



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS – IG

**CALIBRAÇÃO DE SENSORES DE BAIXO CUSTO PARA MONITORAMENTO DA
QUALIDADE DO AR NO DISTRITO FEDERAL**

ERICK FREDERICO KILL AGUIAR

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO Nº 067

Brasília - DF

Julho de 2014

ERICK FREDERICO KILL AGUIAR

**CALIBRAÇÃO DE SENSORES DE BAIXO CUSTO PARA MONITORAMENTO DA
QUALIDADE DO AR NO DISTRITO FEDERAL**

Dissertação de Mestrado apresentada à banca examinadora do Instituto de Geociências no Programa de Geociências Aplicadas da Universidade de Brasília, como exigência para obtenção de título de mestre em Geociências.

Orientador: Prof. Dr. Henrique Llacer Roig

Brasília – DF

Julho de 2014

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade de Brasília. Acervo 1017334.

A282c Aguiar, Erick Frederico Kill.
Calibração de sensores de baixo custo para monitoramento da qualidade do ar no Distrito Federal / Erick Frederico Kill Aguiar. -- 2014.
164 f. : il. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) - Universidade de Brasília, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geociências Aplicadas, 2014.

Inclui bibliografia.

Orientação: Henrique Llacer Roig.

1. Ar - Qualidade. 2. Ar - Controle de qualidade.
3. Ar - Poluição - Medição. 4. Controle de poluição - Equipamento e acessórios - Calibração. I. Roig, Henrique Llacer. II. Título.

CDU 502.55(203)

ERICK FREDERICO KILL AGUIAR

**CALIBRAÇÃO DE SENSORES DE BAIXO CUSTO PARA MONITORAMENTO DA
QUALIDADE DO AR NO DISTRITO FEDERAL**

Dissertação de Mestrado apresentada à banca examinadora do Instituto de Geociências no Programa de Geociências Aplicadas da Universidade de Brasília, como exigência para obtenção de título de mestre em Geociências.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Henrique Llacer Roig
Orientador

Prof. Dr. Paulo Roberto Meneses
Membro Interno

Prof. Dr. Augusto César de Mendonça Brasil
Membro Externo

Brasília, 31 de julho 2014.

“A verdadeira viagem de descobrimento não consiste em procurar novas paisagens, mas em ter novos olhos”.

(Marcel Proust)

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Henrique Llacer Roig, pela liberdade e confiança referente ao presente trabalho, além da indiscutível amizade e compreensão em momentos difíceis.

Agradeço aos técnicos Mancini e Eduardo, funcionários do Laboratório de Geocronologia do Instituto de Geociências da Universidade de Brasília, pelo grande auxílio na execução dos procedimentos e ao Weeberb, colega de Engenharia Ambiental e de pós graduação em Geociências Aplicadas, pela orientação na geração dos dados presentes na dissertação.

Aos meus pais, pelo incentivo para alçar voos maiores e na superação de limites.

A todos, os que citei, dedico meus sinceros agradecimentos e com eles quero compartilhar esta conquista.

RESUMO

O monitoramento da qualidade do ar é importante, pois a poluição do ar tem um impacto direto na saúde humana. Sensores de baixo custo ampliam novas possibilidades de monitoramento da qualidade do ar. Seu desempenho, permite uma nova estratégia de aproximação e acesso aos dados pela população e alta aplicabilidade nos processos de gestão para a área de saúde e meio ambiente. Situações críticas, que não podem ser vistas com abordagens convencionais (redes tradicionais de monitoramento da qualidade do ar), tem a possibilidade de serem rapidamente gerenciadas por uma rede ampla de sistemas portáteis com sensores. Assim, a presente pesquisa teve como objetivo a calibração e validação de sensores de baixo custo. Conseqüentemente, foram escolhidas áreas piloto *outdoor*, na região central de Brasília e pontos *indoor* para avaliação comparativa de performance dos sensores. Foi utilizada a metodologia de injeção volumétrica de CO a 99,999% em um *box* de teste de gases, com dois sensores MiCS -5521 (CO/VOC), sendo um com vida útil reduzida e o outro novo. Adotou-se o número de dez injeções para cada volume (de 1 ml a 6 ml), gerando uma média com maior intervalo de confiança para cada sensor. Os resultados da regressão linear da resistência (Ohms) x volume injetado (ml), demonstraram que são sensores que apresentam forte correlação ($r > 0,8$) e relação inversa na interação dessas duas variáveis, com boa precisão de medição, quando comparados a referência do *datasheet* do fabricante. Constatou-se que eles sofrem interferência de sensibilidade cruzada com partículas de álcool e variação de umidade, sendo variáveis que necessitam de tratamento sistemático para o monitoramento. Os resultados dos levantamentos *outdoor* apresentaram níveis elevados de CO (ppm) na região da Rodoviária de Brasília, considerada área de grande fluxo de veículos automotores do DF. Para as análises *indoor*, os níveis analisados se apresentaram dentro dos limites toleráveis na CONAMA 03. Por último, foi construído um sistema de gestão geoespacial dos dados de poluição gerados pelos sensores de baixo custo, por meio da plataforma *ArcGis Server* e linguagem *Flex*. Este painel teve como objetivo divulgação dos dados para a população em geral bem como poder servir de auxílio às formulações de políticas públicas, no sentido de tecnologia ambiental alternativa, com a possibilidade de entendimento da dispersão dos poluentes e panoramas dinâmicos de monitoramento da qualidade do ar, com maior amplitude espaço-temporal.

Palavras-chave: Sensores de baixo custo. Monitoramento da qualidade do ar. Calibração de micro sensores MiCS -5521 (CO/VOC).

ABSTRACT

Monitoring air quality is important because air pollution has a direct impact on human health. Low cost sensors extend new possibilities for monitoring of air quality. Its performance allows a new approach strategy and access to data by population and high applicability in the management processes for healthcare and the environment. Critical situations, which can not be seen with conventional approaches (traditional networks monitoring air quality), has the possibility of being quickly managed by an extensive network of portable systems with sensors. The present study aimed to the calibration and validation of low-cost sensors. Consequently, outdoor pilot areas were chosen in central Brasilia and indoor points for benchmarking performance of the sensors. The methodology of volumetric injection of CO 99.999% was used in a box of test gases, with two MiCS -5521 sensors (CO/VOC), one with low and another new life. We adopted the number five injections for each volume (1 ml to 6 ml), generating a greater average confidence interval for each sensor. The results of linear regression of resistance (Ohms) versus injected volume (ml), demonstrated that they are sensors that exhibit strong correlation ($r > 0.8$) and an inverse relationship in the interaction of these two variables with good precision measurement when compared to reference manufacturer's datasheet. It was found that they suffer interference from cross-sensitivity to alcohol particles and moisture variation, with variables that require systematic treatment monitoring. The results of the surveys showed elevated outdoor levels of CO (ppm) in the region of Brasilia highway, considered an area of great flux of vehicles in the District. For indoor analyzes, analyzed the levels were within tolerable limits in CONAMA 03. Finally, we built a system for geospatial data management of pollution generated by low cost sensors, through the ArcGIS Server platform and Flex language. This panel aimed to disseminate the data to the general population as well as to serve the assistance formulations of public policy, to alternative environmental technology, with the possibility of understanding the dispersion of pollutants and dynamic panoramas monitoring air quality with greater spatial and temporal scale.

Keywords: Low cost sensors. Monitoring air quality. Calibration of micro-sensors MiCS - 5521 (CO/VOC).

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

CEAN	Centro Educacional Asa Norte
CESPE	Centro de Seleção e de Promoção de Eventos
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CNSA	Conferência Nacional de Saúde Ambiental
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DIAL	Differential Absorption Light Detection and Ranging
DOAS	Differential Optical Absorption Spectroscopy
DQO	Data Quality Objectives Process
FINATEC	Fundação de Empreendimentos Científicos e Tecnológicos
EPA	US Environmental Protection Agency
EPTG	Estrada Parque Taguatinga - Guará
EURAMET	European Association of National Metrology Institutes
FAC	Faculdade de Comunicação
FAU	Faculdade de Arquitetura e Urbanismo
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IBRAM	Instituto Brasília Ambiental
ICC	Instituto Central de Ciências
IG	Instituto de Geociências
IQAr	Índice de Qualidade do Ar
IST	International Sensor Technology
LIDAR	Light Detection And Ranging
MACPoIL	Metrology for Chemical Pollutants in Air
MGA	Medida Geométrica Anual
MP	Material Particulado
PF	Padrões Finais
PMDF	Polícia Militar do Distrito Federal
PPB	Partes Por Bilhão
PPM	Partes Por Milhão
PQAr	Padrões de Qualidade do Ar

PTFE	Poli Tetra Flúor Etileno
SIG	Sistema de Informações Geográficas
TLV	Threshold Limit Values
SEMARH	Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Distrito Federal
SRTE	Superintendência Regional do Trabalho e Emprego
LRTAP	Convention on Long-range Transboundary Air Pollution
NAAQS	National Ambient Air Quality Standards
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
PRONAR	Programa Nacional de Controle da Poluição do Ar
PROCONVE	Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores
PTS	Partículas Totais em Suspensão
SIRGAS	Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas
SQS	Setor de Quadras Sul
UNB	Universidade de Brasília
VOC	Volatile Organic Compound
WHO	World Health Organization

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	211
1.1 HIPÓTESE DE TRABALHO	233
1.2 JUSTIFICATIVA DA PESQUISA	233
1.3 OBJETIVO	244
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO	244
CAPÍTULO 2 – ESTADO DA ARTE	266
2.1 POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA	266
2.2 CARACTERÍSTICAS DOS GASES	299
2.3 HISTÓRICO DA LEGISLAÇÃO DE POLUIÇÃO DO AR	322
2.4 METODOLOGIAS E EQUIPAMENTOS DE MONITORAMENTO	40
2.4.1 AMOSTRADORES PASSIVOS	40
2.4.2 AMOSTRADORES ATIVOS.....	411
2.4.3 AMOSTRADORES AUTOMÁTICOS	422
2.4.4 SENSORES REMOTOS.....	444
2.4.5 BIOMONITORAMENTO	466
2.5 SENSORES DE BAIXO CUSTO PARA MONITORAMENTO DA QUALIDADE DO AR	477
2.5.1 SENSORES DE ÓXIDO DE METAL	49
2.5.2 SENSORES ELETROQUÍMICOS.....	566
2.6 PROTOCOLO DE AVALIAÇÃO E CALIBRAÇÃO DE SENSORES DE GASES DE BAIXO CUSTO PARA O MONITORAMENTO DA POLUIÇÃO DO AR (COMISSÃO EUROPEIA)	588
2.7 SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS	60

2.7.1 <i>WEBGIS</i>	611
2.8 ASPECTOS GERAIS DO DISTRITO FEDERAL	633
2.8.1 ÁREA DE ESTUDO	666
2.8.2 LEGISLAÇÃO E PROGRAMA DE QUALIDADE DO AR DO DISTRITO FEDERAL	677
2.8.3 REDE DE MONITORAMENTO DO DISTRITO FEDERAL	688
CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS	711
3.1 MATERIAIS UTILIZADOS	722
3.1.1 SOFTWARES	722
3.1.2 EQUIPAMENTOS	733
3.1.2.1 EQUIPAMENTOS DO LABORATÓRIO DE GEOCRONOLOGIA – IG ..	733
3.1.2.2 EQUIPAMENTOS ADQUIRIDOS PARA A PESQUISA	777
3.2 PROCEDIMENTOS	866
3.2.1 CALIBRAÇÃO EM AMBIENTE CONTROLADO	877
3.2.1.1 <i>BASELINE</i>	877
3.2.1.2 MEDIÇÃO DE VOLUME CONTROLADO	877
3.2.2 CONVERSÃO DAS CONCENTRAÇÕES DE CO (MONÓXIDO DE CARBONO)	888
3.2.3 GERAÇÃO DA CURVA DE CALIBRAÇÃO	90
3.2.3.1 MODELOS ESTATÍSTICOS DE CORRELAÇÃO E DE REGRESSÃO LINEAR SIMPLES (MRLS)	90
3.2.3.2 ANÁLISE DE REGRESSÃO LINEAR SIMPLES	900
3.2.4 TESTE DE MONITORAMENTO	922
3.2.5 DISPONIBILIZAÇÃO DOS DADOS	977

CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES	1000
4.1 ANÁLISE DA <i>BASELINE</i>	1000
4.2 RESPOSTA DOS SENSORES AS INJEÇÕES DE CO (ML)	1022
4.3 CALIBRAÇÃO PELO MÉTODO DE REGRESSÃO LINEAR SIMPLES	1133
4.4 RESULTADOS DAS ANÁLISES DE CAMPO	1166
4.4.1 ZONA CENTRAL DE BRASÍLIA.....	1166
4.4.2 ESTÁDIO NACIONAL DE BRASÍLIA	1277
4.4.3 CAMPUS DARCY RIBEIRO	1322
4.4.3.1 ANÁLISES OUTDOOR	1322
4.4.3.2 ANÁLISES INDOOR	1377
4.5 RESULTADOS DO <i>WEBGIS</i> (PAINEL)	1444
4.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE OS RESULTADOS	14949
CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	1522
5.1 CONCLUSÃO	1522
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	1544

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Escalas espaciais e temporais da variabilidade de alguns constituintes atmosféricos.	30
Figura 2 - Estação fixa de monitoramento da qualidade do ar	43
Figura 3 - Estação móvel de monitoramento da qualidade do ar	44
Figura 4 - Monitoramento baseado a laser (LIDAR)	45
Figura 5 - Biomonitoramento em área urbana.....	47
Figura 6 - Esquema do sensor de gás de óxido de metal.....	50
Figura 7 - Resposta do sensor para diferentes concentrações de monóxido de carbono para um sensor de SnO ₂ e um analisador de gás infravermelho	52
Figura 8 - Resposta do sensor a indução de umidade.....	53
Figura 9 - Comparação dos níveis de detecção de CO com variados sensores e em diversas concentrações.....	55
Figura 10 - Desenho esquemático de um sensor eletroquímico	57
Figura 11 - Etapas de um SIG	60
Figura 12 - Sistema <i>WebGIS</i>	62
Figura 13 - Diagrama representando a interação entre usuário e a aplicação <i>WebGIS</i>	62
Figura 14 - Mapa de localização da área de estudo.....	63
Figura 15 - Locais de amostragens <i>indoor</i> e <i>outdoor</i>	66
Figura 16 - Fluxograma de Gestão Integrada da Qualidade do ar no Distrito Federal.....	67
Figura 17 - Mapa da rede de monitoramento da qualidade do ar no DF, o qual apresenta as estações conforme sua condição de operação.....	68
Figura 18 - Estação de qualidade do ar utilizada pelo IBRAM, localizada na Fercal.....	70
Figura 19 - Veículos adaptados para o monitoramento da poluição sonora, da qualidade do ar e da incidência da radiação ultravioleta solar no local	70
Figura 20 - Fluxograma de atividades referente à metodologia proposta.	71
Figura 21 - Tela do <i>software</i> de avaliação do <i>kit</i> MiCS – EK1, com as leituras dos slots.....	73
Figura 22 - Cilindro de CO de 8,5 m ³ com concentração de 99,999%.....	74
Figura 23 - Detalhe da estrutura do sistema de gases confinados do laboratório.....	74
Figura 24 - Detalhe do regulador de pressão.....	75
Figura 25 - Seringas hipodérmicas de vidro com as volumetrias de 3 ml, 5 ml e 10 ml	75
Figura 26 - Tabela de medidas de agulhas	76
Figura 27 - Termômetro digital	77

Figura 28 - <i>Box</i> de teste de gases SR#3 Figaro	78
Figura 29 - <i>Box</i> de teste de gases (SR#3) com o <i>kit</i> MiCS - EK1 conectado ao software de avaliação	78
Figura 30 - Detalhe frontal do SR#3 <i>box</i> de teste de gases	79
Figura 31 - Detalhe do misturador (<i>fan</i>) do <i>box</i> de teste de gases e a tampa	79
Figura 32 - Detalhe da tampa do <i>box</i> com o septo de silicone (injeção) e adaptação para os cabos USB e de alimentação energia da placa micro controlada	80
Figura 33 - Sensor MiCS – 5521	80
Figura 34 - R_S/R_0 como uma função da concentração de CO em 50% de umidade relativa e 25°C	81
Figura 35 - Conexões de pinos do sensor MiCS-5521	82
Figura 36 - Circuito de medição para detecção de gases poluentes	83
Figura 37 - Detalhe da placa de avaliação do <i>kit</i> MiCS – EK1 com a localização dos slots com os sensores MiCS - 5521 e o chaveamento de energia (seletor) posição <i>high</i>	83
Figura 38 - Detalhamento da placa micro controlado com as entradas USB e alimentação de energia	84
Figura 39 - Detalhamento esquemático da interface básica e controles da placa micro controlada MiCS - EK1	84
Figura 40 - Protótipo do sistema micro controlado para análise da qualidade do ar.....	86
Figura 41 - Mapa com os pontos das coletas <i>outdoor</i> na região central de Brasília	93
Figura 42 - Mapa de coletas <i>outdoor</i> nas principais vias das imediações do Campus Darcy Ribeiro – Universidade de Brasília.....	94
Figura 43 - Mapa com os pontos de coleta <i>outdoor</i> durante o jogo da Copa do Mundo (Suíça x Equador) – 15/06/2014, no Estádio Nacional de Brasília	95
Figura 44 - Mapa das coletas <i>indoor</i> realizadas no ICC – Universidade de Brasília.....	96
Figura 45 - Fluxograma do modelo de construção da aplicação utilizada <i>ArcGIS Viewer for Flex</i>	97
Figura 46 - Tela do sistema <i>WebGIS</i> , com as informações das medições <i>outdoor</i> e <i>indoor</i> ...	99
Figura 47 - <i>Baseline</i> das resistências (Ohms) obtidas ao longo de aproximadamente 18 horas	101
Figura 48 - Relação entre o ppm_v calculado sobre o volume do <i>box</i> pela volumetria das injeções	102
Figura 49 - Resposta da resistência (Ohms) dos sensores 1 e 2 a injeção de 1 ml (10 repetições) de CO durante a leitura de 30 segundos.....	103

Figura 50 - Gráfico apresentando a resposta da resistência R_s (Ohms) a 10 repetições de injeções de 1 ml de CO.....	104
Figura 51 - Resposta da resistência (Ohms) dos sensores 1 e 2 a injeção de 2 ml (10 repetições) de CO durante a leitura de 30 segundos.....	104
Figura 52 - Gráfico apresentando a resposta da resistência R_s (Ohms) a 10 repetições de injeções de 2 ml de CO.....	105
Figura 53 - Resposta da resistência (Ohms) dos sensores 1 e 2 a injeção de 3 ml (10 repetições) de CO durante a leitura de 30 segundos.....	105
Figura 54 - Gráfico apresentando a resposta da resistência R_s (Ohms) a 10 repetições de injeções de 3 ml de CO.....	106
Figura 55 - Resposta da resistência (Ohms) dos sensores 1 e 2 a injeção de 4 ml (10 repetições) de CO durante a leitura de 30 segundos.....	106
Figura 56 - Gráfico apresentando a resposta da resistência R_s (Ohms) a 10 repetições de injeções de 4 ml de CO.....	107
Figura 57 - Resposta da resistência (Ohms) dos sensores 1 e 2 a injeção de 5 ml (10 repetições) de CO durante a leitura de 30 segundos.....	107
Figura 58 - Gráfico apresentando a resposta da resistência R_s (Ohms) a 10 repetições de injeções de 5 ml de CO.....	108
Figura 59 - Resposta da resistência (Ohms) dos sensores 1 e 2 a injeção de 6 ml (10 repetições) de CO durante a leitura de 30 segundos.....	108
Figura 60 - Gráfico apresentando a resposta da resistência R_s (Ohms) a 10 repetições de injeções de 5 ml de CO.....	109
Figura 61 - Resposta da resistência R_s (Ohms) em 2 momentos de cada injeção (ml), demonstrando a relação inversa com a concentração (Sensor 1)	110
Figura 62 - Resposta da resistência R_s (Ohms) em 2 momentos de cada injeção (ml), demonstrando a relação inversa com a concentração (Sensor 2)	110
Figura 63 - Coeficiente de determinação da resistência (Ohms) em relação a injeção (ml) de CO.....	114
Figura 64 - Localização dos pontos na SQS 202 e Setor Bancário Sul.....	117
Figura 65 - Amostragem na praça da SQS 202	118
Figura 66 - Amostragem no estacionamento do Setor Bancário Sul.....	118
Figura 67 - Localização dos pontos no Setor de Autarquias Sul.....	119
Figura 68 - Amostragem no Setor de Autarquias Sul.....	120
Figura 69 - Localização dos pontos no Setor Comercial Sul	121

Figura 70 - Amostragem no Setor Comercial Sul (Ponto 1)	122
Figura 71 - Amostragem no Setor Comercial Sul (Ponto 2)	122
Figura 72 - Localização dos pontos no Setor Hoteleiro Sul e Eixão Sul.....	123
Figura 73 - Amostragem no Setor Hoteleiro Sul.....	124
Figura 74 - Amostragem no Eixão Sul.....	125
Figura 75 - Localização do ponto na plataforma superior da Rodoviária de Brasília	126
Figura 76 - Amostragem na plataforma superior da Rodoviária de Brasília.....	127
Figura 77 - Localização dos pontos na Portaria 1 e Estacionamento do Estádio Nacional de Brasília.....	128
Figura 78 - Amostragem no estacionamento do Estádio Nacional de Brasília	129
Figura 79 - Amostragem na Portaria 1 do Estádio Nacional de Brasília.....	129
Figura 80 - Localização dos pontos da Portaria 2 e 3 do Estádio Nacional de Brasília	130
Figura 81 - Amostragem na Portaria 2 do Estádio Nacional de Brasília.....	131
Figura 82 - Amostragem na Portaria 3 do Estádio Nacional de Brasília.....	132
Figura 83 - Localização dos pontos nas vias L4 Norte (CESPE) e L3 Norte (Finatec)	133
Figura 84 - Amostragem na via L4 Norte (CESPE).....	134
Figura 85 - Amostragem na via L3 Norte (FINATEC).....	134
Figura 86 - Localização dos pontos no estacionamento do ICC Ala Sul e na via L2 Norte (CEAN).....	135
Figura 87 - Amostragem no estacionamento do ICC Ala Sul	136
Figura 88 - Amostragem na via L2 Norte (CEAN).....	136
Figura 89 - Localização dos pontos no ICC Ala Central (Garagem IG) e ICC Ala Central (IG)	137
Figura 90 - Amostragem no ICC Ala Central – Instituto de Geociências.....	139
Figura 91 - Amostragem no ICC Ala Central – Garagem (IG).....	139
Figura 92 - Localização dos pontos no ICC Ala Sul (CA de Psicologia) e Garagem.....	140
Figura 93 - Amostragem no ICC Ala Sul (Garagem).....	141
Figura 94 - Amostragem no ICC Ala Sul (CA de Psicologia)	141
Figura 95 - Localização dos pontos no ICC Ala Norte (FAC) e Garagem (FAU).....	142
Figura 96 - Amostragem no ICC Ala Norte (FAC).....	143
Figura 97 - Amostragem no ICC Ala Norte – Garagem (FAU).....	143
Figura 98 - Tela do painel com a ferramenta de desenho.....	144
Figura 99 - Tela do painel com a ferramenta de impressão.....	145
Figura 100 - Tela do painel com a ferramenta de consulta	145

Figura 101 - Tela do painel com a ferramenta de gráficos (linha)	146
Figura 102 - Tela do painel com a ferramenta de gráficos (coluna).....	146
Figura 103 - Tela do painel com a ferramenta de legenda dinâmica.....	147
Figura 104 - Tela do painel com a ferramenta de pesquisa	148
Figura 105 - Tela do painel com a ferramenta lista de camada.....	148

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição do ar natural.....	26
Tabela 2 - Padrões nacionais de qualidade do ar.....	28
Tabela 3 - Gases no ar troposférico seco a uma pressão de 1 atm	31
Tabela 4 - Padrões de qualidade do ar em vigor no Brasil.....	35
Tabela 5 - Padrões Estaduais de Qualidade do Ar.....	38
Tabela 6 - Critérios para episódios agudos de poluição do ar	39
Tabela 7 - Estrutura do índice de qualidade do ar	39
Tabela 8 - Qualidade do ar e efeitos a saúde	39
Tabela 9 - Princípios eletro-ópticos x poluentes	42
Tabela 10 - Concentração Padrão Ambiental e Valor Limite (TLV) da Poluição do Ar	48
Tabela 11 - Principais vantagens e desvantagens de conhecidos óxidos de metal para aplicação em sensoriamento de gases.....	50
Tabela 12 - Parâmetros de funcionamento dos sensores de gás de estado sólido de base de óxidos de metal e peculiaridades tecnológicas de sua fabricação	50
Tabela 13 - Sinal de mudança de resistência (aumento ou diminuição) na mudança da atmosfera do gás	51
Tabela 14 - Configuração de chaveamento para os tipos de sensores.....	85
Tabela 15 - Descrição dos campos definidos na tabela de atributos das análises	98
Tabela 16 - Média da <i>baseline</i> para os sensores 1 e 2 (R_0).....	101
Tabela 17 - Média, Desvio padrão e Coeficiente de variação (%) da resistência (Ohms) por volume injetado (ml) – Sensor 1	112
Tabela 18 - Média, Desvio padrão e Coeficiente de variação (%) da resistência (Ohms) por volume injetado (ml) – Sensor 2	112
Tabela 19 - Comparação entre as médias das resistências (Ohms) das injeções (1 ml a 6 ml) do sensor 1 e sensor 2, as respectivas covariâncias e o coeficiente de correlação	112

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Categoria das substâncias poluentes	27
Quadro 2 - Comparação dos valores-limite [$\mu\text{m}/\text{m}^3$] para um tempo médio dado, emitido por diferentes países.....	34

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

Delineadas, nos últimos séculos, a partir de atividades industriais e comerciais, a população humana tem se concentrado prioritariamente nas áreas urbanas. Embora a urbanização venha trazer um maior desenvolvimento econômico, a concentração populacional excessiva causará danos ambientais (BRAGA *et al.*, 2005; VESILIND; MORGAN, 2011), como a poluição do ar, que tem um impacto direto sobre qualidade de vida humana tanto no agravo a saúde (THEPANONDH; TORUKSA, 2011), como no conceito de bem estar social (PAQUET *et al.*, 2013), por causa da rápida emissão e dispersão de poluentes (YASWANTH, 2013).

A poluição atmosférica urbana é uma grande preocupação em cidades modernas principalmente em países em desenvolvimento, onde poluentes afetam consideravelmente a saúde humana (THEPANONDH; TORUKSA, 2011) e são responsáveis por uma variedade de doenças respiratórias, sendo conhecidos por diversas pesquisas, como agentes capazes de causar e/ou agravar o câncer, quando ocorre exposição às variáveis de poluição por longos períodos de tempo (ATSDR, 2014).

Atualmente, o monitoramento por redes de estações de medição estática (posteriormente chamados de estações fixas) são operadas por autoridades oficiais, como órgãos governamentais ligados ao meio ambiente. Esse monitoramento possui alta confiabilidade na geração de dados e são capazes de medir, com precisão, uma ampla gama de poluentes atmosféricos, usando instrumentos analíticos tradicionais, como espectrômetros de massa e cromatógrafos a gás. No entanto, as desvantagens desses sistemas de medição são as suas grandes dimensões, alto custo e manutenção complexa. (HANSENFRAZT *et al.*, 2012).

Sivaraman *et al.* (2013) indica duas limitações básicas nas abordagens utilizadas no controle e publicação de dados da qualidade do ar: Em primeiro lugar, a resolução espacial da amostragem da poluição é baixa, tornando-se necessário o uso de modelos matemáticos para estimar as concentrações de poluentes em áreas não monitoradas das regiões metropolitanas. Em segundo lugar, observações atuais de concentrações não refletem exposições reais vividas pelas pessoas, devido à heterogeneidade espacial das concentrações de poluentes e os padrões de mobilidade dos indivíduos. No cenário do Brasil, ressalta-se o caso específico da cidade de São Paulo, que apresenta uma rede de monitoramento eficiente, sendo focada na região metropolitana do Estado (CETESB, 2013).

Por outro lado, o panorama geral observado para outras cidades brasileiras, apresenta a ausência de rede de monitoramento da qualidade do ar ou deficiência, na existência dela.

