban heat island and thermal comfort conditions at micro-climate scale in a tropical planned city. *Energy and Buildings*, *133*, 577–595. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.10.006>
- Radanovic, G., & Faltings, B. (2015). Incentive Schemes for Participatory Sensing. *Proceedings of the 14th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS 2015)*, 1081–1089.
- Ratti, C., & Claudel, M. (2014). *Local Warming*. Retrieved from http://senseable.mit.edu/papers/pdf/20150430_Ratti_Claudel_LocalWarming_ARQ.pdf
- Rodrigues, H., Nicolau, M. J., José, R. J., & Moreira, A. (2012). Engaging participants for collaborative sensing of human mobility. *UbiComp'12*, 5–8.

- Roy, H. E., Pocock, M. J. O., Preston, C. D., Roy, D. B., Savage, J., Tweddle, J. C., & Robinson, L. D. (2012). *Understanding Citizen Science and Environmental Monitoring*. Retrieved from <https://www.ceh.ac.uk/sites/default/files/citizensciencereview.pdf>
- Saini, H., Thakur, A., Ahuja, S., Sabharwal, N., & Kumar, N. (2016). Arduino based automatic wireless weather station with remote graphical application and alerts. *3rd International Conference on Signal Processing and Integrated Networks, SPIN 2016*, 605–609. <https://doi.org/10.1109/SPIN.2016.7566768>
- Salata, F., Golasi, I., Petitti, D., Vollaro, E. de L., Coppi, M., & Vollaro, A. de L. (2017). Relating microclimate, human thermal comfort and health during heat waves: an analysis of heat island mitigation strategies through a case study in an urban outdoor environment. *Sustainable Cities and Society*, *30*, 79–96. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.01.006>
- Santos, M. A. F. dos, Francisco, M. de F. M., & Yamaguti, W. (2013). O Sistema Nacional de Dados Ambientais e a coleta de dados por satélite. *Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 16 (SBSR)*, 9116–9123.
- Santos, P. M., Rodrigues, J. G. P., Cruz, S. B., Lourenço, T., D'Orey, P. M., Luis, Y., ... Barros, J. (2018). PortoLivingLab: An IoT-Based Sensing Platform for Smart Cities. *IEEE Internet of Things Journal*, *5*(2), 523–532. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2018.2791522>
- Satish, U., Mendell, M. J., Shekhar, K., Hotchi, T., Sullivan, D., Streufert, S., & Fisk, W. J. (2012). Is CO2 an indoor pollutant? direct effects of low-to-moderate CO2 concentrations on human decision-making performance. *Environmental Health Perspectives*, *120*(12), 1671–1677. <https://doi.org/10.1289/ehp.1104789>
- Sensorscope Sarl. (2017). [sensorscope.ch](http://www.sensorscope.ch) | make sensing simple. Retrieved March 22, 2017, from <http://www.sensorscope.ch/sensorscope/?lang=en>
- Seppänen, O. a, Fisk, W. J., & Mendell, M. J. (1999). Association of ventilation rates and CO2 concentrations with health and other responses in commercial and institutional buildings. *Indoor Air*, *9*, 226–252. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.1999.00003.x>
- Silva, L. T., & Mendes, J. F. G. (2012). City Noise-Air: An environmental quality index for cities. *Sustainable*

- Cities and Society*, 4(1), 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2012.03.001>
- Sinha, N., Pujitha, K. E., & Alex, J. S. R. (2015). Xively based sensing and monitoring system for IoT. *2015 International Conference on Computer Communication and Informatics, ICCCI 2015*, 8–13. <https://doi.org/10.1109/ICCCI.2015.7218144>
- Sivaraman, V., Carrapetta, J., Hu, K., & Luxan, B. G. (2013). HazeWatch: A participatory sensor system for monitoring air pollution in Sydney. *38th Annual IEEE Conference on Local Computer Networks - Workshops*, 56–64. <https://doi.org/10.1109/LCNW.2013.6758498>
- Stankovic, J. A. (2014). Research directions for the internet of things. *IEEE Internet of Things Journal*, 1(1), 3–9. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2014.2312291>
- US-EPA. (2020). Ground-level Ozone Pollution. Retrieved from <https://www.epa.gov/ground-level-ozone-pollution/ground-level-ozone-basics#formation>
- Wang, C., Yin, L., Zhang, L., Xiang, D., & Gao, R. (2010). Metal oxide gas sensors: Sensitivity and influencing factors. *Sensors*, 10(3), 2088–2106. <https://doi.org/10.3390/s100302088>
- WMO. (2008). Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation. In *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation* (7th ed.). [https://doi.org/Guide to meteorological instrument and observing practices](https://doi.org/Guide%20to%20meteorological%20instrument%20and%20observing%20practices)
- World Health Organization. (2006). WHO Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide: global update 2005: summary of risk assessment. *Geneva: World Health Organization*, 1–22. [https://doi.org/10.1016/0004-6981\(88\)90109-6](https://doi.org/10.1016/0004-6981(88)90109-6)
- World Health Organization. (2016). Ambient (outdoor) air quality and health. Retrieved June 1, 2017, from WHO website: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs313/en/>
- Zaman, J., D'Hondt, E., Boix, E. G., Philips, E., Kambona, K., & De Meuter, W. (2014). Citizen-friendly participatory campaign support. *2014 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communication Workshops (PERCOM WORKSHOPS)*, 232–235. <https://doi.org/10.1109/PerComW.2014.6815208>

- Zanella, a, Bui, N., Castellani, a, Vangelista, L., & Zorzi, M. (2014). Internet of Things for Smart Cities. *IEEE Internet of Things Journal*, *1*(1), 22–32. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2014.2306328>
- Zhao, H., Zheng, Y., Li, T., Wei, L., & Guan, Q. (2018). Temporal and Spatial Variation in, and Population Exposure to, Summertime Ground-Level Ozone in Beijing. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *15*(4). <https://doi.org/10.3390/ijerph15040628>
- Zimmerman, N., Presto, A. A., Kumar, S. P. N., Gu, J., Hauryliuk, A., Robinson, E. S., ... Subramanian, R. (2018). A machine learning calibration model using random forests to improve sensor performance for lower-cost air quality monitoring. *Atmospheric Measurement Techniques*, *11*(1), 291–313. <https://doi.org/10.5194/amt-11-291-2018>

I. ANEXO I: INFORMAÇÕES COMPLEMENTARES SOBRE A ANÁLISE DOS DADOS

Este Anexo se dispõe a trazer informações sobre a análise dos dados que foram omitidas do curso textual principal por conveniência de facilitar a leitura.

I.I. Verificação de sincronia dos sensores climáticos

Tabela I-1. Verificação de sincronia através da Correlação de Pearson (r) dos sensores de temperatura do Conjunto B para com o dispositivo de referência.

Desvio de amostra	SENSORES (Conjunto B)					
	DS18B20	AM2302	HTU21D	BMP180	BME280	MPL3115A2
-5	0.9996	0.9991	0.9995	0.9994	0.9994	0.9994
-4	0.9997	0.9994	0.9997	0.9996	0.9996	0.9996
-3	0.9997	0.9996	0.9997	0.9997	0.9997	0.9997
-2	0.9997	0.9997	0.9997	0.9997	0.9998	0.9998
-1	0.9996	0.9998	0.9997	0.9997	0.9998	0.9998
0	0.9993	0.9998	0.9995	0.9996	0.9997	0.9997
+1	0.9990	0.9997	0.9992	0.9994	0.9995	0.9996
+2	0.9987	0.9995	0.9989	0.9991	0.9993	0.9994
+3	0.9982	0.9993	0.9985	0.9987	0.9990	0.9991
+4	0.9978	0.9990	0.9981	0.9984	0.9987	0.9987
+5	0.9974	0.9987	0.9977	0.9980	0.9984	0.9984

Tabela I-2. Verificação de sincronia através da Correlação de Pearson (r) dos sensores de temperatura do Conjunto C para com o dispositivo de referência.

Desvio de amostra	SENSORES (Conjunto C)					
	DS18B20	AM2302	HTU21D	BMP180	BME280	MPL3115A2
-5	0.9996	0.9996	0.9996	0.9996	0.9997	0.9997
-4	0.9995	0.9995	0.9995	0.9996	0.9997	0.9998
-3	0.9993	0.9994	0.9994	0.9995	0.9997	0.9997
-2	0.9990	0.9991	0.9991	0.9993	0.9995	0.9997
-1	0.9987	0.9989	0.9989	0.9990	0.9993	0.9995
0	0.9985	0.9996	0.9986	0.9988	0.9991	0.9993
+1	0.9982	0.9994	0.9984	0.9985	0.9989	0.9991
+2	0.9980	0.9993	0.9982	0.9983	0.9987	0.9989
+3	0.9979	0.9991	0.9980	0.9981	0.9985	0.9987
+4	0.9977	0.9989	0.9978	0.9980	0.9983	0.9985
+5	0.9976	0.9987	0.9976	0.9978	0.9981	0.9983

Tabela I-3. Verificação de sincronia através da Correlação de Pearson (r) dos sensores de humidade do Conjunto B para com o dispositivo de referência.

Desvio de amostra	SENSORES (Conjunto B)		
	AM2302	HTU21D	BME280
-5	<i>0.9788</i>	<i>0.9800</i>	<i>0.9825</i>
-4	<i>0.9812</i>	<i>0.9817</i>	<i>0.9846</i>
-3	<i>0.9836</i>	<i>0.9836</i>	<i>0.9868</i>
-2	<i>0.9863</i>	<i>0.9860</i>	<i>0.9895</i>
-1	<i>0.9892</i>	<i>0.9883</i>	<i>0.9921</i>
0	<i>0.9918</i>	<i>0.9901</i>	<i>0.9943</i>
+1	<i>0.9939</i>	<i>0.9910</i>	<i>0.9956</i>
+2	<i>0.9952</i>	<i>0.9902</i>	<i>0.9953</i>
+3	<i>0.9950</i>	<i>0.9888</i>	<i>0.9944</i>
+4	<i>0.9939</i>	<i>0.9868</i>	<i>0.9928</i>
+5	<i>0.9920</i>	<i>0.9844</i>	<i>0.9908</i>

Tabela I-4. Verificação de sincronia através da Correlação de Pearson (r) dos sensores de humidade do Conjunto C para com o dispositivo de referência.

Desvio de amostra	SENSORES (Conjunto C)		
	AM2302	HTU21D	BME280
-5	<i>0.9844</i>	<i>0.9856</i>	<i>0.9849</i>
-4	<i>0.9870</i>	<i>0.9875</i>	<i>0.9872</i>
-3	<i>0.9894</i>	<i>0.9893</i>	<i>0.9894</i>
-2	<i>0.9915</i>	<i>0.9904</i>	<i>0.9908</i>
-1	<i>0.9929</i>	<i>0.9903</i>	<i>0.9915</i>
0	<i>0.9937</i>	<i>0.9888</i>	<i>0.9908</i>
+1	<i>0.9929</i>	<i>0.9872</i>	<i>0.9897</i>
+2	<i>0.9916</i>	<i>0.9850</i>	<i>0.9881</i>
+3	<i>0.9897</i>	<i>0.9821</i>	<i>0.9858</i>
+4	<i>0.9871</i>	<i>0.9793</i>	<i>0.9833</i>
+5	<i>0.9843</i>	<i>0.9760</i>	<i>0.9804</i>

Tabela I-5. Verificação de sincronia através da Correlação de *Pearson* (r) dos sensores de pressão barométrica de mesmo tipo entre os conjuntos A e C, na segunda execução experimental.

Desvio de amostra	SENSORES (Conjuntos A e C)		
	BMP180	BME280	MPL3115A2
-5	0.9990	0.9987	0.9955
-4	0.9988	0.9986	0.9954
-3	0.9991	0.9989	0.9958
-2	0.9993	0.9994	0.9961
-1	0.9993	0.9993	0.9960
0	0.9996	0.9998	0.9964
+1	0.9993	0.9994	0.9961
+2	0.9994	0.9995	0.9962
+3	0.9995	0.9996	0.9962
+4	0.9992	0.9993	0.9960
+5	0.9992	0.9995	0.9961

I.II. Gráficos de temperatura obtidos a partir das execuções experimentais

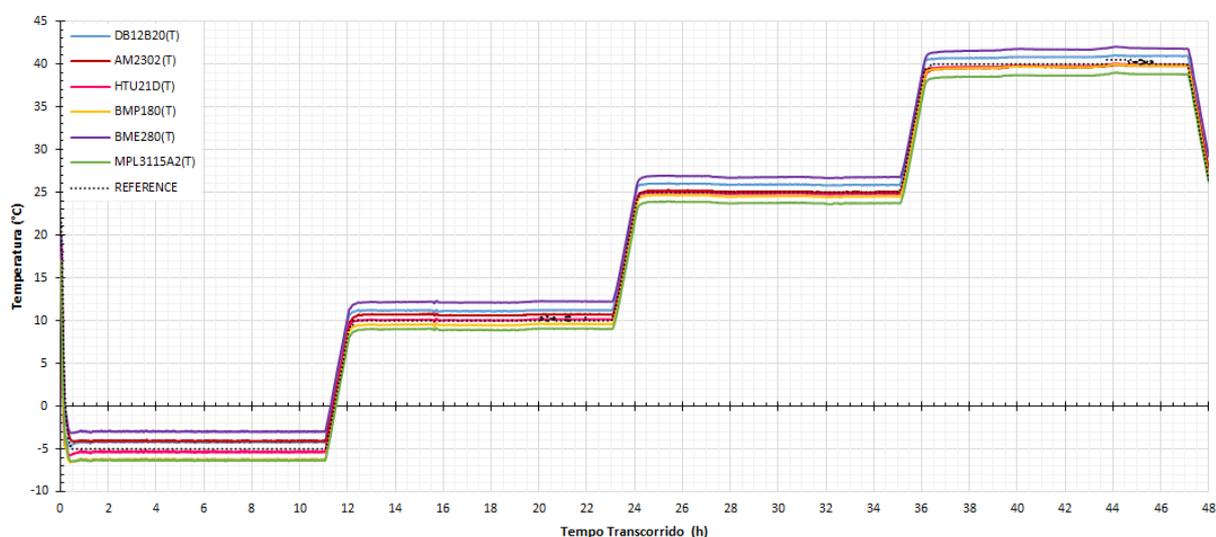


Figura I-1. Leituras de temperatura do conjunto de sensores B durante a sua primeira execução experimental, ocorrida na primeira rotina.