Rada *et al.* (2012) cita que os protocolos e os sensores de monitoramento são extremamente novos, e muita pesquisa ainda precisa ser feita para se integrar estas tecnologias e melhorar os sistemas de informações ambientais. Um ponto importante para a melhoria do monitoramento da qualidade do ar é o compartilhamento de dados ambientais, provenientes de fontes diferentes (pública e empresas privadas), um sistema em tempo real, a fim de se tirar vantagem de dados de diferentes redes de sensores.

Desse modo, a presente pesquisa enquadra-se nessa perspectiva de gerar sistemas de monitoramento distribuído e se possível com a participação das redes colaborativas.

Em Sydney na Austrália (SIVARAMAN *et. al.*, 2013), o projeto “*HazeWatch*”, objetivou o envolvimento dos cidadãos na gestão de dados de poluição do ar ao qual estão expostos, por meio de ferramentas personalizadas, ou seja, micro sistemas controlados com sensores de baixo custo, gerando informações em tempo real. A pesquisa obteve resultados satisfatórios no que tange a compreensão da qualidade do ar urbano, visto que é apresentado ao usuário do sistema, informações de exposição a determinado tipo de poluente durante o seu cotidiano, caracterizando-o também como um meio de conscientização ambiental.

No caso do Brasil, a região metropolitana de São Paulo possui uma rede de monitoramento tradicional (estações fixas e móveis), gerando relatórios de situação regionais, que podem ser acessados na *web*, via portal da instituição. A vantagem desse tipo de sistema se dá no nível de informação gerado, que pode ser correlacionado com diversas outras variáveis, tendo a possibilidade de modelagens ambientais mais precisas.

Em contrapartida, regiões como o Distrito Federal apresentam rede deficitária em relação a geração de dados e diagnósticos de monitoramento da qualidade do ar local, tendo possibilidades de investimentos em rede alternativa de monitoramento portátil móvel, reduzindo os custos investidos no setor pelo governo.

1.1 HIPÓTESE DE TRABALHO

A hipótese básica estabelecida para esta dissertação é que, sensores de baixo custo calibrados e validados podem ser utilizados embarcados em sistemas micro controlados como equipamentos alternativos de monitoramento da qualidade do ar. Com isso, a utilização deles vem a expandir a rede tradicional de monitoramento, ampliando as possibilidades de sensoriamento participativo e colaborativo.

1.2 JUSTIFICATIVA DA PESQUISA

De acordo com Hasenfratz *et al.* (2012), devido à variabilidade espacial da concentração de poluentes do ar, se torna necessária a alta densidade de estações móveis com sensores de baixo custo para o entendimento da dinâmica dos poluentes. O funcionamento da maioria destes sensores mostra uma reação eletroquímica, quando exposto a um gás específico. A concentração é determinada medindo a corrente de saída do sensor ou a resistência da camada do metal como, por exemplo, o dióxido de estanho. Estes sensores são pequenos, acessíveis e adequados para medições móveis.

Com o advento dos *smartphones* e redes móveis, essa possibilidade tem escala cada vez mais aplicável, visto a crescente adesão de usuários a essas tecnologias, podendo ser grandes disseminadores de informações e fazendo com que esses dados sejam disponibilizados em plataformas *WebGIS* (Painel) de forma dinâmica.

A calibração dos sensores de gases é um dos principais desafios durante a fase de desenvolvimento de um sistema de monitoramento da qualidade do ar. A partir do conhecimento das características deles, delimita-se a precisão das leituras e conseqüentemente, da qualidade dos dados gerados.

Os sistemas móveis integrados com sensores de baixo custo podem possibilitar um grande avanço, aliados aos recursos de um SIG, no sentido de se produzir análises com maior variação espaço-temporal, imprescindíveis na modelagem da qualidade ambiental das cidades, se destacando como equipamento alternativo e colaborativo ao monitoramento tradicional da qualidade do ar.

1.3 OBJETIVO

Analisar as potencialidades, viabilidade técnica e operacional de monitoramento da qualidade do ar a partir do uso de sensores de baixo custo embarcados em sistemas micro controlados, utilizando-se como estudo de caso a cidade de Brasília.

Para a concessão do objetivo geral acima referido, o trabalho deve contemplar os seguintes objetivos específicos:

- a) Determinar um procedimento de calibração em laboratório do sensor selecionado;
- b) Aplicação do sensor em áreas específicas da cidade de Brasília;
- c) Construção de uma plataforma *WebGIS* para interação dos dados gerados pelo monitoramento com os sensores *de* baixo custo.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho foi estruturado em quatro capítulos. Inicia-se apresentando a motivação científica e a justificativa para a realização do trabalho, a partir de uma discussão introdutória sobre a importância do monitoramento da qualidade do ar e dos sensores de baixo custo (Capítulo 1).

No Capítulo 2, são abordadas as bases teóricas necessárias ao desenvolvimento do estudo, abrangendo conceitos como princípios de operação de sensores, tipos de sensores, monitoramento convencional da qualidade do ar, padrões de qualidade do ar e componentes de SIG.

O Capítulo 3 consiste na descrição das etapas e métodos empregados no desenvolvimento da pesquisa, bem como dos materiais (*softwares* e dados) utilizados. Nesse ponto, ocorre a explanação de todo o processo de calibração, desde o pré-processamento até a geração de dados e sua análise integrada em um ambiente SIG.

Os resultados do estudo são discutidos no Capítulo 4, abordando, a princípio, os resultados gerados: as curvas de calibração dos sensores, os dados coletados em ambiente *indoor* e *outdoor*. Por fim, todos são integrados em um sistema de informação geográficas (painel *WebGIS*) para proporcionar a caracterização espaço-temporal e a geração de gráficos quantitativos de distribuição de Monóxido de Carbono (CO), nas regiões coletadas.

Finalmente, no Capítulo 5 são destacadas as conclusões e as recomendações relevantes ao aprimoramento futuro da metodologia aqui proposta. Por último são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas.

CAPÍTULO 2 – ESTADO DA ARTE

2.1 POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA

O ar limpo (Tabela 1) é considerado um requisito básico para o bem-estar e saúde humana. Porém, a poluição atmosférica continua a ser uma ameaça significativa para a saúde mundial (WHO, 2005). Deste modo, a poluição do ar, que altera o estado do ar limpo, é um ônus ao ambiente terrestre.

Tabela 1. Composição do ar natural.

Volume de conteúdo em relação ao ar seco (%)		
Oxigênio	(O ₂)	20,93
Nitrogênio	(N ₂)	78,1
Argônio	(Ar)	0,9325
Dióxido de carbono	(CO ₂)	0,03 - 0,04
Hidrogênio	(H ₂)	0,00005
Neônio	(Ne)	0,0018
Hélio	(He)	0,0005
Criptônio	(Kr)	0,0001
Xenônio	(Xe)	0,000009

Fonte: (BAUMBACH, 1998; BOUBEL, 1994).

Segundo a definição de Jacobson (2002) e Derisio (2000), o conceito de poluição do ar é quando gases ou partículas emitidas pela ação humana atingem concentrações suficientemente altas que causam danos diretos ou indiretos para plantas, animais, outras formas de vida, ecossistemas, estruturas ou obras de arte.

De acordo com Baird (2002), o exemplo mais conhecido de poluição do ar é o *smog*, mistura de névoa e fumaça, causado principalmente por emissões provenientes de automóveis, que ocorre em cidades como São Paulo e Pequim. O *smog* provoca dificuldade respiratória, irritação nos olhos e também redução da visibilidade, resultante de reações na atmosfera entre certos hidrocarbonetos, óxidos de nitrogênio e o ozônio (MACINTYRE, 1990).

São duas as principais fontes de emissão associadas à contaminação do ar urbano: as indústrias, desde o início da revolução industrial até os dias atuais, e os veículos automotores, que vêm se transformando na principal fonte de emissão a partir da segunda metade do século XX. (SALDIVA, *et al.*, 2002).

AYOADE (1998) ressalta que a poluição do ar afeta o clima das áreas urbanas de diversas formas. O próprio balanço energético das cidades sofre interferência, pois os poluentes refletem, dispersam e absorvem radiação solar. Muitos poluentes como o NO₂ (Dióxido de Nitrogênio), SO₂ (Dióxido de enxofre) também servem de núcleos de condensação, sendo, portanto, abundantes no ar das cidades, cuja umidade já é substancialmente abastecida através da evaporação, dos processos industriais e dos automóveis, que emitem grandes quantidades de vapor d'água. Conseqüentemente, a tendência da precipitação é aumentar sobre as áreas urbanas.

A Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB, 2013) cita que o nível de poluição atmosférica é medido pela quantidade de substâncias poluentes presentes no ar. A variedade das substâncias que podem ser encontradas na atmosfera é muito grande, o que torna difícil a tarefa de estabelecer uma classificação. Uma das chaves de classificação mais usadas divide os poluentes em cinco grupos principais: monóxido de carbono (CO), partículas em suspensão (PTS), óxidos de enxofre, hidrocarbonetos e óxidos de nitrogênio (Quadro 1). Estes podem ser encontrados na atmosfera, em estado gasoso ou sob a forma de partículas sólidas.

Quadro 1. Categoria das substâncias poluentes.

Compostos de Enxofre	Compostos de Nitrogênio	Compostos Orgânicos	Monóxido de Carbono	Compostos Halogenados	Metais Pesados	Material Particulado	Oxidantes Fotoquímicos
SO ₂	NO	Hidrocarbonetos Álcoois	CO	HCl	Pb	Mistura de compostos no estado sólido ou líquido	O ₃
SO ₃	NO ₂	Aldeídos		HF	Cd		Formaldeído
Compostos de Enxofre Reduzido:	NH ₃	Cetonas		Cloretos	As		Acroleína
(H ₂ S, Mercaptanas, Dissulfeto de carbono, etc)	HNO ₃	Ácidos orgânicos		Fluoretos	Ni		PAN
Sulfatos	Nitratos				etc.		etc.

Fonte: CETESB (2013).

Ainda segundo a CETESB (2013), a interação inicial do índice de qualidade do ar eq.(2) utiliza concentrações ambiente de poluentes para gerar os índices individuais. Estes índices foram então ponderados e somados para formar um único índice total de qualidade do

ar. A metodologia geral pode utilizar concentrações que são tomadas a partir de dados de controle do ambiente, ou capturados por um modelo de difusão.

A medição sistemática da qualidade do ar é restrita a um número de poluentes (Tabela 2) (CONAMA, 1990; WHO, 1995) que foram escolhidos em razão da frequência de ocorrência e de seus conhecidos efeitos adversos à saúde. Uma outra forma de classificar os poluentes é dividindo-os em primários e secundários.

O *Scientific Committees European* (2014) define que um poluente primário é emitido diretamente de uma fonte para a atmosfera. O poluente secundário não está diretamente sendo emitido como tal, mas se forma quando outros poluentes (poluentes primários) reagem na atmosfera, a exemplo do ozônio (O₃), que é formado quando hidrocarbonetos (HC) e óxidos de azoto (NO_x) se combinam na presença de luz solar.

Tabela 2. Padrões nacionais de qualidade do ar.

Poluente	Tempo de Amostragem	Padrão Primário µg/m ³	Padrão Secundário µg/m ³	Método de medição
Partículas Totais em Suspensão (PTS)	24 horas ¹	240	150	amostrador de grandes volumes
	MGA ²	80	60	
Partículas Inaláveis	24 horas ¹	150	150	separação inercial/filtração
	MAA ³	50	50	
Fumaça	24 horas ¹	150	100	refletância
	MAA ³	60	40	
SO ₂ (Dióxido de Enxofre)	24 horas ¹	365	100	pararosalina
	MAA ³	80	40	
NO ₂ (Dióxido de Nitrogênio)	24 horas ¹	320	190	quimiluminescência
	MAA ³	100	100	
CO (Monóxido de Carbono)	1 hora ¹	40.000 ppm	40.000 ppm	infravermelho não dispersivo
		35.000 ppm	35.000 ppm	
	8 hora ¹	10.000 ppm	10.000 ppm	
O ₃ (Ozônio)	1 hora ¹	9 ppm	9 ppm	quimiluminescência
		160	160	

1- Não deve ser excedido mais que uma vez ao ano. 2 – Média geométrica anual. 3 – Média aritmética anual.

Fonte: Adaptado (CONAMA nº 03/90).

2.2 CARACTERÍSTICAS DOS GASES

Segundo o *College of the Enviroment* (2014) da Universidade de Washington, muitos dos poluentes que são monitorados e regulados a nível local e regional podem ser transportados a longas distâncias de suas fontes. A quantidade de tempo que um poluente permanecerá na atmosfera é determinada pela sua reatividade (taxa de perda por reação com radicais hidroxila, etc) e taxa de remoção (deposição seca e úmida). O tempo de residência atmosférica varia muito (Figura 1), tanto entre os poluentes como em toda a atmosfera.

A Figura 1, descreve que se a concentração global média de um componente de rastreio no ambiente não muda significativamente ao longo de um determinado período de tempo, a taxa à qual o constituinte é injetado dentro (e/ou produzidos no interior) da atmosfera deve ser igual à velocidade a que ele é removido dela. Sob tais condições de estado estacionário, podemos definir na eq.(1), o tempo de residência (ou da vida) τ de um traço constituinte na atmosfera onde:

$$\tau = \frac{M}{F} \quad (1)$$

Onde M é a quantidade do componente na atmosfera (em kg) e F é a taxa da sua remoção (em kg s^{-1}) a partir da atmosfera.

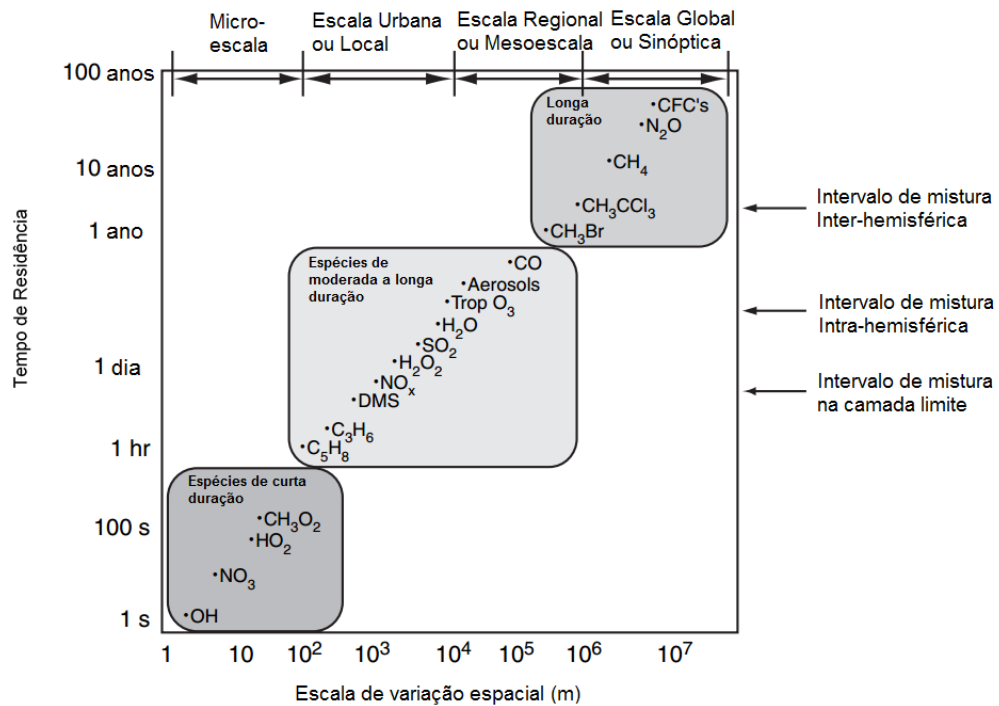


Figura 1. Escalas espaciais e temporais da variabilidade de alguns constituintes atmosféricos.

Fonte: Adaptado (J. H. Seinfeld and S. N. Pandis, Atmospheric Chemistry and Physics, 1998).

Embora cada constituinte atmosférico possua um tempo de permanência de acordo com a eq.(1), os tempos de permanência das moléculas individuais desse constituinte podem variar amplamente, especialmente se os processos de remoção tendem a ser localmente concentrados. Além disso, o tempo de residência, definido dessa maneira, nem sempre demonstra a representação do deslocamento de tempo para a concentração atmosférica de uma espécie reagir a uma mudança abrupta na fonte. Usando o exemplo do CO_2 , que tem um tempo de residência de apenas alguns anos na atmosfera, mas um tempo de ajuste muito mais lento (Tabela 3).

Gás	Fórmula Química	Fração de Volume de ocupado pelas espécies ^a	Tempo de Residência	Fontes
Nitrogênio	N ₂	78.084%	1.6 x 10 ⁷ anos	Biológica
Oxigênio	O ₂	20.946%	3000–4000 anos	Biológica
Argônio	Ar	0.934%	—	Radiogênica
Dióxido de Carbono	CO ₂	379 ppmv	3–4 anos ^d	Biológica, oceânica, combustão (aumento da concentração)
Neon	Ne	18.18 ppmv	—	Vulcão
Hélio	He	5.24 ppmv	—	Radiogênica
Metano ^e	CH ₄	1.7 ppmv	9 anos	Biológica, antropogênica
Hidrogênio	H ₂	0.56 ppmv	≈ 2 anos	Biológica, antropogênica
Óxido Nitroso	N ₂ O	0.31 ppmv	150 anos	Biológica, antropogênica
Monóxido de Carbono	CO	40–200 ppbv	≈ 60 dias	Fotoquímica, combustão, antropogênica
Ozônio	O ₃	10–100 ppbv	Dias - semanas	Fotoquímica, combustão, antropogênica
Hidrocarboneto não-metano (NMHC)	—	5–20 ppbv	Variável	Biológica, antropogênica
Halocarbono	—	3.8 ppbv	Variável	Principalmente antrópica
Peróxido de Hidrogênio	H ₂ O ₂	0.1–10 ppbv	1 dia	Fotoquímica
Formaldeído	HCHO	0.1–1 ppbv	≈ 1.5 h	Fotoquímica
Espécies de Nitrogênio (NO + NO ₂ (= NO _x) + NO ₃ + N ₂ O ₅ + HNO ₃ + PAN)	NO _y	10 pptv–1 ppmv	Variável	Solos, antropogênica, relâmpago
Amônia	NH ₃	10 pptv–1 ppbv	2–10 dias	Biológica
Dióxido de Enxofre	SO ₂	10 pptv–1 ppbv	Dias	Fotoquímica, vulcânica, antropogênica
Sulfeto de dimetilo (DMS)	CH ₃ SCH ₃	10–100 pptv	0.7 dias	Biológica, oceânica
Sulfeto de Hidrogênio	H ₂ S	5–500 pptv	1–5 dias	Biológica, vulcânica
Disulfeto de Carbono	CS ₂	1–300 pptv	≈ 120 h	Biológica, antropogênica
Radical Hidroxila ^f	OH	0–0.4 pptv	≈ 1 s	Fotoquímica
Radical Hidroperoxila ^f	HO ₂	0–5 pptv	—	Fotoquímica

^a Além de uma porcentagem em volume, as unidades usadas são partes por milhão por volume (ppmv), 10⁻⁶; partes por bilhão em volume (ppbv), 10⁻⁹, e partes por trilhão em volume (pptv), 10⁻¹².

^d Este é o tempo médio de uma molécula de CO₂ na atmosfera, antes de ser absorvida pelas plantas ou dissolvida no oceano. No entanto, o tempo necessário para o CO₂ se ajustar na atmosfera a um novo equilíbrio se suas fontes ou sumidouros forem alteradas é ≈ 50 - 200 anos.

^e Outros Hidrocarbonetos como o CH₄ são referidos hidrocarbonetos não metano como (NMHC). Eles se originam a partir da combustão de combustíveis fósseis, queima de biomassa, vegetação de floresta, etc. Como é o caso para o CH₄, o dissipador principal para a maioria do NMHC é a oxidação por OH. Porque o NMHC são mais reativos do que o CH₄, seus tempos de residência na atmosfera são muito mais curtos (horas a meses). Além disso, ao contrário do CH₄, o NMHC contribui significativamente para a formação de O₃ em smogs urbanos e regionais. Por estas razões, tem sido tradicional separar CH₄ de NMHC. Além do CH₄ e NMHC, uma variedade de compostos orgânicos são importantes na química troposférica. Esses outros compostos orgânicos incluem compostos orgânicos voláteis (VOC), tais como carbonilas, compostos orgânicos de enxofre, e álcoois.

^f Radicais (às vezes chamados de radicais livres) são espécies químicas com um elétron não emparelhado em seu exterior (valência). Consequentemente, um radical tem um número ímpar do total de elétrons (por exemplo, OH tem 8 + 1 = 9 elétrons). Os elétrons desemparelhados fazem radicais mais reativos do que os não radicais.

Tabela 3. Gases no ar troposférico seco a uma pressão de 1 atm.

Fonte: adaptado (*College of the Environment*, 2014).

2.3 HISTÓRICO DA LEGISLAÇÃO DE POLUIÇÃO DO AR

Segundo Katulski (2011), a preocupação com a qualidade do ar urbano não é uma novidade. As primeiras queixas foram registradas no século XIII, quando o carvão foi usado pela primeira vez em Londres.

Hoje, a ênfase deslocou-se dos problemas de poluição causados pela indústria para a poluição em áreas urbanas. Uma preocupação crescente sobre a influência de diferentes poluentes do ar sobre a saúde humana foi a principal força motriz para desenvolver e implementar critérios e padrões de qualidade do ar.

Em 1967, o Congresso dos Estados Unidos aprovou o *Clean Air Act*, a primeira lei ambiental moderna. O *Clean Air Act* (EPA, 1990), que foi alterada pela última vez em 1990, exigindo que a *US Environmental Protection Agency* (EPA) definisse os padrões de qualidade do ar (*National Ambient Air Quality Standards - NAAQS*) para poluentes considerados prejudiciais à saúde pública e ao ambiente. O *Clean Air Act* estabeleceu dois tipos de padrões nacionais de qualidade do ar.

Padrões primários para estabelecer limites de proteção à saúde pública, incluindo a saúde de populações "sensíveis", como os asmáticos, crianças e idosos. Padrões secundários para proteção do bem-estar público, incluindo a proteção contra a diminuição da visibilidade, danos aos animais, culturas, vegetação e edifícios. A EPA estabeleceu NAAQS para seis principais poluentes, que são chamados critérios de poluentes: dióxido de enxofre, partículas em suspensão, óxido de nitrogênio, monóxido de carbono, ozônio e chumbo. Estas normas são concentrações de limiar com base em uma análise detalhada de informações científicas relacionadas aos efeitos.

Na Europa, os primeiros padrões internacionais de qualidade do ar foram introduzidos pela Comissão do Parlamento Europeu na década de 1970, e em 1980 para o SO₂ e partículas em suspensão, voltado principalmente para proteger a saúde humana.

Alguns anos mais tarde, a WHO, reconhecendo os danos ecológicos como sendo relevante para a saúde humana, introduziu as diretrizes de qualidade do ar para a Europa, revista em 2000 (WHO, 2000). A mais nova diretriz relativa à qualidade do ar na União Europeia entrou em vigor em junho de 2008 - (2008/50/CE), sendo revista da diretiva-quadro de 1996 relativa à avaliação e à gestão da qualidade do ar ambiente (96/62/CE) (UE, 2008). Funde-se quatro diretivas anteriores e uma decisão do Conselho numa única diretriz sobre a qualidade do ar.

A nova diretriz da União Europeia sobre qualidade do ar leva em conta as preocupações preconizadas pelas diretrizes (WHO, 2005) sobre as partículas finas. Refletindo as últimas diretrizes de qualidade do ar da WHO que identificam partículas finas (MP_{2.5}) como um dos poluentes mais perigosos para a saúde humana, estabelecendo objetivos e metas para a redução da população a exposição ao MP_{2.5}. Essa diretriz também mantém os limites para as concentrações de partículas mais grosseiras, conhecidos como MP₁₀ e outros poluentes principais já sujeitos a legislação.

O Protocolo de Gotemburgo que ocorreu em 30/11/1999, na Convenção sobre a Poluição Atmosférica Transfronteiras a Longa Distância (LRTAP) da Comissão Econômica das Nações Unidas para a Europa e a diretiva da UE relativa ao estabelecimento de valores-limite nacionais de emissão de determinados poluentes atmosféricos (2001/81/CE) fixam os limites anuais de emissão de poluentes atmosféricos – incluindo os poluentes responsáveis pela acidificação, eutrofização e poluição pelo ozônio troposférico – a observar pelos países europeus. O Protocolo de Gotemburgo foi revisto em 2012, e a diretiva relativa aos valores-limite nacionais de emissão discutida em 2013.

Os níveis de poluentes, principalmente de gases, que afetam negativamente a vida na Terra são hoje bem definidos. O Quadro 2 apresenta exemplos de padrões de qualidade do ar emitidos pela *Environmental Protection Agency* (EPA), a WHO e alguns países da União Européia.

Quadro 2. Comparação dos valores-limite [μm^3] para um tempo médio dado de concentração de poluentes, emitido por diferentes países.

Poluente	Tempo Médio de Amostragem	WHO	EPA	UE	Reino Unido	França	Alemanha	Polônia
SO ₂	10-15 min	500	-	-	266	-	-	-
	30 min	-	-	-	-	-	-	-
	1h	-	-	-	350	350	350	350
	3h	-	1300	-	-	-	-	-
	24h	125	365	125	125	125	125	125
	Anual	50	80	20	20	20	20	20
NO ₂	30 min	-	-	-	-	-	200	-
	1h	200	-	200	200	230	-	200
	24h	-	-	-	-	-	100	-
	Anual	40	100	40	40	46	-	40
MP ₁₀	30 min	-	-	-	-	-	-	-
	24h	20	150	50	50	50	50	50
	Anual	50	-	40	40	40	40	40
CO	10-15 min	100000	-	-	-	-	-	-
	30 min	60000	-	-	-	-	-	-
	1h	30000	4000	-	-	-	-	-
	8h	10000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
	24h	-	-	-	-	-	-	-
	Anual	-	-	-	-	-	-	-
O ₃	30 min	-	-	-	-	-	-	-
	1h	-	235	-	-	-	-	-
	8h	100	157	120	100	120	120	120
Pb	24h	-	-	-	-	-	5	-
	3 meses	-	1.5	-	0.5	-	-	-
	Anual	0.5	-	0.5	-	0.5	0.5	0.5
Benzeno	Anual	-	-	5	16.25	8	-	5

Fonte: KATULSKI (2011).

A legislação brasileira teve suas definições dos padrões de qualidade do ar por diretrizes do Instituto Brasileiro de Meio Ambiente (IBAMA) e aprovados pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) através da Resolução nº 03, de 28 de junho de 1990. São estabelecidos então dois tipos de padrões de qualidade do ar, os primários e secundários:

- Padrões Primários de Qualidade do Ar são as concentrações de poluentes que, ultrapassadas, poderão afetar a saúde da população. (Resolução CONAMA 03/1990);
- Padrões Secundários de Qualidade do Ar são as concentrações de poluentes abaixo das quais se prevê o mínimo efeito adverso sobre o bem-estar da população, assim como o mínimo dano à fauna, à flora, aos materiais e ao meio ambiente em geral. (Resolução CONAMA 03/1990).

A Resolução 03/1990 do CONAMA (Tabela 4), ainda determina os métodos de amostragem e análise a serem utilizados para diversos poluentes; os valores medidos em concentração de poluentes, dos padrões nacionais de qualidade do ar para Partículas Totais em Suspensão (PTS), Fumaça, Partículas Inaláveis (MP₁₀), Dióxido de Nitrogênio (NO₂), Dióxido de Enxofre (SO₂), Monóxido de Carbono (CO) e Ozônio (O₃).

Poluente	Tempo de Amostragem	Concentração (violações aceitas por ano)	
		Padrão Primário	Padrão Secundário
PTS (µm/m ³)	24 horas	240	150
	Anual (MGA*)	80	60
Fumaça (µm/m ³)	24 horas	150	50
	Anual	60	17
Partículas Inaláveis - MP10 (µm/m ³)	24 horas	150	150
	Anual	50	50
SO ₂ (µm/m ³)	24 horas	365	100
	Anual	80	40
CO (µm/m ³ - ppm)	1h	40.000 - 35	40.000 - 35
	8h	10.000 - 9	10.000 - 9
NO ₂ (µm/m ³)	1h	320	190
	Anual	100	100
O ₃ (µm/m ³)	1h	160	160

Observação: Para PTS, fumaça, partículas inaláveis e SO₂, os padrões primários e secundários relativos às médias de 24h podem ser ultrapassados apenas uma vez por ano. Os padrões primários e secundários de CO de 8h e de 1h e do ozônio também não podem ser ultrapassados mais de uma vez ao ano. Não há padrão de ultrapassagem para o NO₂. MGA - Medida Geométrica Anual.