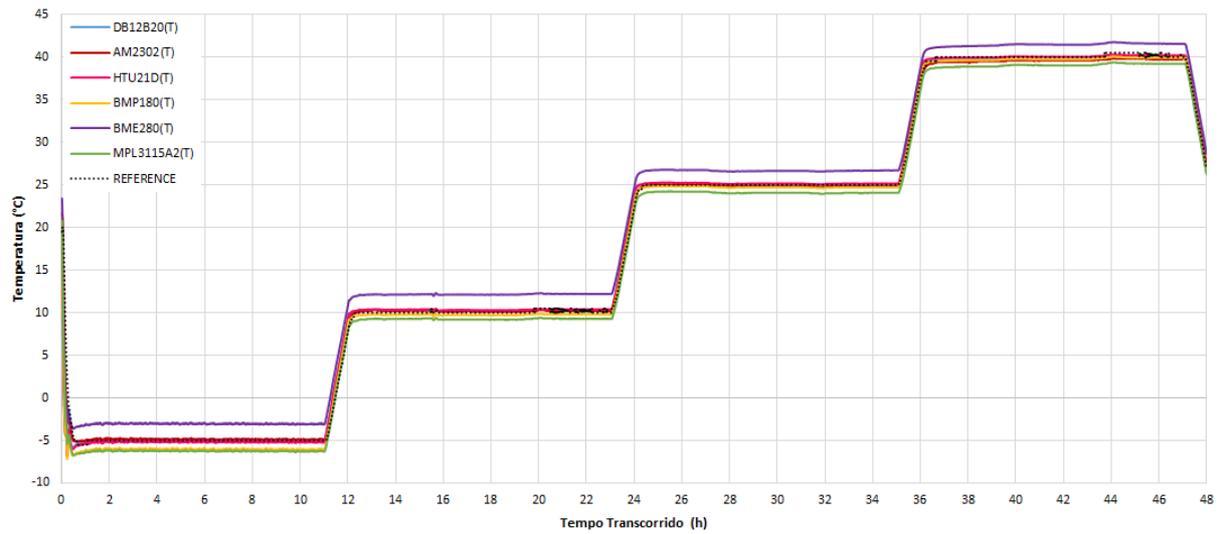


Figura I-2. Leituras de temperatura do conjunto de sensores C durante a sua primeira execução experimental, ocorrida na segunda rotina.

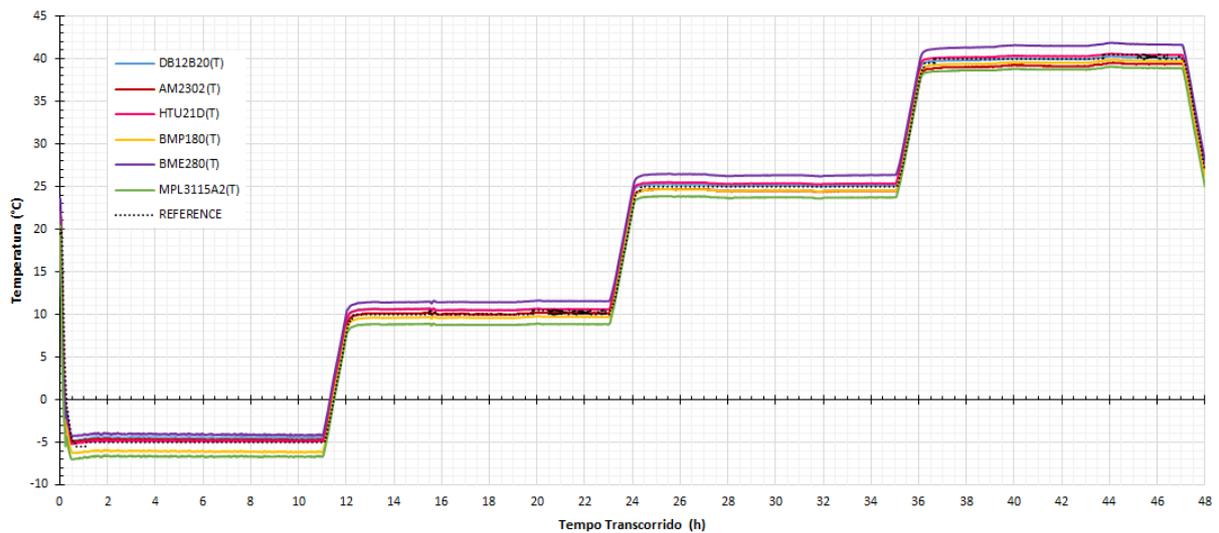


Figura I-3. Leituras de temperatura do conjunto de sensores A durante a sua segunda execução experimental, ocorrida na segunda rotina.

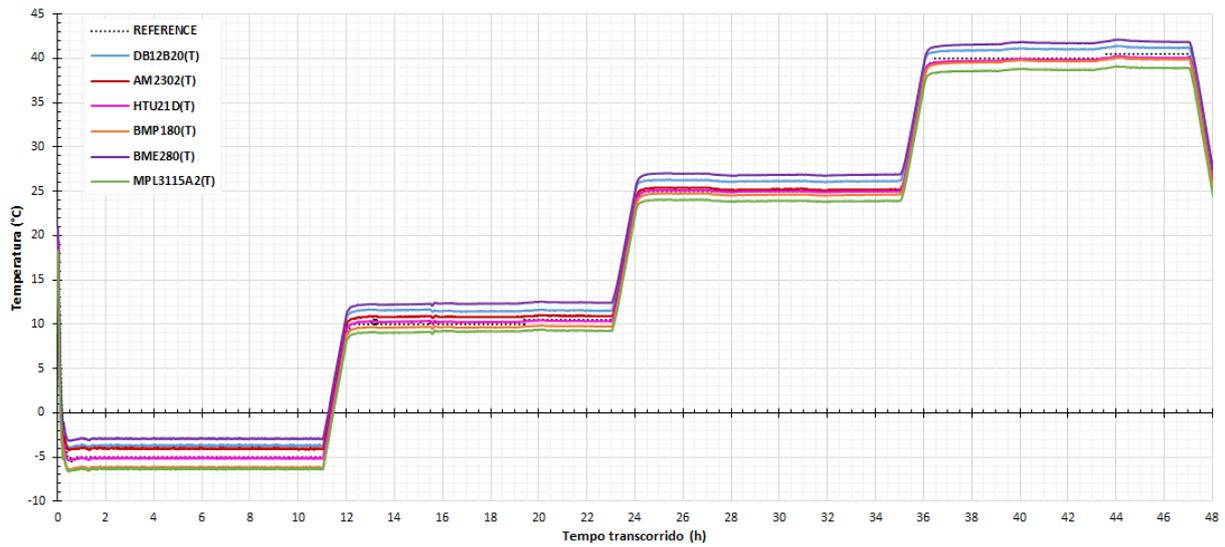


Figura I-4. Leituras de temperatura do conjunto de sensores B durante a sua segunda execução experimental, ocorrida na terceira rotina.

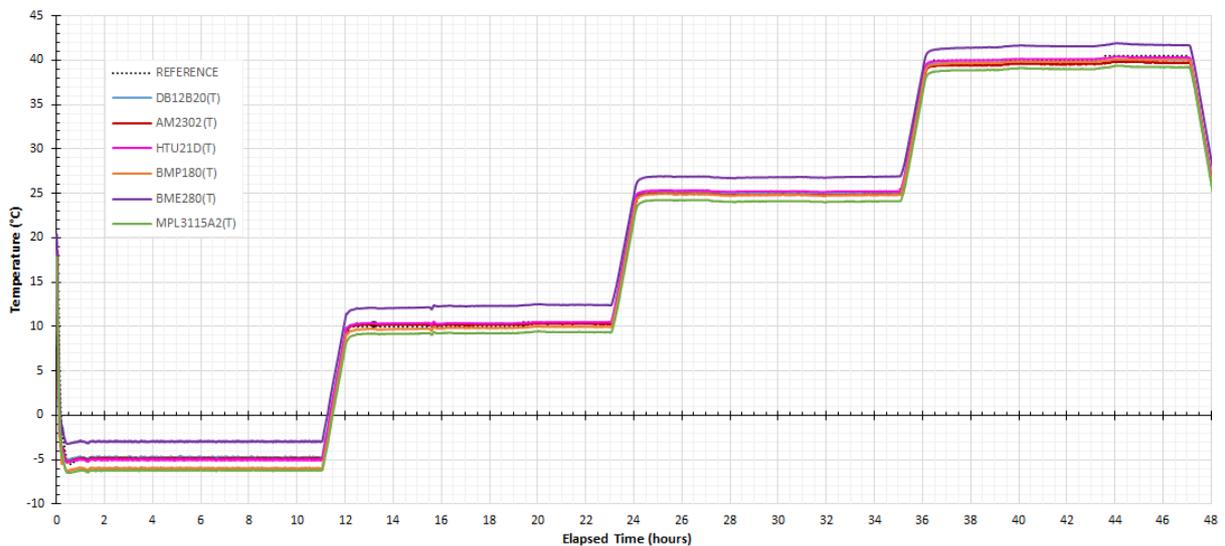


Figura I-5. Leituras de temperatura do conjunto de sensores C durante a sua segunda execução experimental, ocorrida na terceira rotina.

I.III. Gráficos de humidade obtidos a partir das execuções experimentais

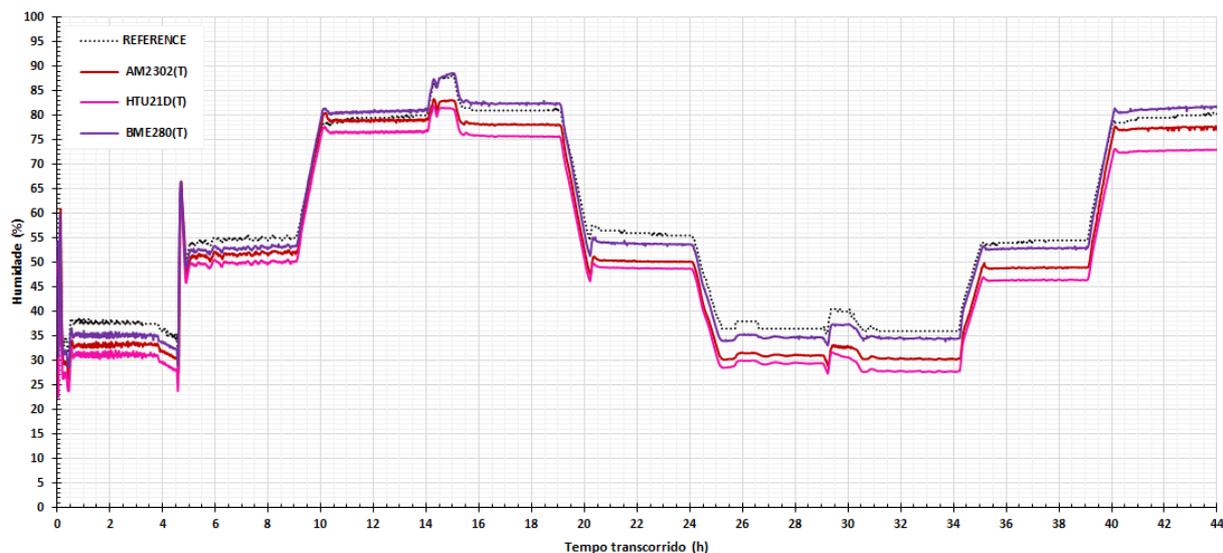


Figura I-6. Leituras de humidade relativa do conjunto de sensores B durante sua primeira execução experimental, ocorrida na primeira rotina para verificação dos dados de humidade relativa do ar.

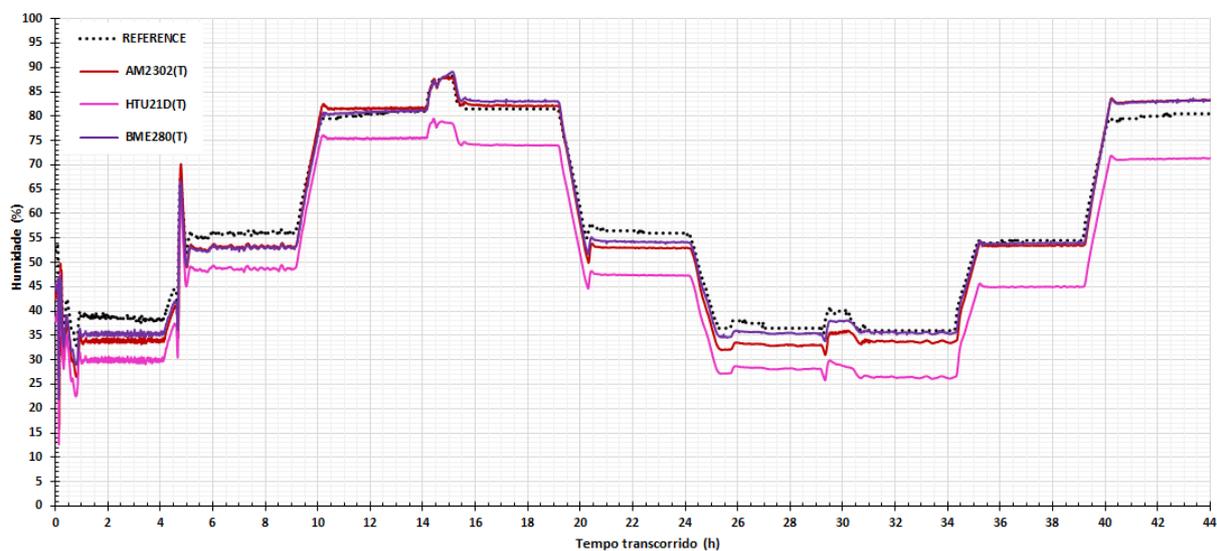


Figura I-7. Leituras de humidade relativa do conjunto de sensores A durante sua primeira execução experimental, ocorrida na segunda rotina para verificação dos dados de humidade relativa do ar.