Fonte: Elaboração a partir da Resolução CONAMA 03/1990.

Tabela 4. Padrões de qualidade do ar em vigor no Brasil.

A Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB), do estado de São Paulo, faz uso do índice de qualidade do ar (IQAr) eq.(2), ferramenta matemática desenvolvida para simplificar o processo de divulgação da qualidade do ar para o público. Esse índice é utilizado desde 1981, e foi criado usando como base uma longa experiência desenvolvida no Canadá e nos EUA. Para cada poluente medido é calculado um índice. O índice obtido para a concentração de poluente no ar recebe uma qualificação, que é uma espécie de nota, classificada em boa, regular, inadequada, má e péssima, com o seguinte histórico:

- Em 2005, a Organização Mundial de Saúde - WHO publicou documento com uma revisão dos valores-guia para os poluentes atmosféricos visando à proteção da saúde da população, à luz dos conhecimentos científicos adquiridos até então. Segundo essa publicação, os padrões de qualidade do ar (PQAr) variam de acordo com a abordagem adotada para balancear riscos à saúde, viabilidade técnica, considerações econômicas e vários outros fatores políticos e sociais, que, por sua vez, dependem, entre outras coisas, do nível de desenvolvimento e da capacidade do Estado de gerenciar a qualidade do ar. As diretrizes recomendadas pela WHO levam em conta esta heterogeneidade e, em particular, reconhecem que, ao formularem políticas de qualidade do ar, os governos devem considerar cuidadosamente suas circunstâncias locais antes de adotarem os valores propostos como padrões nacionais. A WHO também preconiza que o processo de estabelecimento de padrões visa atingir as menores concentrações possíveis no contexto de limitações locais, capacidade técnica e prioridades em termos de saúde pública.
- Em 2008, o Estado de São Paulo iniciou um processo de revisão dos padrões de qualidade do ar, baseando-se nas diretrizes estabelecidas pela WHO, com participação de representantes de diversos setores da sociedade. Este processo culminou na publicação do Decreto Estadual nº 59113 de 23/04/2013, estabelecendo novos padrões de qualidade do ar por intermédio de um conjunto de metas gradativas e progressivas para que a poluição atmosférica seja reduzida a níveis desejáveis ao longo do tempo.

- O Decreto Estadual nº 59113/2013 estabelece que a administração da qualidade do ar no território do Estado de São Paulo será efetuada através de Padrões de Qualidade do Ar, observados os seguintes critérios: I. Metas Intermediárias - (MI) estabelecidas como valores a serem cumpridos em etapas, visando à melhoria gradativa da qualidade do ar no Estado de São Paulo, baseada na busca pela redução das emissões de fontes fixas e móveis, em linha com os princípios do desenvolvimento sustentável; II. Padrões Finais (PF) - Padrões determinados pelo melhor conhecimento científico para que a saúde da população seja preservada ao máximo em relação aos danos causados pela poluição atmosférica. As tabelas a seguir apresentam os padrões de qualidade do ar estabelecidos no DE nº 59113/2013, sendo que os padrões vigentes estão assinalados.

A CETESB (2014) explica que o Índice de Qualidade do Ar (IQAr), tem como objetivo principal proporcionar à população o entendimento sobre a qualidade do ar local, em relação a diversos poluentes atmosféricos amostrados nas estações de monitoramento. O IQAR é divulgado através de um boletim da qualidade do ar para cada estação de monitoramento. É uma ferramenta matemática (eq.(2)) utilizada para transformar as concentrações medidas dos diversos poluentes em um único valor adimensional que possibilita a comparação com os limites legais de concentração para os diversos poluentes (Padrões de Qualidade do Ar - PQAr).

$$IQAr = \frac{I_{sup} - I_{inf}}{C_{sup} - C_{inf}} \times (C - C_{inf}) + I_{inf} \quad (2)$$

onde I_{Sup} é o valor crítico superior do índice, I_{Inf} o valor crítico inferior do índice, C_{Sup} a concentração do poluente que corresponde ao I_{Sup} , C_{Inf} a concentração do poluente que corresponde ao C_{Inf} e C a concentração medida para o poluente em questão.

Tabela 5. Padrões Estaduais de Qualidade do Ar
(Decreto Estadual nº 59113 de 23/04/2013).

Poluente	Tempo de Amostragem	MI1 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	MI2 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	MI3 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PF ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Partículas inaláveis (MP_{10})	24 horas	120	100	75	50
	MAA ¹	40	35	30	20
Partículas inaláveis finas ($\text{MP}_{2,5}$)	24 horas	60	50	37	25
	MAA ¹	20	17	15	10
Dióxido de enxofre (SO_2)	24 horas	60	40	30	20
	MAA ¹	40	30	20	-
Dióxido de nitrogênio (NO_2)	1 hora	260	240	220	200
	MAA ¹	60	50	45	40
Ozônio (O_3)	8 horas	140	130	120	100
Monóxido de carbono (CO)	8 horas	-	-	-	9 ppm
Fumaça* (FMC)	24 horas	120	100	75	50
	MAA ¹	40	35	30	20
Partículas totais em suspensão* (PTS)	24 horas	-	-	-	240
	MGA ²	-	-	-	80
Chumbo** (Pb)	MAA ¹	-	-	-	0,5

1 - Média aritmética anual.

2 - Média geométrica anual.

* Fumaça e Partículas Totais em Suspensão - parâmetros auxiliares a serem utilizados apenas em situações específicas, a critério da CETESB.

** Chumbo - a ser monitorado apenas em áreas específicas, a critério da CETESB.

As Metas Intermediárias devem ser obedecidas em 3 (três) etapas, assim determinadas:

I. Meta Intermediária Etapa 1 - (MI1) - Valores de concentração de poluentes atmosféricos que devem ser respeitados a partir de 24/04/2013;

II. Meta Intermediária Etapa 2 - (MI2) - Valores de concentração de poluentes atmosféricos que devem ser respeitados subsequentemente à MI1, que entrará em vigor após avaliações realizadas na Etapa 1, reveladas por estudos técnicos apresentados pelo órgão ambiental estadual, convalidados pelo CONSEMA;

III. Meta Intermediária Etapa 3 - (MI3) - Valores de concentração de poluentes atmosféricos que devem ser respeitados nos anos subsequentes à MI2, sendo que o seu prazo de duração será definido pelo CONSEMA, a partir do início da sua vigência, com base nas avaliações realizadas na Etapa 2.

Os padrões finais (PF) são aplicados sem etapas intermediárias quando não forem estabelecidas metas intermediárias, como no caso do monóxido de carbono, partículas totais em suspensão e chumbo. Para os demais poluentes, os padrões finais passam a valer a partir do final do prazo de duração do MI3.

A Legislação Estadual (DE nº 59113/2013) estabelece também critérios para episódios agudos de poluição do ar. A declaração dos estados de Atenção, Alerta e Emergência, além dos níveis de concentração ultrapassados, requer a previsão de condições meteorológicas desfavoráveis à dispersão dos poluentes.

Fonte: (CETESB, 2013).

Tabela 6. Critérios para episódios agudos de poluição do ar (Decreto Estadual nº 59113 de 23/04/2013).

Parâmetros	Atenção	Alerta	Emergência
Partículas inaláveis finas ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) - 24h	125	210	250
Partículas inaláveis ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) - 24h	250	420	500
Dióxido de enxofre ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) - 24h	800	1.600	2.100
Dióxido de nitrogênio ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) - 1h	1.130	2.260	3.000
Monóxido de carbono (ppm) - 8h	15	30	40
Ozônio ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) - 8h	200	400	600

Fonte: CETESB (2013).

Para cada poluente medido é calculado um índice, que é um valor adimensional. Dependendo do índice obtido, o ar recebe uma qualificação, que é uma nota para a qualidade do ar, além de uma cor, conforme apresentado na Tabela 7 e Tabela 8.

Tabela 7. Estrutura do índice de qualidade do ar.

Qualidade	Índice	MP ₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) 24h	MP _{2,5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) 24h	O ₃ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) 8h	CO (ppm) 8h	NO ₂ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) 1h	SO ₂ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) 24h
N1 - Boa	0 - 40	0 - 50	0 - 25	0 - 100	0 - 9	0 - 200	0 - 20
N2 - Moderada	41 - 80	>50 - 100	>25 - 50	>100 - 130	>9 - 11	>200 - 240	>20 - 40
N3 - Ruim	81 - 120	>100 - 150	>50 - 75	>130 - 160	>11 - 13	>240 - 320	>40 - 365
N4 - Muito Ruim	121 - 200	>150 - 250	>75 - 125	>160 - 200	>13 - 15	>320 - 1130	>365 - 800
N5 - Péssima	>200	>250	>125	>200	>15	>1130	>800

Fonte: CETESB (2013).

Tabela 8. Qualidade do ar e efeitos a saúde.

Qualidade	Índice	Significado
N1 - Boa	0 - 40	
N2 - Moderada	41 - 80	Pessoas de grupos sensíveis (crianças, idosos e pessoas com doenças respiratórias e cardíacas) podem apresentar sintomas como tosse seca e cansaço. A população, em geral, não é afetada.
N3 - Ruim	81 - 120	Toda a população pode apresentar sintomas como tosse seca, cansaço, ardor nos olhos, nariz e garganta. Pessoas de grupos sensíveis (crianças, idosos e pessoas com doenças respiratórias e cardíacas) podem apresentar efeitos mais sérios na saúde.
N4 - Muito Ruim	121 - 200	Toda a população pode apresentar agravamento dos sintomas como tosse seca, cansaço, ardor nos olhos, nariz e garganta e ainda falta de ar e respiração ofegante. Efeitos ainda mais graves à saúde de grupos sensíveis (crianças, idosos e pessoas com doenças respiratórias e cardíacas).
N5 - Péssima	>200	Toda a população pode apresentar sérios riscos de manifestações de doenças respiratórias e cardiovasculares. Aumento de mortes prematuras em pessoas de grupos sensíveis.

Fonte: CETESB (2013).

2.4 METODOLOGIAS E EQUIPAMENTOS DE MONITORAMENTO

A escolha dos monitores de poluição deve levar em consideração, além dos padrões legais, os recursos necessários para a aquisição, operação e manutenção dos equipamentos. Várias metodologias e equipamentos foram desenvolvidos para detectar a quantidade de material particulado e de gases tóxicos presentes no ar atmosférico. Esses equipamentos possuem sensores eletroquímicos que são responsáveis pelo monitoramento dos gases tóxicos. Como qualquer equipamento de medição, a confiabilidade dos valores obtidos depende da sensibilidade e da precisão do equipamento. O intervalo de calibração deve ser respeitado (LISBOA, 2007).

Lisboa (2007), ainda cita que em ambientes fechados (*indoor*), os métodos de medição da qualidade do ar não diferem muito dos métodos utilizados em ambientes abertos (*outdoor*). A maior parte do monitoramento *indoor* utiliza amostradores passivos ou ativos, uma vez que, embora em muitos casos, a avaliação da exposição aguda necessite de analisadores automáticos, podendo haver certa dificuldade de instalação deles.

2.4.1 AMOSTRADORES PASSIVOS

O amostrador, monitor ou dosímetro passivo é definido como aquele que não utiliza energia elétrica ou baterias, não ocorrendo o movimento ativo do ar através do amostrador, conseqüentemente não há necessidade de calibração de fluxos de ar (medir o volume), e nem de muita manutenção, são pequenos e fáceis de transportar, construído em forma de tubo ou emblema, com capacidade de fixar compostos gasosos ou vapores da atmosfera, por meio de substrato químico, em ambientes abertos ou fechados, podendo ser deixado em campo durante longos períodos, de horas até meses.

A facilidade de manuseio favorece o uso desses dispositivos, também no monitoramento da exposição pessoal em ambientes de trabalho. A taxa de fixação é controlada por processos físicos, tais como permeação e difusão (CRUZ, 2002).

O tempo de exposição varia dependendo da concentração do poluente na atmosfera e da capacidade de absorção do dispositivo. Devido ao baixo custo, um número significativo de amostradores pode ser instalado, inclusive em diversos locais simultaneamente e,

consequentemente, obter-se informações importantes sobre a distribuição geográfica e espacial dos poluentes em estudo (PORFÍRIO, 2008).

Uma das desvantagens dos amostradores passivos é a de não distinguirem episódios transitórios de altas e baixas concentrações em um dado período e não serem indicados como método de referência para monitoramento do ar em normas internacionais e nacionais (CRUZ, 2008).

2.4.2 AMOSTRADORES ATIVOS

Para amostragem ativa, utilizam-se bombas e controladores de fluxo de ar atmosférico, necessitando de baterias ou energia elétrica para funcionamento contínuo, através de uma estrutura que retêm os poluentes (CETESB, 2010).

A amostragem ativa pode ser realizada como amostragem contínua, descontínua e sem pré-concentração. A amostragem contínua é baseada na combinação adequada e automatizada dos sistemas de amostragem e análises através de analisadores ou monitores, tendo como vantagem os resultados em curto espaço de tempo. As amostragens descontínuas são realizadas por métodos de amostragens não automatizados, com tempo estabelecido e sendo as análises do material coletado realizada em laboratório. E as sem pré-concentração utilizam bolsas plásticas, *canisters*, tendo limitações em relação ao volume da amostra coletado podendo ser insuficiente no caso de baixas concentrações (CRUZ, 2008).

De acordo com Cruz (2002), a aplicação de tais técnicas muitas vezes é pouco efetiva, tanto pela necessidade contínua de energia, como pela necessidade de pessoal capacitado para a operação dos equipamentos. Esses fatores impossibilitam a coleta de amostras em regiões onde tais requisitos não estejam disponíveis.

2.4.3 AMOSTRADORES AUTOMÁTICOS

Este tipo de equipamento de medição fornece medidas com resolução temporal relativamente alta, normalmente médias de 30 ou 60 minutos, e utilizam princípios eletro-ópticos. A amostra de ar entra em uma câmara de reação onde a propriedade ótica do gás pode ser medida diretamente, ou uma reação química ocorre produzindo quimiluminescência ou luz fluorescente. Um detector de luz produz um sinal elétrico que é proporcional à concentração do poluente que está sendo medido (LISBOA e KAWANO, 2007). Dependendo do poluente, o analisador utiliza diferentes princípios electro-ópticos, tal como pode ser observado na Tabela 9.

Tabela 9. Princípios eletro-ópticos x poluentes.

Princípio Eletro-óptico	Poluente
Fluorescência	SO ₂
Quimiluminescência	NOX, NO e NO ₂
Absorção de infravermelho não dispersivo	CO
Cromatografia gasosa/ionização de chama (ou espectrômetro de massa)	Hidrocarbonetos (HC)
Absorção de ultravioleta	O ₃
Absorção β e microbalanço oscilante	Partículas em suspensão

Fonte: LISBOA e KAWANO (2007).

Medidas deste tipo possuem alto grau de precisão. Estes analisadores funcionam continuamente produzindo grande quantidade de dados. Necessitam de computadores exclusivamente dedicados para posterior processamento e análise. É comum seu uso em unidades fixas (Figura 2) ou móveis de monitoramento (Figura 3).



Figura 2. Estação fixa de monitoramento da qualidade do ar. Fonte: CETESB (2013).

Segundo a CETESB (2014), a Região Metropolitana de São Paulo, o interior e litoral do Estado, possuem estações fixas, além de estações móveis, que são utilizadas em estudos temporários. Esta rede, ligada a uma central de computadores através do sistema de telemetria, registra ininterruptamente as concentrações dos poluentes na atmosfera. Estes dados são processados com base nas médias estabelecidas por padrões legais e nas previsões meteorológicas, que indicam as condições para a dispersão dos poluentes. Eles são disponibilizados de hora em hora na internet, e em boletim diário, elaborado às 16 horas, apresentando a situação das últimas 24 horas.



Figura 3. Estação móvel de monitoramento da qualidade do ar. Fonte: CETESB (2013).

2.4.4 SENSORES REMOTOS

O equipamento pode trabalhar na faixa do ultravioleta (UV), como o equipamento DOAS (*Differential Optical Absorption Spectroscopy*), ou ainda o infravermelho próximo, como o FITR (LISBOA e KAWANO, 2007). O sensor remoto tem como objetivo medir a emissão de hidrocarbonetos e de monóxido de carbono dos veículos automotores que trafegam pelas vias.

Lisboa e Kawano (2007) ainda descrevem que, ao contrário de muitos outros equipamentos utilizados, não há necessidade de conectar o aparelho ao veículo que se pretende avaliar. Montado em um furgão estacionado, o equipamento envia um feixe de infravermelho ao longo de uma faixa de tráfego para medir os hidrocarbonetos, o monóxido de carbono e o dióxido de carbono liberados por um veículo determinado.

Estudos realizados pela EPA e pela *California Air Resources Board* concluíram que o sensor remoto identifica erroneamente alguns veículos como poluidores. Isto ocorre porque há uma variabilidade nos modos de operação.

Há ainda equipamentos mais sofisticados baseados em laser (*Light Detection And Ranging* - LIDAR), utilizados especificamente no monitoramento de gases próximos a fontes emissoras e para medidas de concentração vertical na atmosfera (Figura 4).



Figura 4. Monitoramento baseado a laser (LIDAR). Fonte: Meteo-tech (2014).

Wandinger (2005) cita que o LIDAR envia pulsações pequenas de laser na atmosfera. A fração pequena da luz que é refletida do sistema LIDAR é recebida por um telescópio e um detector sensível.

Korb e Weng (1983) afirmam que para determinar a distribuição no espaço de um contaminante gasoso, pode ser aplicado a *Absorção Diferencial Técnica de Lidar* (DIAL). Esta técnica está baseada na absorção clara através de moléculas. De acordo com as propriedades espectroscópicas da molécula específica, a absorção depende do comprimento de onda da luz incidente.

2.4.5 BIOMONITORAMENTO

A bioindicação não trata predominantemente da indicação da existência, do vigor ou da intensidade de um fator ambiental, mas sim da reação do sistema biológico, ou bioindicador. Trata-se do reconhecimento do efeito de um fator ambiental. Nisso baseia-se a principal diferença entre o monitoramento de parâmetros físicos e químicos da bioindicação de fatores ambientais (MATSUURA, 2000).

Com frequência, o biomonitoramento (Figura 5) é usado para definir reações, dependentes de uma variável temporal, a um fator ambiental antrópico ou modificado antropicamente, manifestadas através de respostas mensuráveis provenientes do bioindicador. Essas respostas têm que ser comparáveis com situações padronizadas (MATSUURA, 2000).

Os bioindicadores podem ser espécies, grupos de espécies ou comunidades biológicas. Suas funções vitais se correlacionam tão estreitamente com determinados fatores ambientais, que podem ser empregados como indicadores na avaliação de uma dada área (CALLISTO *et al.*, 2004).

De acordo com LIMA (2000), os tipos básicos de bioindicadores são chamados de "indicadores sensíveis" e "indicadores acumuladores".

Matsuura (2000) concorda e acrescenta dizendo que os bioindicadores também podem ser não específicos (quando a mesma reação pode ser provocada por diferentes fatores antrópicos) e específicos (quando somente um fator ambiental provoca a reação). Se o bioindicador reage modificando seu comportamento com um desvio significativo em relação ao comportamento normal, então ele é um bioindicador sensível. Se ele, ao contrário, acumula influências antrópicas sem, contudo, mostrar danos passíveis de serem reconhecidos em um curto espaço de tempo, ele é denominado bioindicador acumulativo.

Louzada (2001) adota outra nomenclatura para classificar os bioindicadores. Segundo ele, os tipos mais comuns seriam:

- Espécies sentinelas – introduzidas para indicar;
- Espécies detectoras – ocorrem naturalmente e respondem ao stress de forma mensurável;
- Espécies exploradoras – reagem positivamente ao distúrbio ou agente estressor.



Figura 5. Biomonitoramento em área urbana. Fonte: Prefeitura de Camaçari (2014).

2.5 SENSORES DE BAIXO CUSTO PARA MONITORAMENTO DA QUALIDADE DO AR

A *Joint Research Centre* (SPINELLE, 2013) descreve que os sensores de gases de baixo custo são identificados como dispositivos emergentes de monitoramento, para medições indicativas, tendo a vantagem de fornecerem resultados rápidos, baratos e permitem uma boa cobertura espacial.

Medidas quantitativas de concentrações de poluentes (Tabela 10), em geral, exigem técnicas para serem sensíveis às concentrações ambientais e exclusivamente para essa proposição particular (ou seja, livre de interferência de outros poluentes).

Tabela 10. Concentração Padrão Ambiental e Valor Limite (TLV) da Poluição do Ar.

Poluentes	Ambiente	Concentração	TLV*
NOx	Abaixo 0.04-0.06 ppm (média diária)	NO ₂ : 3 ppm, NO: 25 ppm	0.01-0.3 ppm
CO ₂	-	5000 ppm	200-400 ppm
CO	35 ppm (1 h média)	50 ppm	0.1-10 ppm
HCHO	-	1 ppm	-
SO ₂	Abaixo 0.04 ppm (média diária)	2 ppm	0-2 ppm
NH ₃	-	25 ppm	-
O ₃	Abaixo 0.06 ppm (1 h média)	0.1 ppm	0-0.5 ppm
CFC**	-	-	20 ppt

*TLV: máxima exposição em um período de 8 h a 40 h por semana

**CFC (Freon)

Fonte: Adaptado (HUSNI, *et. al.*, 2013).

Sensores de baixo custo estão disponíveis comercialmente para uma gama de gases, indicados pela WHO (2005) como variáveis agravantes para o bem-estar humano.

No entanto, alguns deles destinam-se a ser utilizado na gama ppb, que é relevante para a qualidade do ar urbano. Sensores disponíveis comercialmente são construídos para algumas aplicações, como por exemplo, para área de segurança, como detecção de envenenamento por CO. A maioria dos sensores básicos, disponíveis para NO, CO, NO₂, e VOC, são sensores de óxido de metal ou sensores eletroquímicos (HUSNI, *et. al.*, 2013).

2.5.1 SENSORES DE ÓXIDO DE METAL

Loreto (2012), descreve que os sensores semicondutores de óxido de metal, compostos de um ou mais óxidos de metais de transição, são feitos principalmente de SnO_2 na forma de pastilhas porosas/grossas ou películas finas, depositadas sobre um substrato de alumina ou de sílica. As propriedades de detecção são baseadas na reação entre o semicondutor de óxido de metal e de oxidação ou a redução dos gases na atmosfera, que levam a alterações na condutividade. Esta alteração na condutividade é medida ao longo de um par de elétrodos interdigitados, incorporados ao óxido de metal (Figura 6).

Um elemento de aquecimento é usado para regular a temperatura do sensor (platina). Os sensores têm de ser aquecidos de 200 a 400 graus Celsius, para aumentar a sensibilidade e reduzir o tempo de resposta. Eles apresentam diferentes características de resposta de gás em diferentes faixas de temperatura. A seleção da melhor temperatura operacional para cada tipo de gás específico aumenta ou reduz a sensibilidade. Por vezes, as camadas finas de outros metais (por exemplo, nano-partículas de ouro), ou óxidos de metal, são depositadas sobre a camada de detecção para atuar como um catalisador ou um filtro. A sensibilidade transversal do sensor de óxido de metal pode ser reduzida pela adição de filtros. Um exemplo, são os depuradores de ozônio adicionados em alguns sensores de NO_2 , e filtros de carvão adicionado a alguns sensores de CO (LORETO, 2012).

A Tabela 11 apresenta os principais óxidos de metal utilizados nos sensores de gases e suas vantagens e desvantagens, segundo Yoo (2011) enquanto a Tabela 12 apresenta os gases medidos por cada tipo, sua faixa de temperatura de operação e o nível de estabilidade. A Figura 6 apresenta a configuração dos sensores de óxido de metal.

Tabela 11. Principais vantagens e desvantagens de conhecidos óxidos de metal para aplicação em sensoriamento de gases.

Material	Vantagens	Desvantagens
SnO ₂	Alta sensibilidade, boa estabilidade em atmosfera redutora	Baixa seletividade, dependência da umidade do ar
WO ₂	Boa sensibilidade para gases oxidantes, boa estabilidade térmica	Baixa sensibilidade, dependência de umidade do ar, processo de recuperação lento
Ga ₂ O ₃	Alta estabilidade, possibilidade de operar a altas temperaturas	Baixa seletividade, sensibilidade média
In ₂ O ₃	Alta sensibilidade para gases oxidantes, resposta rápida e recuperação, baixa sensibilidade à umidade do ar	Baixa estabilidade a baixa pressão parcial de oxigênio
CTO (CrTiO _x)	Alta estabilidade, baixa sensibilidade à umidade do ar	Sensibilidade média

Fonte: Adaptado (YOO, 2011).

Tabela 12. Parâmetros de funcionamento dos sensores de gás de estado sólido de base de óxidos de metal e peculiaridades tecnológicas de sua fabricação.

Óxidos metálicos	Gases detectados	Temperatura de operação (°C)	Estabilidade
SnO ₂	(CO, H ₂ , CH ₄ , etc.)	200-400	Excelente
WO ₃	NO _x , O ₃ , H ₂ S, SO ₂	300-500	Excelente
Ga ₂ O ₃	O ₂ , CO	600-900	Alto
In ₂ O ₃	O ₃ , NO _x	200-400	Moderado
MoO ₃	NH ₃ , NO ₂	200-450	Moderado
TiO ₂	O ₂ , CO, SO ₂	350-800	Alto
ZnO	CH ₄ , C ₄ H ₁₀ , O ₃ , NO _x	250-350	Satisfatório
CTO	H ₂ S, NH ₃ , CO, VOC	300-450	Alto
Fe ₂ O ₃	Álcool, CH ₄ , NO ₂	250-450	Baixo

Fonte: Adaptado (YOO, 2011).

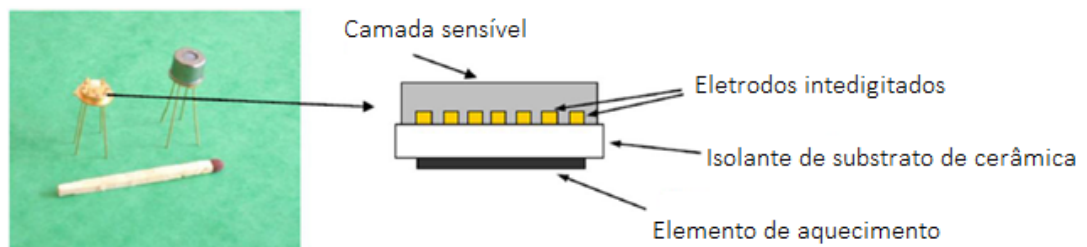


Figura 6. Esquema do sensor de gás de óxido de metal. Fonte: adaptado (LORETO, 2012).

Segundo Yoo (2011) o desenvolvimento de sensores de óxido de metal para a mensuração do gás CO se tornou urgente em função da possibilidade de envenenamento por este gás, resultante da combustão imperfeita de querosene ou gás em um aquecedor. Isso devido as características deste gás, inodoro e incolor. Muitos dispositivos de sensores comerciais, à base de SnO₂, foram estudados por vários pesquisadores na década de 80. Estes sensores de gás, frequentemente, operam a alta temperatura de até 400°C, a fim de se alcançar alta sensibilidade.

Recentemente, de modo a diminuir a temperatura de funcionamento, tais catalisadores de Pt, Pd e Au são adicionados e, óxidos de metais (WO₃, In₂O₃, MoO₃, V₂O₅) são injetados na matriz de SnO₂. Especialmente, óxidos mistos, normalmente adaptados por *doping* de cátions metálicos em uma matriz de óxido, têm atraído um grande interesse em aplicações de catálise para detecção de gases (YOO, 2011).

Fine (2010), indica que a Teoria de banda, tal como aplicada a sensores de gases, tem sido objeto de intenso estudo ao longo dos anos. O gás alvo interage com a superfície da película de óxido de metal, o que resulta em uma mudança na resistência do material. Um semicondutor do tipo *n* é aquele em que os portadores de cargas majoritárias são elétrons e, após interação com um gás redutor, há um aumento na condutividade.

Já um semicondutor tipo *p* é um material que conduz, com orifícios positivos, a carga majoritária; por isso, os efeitos opostos são observados com o material e que apresenta um aumento da resistência na presença de um gás oxidante. Observa-se esse aumento da resistência com um gás de redução, onde a carga negativa é introduzida no material e reduz a concentração da carga positiva transportadora (Tabela 13).

Tabela 13. Sinal de mudança de resistência (aumento ou diminuição) na mudança da atmosfera do gás.