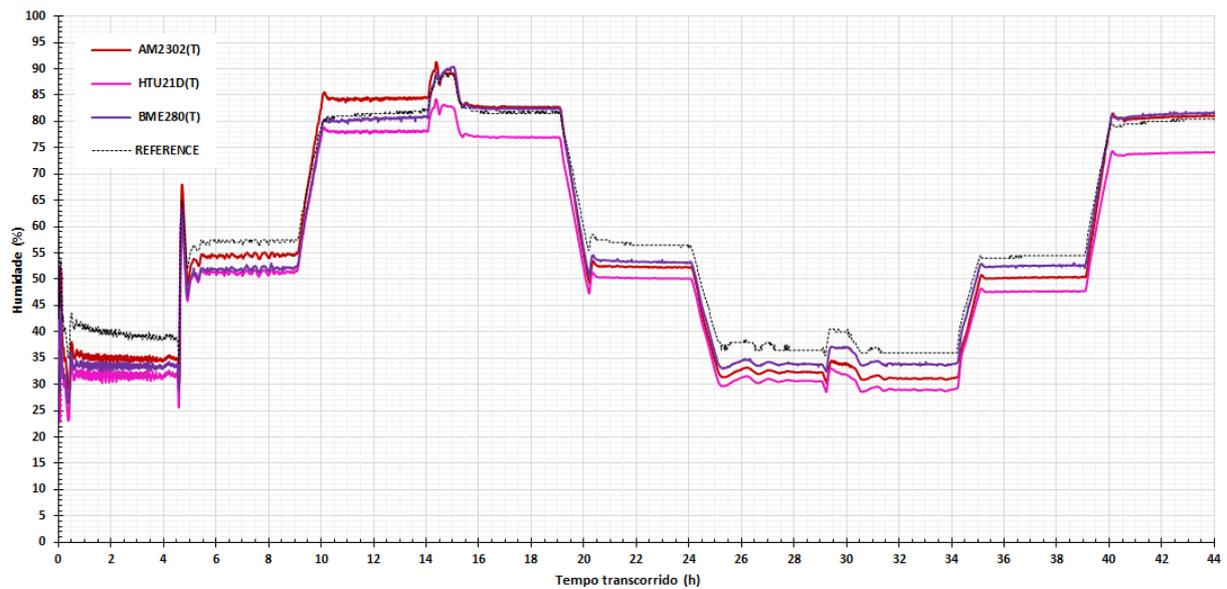


Figura I-8. Leituras de umidade relativa do conjunto de sensores C, durante a sua segunda execução experimental, ocorrida na terceira rotina para verificação dos dados de umidade relativa do ar.

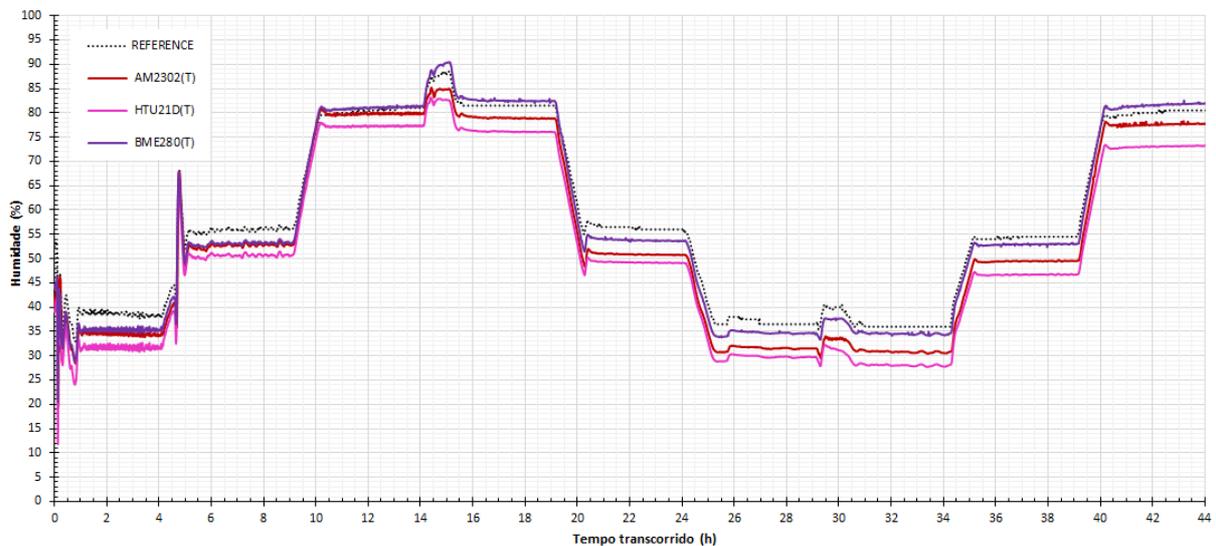


Figura I-9. Leituras de umidade relativa do conjunto de sensores B, durante a sua segunda execução experimental, ocorrida na segunda rotina para verificação dos dados de umidade relativa do ar.

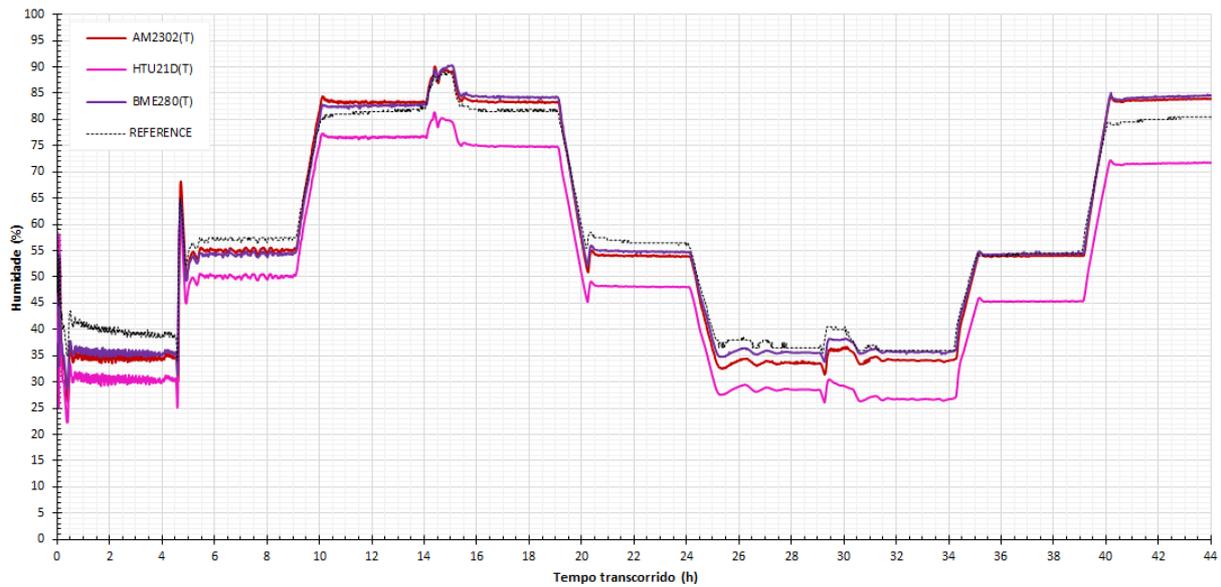


Figura I-10. Leituras de humidade relativa do conjunto de sensores A, durante a sua segunda execução experimental, ocorrida na terceira rotina para verificação dos dados de humidade relativa do ar.

I.IV. Gráficos de pressão barométrica obtidos a partir das execuções experimentais.