Classificação	Gases oxidantes	Gases redutores
Tipo <i>n</i>	Resistência aumenta	Resistência diminui
Tipo <i>p</i>	Resistência diminui	Resistência aumenta

Fonte: Adaptado (FINE, 2010).

Wiegleb e Heitbaum (1994) relataram a utilização de sensores de gás de óxido de metal como detectores para monitoramento das concentrações de gases NO e CO em carros. O SnO₂ foi utilizado para detectar a alteração na concentração de CO e o In₂O para detectar a concentração de NO. O sensor foi utilizado para medir a concentração de monóxido de vários

estágios de um percurso. Os óxidos de metal foram utilizados devido à sua rápida resposta à mudança na concentração, quando em contato com os gases. Essas respostas foram comparadas com um analisador de gás infravermelho. As respostas são comparáveis, embora o analisador de IR tenha uma maior gama de leitura.

Barbi *et al.* (1995) desenvolveu um sensor de SnO₂ base, que mostrou uma resposta à presença de gás CO a partir das concentrações de 10 ppm e acima. A temperatura de funcionamento ideal mostrou ser de 250°C, com a resposta da resistência em ar ambiente (R_0/R) mostrando 2,2 a 20 ppm, e de 4,1 a 100 ppm, gerando um aumento constante com a concentração (Figura 7).

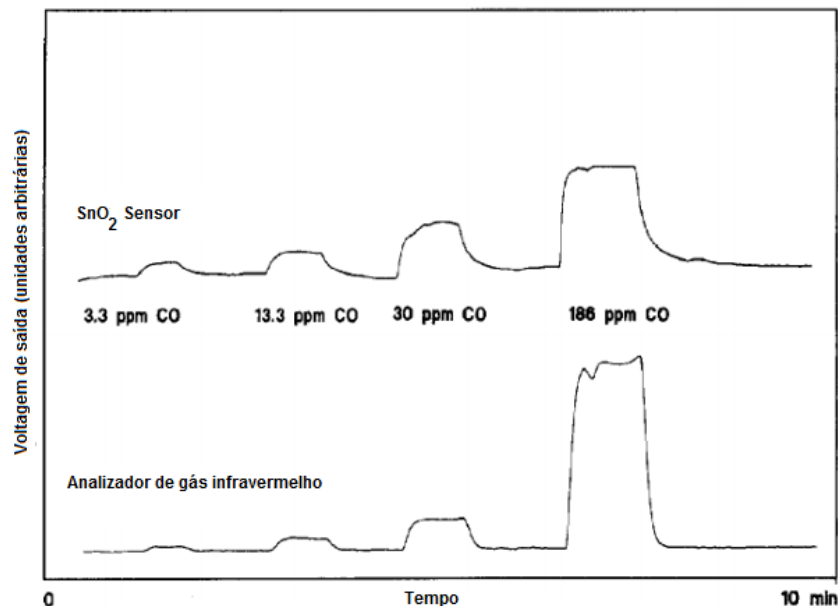


Figura 7. Resposta do sensor para diferentes concentrações de monóxido de carbono para um sensor de SnO₂ e um analisador de gás infravermelho.

Fonte: adaptado (FINE, 2010).

Riviere *et al.* (2003) utilizou serigrafia para produzir uma película de óxido de estanho, variando a composição da tinta. Os materiais demonstraram uma forte resposta à presença de monóxido de carbono, mostrando um aumento de aproximadamente $1 \log \text{Ohm}^{-1} \text{CO}$ a 300 ppm, e uma temperatura de 500°C.

Tischner (2008), anunciou o desenvolvimento de uma película fina de SnO₂ (50-100 nm) depositado por um método de pulverização de pirólise. Os filmes foram produzidos para operar melhor na região de 250-400 °C. Quando testado, o filme mostrou uma dependência da temperatura sobre a resposta: A 250°C, o filme mostrou boas respostas entre 0-40 ppm, a

400°C, e a película obteve a gama de resposta entre 0 e 100 ppm. A película também foi desenvolvida para ser extremamente sensível à umidade, um problema para aplicações em campo, onde se espera que a umidade seja variável. A sugestão é o uso de filmes mais finos, podendo ser mais sensíveis (Figura 8).

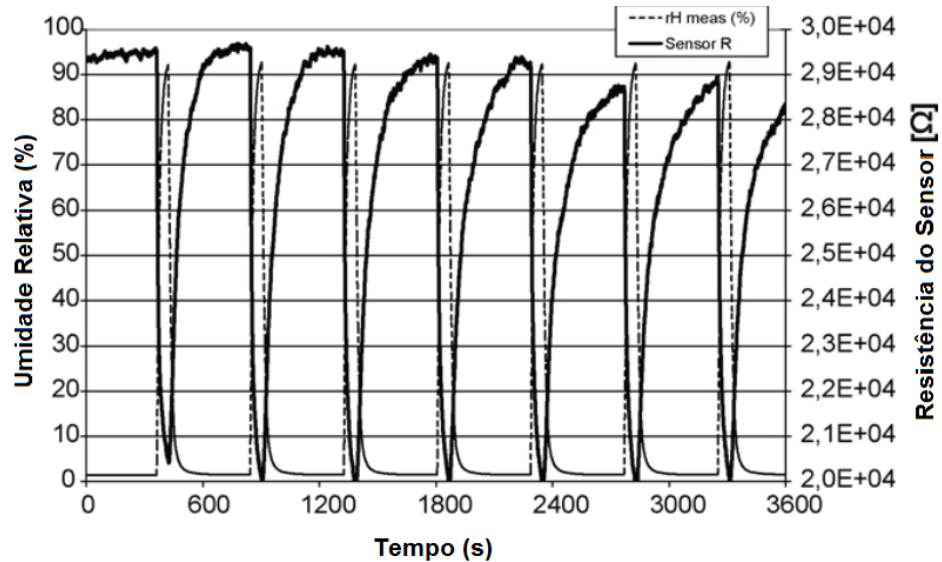


Figura 8. Resposta do sensor a indução de umidade. Fonte: adaptado (FINE, 2010).

Li *et al.* (2009) discorre que, em relação as diferentes fases do óxido de titânio (TiO_2), mostra-se uma resposta de tipo *n* para a presença de CO. O filme de rútilo exhibe respostas do tipo *n* e do tipo *p*, em função da temperatura em que as leituras foram feitas, e encontraram-se concentrações de oxigênio e monóxido de carbono em ambos. Isto demonstra que a fase do material produzido, fazem do sensor semicondutor de óxido de metal ser de grande importância e, devem ser levados em consideração quanto a escolha do método e as condições de deposição.

Izu *et al.* (2009) estudou a resposta de filmes de óxido de cério, após terem sido sinterizadas em diferentes temperaturas (entre 800°C e 1030°C). A película formada após a sinterização a 950°C mostrou a melhor resposta à presença de CO, a uma temperatura de 450°C, e uma concentração de CO de 5000 ppm.

Outros filmes de óxido de cério, também têm sido desenvolvidos, usando feixe de elétrons e, em seguida, recozimento a 500°C (DURRANI *et al.*, 2008). Ainda cita que a temperatura ótima de funcionamento dos filmes foi observada na faixa de 390 °C, com a melhor resposta, onde se mostra o CO estando a uma concentração de 500 ppm. Porém, as

respostas eram lentas com este material, tendo o tempo de 45 segundos para reagir com o CO, e 25 segundos para o filme se recuperar, na ausência do gás em questão.

Sensores de óxido de metal requerem apenas uma função de seu sistema eletrônico. Eles exigem eletrônica para controlar seu elemento de aquecimento. Dependendo do tipo de óxido de metal do sensor, o aquecimento é feito de forma contínua ou pulsada. Loreto (2012), indica que as melhores experiências são com aquecimento contínuo. Isso significa que os componentes eletrônicos devem garantir uma quantidade constante de energia (*Watts*) enviada através do elemento de aquecimento do sensor. Sensores de óxido de metal, tipicamente tem um elemento de aquecimento com uma resistência relativamente estável. Devido a isso, uma tensão constante sobre o elemento de aquecimento garante um consumo de energia suficiente estável no elemento aquecedor. Para medições com períodos mais longos (várias semanas ou mais), uma possível mudança da resistência de aquecimento, ao longo do tempo, tem que ser levadas em consideração.

Esses sensores sempre contém um elemento aquecedor para elevar a temperatura. O consumo típico de um elemento de aquecimento é entre 50 e 500 mW. Além disso, existe uma pequena necessidade atual para ser enviada através do elemento, para medir a resistência do sensor. O tempo de estabilização para os sensores de óxido de metal, necessitam de alimentação por um período relativamente longo, anterior a sua utilização, ao qual só podem ser utilizados após terem sido aquecidos até à temperatura correta e, depois de todas as impurezas terem tempo de serem “queimadas” na superfície do sensor. O aquecimento do sensor, é relativamente rápido (menos de 1 hora). O tempo de limpeza, pode ser de até uma semana. Não é possível ligar um sensor e iniciar as análises de imediato. É necessário um tempo relativamente longo, durante o qual o sinal do sensor vai se estabilizar. Na prática, a maneira mais fácil de lidar com este inconveniente é a de manter os sensores alimentados em todos os momentos.

O vento é um dos fatores que influenciam as medições de sensores de baixo custo. Segundo Loreto (2012), sensores de óxido de metal, em particular, são muito sensíveis ao ar, quando se tem incidência direta sobre eles. Este efeito é causado pelo efeito de arrefecimento do vento sobre a superfície do sensor, que se encontra muito quente (em torno de 300°C). Ao conceber a caixa/compartimento do sensor, é importante proteger os sensores de óxido de metal contra o vento enquanto certifica-se que os sensores estão bem expostos ao gás de interesse de monitoramento.

Ambos os sensores não devem ser colocados expostos diretamente a incidência de radiação solar, pois seu sinal de medição reage fortemente sobre essa exposição.

Experiências de sucesso, com o uso ao ar livre, também foram descritas por Loreto (2012), durante períodos com uma elevada umidade. Segundo ele, ambos os sensores e seus aparelhos eletrônicos continuaram suas operações normais durante esses períodos com alta umidade do ar. Durante os testes, os sensores sempre foram cobertos por algum tipo de telhado para evitar a chuva poderia atingi-los diretamente. Os aparelhos eletrônicos foram mantidos com alimentação em todos os momentos para tê-los ligeiramente aquecidas. Ambos sensores são sensíveis a mudanças na umidade relativa do ar e temperatura. A caixa do sensor deve tentar reduzir ao máximo, as alterações nessas duas variáveis. Isto pode ser realizado com um sistema de condicionamento de ar.

Percebeu-se também, que os sensores de baixo custo, têm problemas com sensibilidade cruzada. Eles não só reagem ao gás alvo, mas em uma ampla variedade de outros gases. Com isso, filtros são utilizados para remover os gases que interferem nas leituras, antes que eles atinjam a superfície do sensor (Figura 9).

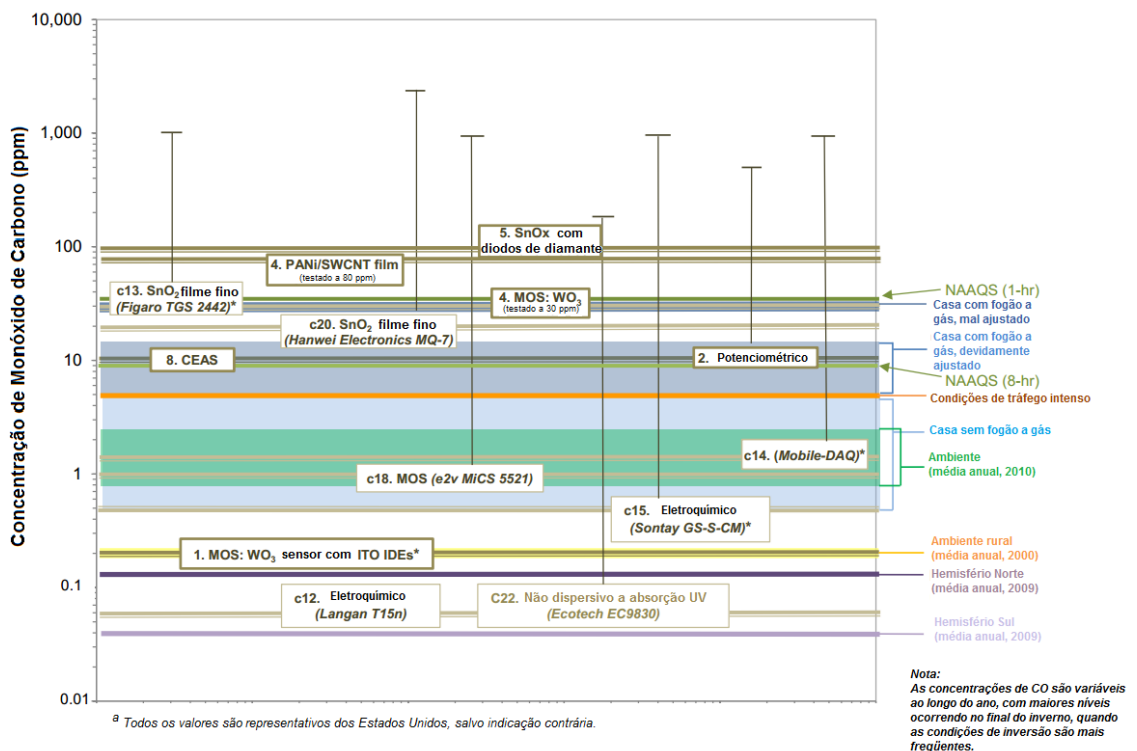


Figura 9. Comparação dos níveis de detecção de CO com variados sensores e em diversas concentrações. Fonte: adaptado (Argonne National Laboratory, 2013).

2.5.2 SENSORES ELETROQUÍMICOS

Woodfin (2003) descreve que os sensores eletroquímicos operam reagindo com o gás alvo, produzindo um sinal elétrico proporcional à concentração de gás.

A Figura 10 apresenta uma visão geral do esquema de um sensor eletroquímico típico, que é composto por um eletrodo de detecção (também chamado de eletrodo de trabalho) e um contra eletrodo separados por uma fina camada de eletrólito.

O gás, ao entrar em contato com o sensor, difunde-se através de uma membrana de polímero sólido hidrofóbico, eventualmente atingindo a superfície do eletrodo de detecção. O eletrodo de detecção, oxida ou reduz o gás alvo com o contra eletrodo. Estas reações são catalisadas pelos materiais do eletrodo, desenvolvidos especificamente para o gás de interesse, sendo a principal diferença a presença de uma membrana semipermeável de separação das fases líquida (eletrólito) e gasosa (amostra de ar a ser medida). Esta membrana permite a difusão das moléculas gasosas através do eletrólito, evitando ao mesmo tempo a evaporação do eletrólito (SENNEQUIER, 2013).

Para potencializar a ionização do gás alvo no eletrólito, os eletrodos dos sensores são construídos normalmente com metais como a Platina, o Ouro e a Prata em função de suas propriedades catalíticas (LORETO, 2012).

A membrana de separação entre a fase líquida e gasosa dos sensores é feita através de materiais porosos e hidrofóbicos. O material mais utilizado para este fim é PTFE (Poli Tetra Flúor Etileno) (GFG, 2009).

Segundo a International Sensor Technology - IST (2010), dois tipos de sensores eletroquímicos são encontrados no mercado, sendo a principal diferença entre eles a utilização de materiais sólidos e gasosos a serem oxidados. Os sensores que utilizam materiais sólidos têm sempre como produto da reação outro material sólido. Por outro lado, os sensores que utilizam materiais gasosos podem ter como produto da reação, materiais líquidos ou gasosos. Exemplos dos dois tipos de sensores seriam o sensor de medição de Oxigênio que usa como material para oxidação o chumbo (Pb) e seu produto é o Óxido de Chumbo (PbO_2) e o sensor de medição de Monóxido de Carbono (CO) que utiliza como material a ser oxidado, o próprio Monóxido de Carbono (CO) e têm como produto o gás carbônico (CO_2). Ainda segundo a IST (2010), os sensores eletroquímicos possuem uma dependência na temperatura, pois a maior parte das reações eletroquímicas têm sua velocidade dependente da temperatura. Em função disto, eles possuem sensores de temperatura associados para promover a compensação.

Henderson (2012) explica, que o eletrodo do sensor (Figura 10) não permanece em performance constante, devido à reação eletroquímica contínua que ocorre sobre a sua superfície, causando uma deterioração de desempenho. Conseqüentemente, um eletrodo de referência é colocado dentro do eletrólito e em proximidade ao eletrodo de detecção. O eletrodo de referência envia a polarização correta ao eletrodo de detecção. Com um resistor conectado através dos eletrodos, uma corrente proporcional para a detecção da concentração de gás, flui entre eles. Quando essas concentrações são medidas na faixa de ppb, as correntes geradas podem ser definidas em escala de poucos nano-amperes. Em face disso, o sensor eletroquímico é muitas vezes descrito como um sensor de gás amperométrico.

A resposta elétrica é linear com a concentração dos gases e a geração dos sinais é espontânea (comportamento similar à de uma bateria). Para os sensores de baixas concentrações, é necessária a amplificação adequada do sinal, pois em alguns casos a geração de corrente pode ser muito baixa (próximo de $0,1 \mu\text{A/ppm}$ de gás) (GFG, 2009).

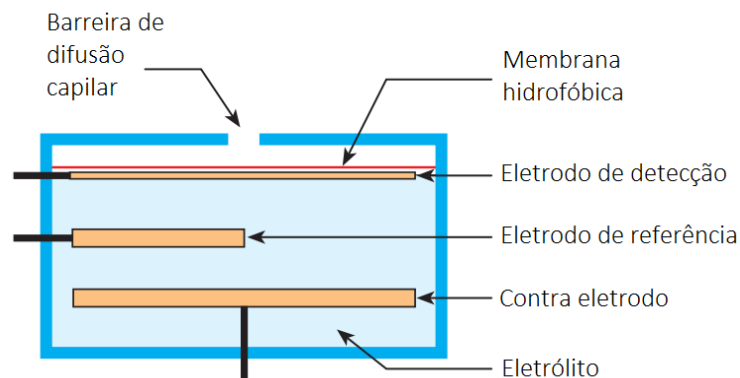


Figura 10. Desenho esquemático de um sensor eletroquímico.

Fonte: Adaptado (LORETO, 2012).

2.6 PROTOCOLO DE AVALIAÇÃO E CALIBRAÇÃO DE SENSORES DE GASES DE BAIXO CUSTO PARA O MONITORAMENTO DA POLUIÇÃO DO AR (COMISSÃO EUROPEIA)

De acordo com o *Joint Research Centre* (SPINELLE, 2013), a Metrologia para Poluentes Químicos no Ar (MACPoll) é um projeto de pesquisa conjunta do Programa de Investigação Metrológica da União Europeia (EURAMET) que, entre outras atividades, lida com sensores de gás para o monitoramento da qualidade do ar, de baixo custo. Comparado com as medições de referência, os sensores de gás permitem o monitoramento da poluição do ar a um custo menor.

Spinelle (2013) ainda descreve que a diretiva permite a utilização de medições indicativas, sem restrições nas zonas onde o limiar superior (UAT) não seja excedido, enquanto permitem uma redução de 50% das medidas mínimas de referência, onde o UAT for excedido. A diretiva não especifica qualquer método indicativo, mas requer a demonstração, que pode satisfazer um objetivo de qualidade de dados (DQO), que é cerca de duas vezes menos rigorosa do que o de métodos de referência. O DQO é definido como uma incerteza relativa expandida. Uma vez que a diretiva não dá qualquer orientação para esta demonstração, dentro da MACPoll, foi decidido a elaboração de um protocolo para a avaliação dos sensores de gás.

O protocolo requer a identificação do sensor, fabricante e fornecedor, modelo, p/n, placa de teste, fonte de alimentação, aquisição de dados, tratamento e processamento e outras informações relevantes, como o aquecedor e temperatura do ciclo, a caixa de proteção e/ou suporte de sensor. A avaliação do sensor é realizada com um limite ou valor-alvo (LV) e é definido na diretiva com um tempo médio correspondente. A seleção do micro-ambiente (urbano, rural, trânsito ou de monitoramento industrial), no qual está previsto o uso do sensor, permite estimar o *background*, a abundância de possíveis interferências gasosas, a temperatura média e umidade relativa de exposição. A informação existente sobre a sensibilidade, seletividade (interferência conhecida), dados de validação existentes, estabilidade, deverão ser recolhidas, incluindo, se possível, um modelo de equação, que descreve as respostas do sensor de acordo com a influência dos parâmetros (SPINELLE, 2013).

Segundo Spinelle (2013), o objetivo deste protocolo de avaliação pode ser diferente, de acordo com o conhecimento do modelo de equação utilizado para os sensores. Pode-se distinguir:

- Sensores se comportando como uma caixa preta: os resultados do teste deste protocolo podem ser usados diretamente, estimando a incerteza de medida induzida pela variação de parâmetros que influenciam ou após a criação de uma função de correção para compensar esses efeitos;
- Sensores com um modelo de equação já estabelecido, com o qual os usuários devem calcular as respostas do sensor: os resultados dos testes são utilizados para estimar a incerteza, depois de ajustar aos coeficientes da equação;
- Nada se sabe sobre a relação entre a resposta do sensor e as concentrações do poluente gás testado. Neste caso, os resultados dos testes são usados para definir um modelo de equação e para estimar a incerteza do resultado da medição.

Ainda segundo o protocolo, é necessário um sistema para geração dinâmica, com as concentrações conhecidas de um gás de ensaio. Uma câmara com exposição a materiais inertes, pode ser utilizada para o teste simultâneo de vários sensores. Ele deve ser possível na medição, controle e alteração da taxa de fluxo de ar através da câmara e da concentração do gás de ensaio, temperatura, umidade relativa e qualquer interferência gasosa. Todos os parâmetros devem ser controlados independentemente, a fim de evitar o efeito de variáveis não controladas nas respostas dos sensores. A avaliação dos sensores se dará na comparação entre as respostas de sensores e medições de referência, excluindo dados calculados a partir do sistema de geração de mistura de gás (SPINELLE, 2013).

A incerteza de campo é calculada através da comparação dos resultados de sensores com as medições de referência, utilizando a metodologia do *Guide for the Demonstration of Equivalence of Methods of Measurement* (2010), elaborado pela Comissão Européia, para propor métodos de referência para medições, segundo as diretivas de qualidade do ar.

2.7 SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS

O primeiro registro de um SIG, foi desenvolvido em 1962 por Roger Tomlinson, no Canadá. Devido ao alto custo, necessidades técnicas de hardware, de software e de recursos humanos com conhecimento especializado, era uma técnica de uso bastante restrito. Somente com a difusão dos sistemas digitais que o SIG veio adquirir a praticidade, a operacionalidade e a abrangência contemporâneas.

Há diversos conceitos sobre SIG, ao qual, segundo Câmara e Queiroz (2001), essa diversidade reflete "a multiplicidade de usos e visões possíveis desta tecnologia e apontam para uma perspectiva interdisciplinar de sua utilização." Sobre este tema, Cowen (1990) aponta que as muitas definições de SIG foram influenciadas pelas "evoluções dos processos que estiveram presentes no desenvolvimento da tecnologia do geoprocessamento" e que podem ser divididas de acordo com a Figura 11.

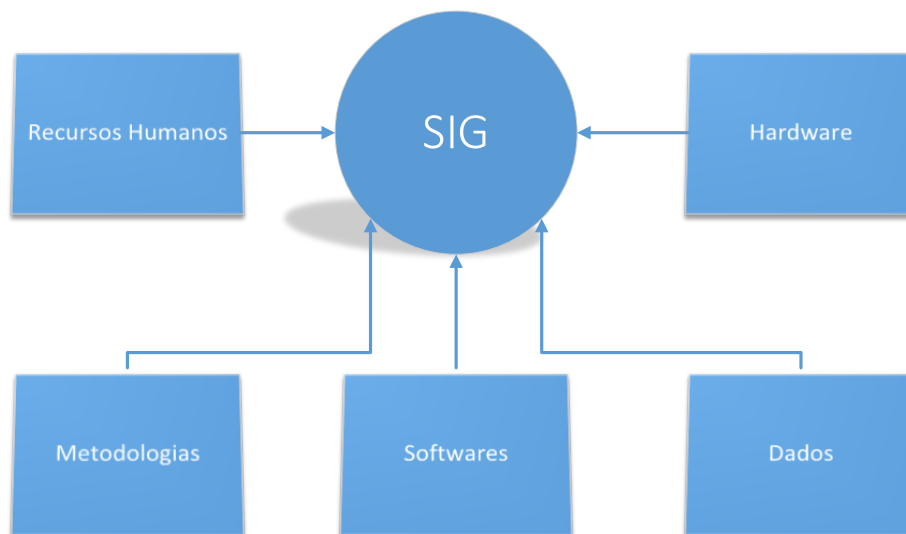


Figura 11. Etapas de um SIG.

De forma geral, um SIG é composto por quatro elementos básicos: hardware, software, dados espaciais e recursos humanos. Ainda é possível decompor os três primeiros elementos de acordo com as exigências de qualidade, de precisão, de acurácia e de complexidade da análise espacial. Cabe ressaltar que um dos elementos refere-se a recursos humanos. Esse fato é relevante porque a análise espacial não é realizada pelos demais elementos, somente passa por eles: é o usuário o responsável pela qualidade do resultado final da aplicação do SIG. Da mesma forma que os processamentos computacionais devem ser

compatíveis com a magnitude dos dados espaciais e dos processamentos que deverão ser realizados, o usuário no controle da máquina deve estar apto para desempenhar as atividades necessárias.

Segundo Câmara e Monteiro (2001), um SIG envolve:

"[a necessidade que] cada especialista transforme conceitos de sua disciplina em representações computacionais. Após esta tradução, torna-se viável compartilhar os dados de estudo (...) Em outras palavras, quando falamos que o espaço é uma linguagem comum no uso de SIG, estamos nos referindo ao espaço computacionalmente representado e não aos conceitos abstratos de espaço geográfico".

2.7.1 WEBGIS

O conceito refere-se a uma ferramenta SIG, ao qual é concentrada em rede que utiliza a Internet como principal meio de acesso a dados distribuídos e outras informações, análise, processamento e divulgação de informação geográfica, (PENG, 1999; PENG e BEIMBORN, 1998; PLEWE, 1997).

A tecnologia favorece a novos meios de acesso que coletam, disseminam e processam dados espaciais e informações sobre plataforma *online*. Também, possui diversas características que são distintas dos SIG *desktop* tradicionais, como o fácil acesso e interface interativa, o que o torna um ótimo meio de compartilhamento de informações espaciais e de transformação, bem como apresentações multimídia e de modo participativo, com o público. Muitas aplicações *WebGIS* foram desenvolvidas para disseminar dados e funções de análise geográfica através da Internet (BATTY, 1999; COLEMAN, 1999; PENG, 1999; PLEWE, 1997).

A grande vantagem deste tipo de aplicação, é que os usuários não necessitam de *softwares* instalados nos computadores locais, favorecendo assim o acesso quase universal para o público.

Mitchell (2005) cita que uma aplicação *WebGIS* (Figura 12) tem a característica de que o usuário pode, de alguma maneira, ter interação com o mapa utilizando a *web* (Figura 13). Esta interação pode se dar de variadas maneiras, como selecionar diferentes temas para visualização, alterar a escala de visualização, dentre outras. Ou seja, a geovisualização ganha um papel de destaque na interação humana com o computador, facilitando a exploração dos dados (FINNSETH e JOKULSSON, 2004). Além disso, mapas podem ser gerados a partir de bancos de dados geográficos, proporcionando um caráter dinâmico a representação temática.

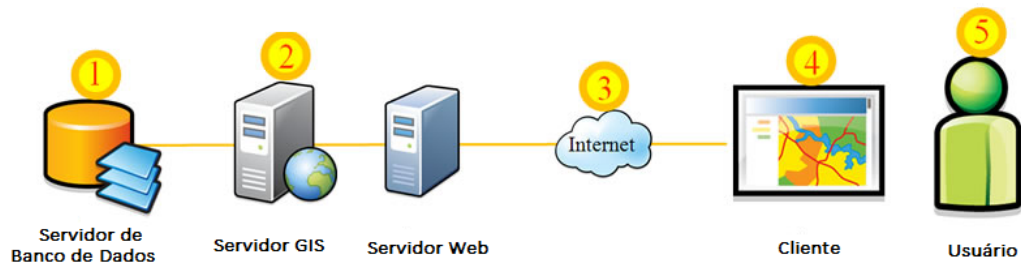


Figura 12. Sistema *WebGIS*.