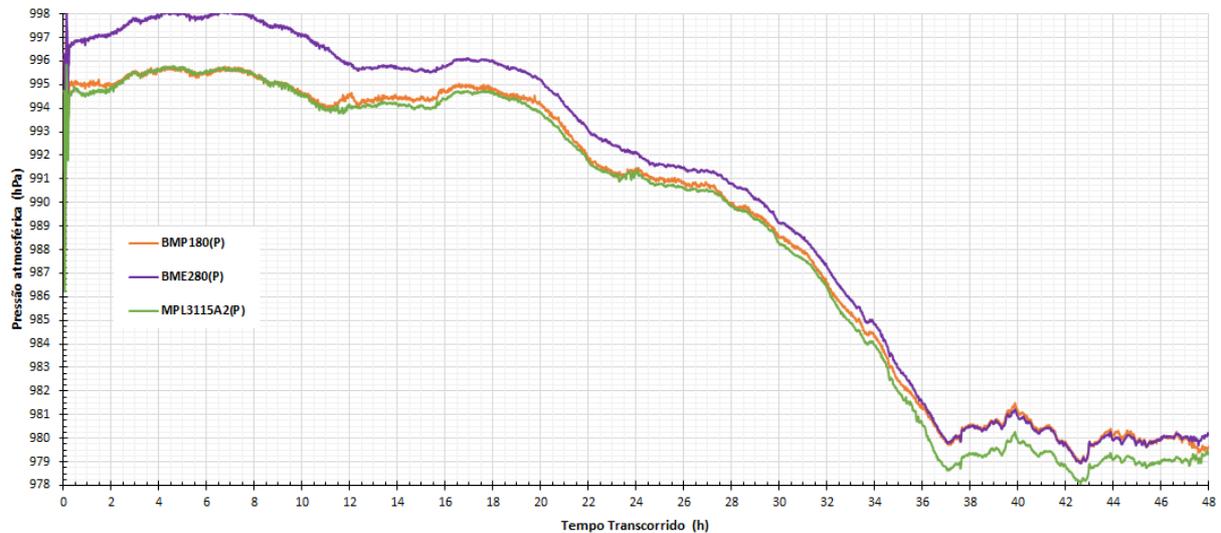


Figura I-11. Leituras de pressão atmosférica obtidas pelo conjunto de sensores B, durante sua primeira execução experimental, entre os dias 1º e 3 de março de 2017.

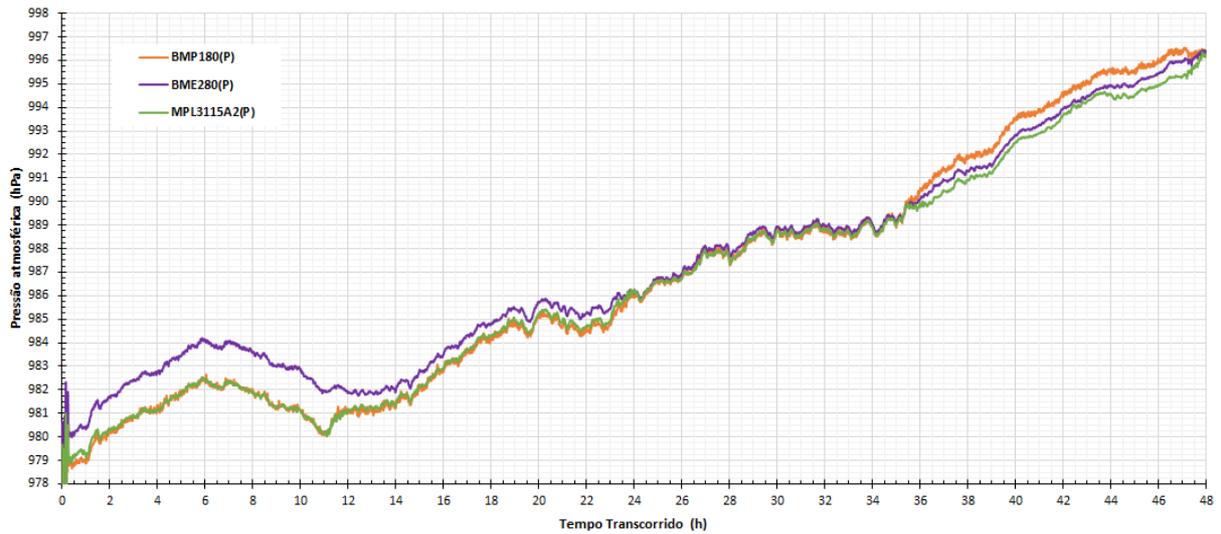


Figura I-12. Leituras de pressão atmosférica obtidas pelo conjunto de sensores C, durante sua primeira execução experimental, entre os dias 3 e 5 de março de 2017.

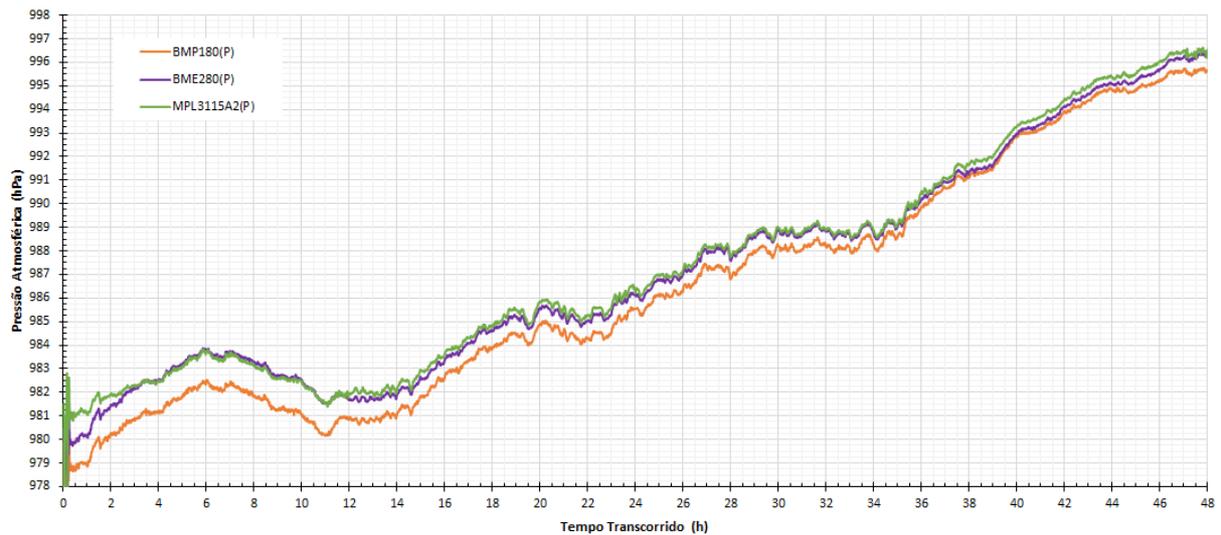


Figura I-13. Leituras de pressão atmosférica obtidas pelo conjunto de sensores A, durante sua segunda execução experimental, entre os dias 3 e 5 de março de 2017.

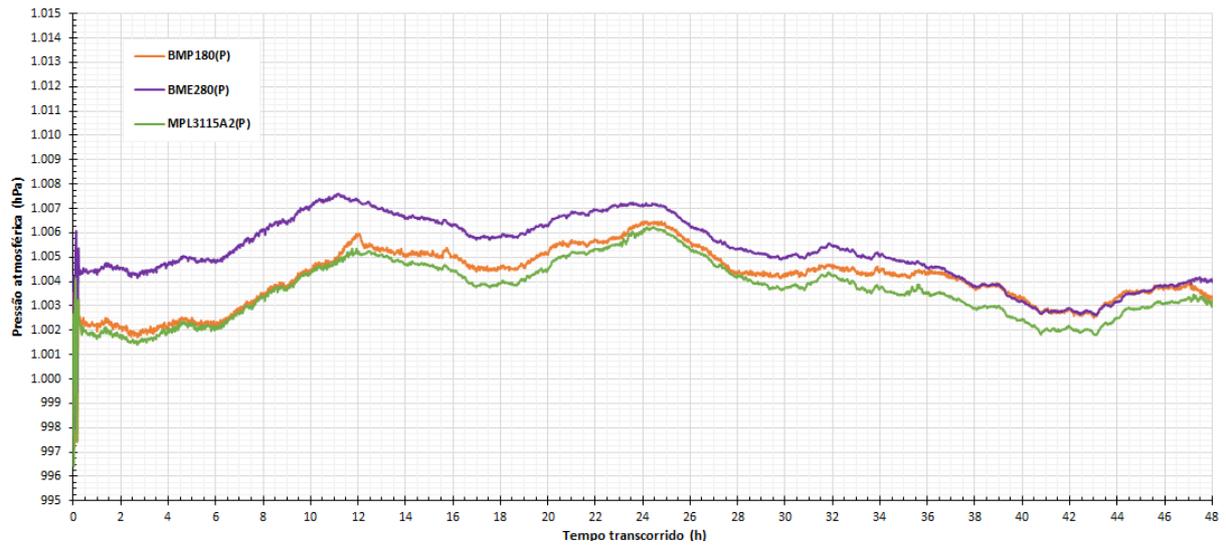


Figura I-14. Leituras de pressão atmosférica obtidas pelo conjunto de sensores B, durante a sua segunda execução experimental, ocorrida entre os dias 6 e 8 de março de 2017.

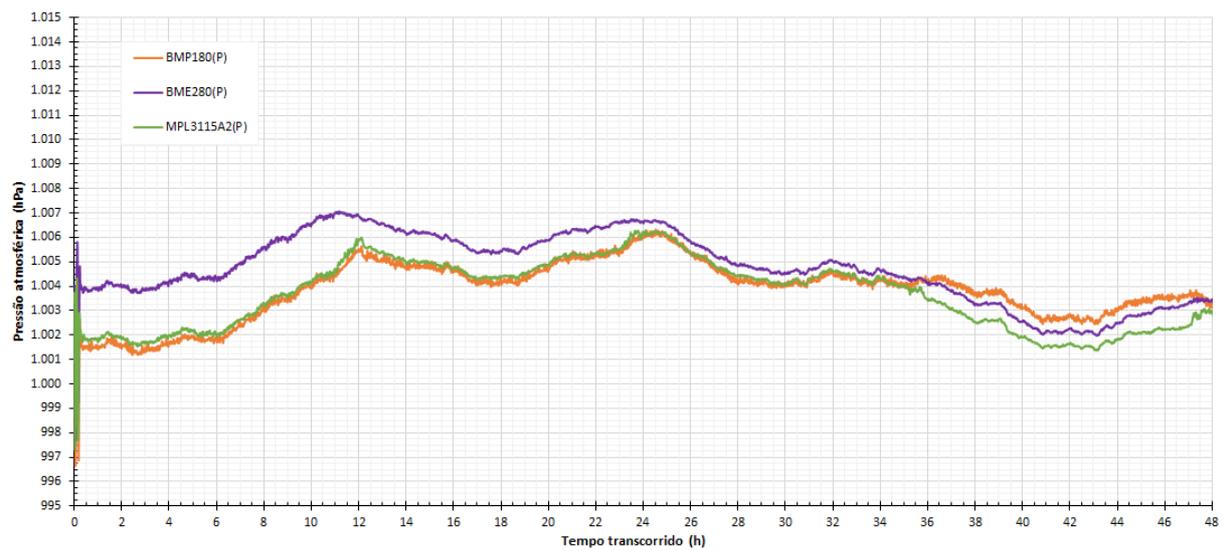


Figura I-15. Leituras de pressão atmosférica obtidas pelo conjunto de sensores C, durante a sua segunda execução experimental, ocorrida entre os dias 6 e 8 de março de 2017.

ANEXO II – CÓDIGOS UTILIZADOS PARA LEITURA DOS SENSORES

Neste anexo são apresentados os códigos utilizados pelo Arduino para ler os sensores utilizados no presente trabalho. Como todos os códigos foram construídos sob licença *copyleft*, a eventual reprodução dos mesmos não carece de autorização prévia pois não resultaram em propriedade intelectual.

II.1 Artefato climático (sensores de temperatura, humidade relativa do ar e pressão atmosférica).

```
// TIAGO C DE ARAUJO
// CODIGO PARA VERIFICACAO DE SENSORES EM CAMARA AMBIENTAL
// Universidade do Minho

#include <Wire.h>
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>
#include <dht.h>
#include "Adafruit_HTU21DF.h"
#include <SFE_BMP180.h>
#include "cactus_io_BME280_I2C.h"
#include <Adafruit_MPL3115A2.h>
#include <SPI.h>
#include <SD.h>

dht DHT;
Adafruit_HTU21DF htu = Adafruit_HTU21DF ();
Adafruit_MPL3115A2 mpl = Adafruit_MPL3115A2 ();

// DEFINE O PINO DO DS18B20
#define DS1 2

// INSTANCIA PARA COMUNICAR COM O SENSOR DS18B20
OneWire oneWire(DS1);
DallasTemperature sens_ds18(&oneWire);

// INSTANCIA PARA O BMP180
SFE_BMP180 bmp180;

// INSTANCIA PARA O BME280 MUDAR DE ENDEREÇO
// BMP180 UTILIZA O 0x77
// BME280 UTILIZA 0x77 (PADRAO) OU 0x76 (ALTERNATIVO)
// PARA MUDAR O BME PARA 0x76, O PINO SPO PRECISA ESTAR NO GND
BME280_I2C bme (0x76);

File arquivo;
int sample = 1;
unsigned long t1,t2;

void setup(void)
{
  SD.begin(10);

  // PORTA SERIAL PARA VERIFICAÇÃO
  Serial.begin(9600);
  Serial.println("Monitor de verificacao de sensores.");
}
```

```

// INICIA O DS18B20 @ OneWire
sens_ds18.begin();

//INICIA O HTU @ I2C
htu.begin();

//INICIA O BMP180 @ I2C
bmp180.begin();

//INICIA O BME280 @ I2C
bme.begin();

//INICIA O MPL3115A2 @ I2C
mpl.begin();

//INICIA O SHIELD SD E PREPARA ARQUIVO (CABECALHO)

arquivo = SD.open("OUTPUT.txt", FILE_WRITE);
arquivo.print("08/03/17. tS = 60s.");
arquivo.print("\r\n");
arquivo.print("N, ds18b20(T), AM2302(T), HTU21D(T), BMP180(T), BME280(T),
MPL3115A2(T), AM2302(H), HTU21D(H), BME280(H), BMP180(P), BME280(P),
MPL3115A2(P)");
arquivo.print("\r\n");
arquivo.close();
}

// ===== LOOP PRINCIPAL =====

void loop(void)
{
    t1 = millis(); // INICIA CONTAGEM PARA AJUSTE DE AMOSTRAGEM

    // Inicializacao do Logger
    arquivo = SD.open("OUTPUT.txt", FILE_WRITE);

    // Finaliza o Loop caso o SD seja removido.
    if(!SD.exists("OUTPUT.txt")){
        Serial.println("SD removido. Salve o Arquivo.");
        while(1);
    }

    // REQUISITA TEMPERATURAS (E POSSIVEL MAIS DE UM SENSOR EM PARALELO)
    sens_ds18.requestTemperatures();

    //REQUISITA O AM2302, NO PINO 3
    DHT.read22(3);

    //CONFIGURA PARAMETROS PARA BMP180
    char status;
    double Tb, Pb;

    //REQUISITA O BMP180 NO BARRAMENTO I2C
    status = bmp180.startTemperature();
    if (status != 0)
    {
        delay(status);
        //Adquire a temperatura
        status = bmp180.getTemperature(Tb);
        if (status != 0)
        {
            status = bmp180.startPressure(2);
            if (status != 0)
            {
                delay(status);
            }
        }
    }
}