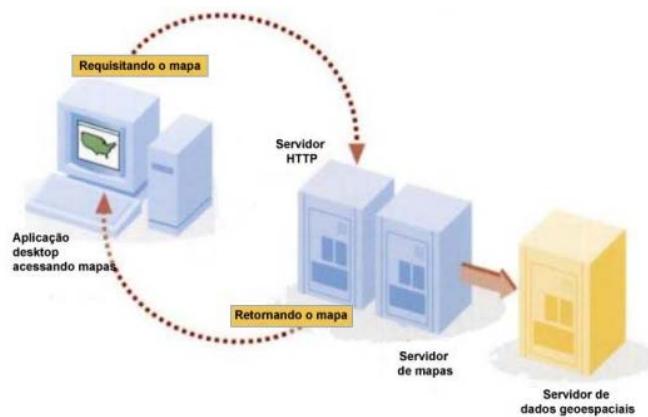


Figura 13. Diagrama representando a interação entre usuário e a aplicação *WebGIS*. Fonte: Adaptado de Mitchell (2005).

2.8 ASPECTOS GERAIS DO DISTRITO FEDERAL

Como apresentado no Capítulo 1, para o teste de validação de campo foram selecionadas duas áreas, sendo uma localizada no Campus Darcy Ribeiro da Universidade de Brasília e a segunda, nos arredores da Rodoviária e região metropolitana de Brasília e na parte central da cidade de Brasília (Figura 14).

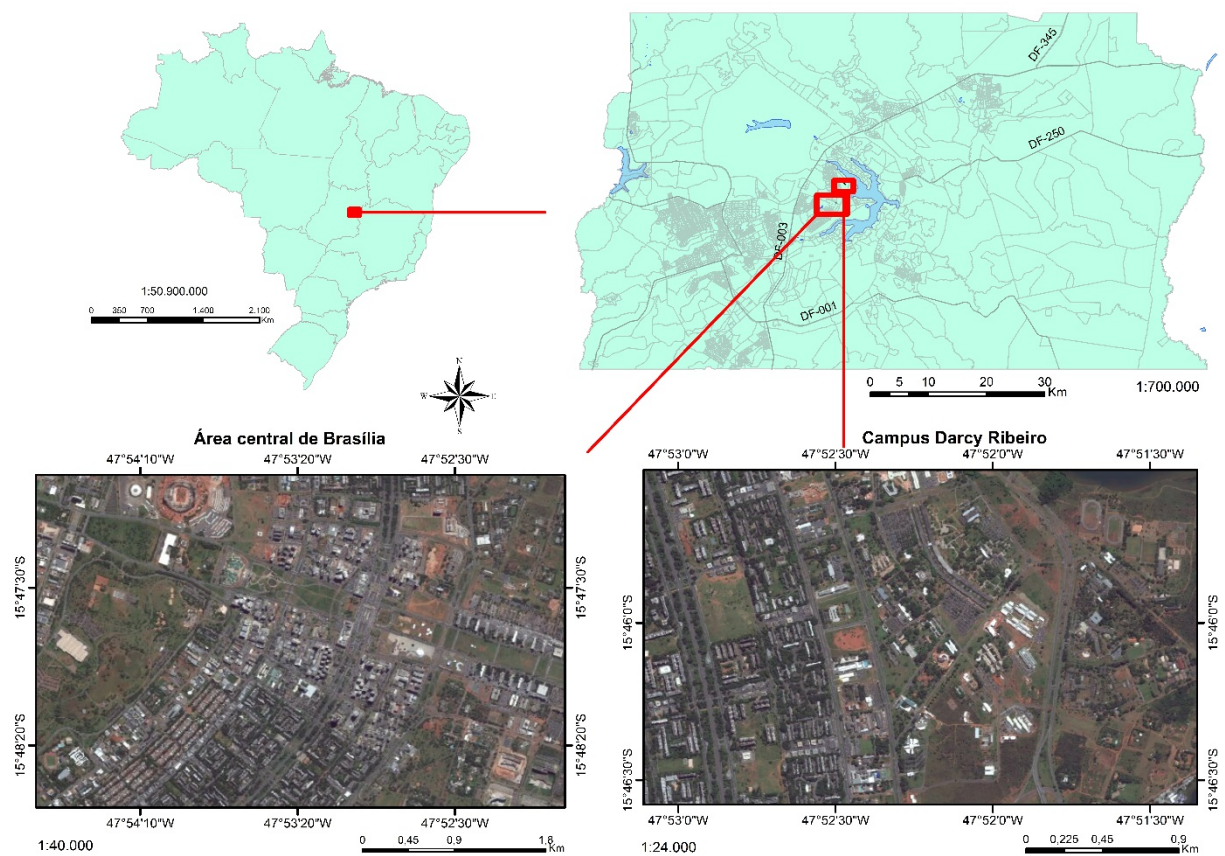


Figura 14. Mapa de localização da área de estudo.

Deste modo, objetivando contextualizar a situação ambiental e legal referente aos estudos de poluição atmosférica, a seguir será apresentado um resumo do contexto.

Segundo o IBGE (2010), o Distrito Federal é dividido em 31 regiões administrativas, totalizando uma área de 5.799,999 km². A divisão do Distrito Federal em regiões administrativas foi estabelecida através da Lei nº 4.545/64, que também instituiu as administrações regionais. À época, eram 8 regiões administrativas. Leis posteriores alteraram

o nome e criaram novas regiões administrativas. Até o ano 2000, o DF possuía dezenove regiões administrativas – RA's. Após 2003, foram criadas mais onze. Desde janeiro de 2012, com a criação da região administrativa da Fercal, existem 31 regiões administrativas. O crescimento demográfico se situa em 2,82 por cento anual. A densidade média é de 410,8 hab./km e a taxa de urbanização, uma das mais altas do país, alcança 94,7%.

Costa (2002) estudou os efeitos da poluição do ar relacionando-os com o crescimento de área urbana e veículos no Distrito Federal. Os resultados mostraram que o Distrito Federal ainda não apresenta uma política efetiva para o monitoramento e combate à poluição atmosférica, talvez por não ter atingido estados críticos, como acontece nas cidades de São Paulo e Rio de Janeiro e em grandes metrópoles de outros países, a exemplo de Pequim.

Réquia e Abreu (2011) analisaram a influência de PTS no ar do DF e correlacionaram com dados de saúde, no sentido de se entender os efeitos nos quadros clínicos do sistema respiratório e circulatório atendidos nas Regiões Administrativas. Os resultados mostraram, que em alguns casos, há correlação da poluição atmosférica com o número de óbitos e internações de crianças e idosos no Distrito Federal. Ainda cita que as políticas de governo podem ser exemplificadas pela criação de estratégias fiscalizadoras e de tecnologias ambientais, para minimização das emissões dos poluentes de suas respectivas fontes.

Kill e Roig (2013) avaliaram por sensoriamento remoto, a dispersão de aerossol na região do DF e avaliando possíveis variáveis relacionadas. O resultado da pesquisa mostrou maiores concentrações de material particulado e dispersão de gases na região central de Brasília, Taguatinga, Água Claras e Jardim Botânico. O estudo ainda indicou a necessidade de apurações a nível de solo, utilizando redes amplas de sensoriamento ambiental, para a melhoria da qualidade espaço-temporal dos dados.

No que tange a caracterização climática, segundo a classificação de Strahler (1976), é identificado como Tropical Alternadamente Úmido e Seco, com período de chuva no verão e período seco no inverno (STEINKE, 2004).

As temperaturas médias anuais no DF variam entre 22 e 24°C, com máximas que ultrapassam 25° C no verão, e mínimas que descem os 18°C. As médias pluviométricas anuais variam entre 1500 e 1700 mm (MORAES, 1993).

A partir da segunda quinzena do mês de março, e o mês de abril são caracterizados como períodos de transição entre a estação úmida e a estação seca, sendo que o mês de março ainda é considerado um mês chuvoso por ainda estar no período de verão. Em contrapartida, os meses de setembro e outubro também são considerados meses de transição, marcando o fim do período seco e o início do úmido (STEINKE, 2004).

De acordo com Moraes (1993), no DF são encontradas matas ciliares, cerrado subcaducifólio, campo cerrado e vegetações campestres, o que corresponderia aos tipos de formações florestais, savânicas e, campestres. A paisagem natural original é dominada pelo cerrado *senso stricto*, uma savana de árvores e arbustos com estrato gramíneo bem desenvolvido e cobertura arbórea de 10 a 50% (EITEN, 1972, 1984). A vegetação do cerrado possui altos níveis de endemismos, com cerca de 40% das espécies arbóreas restritas ao bioma. No fundo dos vales e nas vertentes de drenagem das encostas há matas de galeria mais ou menos desenvolvidas, em associação com veredas de buritizais e margeadas por campos limpos úmidos ou sazonalmente inundados. Nas áreas de relevo mais acentuado ou solos pedregosos, as matas de galeria transicionam diretamente para os campos cerrados dominados por vegetação gramínea e arbustiva. Estes últimos dominam também regiões de relevo mais suave e solos rasos. Os campos limpos são extremamente raros e em grande parte já foram convertidos para áreas agrícolas ou pastoris. Existem remanescentes na estação ecológica de Águas emendadas e na Reserva do IBGE. Nas áreas mais altas e pedregosas, até 1.300 m, encontram-se campos rupestres, com flora endêmica única. Na região norte do DF há matas mesofíticas em cima de solos calcários, também bastante impactadas pela presença de fábricas de cimento e pelo desmatamento para pastoreio. Estas matas estão associadas ao sistema do rio Maranhão, tributário do Tocantins, e mostram elementos de influência amazônica (CAVALCANTI, 2012).

Referindo-se aos recursos hídricos, a região dos cerrados é de suma importância para o Brasil, tendo sua localização geográfica central no país, com predomínio de superfícies elevadas caracterizadas como planaltos e chapadas, dando origem a um relevante divisor de águas. Nessa região estão localizadas as três nascentes das principais bacias hidrográficas brasileiras: Amazônica, São Francisco e Paraná, (AB'SABER, 2003), aonde o DF particularmente se apresenta como divisor de águas das bacias do rio São Francisco na sua porção Leste e das bacias do Paraná e do Tocantins.

2.8.1 ÁREA DE ESTUDO

A fase de testes analíticos, em ambiente controlado, foi realizada no Laboratório de Geocronologia do Instituto de Geociências, situado no *campus* Darcy Ribeiro da Universidade de Brasília – UnB.

Contudo, foram levantados alguns pontos amostrais para a realização dos testes (*outdoor* e *indoor*) para se entender a variação em ambientes não controlados a partir desses sensores (Figura 15). A priorização foi para a região central de Brasília, vias principais próximas a Universidade de Brasília, Instituto Central de Ciências - ICC e em dia de grande evento (Copa do Mundo), no Estádio Nacional de Brasília.

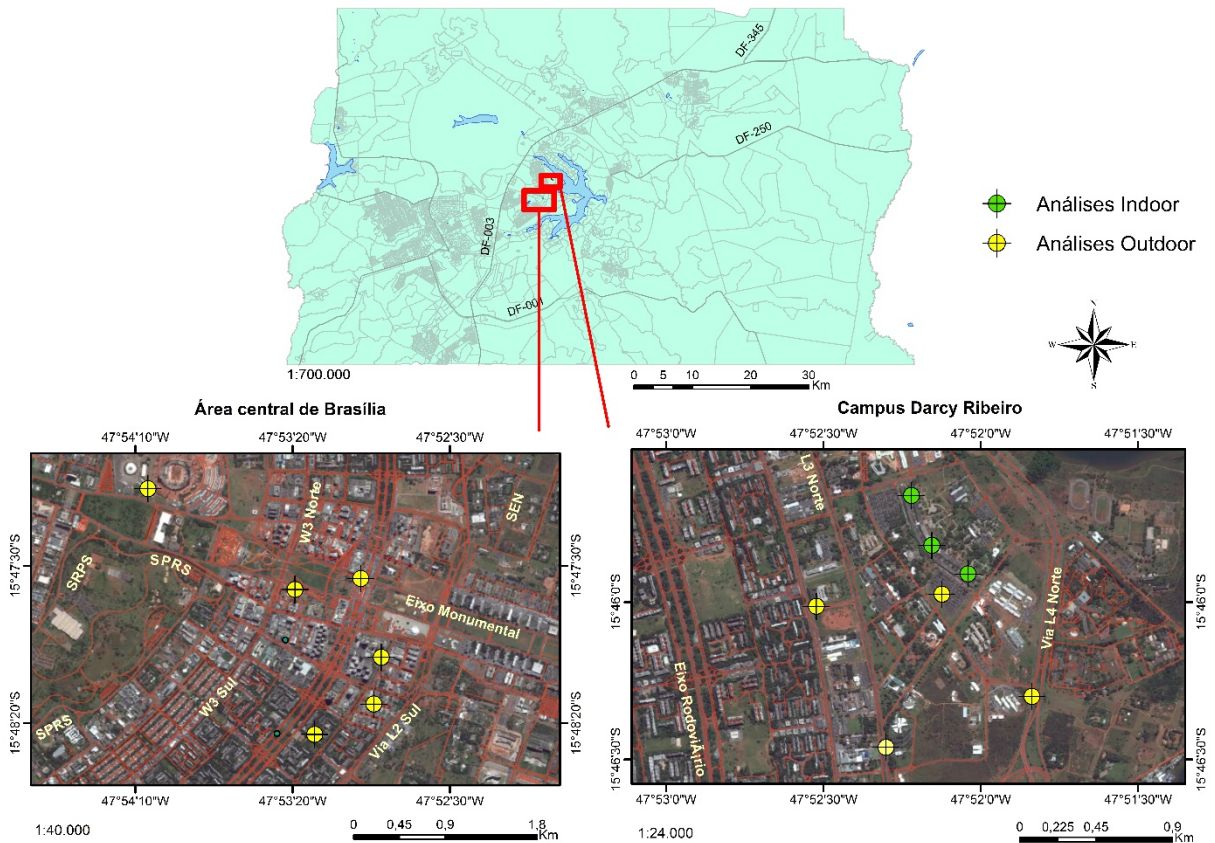


Figura 15. Locais de amostragens *indoor* e *outdoor*.

2.8.2 LEGISLAÇÃO E PROGRAMA DE QUALIDADE DO AR DO DISTRITO FEDERAL

A Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos - SEMARH (2012), criou o Programa de Qualidade do Ar e é parte integrante do Plano de Gestão Integrada da Qualidade Ambiental da Subsecretaria de Saúde Ambiental - SUSAM, que compõe a estrutura orgânica da Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Distrito Federal - SEMARH e visa o desenvolvimento de políticas de gestão eficiente de dados e informações sobre procedimentos e processo relativos à qualidade do ar e seus efeitos sobre a saúde da população do Distrito Federal, tomando como base o arcabouço legal que subsidia o tema.

Ainda estabelece um fluxograma de Gestão Integrada da Qualidade do ar no Distrito Federal (Figura 16).

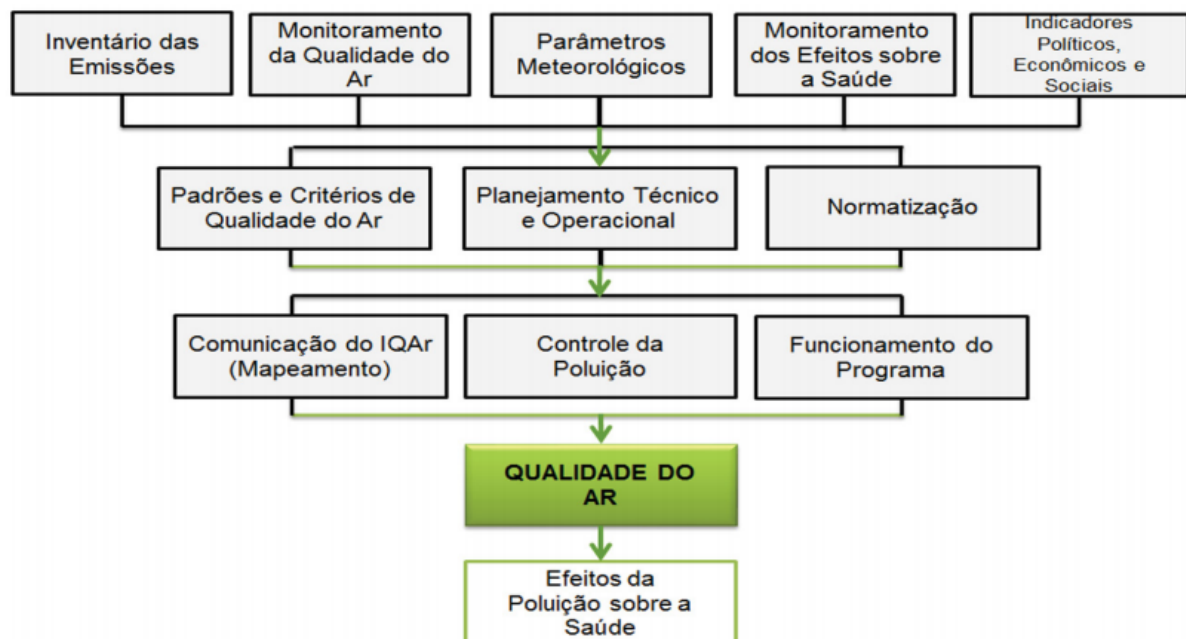


Figura 16. Fluxograma de Gestão Integrada da Qualidade do ar no Distrito Federal. Fonte: SEMARH (2012).

2.8.3 REDE DE MONITORAMENTO DO DISTRITO FEDERAL

No Distrito Federal, o órgão governamental responsável pelo monitoramento da qualidade do ar, é o Instituto Brasília Ambiental – IBRAM.

Segundo o IBRAM (2014), o Programa de Monitoramento da Qualidade do Ar do Distrito Federal está em vigor desde 2005, com uma rede de monitoramento com configuração dinâmica e visão de expansão. Sua finalidade é a quantificação de poluentes atmosféricos, bem como a avaliação da qualidade do ar em relação aos limites estabelecido para nortear medidas e políticas públicas de busca pela qualidade de vida e ambiental da população local. Apesar deste objetivo a rede do DF é deficitária com apenas 4 estações em funcionamento (Rodoviária, Setor Comercial Sul, Fercal e Ciplan - Figura 17) cuja série histórica tem várias falhas de medição. Além destas estações existem mais 4 estações fora de operação (Figura 17) por problemas técnicos e dificuldade de manutenção, das quais duas são da UnB. Existe um planejamento para mais 4 estações.

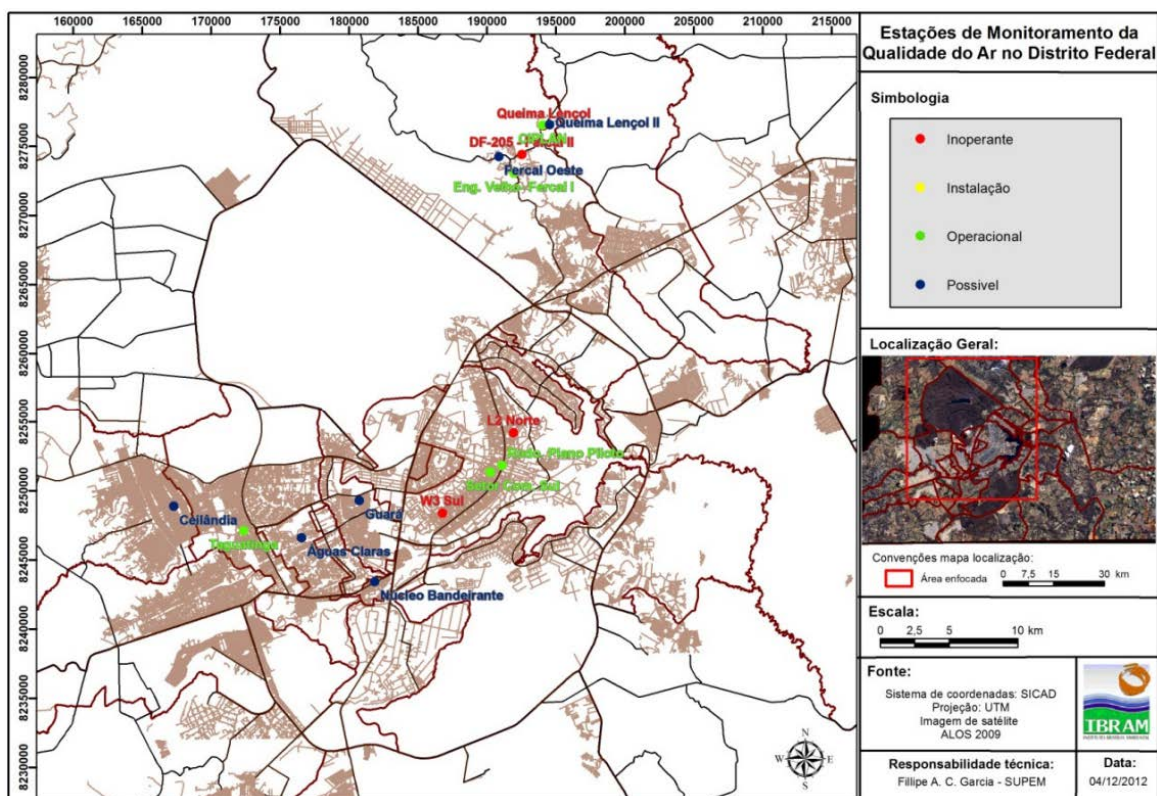


Figura 17. Mapa da rede de monitoramento da qualidade do ar no DF, o qual apresenta as estações conforme sua condição de operação. Fonte: IBRAM (2013).

Todas as estações em operação monitoram manualmente a concentração dos parâmetros de partículas totais em suspensão (PTS) ou partículas inaláveis até 10 µm de dimensão (PM₁₀) e concentração de fumaça.

A seguir é apresentada a lista das estações existente operando e desativadas com os respectivos parâmetros analisados:

- Estação Rodoviária: plataforma inferior da rodoviária do Plano Piloto, próxima aos pontos de embarque e desembarque das diversas linhas de ônibus urbanos;
- Estação Setor Comercial Sul: próximo a uma parada de ônibus em frente ao Hospital de Base do DF;
- Estação Taguatinga Centro: canteiro central da DF-085 (EPTG) próximo à Praça do Relógio na Avenida Central de Taguatinga;
- Estação Fercal: às margens da Rodovia DF 150 e próxima ao posto da PMDF;
- Estação Ciplan: dentro das instalações da na unidade fabril da fábrica Cimentos Planalto (CIPLAN).

A escolha destes locais está associada ao tipo de fonte poluidora: as emissões veiculares (Rodoviária, Setor Comercial, W3 Sul e Taguatinga), com o cenário de uma frota crescente, e associado as fábricas de cimento da região da Fercal (Estações Queima Lençol, Fercal e Ciplan) (Figura 18). Esta última, além das indústrias, existe um grande fluxo de veículos pesados movidos a diesel e ressuspensão de poeiras.

Além destas estações o Governo do DF tem duas estações móveis (Figura 19) e mais duas novas estações portáteis automáticas para a medição da qualidade do ar e da incidência da radiação ultravioleta solar.



Figura 18. Estação de qualidade do ar utilizada pelo IBRAM, localizada na Fercal.

Fonte: IBRAM (2013).



Figura 19. Veículos adaptados para o monitoramento da poluição sonora, da qualidade do ar e da incidência da radiação ultravioleta solar no local. Fonte: IBRAM (2013).

CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo detalha, os materiais utilizados, as etapas de trabalho e os métodos utilizados para alcançar os objetivos do potencial de utilização de sensores de baixo custo para monitoramento da qualidade do ar, aplicando-se Brasília como área de estudo, bem como os materiais e metodologia de calibração dos sensores de baixo custo. Utilizaram-se os sensores para coleta de dados da qualidade do ar (*outdoor* e *indoor*), aplicando-os em áreas específicas do DF. Como etapa final, a espacialização e disponibilização dos dados em formato de Painel digital (*WebGIS*).

A metodologia geral proposta para o desenvolvimento da pesquisa segue o fluxograma da Figura 20.

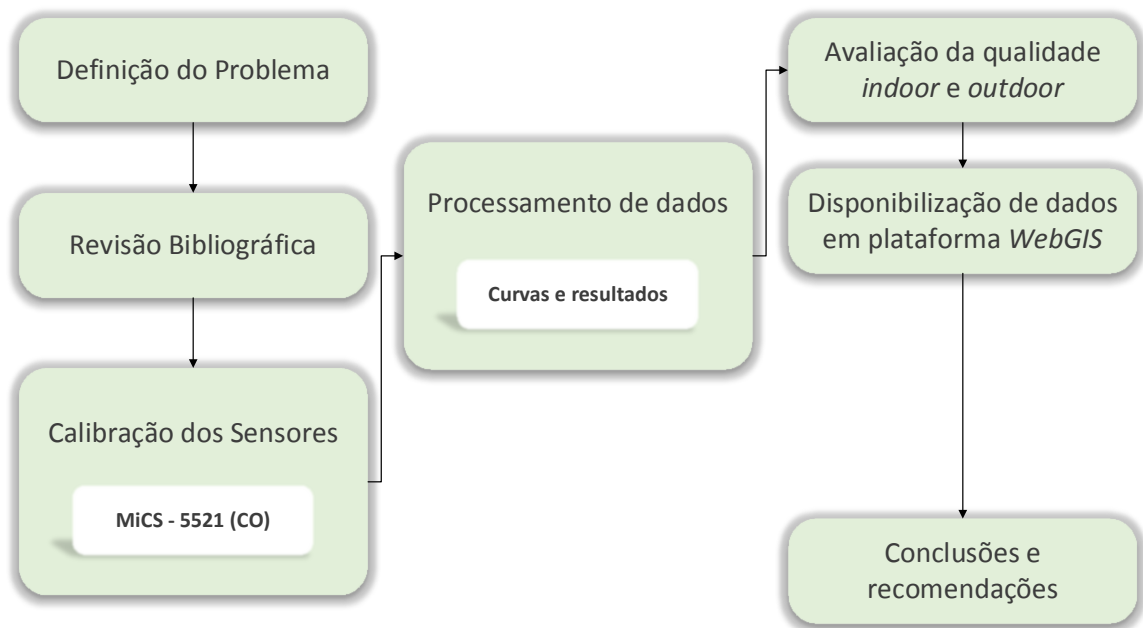


Figura 20. Fluxograma de atividades referente à metodologia proposta.

Buscou-se subsídios para o estabelecimento da metodologia de trabalho por meio da revisão bibliográfica, descrita no Capítulo 2. As informações sobre o tema foram reunidas a partir de diferentes tipos de publicações, desde artigos científicos relacionados às geotecnologias, saúde, meio ambiente e às questões da área de eletrônica.

Levando-se em consideração as informações obtidas na literatura, foram definidas as metodologias de calibração, que serão descritas nesse capítulo. Assim, após essa delimitação e aquisição dos dados laboratoriais, foram corrigidos estatisticamente e, posteriormente, os

resultados do monitoramento *outdoor* e *indoor* foram integrados em um ambiente SIG para manipulação.

A última fase da pesquisa corresponde à disponibilização dos dados, em ambiente computacional *WebGIS* para interpretação gráfica e espacial dos dados obtidos no monitoramento *outdoor* e *indoor*.

3.1 MATERIAIS UTILIZADOS

3.1.1 SOFTWARES

Foram utilizados *softwares* para o processamento de dados geográficos, podendo citar o ArcGIS e seus componentes de disponibilização de dados denominados ArcGIS *Server* e ArcGis *Viewer for Flex*, sendo esse último para a criação do painel (*WebGIS*). Para o processamento estatístico dos dados e geração dos gráficos que seguem no capítulo 4, foram utilizados o *Microsoft Office Excel* e o R. O *Microsoft Office Excel* é um editor de planilhas produzido pela *Microsoft*, onde seus recursos incluem uma interface intuitiva e capacidades ferramentas de cálculo e de construção de gráficos. O R é um *software* gratuito para elaboração de gráficos e computação estatística, oferecendo uma variedade de técnicas gráficas e estatísticas modelos lineares e não lineares, testes estatísticos clássicos, análises de séries, classificação.

E finalmente, para a aquisição da resposta dos sinais de resistência da placa micro controlada no experimento, explorou-se o *software* do *Kit MiCS – EK1*, do fabricante E2V (Figura 21), que apresenta a leitura dos dois *slots* para sensores de óxido de metal, com o resultado em unidade de resistência (Kohms ou Ohms). Outros dois campos fazem a leitura da temperatura de funcionamento da placa e umidade ambiente (sensores calibrados de fábrica). Com isso, é gerado um *data logging*, que pode ser definido com a escala de tempo desejada pelo usuário. Os dados finais são salvos em um arquivo de formato CSV (.csv).

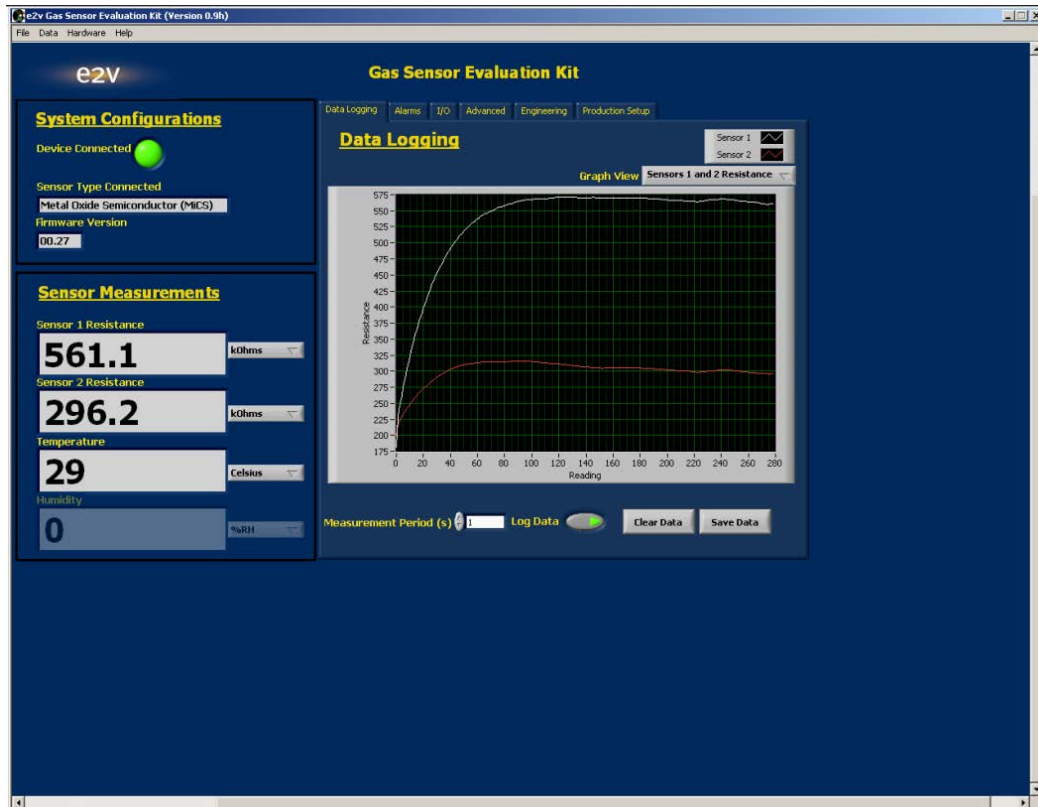


Figura 21. Tela do *software* de avaliação do *kit* MiCS – EK1, com as leituras dos *slots*.

3.1.2 EQUIPAMENTOS

3.1.2.1 EQUIPAMENTOS DO LABORATÓRIO DE GEOCRONOLOGIA – IG

Na etapa de calibração dos sensores, foi utilizado o espaço físico do laboratório de Geocronologia, bem como o cilindro de gás de CO, o regulador de pressão, as seringas para as injeções volumétricas, agulhas e termômetro digital, detalhados abaixo.

O cilindro de Monóxido de Carbono com volume de 8,5 m³ (Figura 22 e 23) que o laboratório dispõe, possui concentração de 99,999% - 5.0 analítico.



Figura 22. Cilindro de CO de 8,5 m³ com concentração de 99,999%.

Para a retirada de CO do cilindro, foi feita a partir da saída do regulador de pressão (Figura 24), onde a saída do duto possuía um tampão de silicone, ao qual se abria a válvula para a liberação do gás e com a agulha da seringa se retirava o volume a ser utilizado para cada medição.



Figura 23. Detalhe da estrutura do sistema de gases confinados do laboratório.



Figura 24. Detalhe do regulador de pressão

Para a injeção de CO, foram utilizadas seringas hipodérmicas de vidro com as volumetrias de 3 ml, 5 ml e 10 ml (Figura 25) e agulhas de medida 16G 1 1/2 (1,60 mm x 40 mm) (Figura 26).



Figura 25. Seringas hipodérmicas de vidro com as volumetrias de 3 ml, 5 ml e 10 ml.









Métrico (mm)	Gauge/ Polegadas	Cor do Canhão A cor do canhão define o diâmetro da agulha	
1,60 x 40	16G 1 1/2		Branco
1,20 x 25 1,20 x 40	18G 1 18G 1 1/2		Rosa
1,00 x 25 1,00 x 30	19G 1 19G 1 1/4		Creme
0,80 x 25 0,80 x 30 0,80 x 40	21G 1 21G 1 1/4 21G 1 1/2		Verde
0,70 x 25 0,70 x 30	22G 1 22G 1 1/4		Preto
0,55 x 20	24G 3/4		Violeta
0,45 x 13	26G 1/2		Castanho
0,38 x 13	27 5G 1/2		Cinza

Figura 26. Medidas de agulhas.

A temperatura ambiente (máxima e mínima) do laboratório foi medida com um termômetro digital (TM-882 Equitherm) (Figura 27), com as seguintes especificações:

- Faixa de temperatura:
 - Interna -10°C a +50°C / 14°F a +122°F
 - Externa -50°C a +70°C / -58°F a +158°F
- Precisão: +1°C
- Resolução: 0,1°C
- Display: LCD 64mm (L) x 27mm (A)



Figura 27. Termômetro digital.

3.1.2.2 EQUIPAMENTOS ADQUIRIDOS PARA A PESQUISA

O SR#3 (Figura 28, Figura 29, Figura 30, Figura 31 e Figura 32) é um *box* de teste de gases, fabricado pela empresa japonesa Figaro, tendo as seguintes especificações:

- Fonte de Alimentação: 110V A.C 50/60Hz;
- Consumo: 10W;
- Dimensões: 235 mm x 180 mm x 210 mm;
- Volume efetivo: 5,4 L;
- Material: Acrílico.

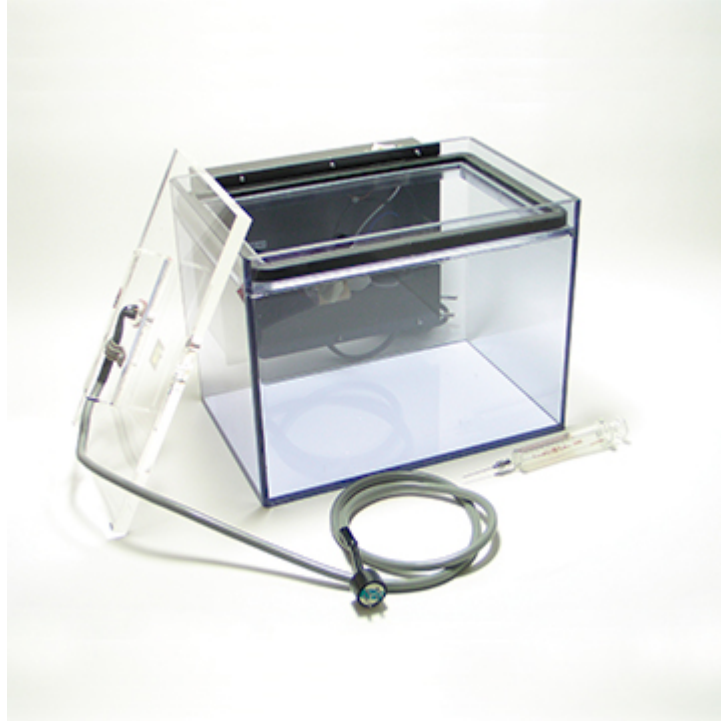


Figura 28. Box de teste de gases SR#3 Figaro. Fonte: Figaro.



Figura 29. Box de teste de gases (SR#3) com o kit MiCS - EK1 conectado ao *software* de avaliação.

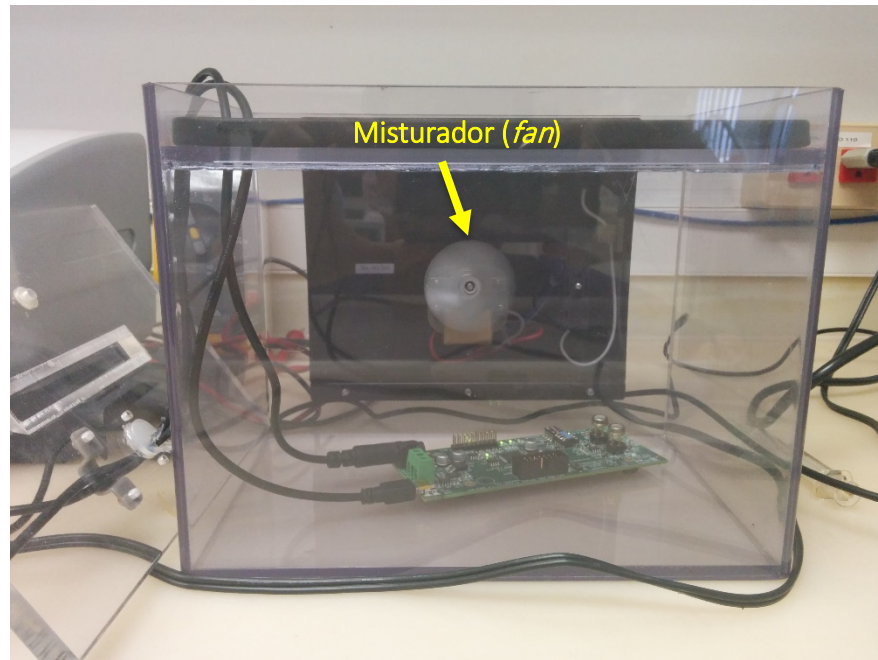


Figura 30. Detalhe frontal do SR#3 *box* de teste de gases.

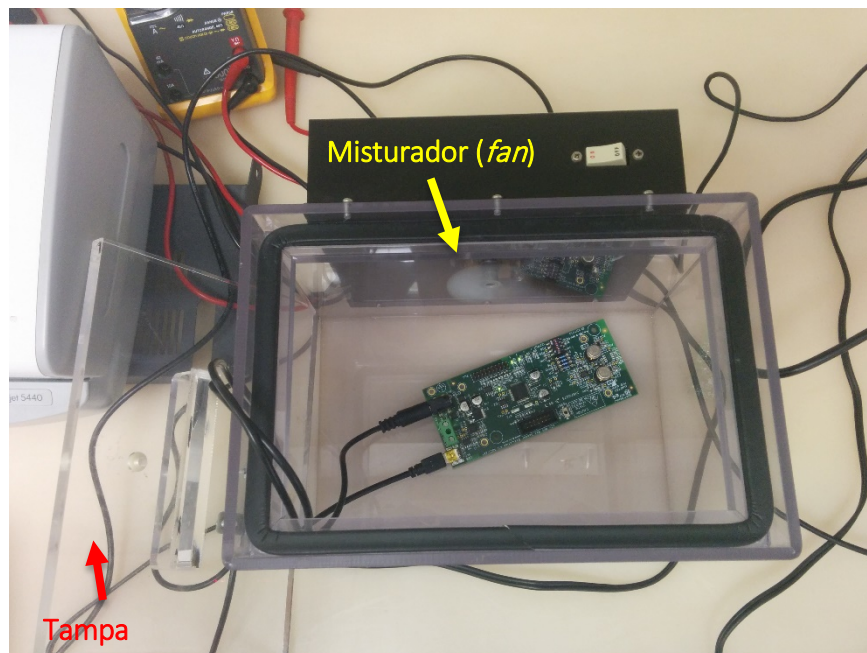


Figura 31. Detalhe do misturador (*fan*) do *box* de teste de gases e a tampa.

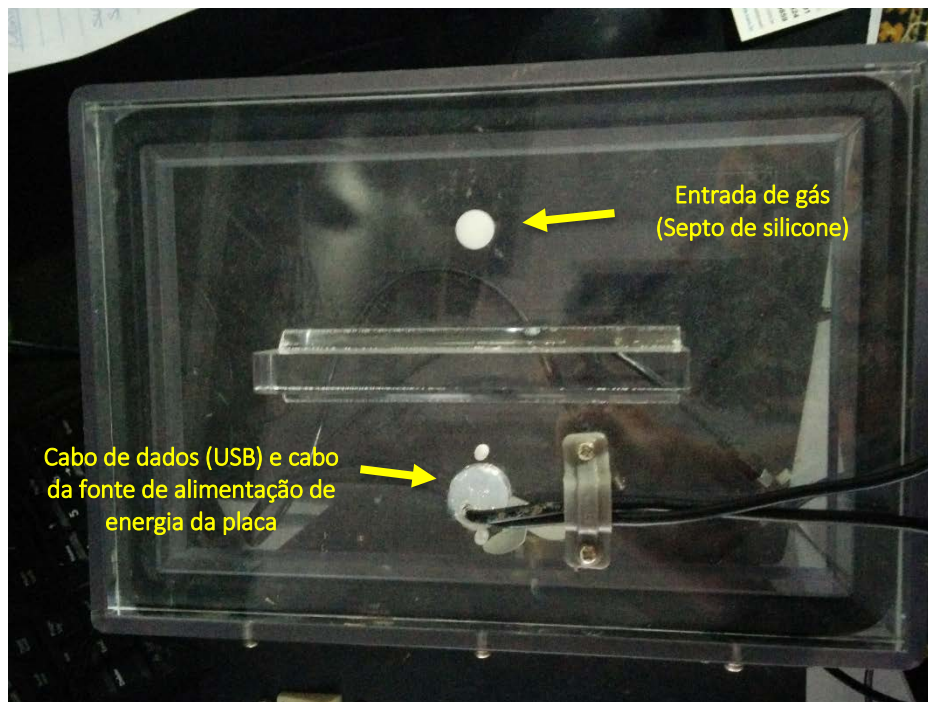


Figura 32. Detalhe da tampa do *box* com o septo de silicone (injeção) e adaptação para os cabos USB e de alimentação energia da placa micro controlada.

Foi utilizado o sensor MiCS – 5521 (Figura 33) da E2V, que é indicado para a detecção de gases tais como monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos (HC) e compostos orgânicos voláteis (VOC). O sensor 1 nunca teve uso e o sensor 2 tem um ano e meio de uso. Segundo o fabricante, o sensor tem dois anos de vida útil.



Figura 33. Sensor MiCS – 5521. Fonte: E2V

Segundo a E2V, suas características são:

- Baixa corrente de aquecimento;
- Ampla faixa de detecção;
- Alta sensibilidade;
- Tempo curto de pré-aquecimento;
- Miniaturizado;
- Alta resistência a choques e vibrações.

O modo recomendado de operação é uma potência constante. A energia do aquecedor $P_H = 76 \text{ mW}$ é aplicada e faz com que a temperatura da resistência de detecção (R_S) alcance cerca de 340°C . A detecção dos gases poluentes é conseguida medindo a R_S durante a operação.

A resposta do sensor de CO em ar ambiente está representada na Figura 34.

A resistência do sensor (R_S) é normalizada para a resistência do ar (R_0).

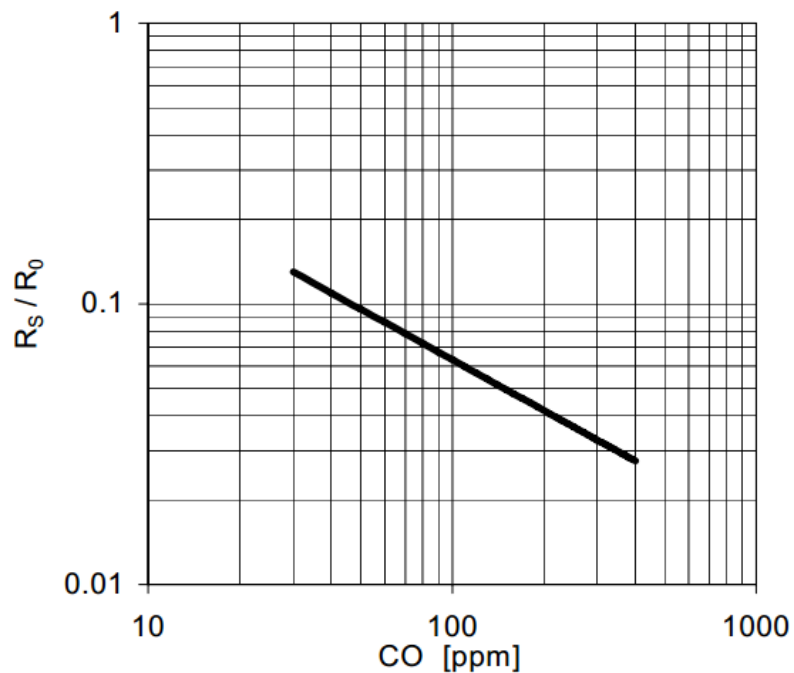


Figura 34. R_S/R_0 como uma função da concentração de CO em 50% de umidade relativa e 25°C . Fonte: E2V.

Um circuito simples de medir o nível de poluição é proposto na Figura 35. A tensão de aquecimento V_H é aplicado a um resistor de 75Ω ligado ao pino 3 e o pino 1 está ligado a GND. Este resistor é necessário para obter a energia correta de aquecimento (2,4 V e 76 mW).

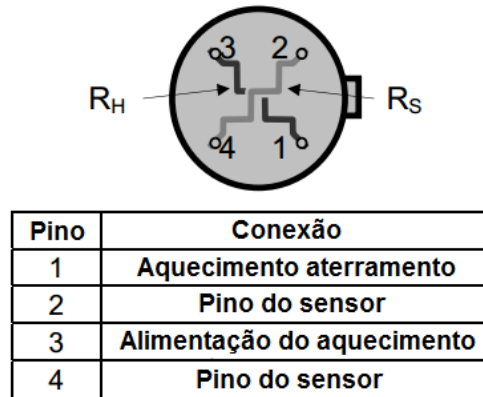


Figura 35. Conexões de pinos do sensor MiCS-5521. Fonte: E2V.

Uma carga da resistência R_L está ligada em série com R_S para converter a resistência R_S a uma tensão V_S entre os pinos 2 e 4 (Figura 36). R_S pode então ser calculado pela seguinte eq.(3):

$$R_S = \frac{R_L}{(V_{CC} - V_S) \times V_S} \quad (3)$$

Onde R_L é a carga da resistência, V_{cc} a tensão máxima de alimentação do sensor e V_S a tensão entre os pinos 2 e 4.

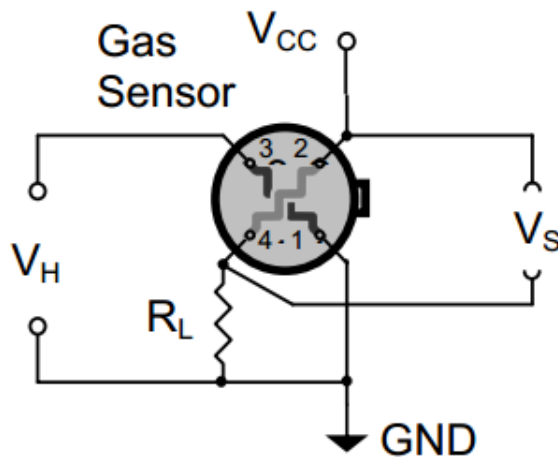


Figura 36. Circuito de medição para detecção de gases poluentes. Fonte: E2V.

Para a transformação das leituras feitas em resistência para a concentração (ppm), é feita pela seguinte eq.(4):

$$\frac{R_S}{R_0} \quad (4)$$

onde R_s é a resistência lida e R_0 é a resistência do *baseline* em ar ambiente.

Com essa relação, consegue-se chegar aos valores de concentração (ppm) (Figura 34), que ilustra o gráfico da função de resposta do sensor MiCS – 5521.

O *kit* MiCS – EK1 acompanha uma placa micro controlada (Figura 37 e Figura 38) para leitura dos sensores de óxido de metal. Apresenta dois *slots* para leituras paralelas



Figura 37. Detalhe da placa de avaliação do *kit* MiCS – EK1 com a localização dos *slots* com os sensores MiCS - 5521 e o chaveamento de energia (seletor) posição *high*.

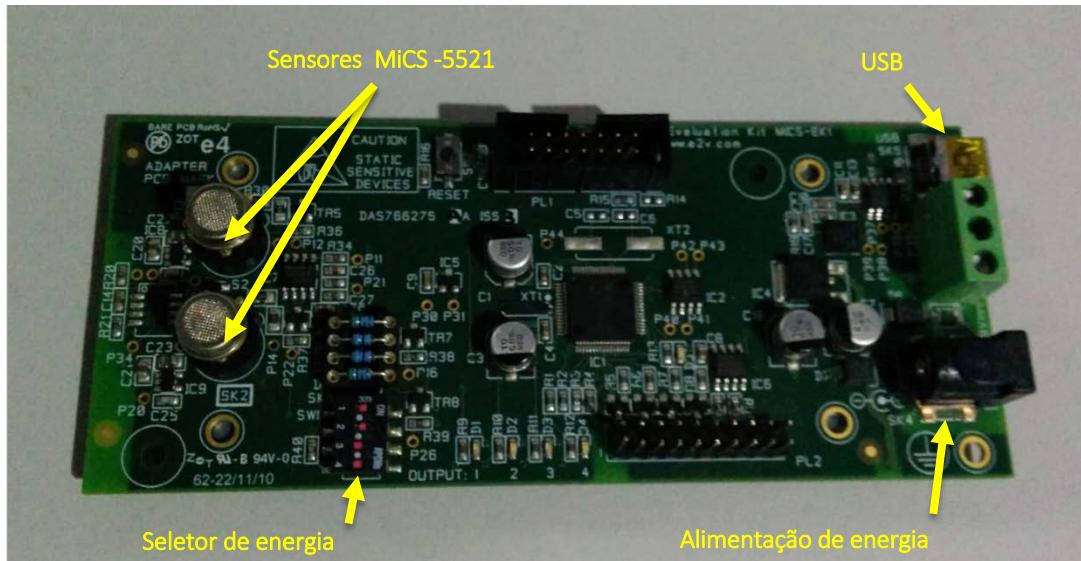


Figura 38. Detalhamento da placa micro controlado com as entradas USB e alimentação de energia.

Segundo o fabricante, o chaveamento para sensores MiCS – 5521 (Figura 39) é o *High* (76 mW), que corresponde a energia ideal para o funcionamento padrão desse sensor (Tabela 14).

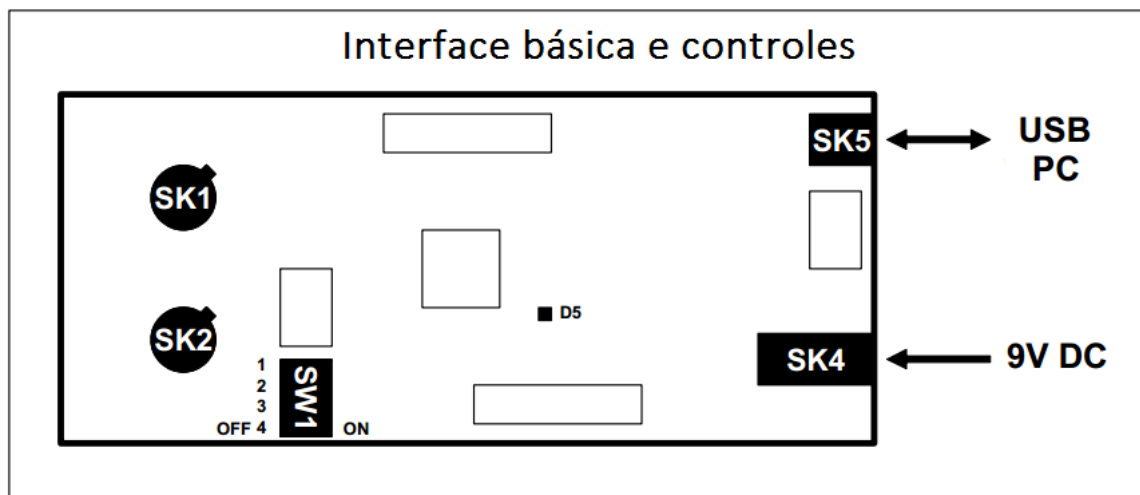


Figura 39. Detalhamento esquemático da interface básica e controles da placa micro controlada MiCS - EK1.

Tabela 14. Configuração de chaveamento para os tipos de sensores.

Sensor	Energia	Operação Automática: SW1-1 (slot SK1) SW1-2 (slot SK2)
MiCS - 2610	High	ON
MiCS - 2611	High	ON
MiCS - 2710	Low	OFF
MiCS - 5121	High	ON
MiCS - 5132	High	ON
MiCS - 5135	High	ON
MiCS - 5521	High	ON
MiCS - 5525	High	ON

Fonte: E2V

Foi utilizado um sistema micro controlado experimental (Figura 40), desenvolvido pela empresa Geosignals, com o intuito de coletar dados em campo, com pareamento de informações via *bluetooth* para plataformas *mobile* (*smartphones*) e envio das amostras coletadas por redes móveis ou *wireless*. O protótipo encontra-se pronto, porém necessita dos testes de calibração com os sensores e ajustamento dos algoritmos com os dados, resultados das análises dessa pesquisa. Utiliza o sistema de leitura semelhante ao da placa do *kit* MiCS – EK1, fazendo recepção dos dados dos sensores na forma de resistência (Ohms) e com isso, podendo se aplicar modelagens matemáticas para se obter os dados em ppm. Porém, o protótipo tem a possibilidade de leitura de outros sensores de óxido de metal para monitoramento de variáveis ambientais (umidade, temperatura e pressão atmosférica) e de gases (CO₂, SO₂, NO₂, O₃).

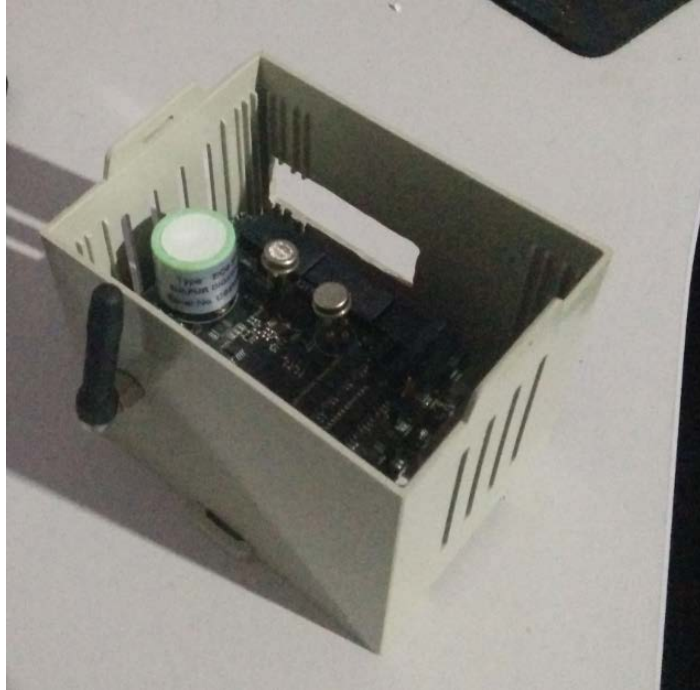


Figura 40. Protótipo do sistema micro controlado para análise da qualidade do ar.

3.2 PROCEDIMENTOS

Os procedimentos para a calibração foram realizados no laboratório de Geocronologia da Universidade de Brasília, vinculado ao Instituto de Geociências – IG/UnB, nos dias 16/05/2014, 20/05/2014, 23/05/2013 e 10/06/2013, estando divididos em cinco etapas, descritas como:

- *Baseline*;
- Medição de volume controlado;
- Conversão das concentrações de CO (Monóxido de Carbono);
- Geração da curva de calibração;
- Análise de Regressão Linear Simples;
- Teste de Monitoramento.

3.2.1 CALIBRAÇÃO EM AMBIENTE CONTROLADO

3.2.1.1 *BASELINE*

Loreto (2012), cita que os sensores de óxido de metal têm de ser aquecidos de 200°C até 400°C, para aumentar a sensibilidade e reduzir o tempo de resposta.

Com isso, para se chegar ao tempo de resposta, os dois sensores MiCS – 5521 foram expostos ao ar ambiente do laboratório, realizando leituras durante um período de 18 horas contínuas, com dados lidos em intervalos de segundo a segundo. O resultado disso foi um *data logging* demonstrando o momento de estabilização da resistência dos sensores, que serão descritos no Capítulo 4.