```

```

        status = bmp180.getPressure(Pb, Tb);
    }
}
}
// FIM DA REQUISICAO DO BMP180

// REQUISITA BME
bme.readSensor();

float Tmpl, Pmpl;
Pmpl = mpl.getPressure();
Tmpl = mpl.getTemperature();

//PLOT DE TEMPERATURA
arquivo.print(sample);
arquivo.print(", ");
arquivo.print(sens_ds18.getTempCByIndex(0));
arquivo.print(", ");
arquivo.print(DHT.temperature);
arquivo.print(", ");
arquivo.print(htu.readTemperature());
arquivo.print(", ");
arquivo.print(Tb);
arquivo.print(", ");
arquivo.print(bme.getTemperature_C());
arquivo.print(", ");
arquivo.print(Tmpl);
arquivo.print(", ");

//PLOT DE HUMIDADE
arquivo.print(DHT.humidity);
arquivo.print(", ");
arquivo.print(htu.readHumidity());
arquivo.print(", ");
arquivo.print(bme.getHumidity());
arquivo.print(", ");
//Serial.println(" ");

//PLOT DE PRESSAO
arquivo.print(Pb);
arquivo.print(", ");
arquivo.print(bme.getPressure_MB());
arquivo.print(", ");
arquivo.print(Pmpl/100);
arquivo.print("\r\n");

sample = sample + 1;
arquivo.close();

t2 = millis(); // FIM DO CONTADOR

//GARANTE QUE CADA AMOSTRA OCORRA EXATAMENTE 60 SEGUNDOS APÓS A ÚLTIMA
delay(60000-t2+t1);

```

II.II Artefato para dióxido de carbono.

```
// TIAGO C DE ARAUJO
// Universidade do Minho
// *** LEITURAS DE CO2 ***
// MH-Z16
// MG-811

#include <Wire.h>
#include <SPI.h>
#include <SD.h>
#include <SC16IS750.h>
#include <string.h>
#include <NDIRZ16.h>

#define          MG_PIN_A(0)      // MG811-A LIGADO NO PINO ANALOGICO 0

#define          DC_GAIN(8.5)    //GANHO DO AMPLIFICADOR. VALOR NOMINAL = 8.5.

float voltsA;
float mvoltsA;

char fname[]="CO2b.txt";

File arquivo;
int amostra = 1;

SC16IS750 i2cuart = SC16IS750(SC16IS750_PROTOCOL_I2C,SC16IS750_ADDRESS_BB);
NDIRZ16 mySensor = NDIRZ16(&i2cuart);

unsigned long ti, tf;

void setup()
{
    Serial.begin(9600);

    i2cuart.begin(9600);

    if (SD.begin(10)){
        Serial.println("Cartao SD: OK!");
        arquivo = SD.open(fname, FILE_WRITE);
        arquivo.print("Teste de Co2. Sensor Verde. ts = 60s.");
        arquivo.print("\r\n");
        arquivo.print("N, MH-Z16.B (ppm), MG-811.B (V)");
        arquivo.print("\r\n");
        arquivo.close();
    } else {
        Serial.println("Cartao SD: nao inserido! (Dados nao serao salvos).");
    }

    if (i2cuart.ping()) {
        Serial.println("Controlador I2C do MH-Z16 Encontrado!");
        Serial.println("E preciso aguardar 10s para inicializar");
    } else {
        Serial.println("Controlador I2C do MH-Z16 nao encontado! Sistema pausado.");
    }

    while(1);
}

power(1);
//Aguarda o MH-Z16.
delay(10000);
Serial.println("Amostra, MH-Z16, MG-811 (mV)");
```

```

};

void loop() {

    for (int x = 1; x <= 1430; x++){ // 1430 caso seja 1 amostra por minuto.
        ti = millis();

        voltsA = analogRead(MG_PIN_A);
        voltsA = (voltsA*5)/1024;
        mvoltsA = voltsA/DC_GAIN;

        if (mySensor.measure()) {
            arquivo = SD.open(fname, FILE_WRITE);
            Serial.print(amostra);
            arquivo.print(amostra);
            Serial.print(", ");
            arquivo.print(", ");
            Serial.print(mySensor.ppm);
            arquivo.print(mySensor.ppm);
            Serial.print(", ");
            Serial.print(", ");
            Serial.println(mvoltsA*1000, 1);
            arquivo.println(mvoltsA, 5);

            arquivo.close();

        } else {
            Serial.println("Sensor nao leu: Amostra nula.");
        }

        amostra = amostra + 1;
        tf = millis();
        delay(60000-tf+ti);
    }
    //REINICIA O MH-Z16 ANTES DAS 24H
    Serial.println("--- Rebooting ---");
    power(0);
    delay(5000);
    power(1);
    delay(15000);
}

//Liga e desliga o MH-Z16. 1=ON, 0=OFF
void power (uint8_t state) {
    i2cuart.pinMode(0, INPUT); //set up for the power control pin

    if (state) {
        i2cuart.pinMode(0, INPUT); //turn on the power of MH-Z16
    } else {
        i2cuart.pinMode(0, OUTPUT);
        i2cuart.digitalWrite(0, 0); //turn off the power of MH-Z16
    }
}
}

```

II.III Artefato para monóxido de carbono.

```
// TIAGO C DE ARAUJO
// Universidade do Minho
// *** LEITURAS DE CO ***
// MQ7 e/ou MQ9

#include <SPI.h>
#include <SD.h>
#include <dht.h>
#include <Wire.h>

File arquivo;
int amostra = 1;
unsigned long t1, t2;
float output1;
float output2;
float mvA;
float mvB;

dht DHT;

//NOMEAR O ARQUIVO AQUI
char fname[] = "monoxido.txt";

void setup() {
  Serial.begin(9600);

  // SD.begin(10) para os shields empilháveis do UNO
  // (53)Para o MEGA
  if (SD.begin(10)){
    Serial.println("Cartao SD: OK!");
    arquivo = SD.open(fname, FILE_WRITE);
    arquivo.print("N (20s), temp, humd, Sensor 1, Sensor 2");
    arquivo.print("\r\n");
    arquivo.close();
  } else {
    Serial.println("Cartao SD: nao inserido! (Dados nao serao salvos).");
  }
  Serial.println("Sensor 1, Sensor 2");
}

void loop() {
  t1 = millis();

  DHT.read22(2);

  arquivo = SD.open(fname, FILE_WRITE);
  // Valido para MQ7 e MQ9
  output1 = analogRead(A0);
  output2 = analogRead(A2);
  mvA = (output1*5)/1024;
  mvB = (output2*5)/1024;

  arquivo.print(amostra);
  arquivo.print(", ");
  arquivo.print(DHT.temperature);
  arquivo.print(", ");
  arquivo.print(DHT.humidity);
  arquivo.print(", ");
  arquivo.print(mvA, 5);
  arquivo.print(", ");
  arquivo.println(mvB, 5);
  arquivo.close();
}
```

```
Serial.print(amostra);
Serial.print(", ");
Serial.print(DHT.temperature);
Serial.print(", ");
Serial.print(DHT.humidity);
Serial.print(", ");
Serial.print(mvA, 5);
Serial.print(", ");
Serial.println(mvB, 5);

amostra++;

t2 = millis();

//Configura o delay entre as amostras (em milissegundos)
delay(5000-t2+t1);
```