3.2.1.2 MEDIÇÃO DE VOLUME CONTROLADO

Existem duas abordagens comuns para a calibração de sensores de gases que são utilizadas para monitorar poluentes. A calibração pode ocorrer tanto em laboratório, utilizando misturas de gases artificiais ou em campo, com medições da poluição real, colocando o sensor perto de uma estação fixa, proporcionando medidas confiáveis.

A desvantagem de calibrar os sensores com medições da poluição real é a dependência das condições meteorológicas e da dispersão da poluição local, onde ambos não podem ser controlados. Para uma calibração precisa, medições de referência no âmbito de um vasto leque de condições ambientais são desejáveis, por exemplo, baixa, média e altas concentrações do poluente alvo sob umidade e temperatura com configurações distintas (HANSEFRATZ, 2012).

Neste trabalho pretendia-se realizar os dois procedimentos. Entretanto, devido a problemas burocráticos, a calibração em condições reais que seria realizada junto a uma estação móvel do IBRAM e uma estação fixa da CETESB acabou não correndo, restringindo-se a calibração em laboratório.

Para esse procedimento, utilizaram-se as seringas (Figura 25 e Figura 26) e agulhas descritas nos equipamentos do laboratório.

A placa do *kit* também foi utilizada, inserida no interior do *box* (Figura 31).

Para o uso do *box* SR#3, seguiu-se a metodologia, indicada pelo fabricante, mantendo o *box* aberto em um ambiente limpo e ligando o misturador de 2 a 3 minutos para

garantir que todos os contaminantes serão removidos da caixa. Após isso, fechou-se o *box* com a tampa. Posteriormente a seringa foi preenchida com o volume de CO, retirado a partir de um duto de saída da válvula do tanque de gás. Com isso, o CO foi injetado no *box* através de um septo de silicone. Em seguida, ligou-se o misturador (*fan*) por 30 segundos e aguardou-se mais 30 segundos para observação da leitura de saída. A tampa do *box* foi retirada para retornar o ciclo de 2 a 3 minutos para a limpeza da caixa.

Os volumes de CO utilizados na calibração foram de: 1 ml, 2 ml, 3 ml, 4 ml, 5 ml e 6 ml.

Para cada volume (ml), foram feitas dez repetições de injeções de CO, afim de que se obtivesse uma média de cada volumetria.

Os resultados da calibração e cálculos estatísticos das leituras encontradas, serão descritos no Capítulo 4.

3.2.2 CONVERSÃO DAS CONCENTRAÇÕES DE CO (MONÓXIDO DE CARBONO)

De acordo com o NIST (2011), unidades de fração de volume ou fração molar são frequentemente utilizadas para a concentração de gases. Na análise, foi somado o volume do *box* a cada ml injetado. A fração de valor mais utilizada é ppm_v (partes por milhão em volume), definida pela seguinte eq.(5):

$$ppm_v = \frac{V_i}{V_{total}} \times 10^6 \quad (5)$$

onde V_i é o volume do gás e V_{total} o volume do ar.

A conversão de ppm para mg/m³ (NIST, 2011), é descrita na eq.(6) como:

$$mg/m^3 = \frac{ppm \times M}{24.45} \quad (6)$$

onde ppm é o valor de ppm da solução, M a massa molecular do poluente do ar e o valor 24.45 é um fator de conversão que representa o volume de um mol de gás.

Beychok (2005) explica que as equações de conversão dependem da temperatura à qual a conversão é desejada (geralmente cerca de 20°C a 25°C). A uma pressão atmosférica de 1 atm (101,325 kPa ou 1,01325 bar), sendo a equação geral eq.(7):

$$ppm_v = (mg/m^3) \times \frac{(273.15 + ^\circ C)}{(12.187) \times (M)} \quad (7)$$

onde mg/m^3 é a quantidade em miligramas do poluente por metro cúbico de ambiente, ppm_v a concentração de poluentes do ar, em partes por milhão por volume (isto é, o volume de gás poluente por 10^6 volumes de ar ambiente), $^\circ C$ a temperatura do ar ambiente em graus Celsius, 12.187 o valor da constante de gás universal, 273.15 é T_0 em Kelvin e M a massa molecular do poluente do ar.

Beychok (2005) ainda cita que as concentrações de poluentes do ar, expressas em massa por unidade de volume de ar atmosférico (mg/m^3 , $\mu g/m^3$, etc) ao nível do mar, irão diminuir com o aumento da altitude. A diminuição de concentração é diretamente proporcional à diminuição da pressão, com o aumento da altitude.

Dada a concentração de poluentes na atmosfera a uma pressão atmosférica de 1 atmosfera (ou seja, a altitude a nível do mar), a concentração em outras altitudes pode ser obtida a partir desta eq.(8):

$$C_a = C \times (0.9877^a) \quad (8)$$

onde C_a é a concentração, em massa por unidade de volume na altitude especificada, a a altitude em km (valor de referência do Distrito Federal: 1.172 m), C a concentração de poluentes do ar, em massa por unidade de volume à pressão atmosférica a nível do mar.

3.2.3 GERAÇÃO DA CURVA DE CALIBRAÇÃO

Os dados levantados foram analisados com o intuito de testar a hipótese da pesquisa através de ferramentas da estatística inferencial.

Foi realizado o teste de regressão linear simples, utilizando os *softwares* R e Excel.

3.2.3.1 MODELOS ESTATÍSTICOS DE CORRELAÇÃO E DE REGRESSÃO LINEAR SIMPLES (MRLS)

Segundo Pereira (2012), a regressão e a correlação são procedimentos utilizados para estimar relações entre variáveis que possam existir na população. A análise de correlação e de regressão compreendem a análise de dados amostrais para saber se e como duas ou mais variáveis estão relacionadas uma com a outra em uma população. Um modelo de regressão estabelece uma relação de causa-efeito entre duas ou mais variáveis. Essa causalidade pode não ser imposta nos dados e analisar-se apenas o grau de associação entre duas variáveis. Isso é feito através do coeficiente de correlação. Assim, um coeficiente de correlação permite medir a intensidade da associação entre variáveis sem impor qualquer relação de causa-efeito entre elas, enquanto a regressão estabelece esta relação de causalidade.

3.2.3.2 ANÁLISE DE REGRESSÃO LINEAR SIMPLES

De acordo com Yamauti (2013), a regressão linear simples constitui uma tentativa de estabelecer uma equação Matemática linear (linha reta) que descreva o relacionamento entre duas variáveis. A regressão é um modelo estatístico usado para prever o comportamento de uma variável quantitativa (variável dependente ou Y) a partir de uma ou mais variáveis relevantes (variáveis independentes ou X's) informando sobre a margem de erro dessas previsões. Quando existe apenas uma variável X, o modelo designa-se por regressão linear simples (MRLS). Quando existe mais do que uma variável X, o modelo designa-se por regressão linear múltipla (MRLM). O modelo de regressão linear simples (MRLS) analisa a relação entre duas variáveis de natureza quantitativa X e Y cuja tendência é aproximadamente

representada por uma linha reta. Para se estimar o valor esperado, usa-se um modelo a partir do qual se determina a relação entre ambas as variáveis eq.(9).

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_i + \varepsilon_i \quad (9)$$

onde Y_i é a variável explicada (dependente); é o valor que se quer atingir, β_0 é uma constante, que representa a interseção da reta com o eixo vertical, β_1 é outra constante, que representa o declive da reta, X_i a variável explicativa (independente), representa o fator explicativo na equação, ε_i o termo que inclui todos os fatores residuais mais os possíveis erros de medição. O seu comportamento é aleatório, devido à natureza dos fatores que encerra. O termo aleatório integra todos os fatores que influenciam a variável dependente Y e não estão especificados no modelo.

Para que este modelo possa ser usado para fazer inferência estatística, os erros devem satisfazer determinados pressupostos, que consiste em serem normalmente distribuídos, com a mesma variância σ^2 (desconhecida), independentes entre si e independentes da variável explicativa X.

Reis (1997) descreve que a linha de regressão oferece-nos o valor esperado de Y para cada valor de X, enquanto os desvios entre cada observação e a linha reta (ou o valor esperado) constituem os termos aleatórios. No modelo de regressão linear simples o R^2 corresponde ao coeficiente de determinação. Assim claramente, um valor elevado do coeficiente de correlação implicará um valor elevado de r (que varia entre -1 e 1). R^2 pode ainda ser interpretado como a percentagem de variação total de Y em torno da sua média que é explicada pela variável independente (no caso da regressão simples) ou pelo conjunto de variáveis independentes (no caso da regressão linear múltipla).

3.2.4 TESTE DE MONITORAMENTO

A calibração dos sensores seria realizada em comparação aos dados gerados das estações tradicionais da rede de monitoramento da qualidade do ar da CETESB. Devidas as dificuldades burocráticas e operacionais, não foi possível a aplicação dessa metodologia, limitando-se as análises a níveis pontuais, em áreas pré-selecionadas. No cenário do DF, o IBRAM apresenta escassez de dados da qualidade do ar, impossibilitando qualquer correlação de dados locais.

Diante disso, no dia 06/06/2014, utilizou-se a Rodoviária de Brasília como um ponto de referência *outdoor* para a medição. A partir dela, foi gerado no *plugin* HawthTools, em ambiente ArcGIS *Info* 10.2.2, uma malha regular (*grid*) de 20 m x 20 m (*Sampling Tools*, no algoritmo “*creator vector grid*”) (Figura 41) e amostras randômicas (“*generate random points*”), com a intenção de distribuição de pontos periféricos para a coleta de dados da qualidade do ar. A entrada para a amostragem randômica foi de oito pontos de medição. As amostragens *outdoor* foram realizadas com período de coleta de amostras de 5 minutos para cada ponto.

Posteriormente, no dia 13/06/2014, foram feitas as coletas *outdoor* nas imediações do *Campus* Darcy Ribeiro, da Universidade de Brasília, nas principais vias periféricas ao “minhocão” (Figura 42).

Outra parte das coletas *outdoor* foram realizadas durante o jogo da Copa do Mundo (Suíça x Equador), com o levantamento de 4 pontos nas imediações do evento, que aconteceu dia 15/06/2014 as 13h, no Estádio Nacional de Brasília (Figura 43).

Para a coleta de dados *indoor*, selecionou-se a Universidade de Brasília (UnB), localizada no *Campus* Darcy Ribeiro. Nesse local, foram divididos dois ambientes de medição: térreo e garagem. As medições foram efetuadas no ICC Ala Sul, ICC Ala Central e ICC Ala Norte. As amostragens *indoor* foram realizadas no dia 13/06/2014, com período de coleta de amostras de 5 minutos para cada ponto (Figura 44).

A placa do *kit* MiCS - EK1 juntamente com o protótipo micro controlado foram utilizados para ambos ambientes de coleta, analisando os parâmetros de resistência (Ohms), umidade do ar e temperatura (°C). Os dois sistemas ficaram ligados continuamente, anterior a toda a semana da medição, para que se chegasse a sua estabilização de resistência ideal de leitura.

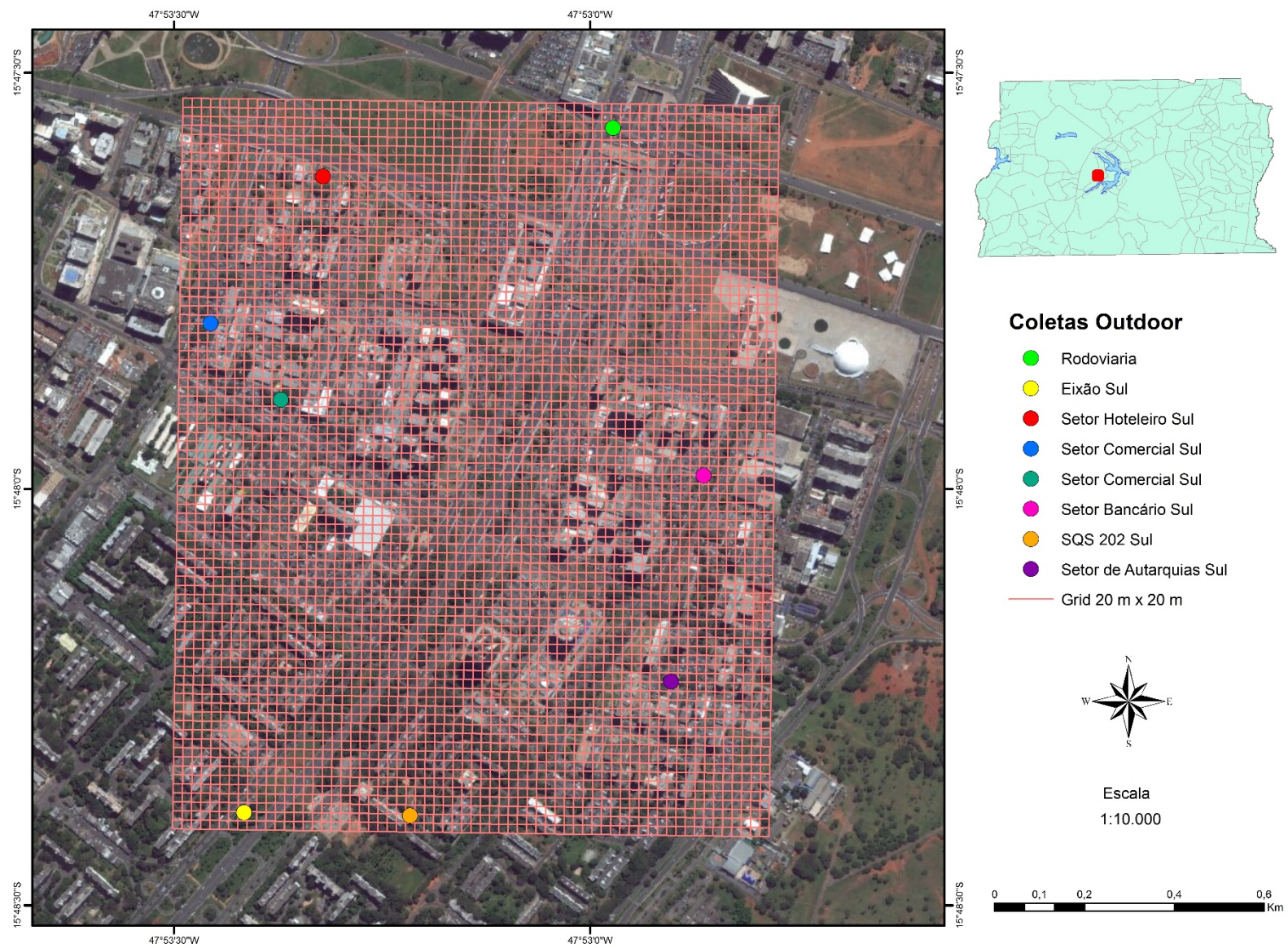


Figura 41. Mapa com os pontos das coletas *outdoor* na região central de Brasília.

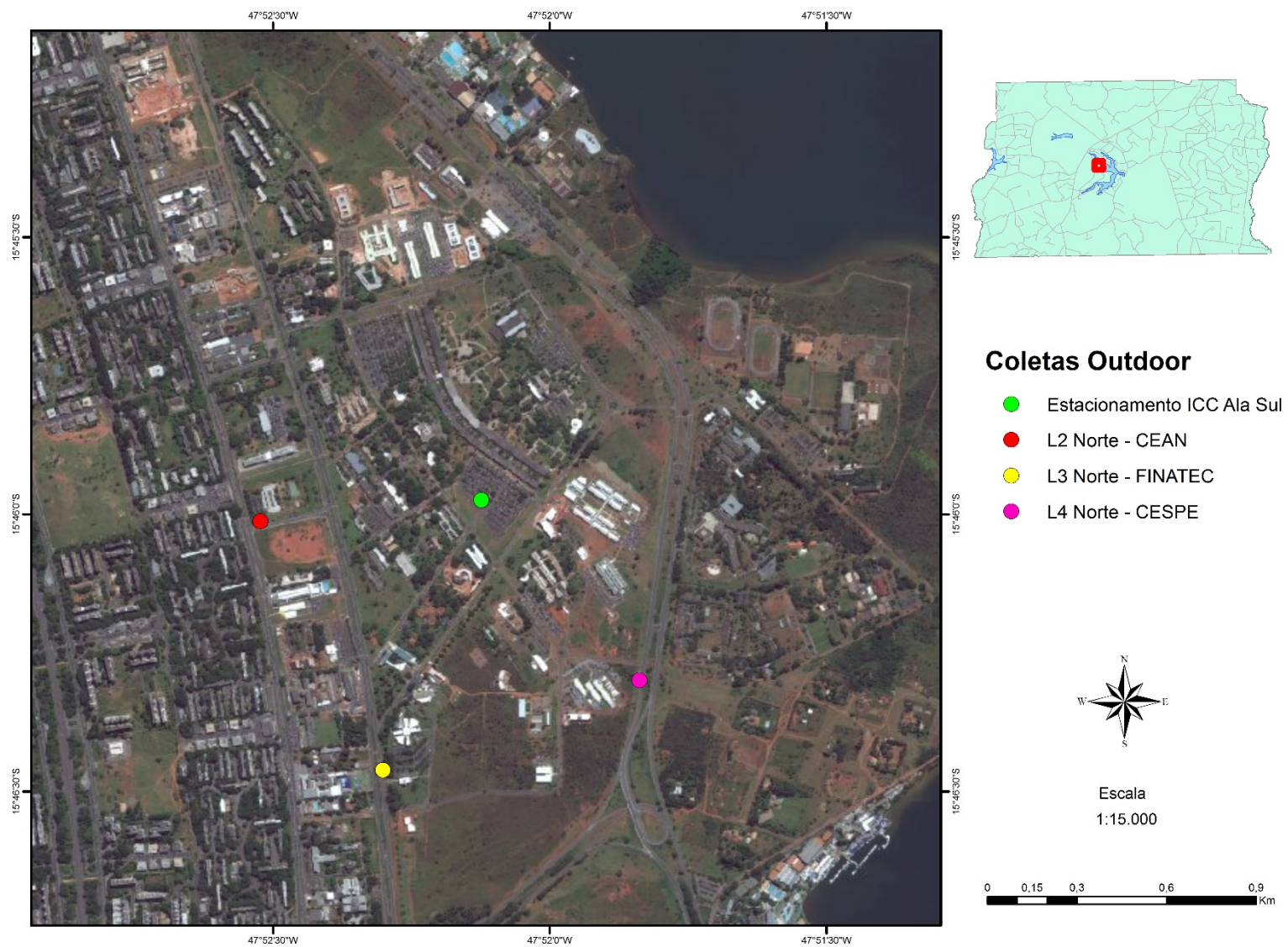


Figura 42. Mapa de coletas *outdoor* nas principais vias das imediações do *Campus Darcy Ribeiro* – Universidade de Brasília.

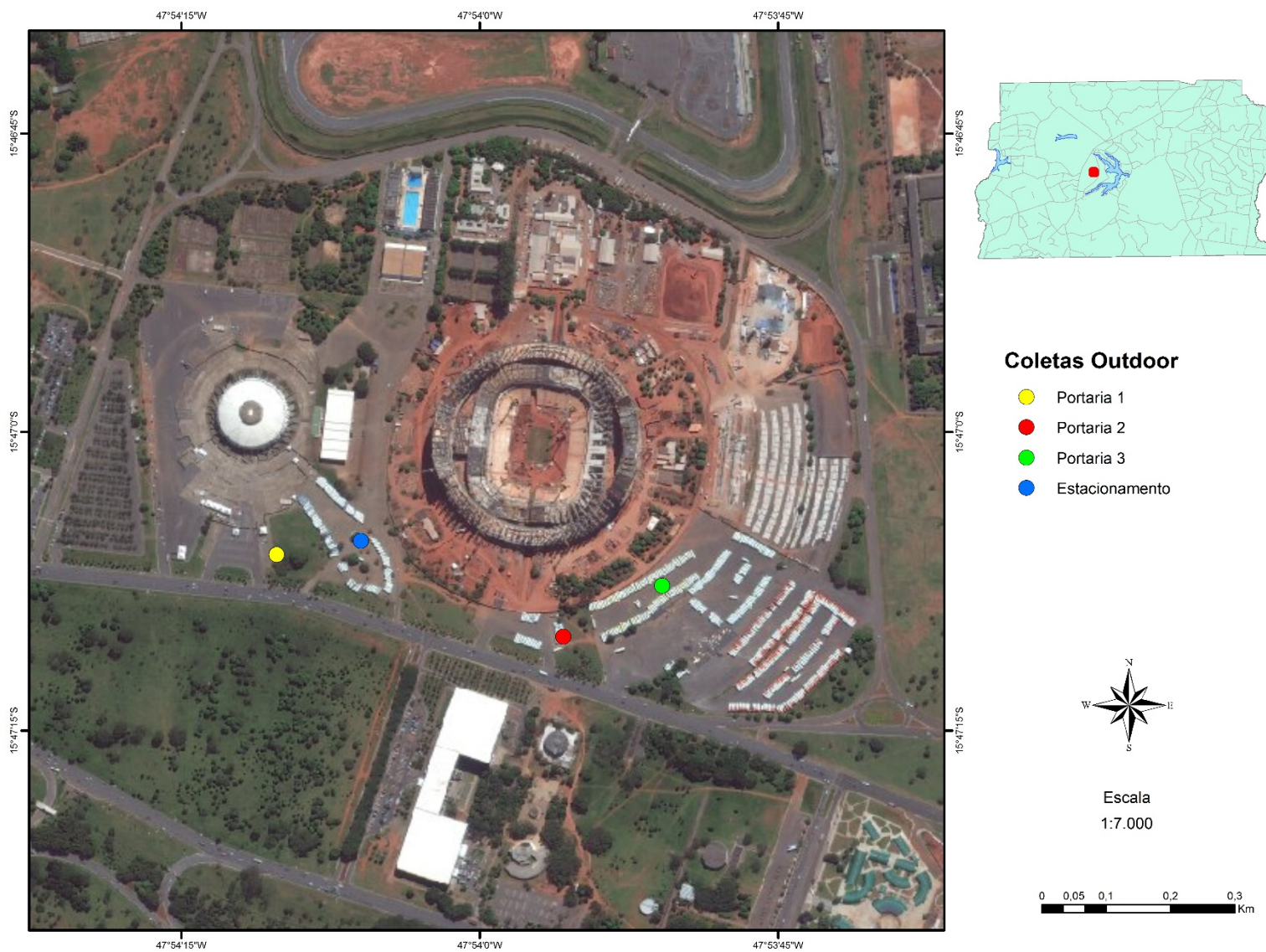


Figura 43. Mapa com os pontos de coleta *outdoor* durante o jogo da Copa do Mundo (Suíça x Equador) – 15/06/2014, no Estádio Nacional de Brasília.

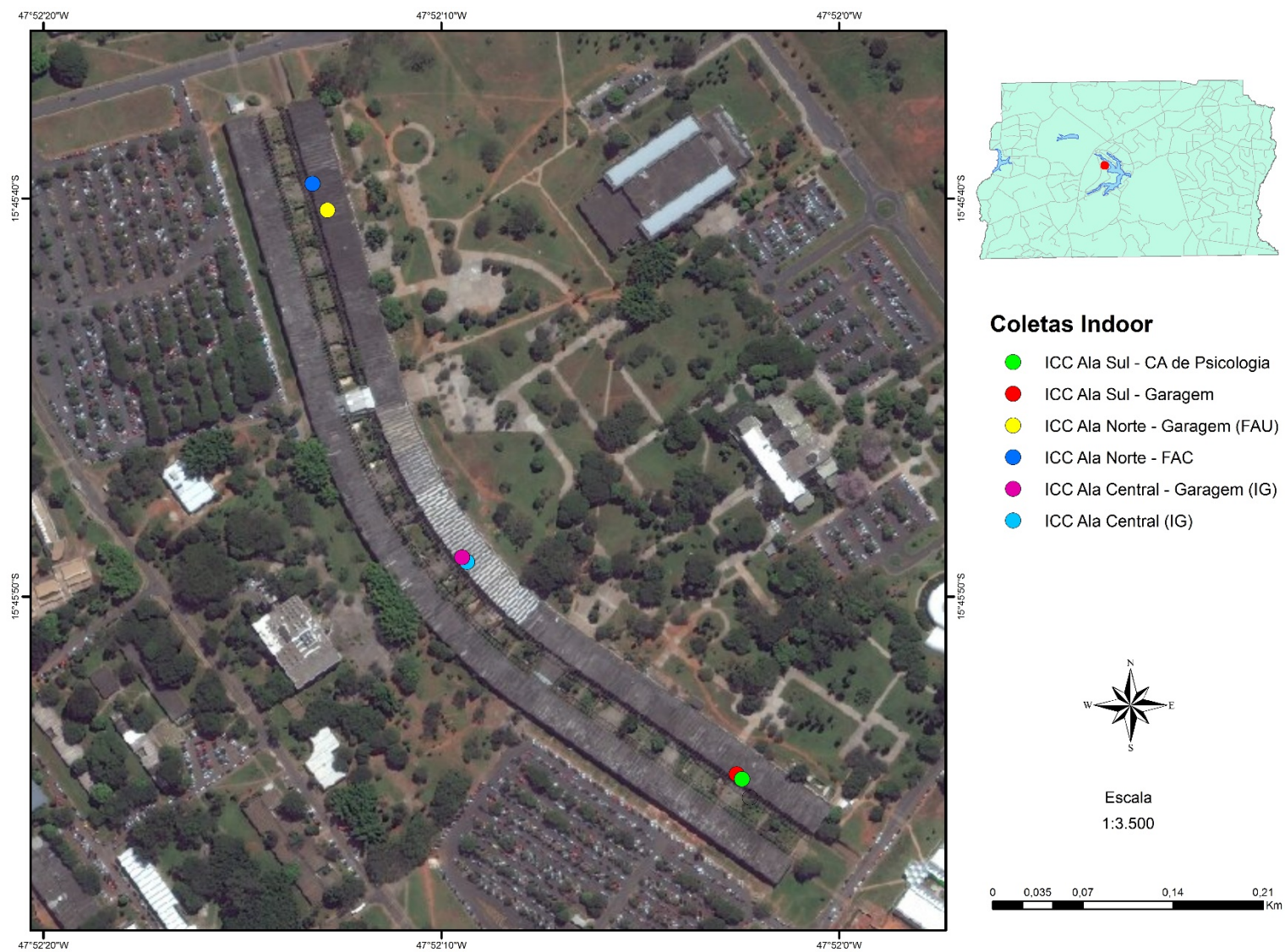


Figura 44. Mapa das coletas *indoor* realizadas no ICC – Universidade de Brasília.

3.2.5 DISPONIBILIZAÇÃO DOS DADOS

Finalizada a coleta de dados de qualidade do ar, gerou-se a espacialização das análises em formato de mapa dinâmico digital (*WebGIS*), ilustrado no fluxograma (Figura 45).

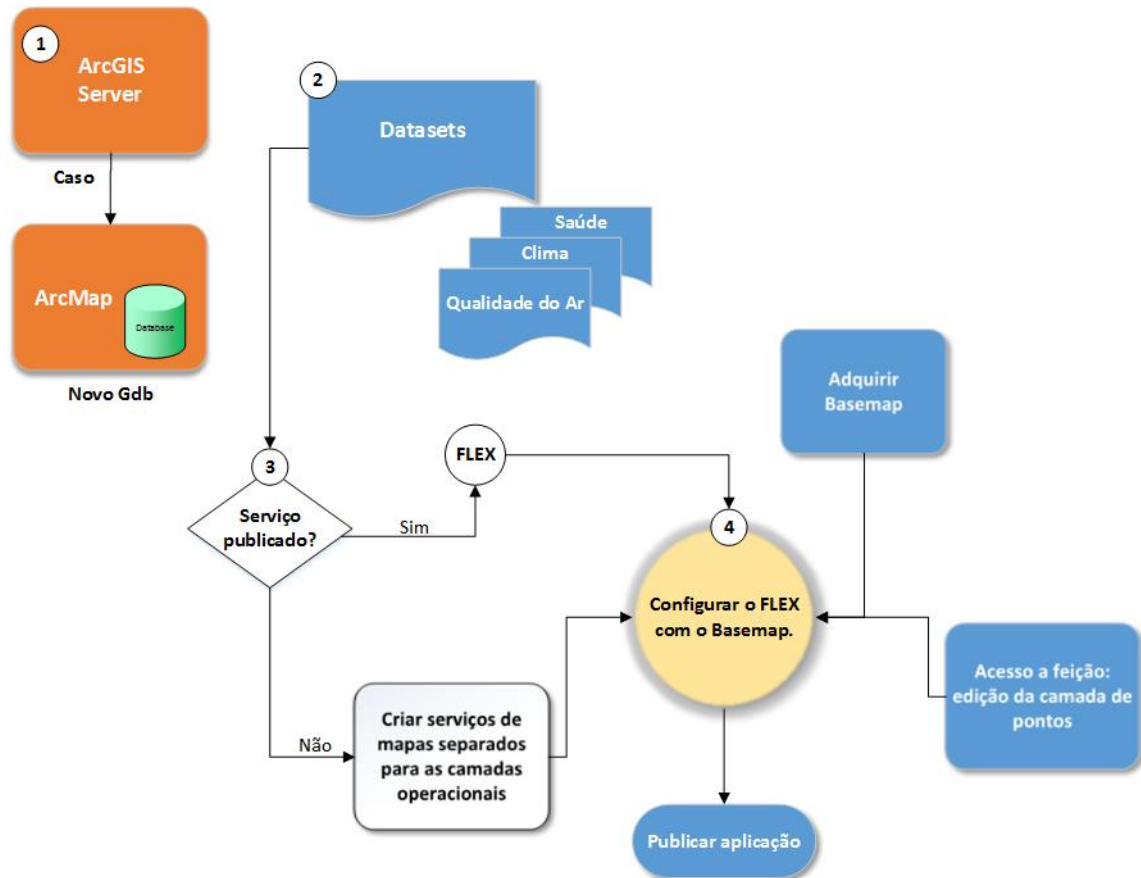


Figura 45. Fluxograma do modelo de construção da aplicação utilizada *ArcGIS Viewer for Flex*.

Inicialmente, se criou um *geodatabase* com as análises *outdoor* e *indoor*, no formato vetorial (ponto), com os campos descritos abaixo (Tabela 15).

Tabela 15. Descrição dos campos definidos na tabela de atributos das análises.

Tipo	Dado	Campos	Descrição	Ambiente	Data de aquisição
Ponto	Local	Data (<i>Datetime</i>); Hora (<i>Datetime</i>); Temperatura (<i>String</i>); Umidade (<i>String</i>); Sensor_1_R (<i>String</i>); PPM_Senso (<i>Double</i>); Sensor_2_R (<i>String</i>); PPM_Sen_1 (<i>Double</i>); Latitude (<i>Double</i>); Longitude (<i>Double</i>); Este (<i>Double</i>); Norte (<i>Double</i>)	Descrição do local	<i>Outdoor</i> ou <i>Indoor</i>	DD/MM/AAAA

O procedimento inicial para o tratamento dos dados é a entrada na plataforma *ArcGIS Info*, ao qual se criaram os atributos individuais na tabela de cada *shapefile*. Posteriormente, na etapa de desenvolvimento, customização e publicação do painel, utilizou-se o *ArcGIS Server* como plataforma. Nele, foram disponibilizados os serviços das camadas (*shapefiles*) analisadas em campo, tendo a possibilidade de gerenciamento total da aplicação. Seu papel é de servidor de dados entre o *software* desktop e os serviços de disponibilização de dados em ambiente *web*.

O resultado final, foi a publicação do serviço de mapas na ferramenta *ArcGIS Viewer for Flex*, que facilita a configuração do *layout* final da aplicação *web* (Figura 46). Foram inseridas as camadas de mapas base, ferramenta de gráficos comparativos, desenho interativo, identificador, legenda, lista de camadas, buscador, impressão de dados, alteração de cores temáticas. Esse conjunto de interação de ferramentas permite análises gráficas e consultas dinâmicas, tendo a possibilidade de novas entradas de variáveis vetoriais para futuras correlações com os dados analisados. As consultas podem ser exportadas do sistema em variados formatos (.xls, .doc, .pdf, etc).

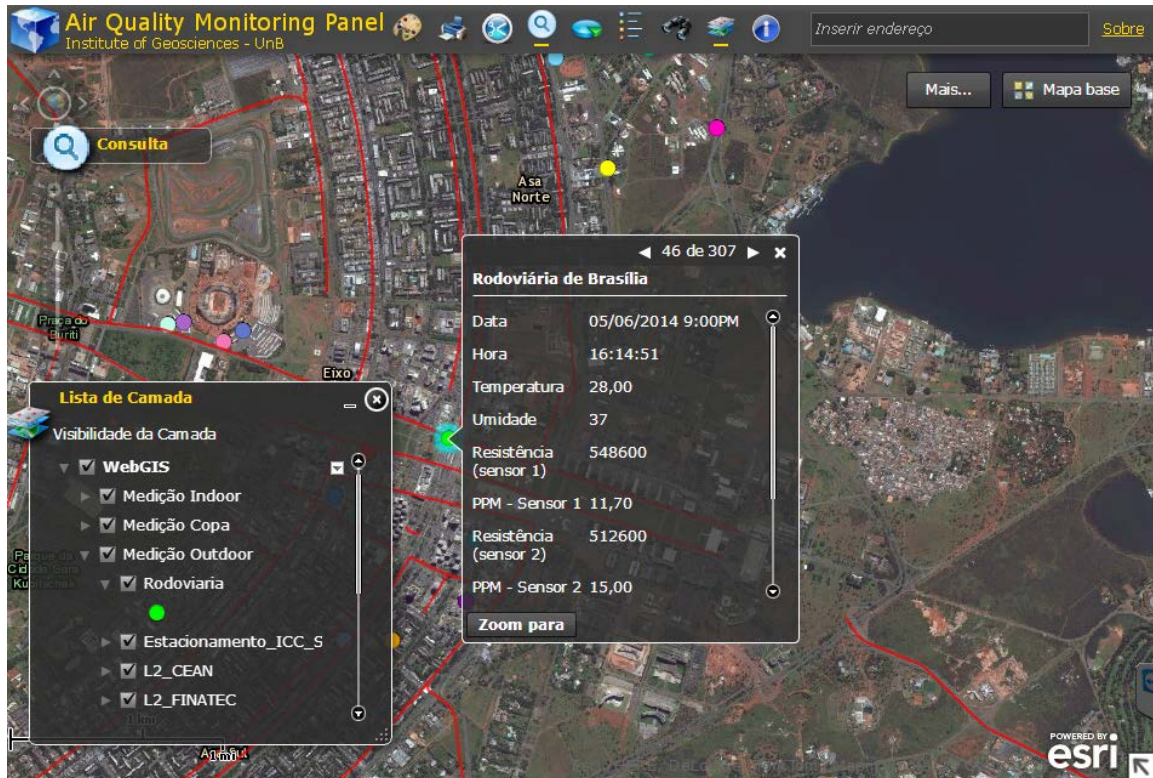


Figura 46. Tela do sistema *WebGIS*, com as informações das medições *outdoor* e *indoor*.

CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

Por tratar-se de um trabalho metodológico, os resultados serão apresentados seguindo as etapas de trabalho, ou seja, inicia-se com a leitura das resistências dos sensores, análise da *baseline* e determinação da volumetria. Após a calibração serão apresentados os testes de campo *indoor* e *outdoor* e por último, as funcionalidades do Sistema *WebGIS* – painel de monitoramento.

Os resultados expressam os seguintes procedimentos realizados:

- Calibração
 - ✓ Análise da *baseline*
- Resposta dos sensores as injeções de CO (ml)
- Calibração por regressão linear
- Testes de Campo
 - ✓ *Outdoor*
 - ✓ *Indoor*
- Sistema *WebGIS*

4.1 ANÁLISE DA *BASELINE*

Durante os testes de laboratório, os sensores modelo MiCS – 5521 da E2V mostraram reprodutibilidade aceitável e resposta linear, com sinais estáveis em condições controladas.

Os sensores foram deixados por aproximadamente 18 horas expostos no laboratório, em ar ambiente, afim de que se coletassem a resistência do ar (R_0). Essas leituras geraram a *baseline* para cada sensor, apresentado na Figura 47 e Tabela 16.

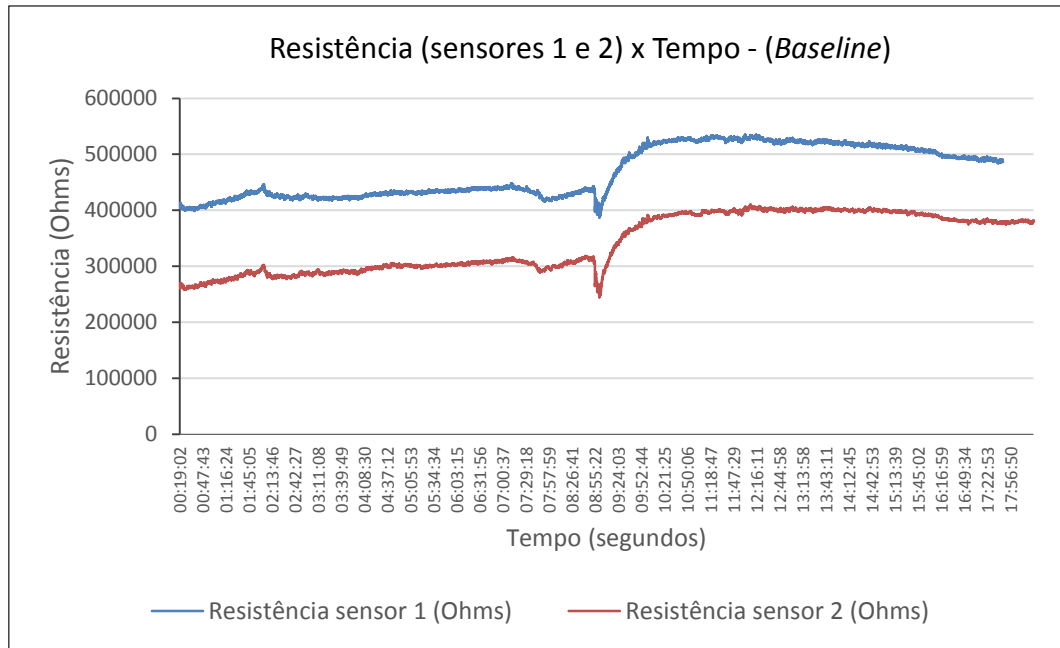


Figura 47. Baseline das resistências (Ohms) obtidas ao longo de aproximadamente 18 horas.

Tabela 16. Média da *baseline* para os sensores 1 e 2 (R_0).

Sensor 1 (Ohms)	Sensor 2 (Ohms)
468958	341631

O ambiente do laboratório de Geocronologia não apresentou grandes variações de concentração de CO, por ser um ambiente fechado. Há o controle de temperatura (25°C) e uma variação mínima de umidade, que se apresentou na faixa dos 50% (umidade recomendada para os cálculos do *datasheet* em relação a R_S/R_0).

A *baseline* demonstra um comportamento semelhante para os dois sensores, porém, com a variação de valores de resistência entre eles. Esta variação pode estar associada a um desgaste ao longo do tempo sobre o material utilizado na resistência, que também pode sofrer interferências com impurezas sobre ele, reduzindo sua capacidade de leitura como foi observado por (LORETO, 2012). O autor também relatou que sensores de CO idênticos possuem um efeito de temperatura diferente em seu sinal de linha de base.

Fato importante no processo de construção da *baseline* é que após 9 horas de sistema ligado coletando os dados no ambiente do laboratório, os dois sensores estavam com suas leituras estabilizadas, quando ocorreu uma mudança brusca dela e uma nova estabilização a um patamar superior. Acredita-se que este processo ocorreu por conta da sensibilidade cruzada após o uso de álcool para a limpeza da vidraria laboratorial, em ambiente fechado.

Esta interferência foi observada por Loreto (2012) e Li (2009). Estes autores indicam que sensores de álcool e umidade são necessários ao se configurar um sistema micro controlado que utilize esses sensores, no sentido de se calcular as interferências das duas variáveis. Conseqüentemente, indicam que um ambiente de umidade controlada deve ser montado para o módulo que levará esse sistema.

4.2 RESPOSTA DOS SENSORES AS INJEÇÕES DE CO (ML)

Esse procedimento foi realizado com o *box* de teste Figaro (Figura 28), em material de acrílico, com volume total de 5,4 litros, sendo o ambiente confinado para as injeções de CO (ml). Dois sensores foram utilizados, sendo um deles sem uso (sensor 1) e outro com aproximadamente um ano e meio de uso (sensor 2). A vida útil indicada pelo fabricante (E2V, 2014) é de 2 anos.

A Figura 48 demonstra a relação entre o volume do *box* (5,4 litros) e a concentração ppm_v de CO da caixa, calculados segundo as eq.(5, 6, 7 e 8).

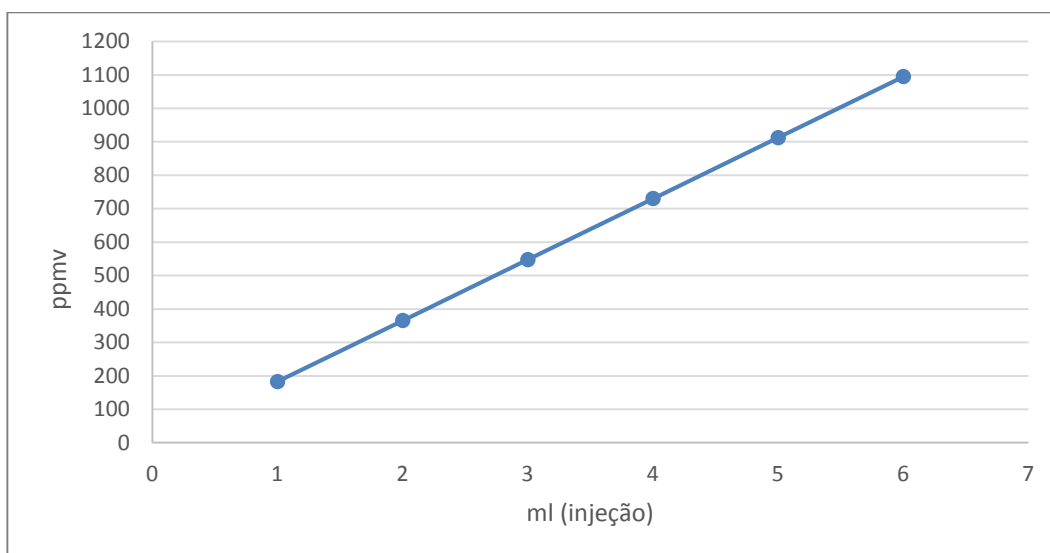


Figura 48. Relação entre o ppm_v calculado sobre o volume do *box* pela volumetria das injeções.

Barbi *et al.* (1995) cita que os sensores de óxido de metal demonstram uma resposta à presença de gás de CO a partir das concentrações acima de 10 ppm. De acordo com o *datasheet* do fabricante dos sensores (E2V, 2014), o limite máximo de detecção é de 1000

ppm. Utilizando-se destas informações e os dados do cálculo volumétrico (Figura 49), o volume do *box* atinge essa concentração em 6 ml. As respostas da resistência por tempo para cada volume injetado na caixa estão representadas nas Figuras 49 a 60, onde as Figuras 51, 53, 55, 57 e 59 demonstram a variação da concentração no momento de homogeneização e as Figuras 52, 54, 56, 58 e 60 demonstram os momentos das injeções de volumetrias de gás CO. Percebe-se que no momento da injeção de 6 ml (Figura 60), a resistência diminui até o ponto em que o material de óxido de metal passa a não detectar o gás alvo, tendo a resistência no seu ponto mais baixo de leitura.

As Figuras 52, 54, 56, 58 e 60 demonstram os momentos das injeções de volumetrias de gás CO. Percebe-se que no momento da injeção de 6 ml (Figura 60), a resistência diminui até o ponto em que o material de óxido de metal passa a não detectar o gás alvo, tendo a resistência no seu ponto mais baixo de leitura.

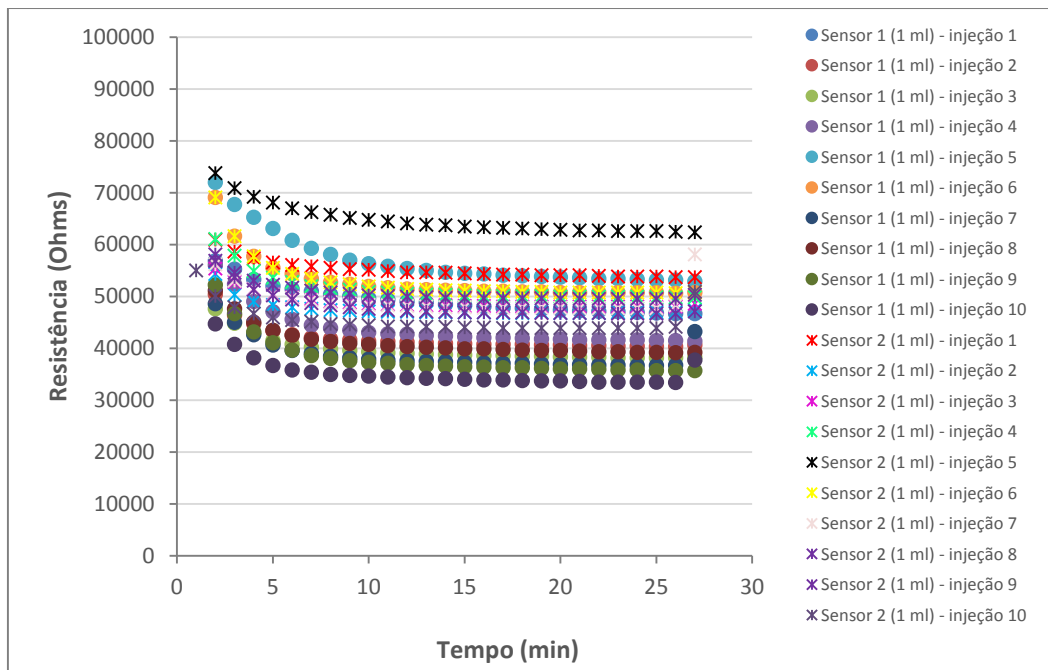


Figura 49. Resposta da resistência (Ohms) dos sensores 1 e 2 a injeção de 1 ml (10 repetições) de CO durante a leitura de 30 segundos.

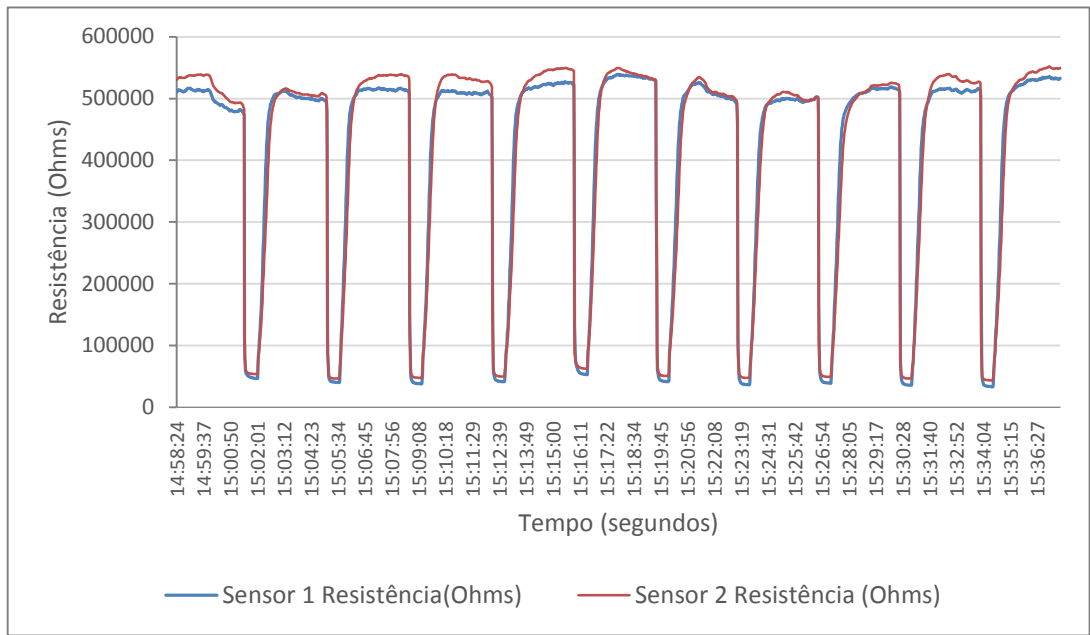


Figura 50. Gráfico apresentando a resposta da resistência R_s (Ohms) a 10 repetições de injeções de 1 ml de CO.

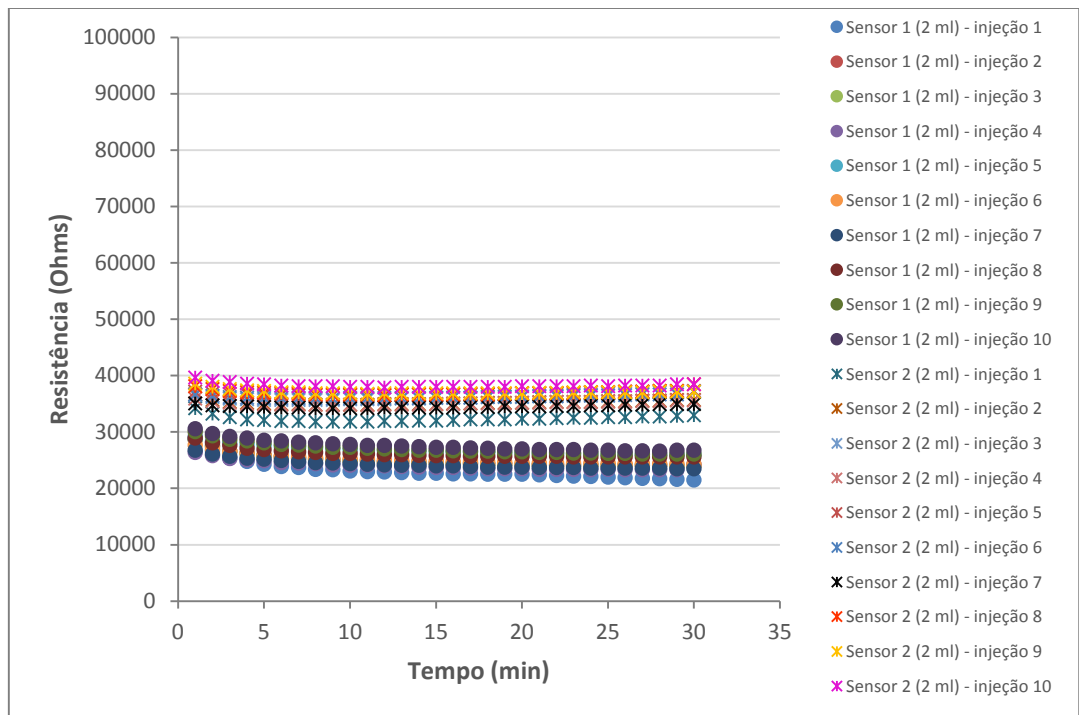


Figura 51. Resposta da resistência (Ohms) dos sensores 1 e 2 a injeção de 2 ml (10 repetições) de CO durante a leitura de 30 segundos.

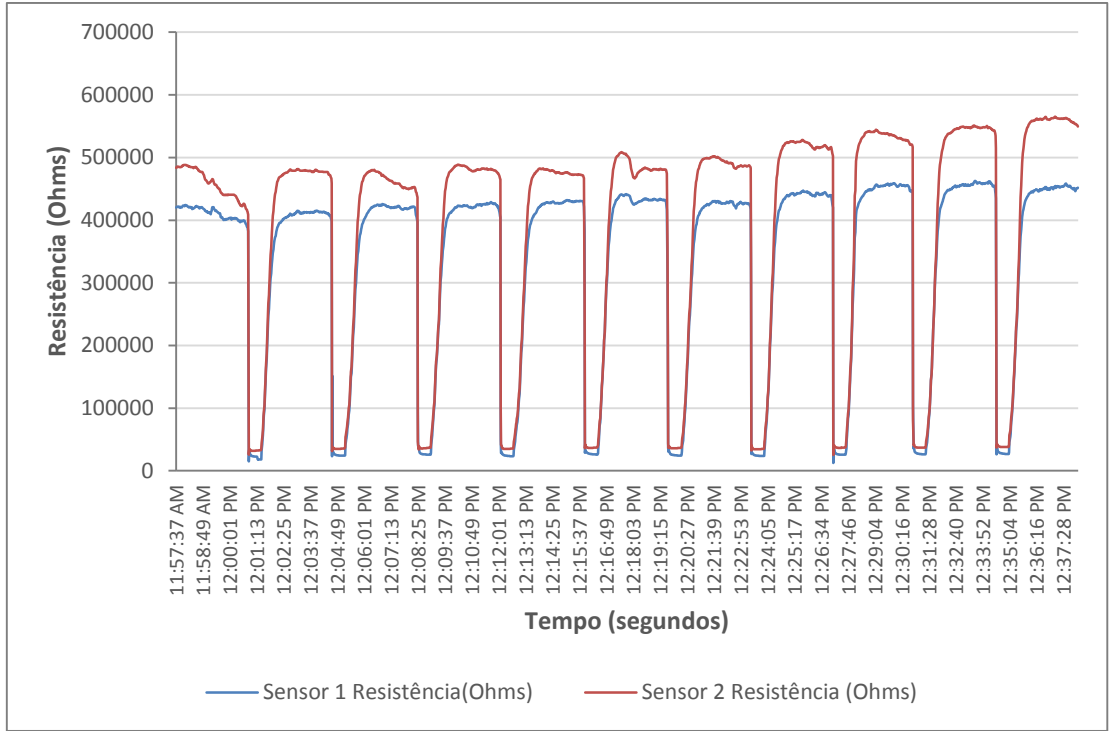


Figura 52. Gráfico apresentando a resposta da resistência R_s (Ohms) a 10 repetições de injeções de 2 ml de CO.

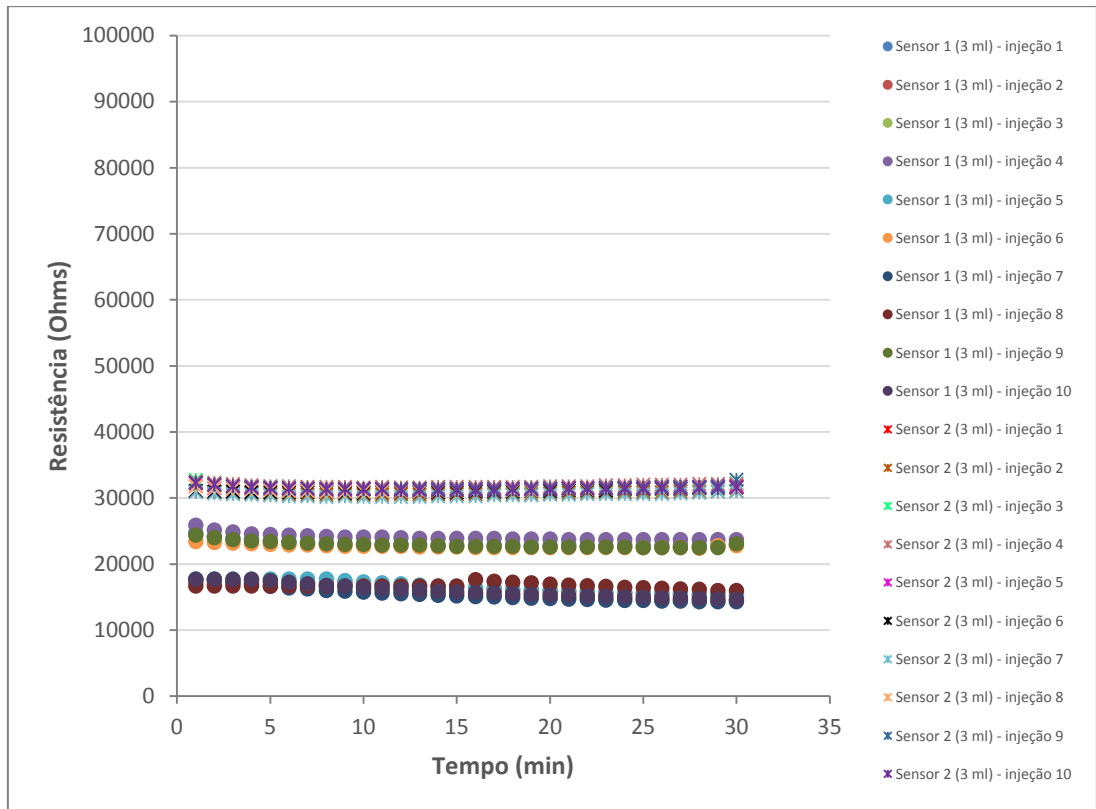


Figura 53. Resposta da resistência (Ohms) dos sensores 1 e 2 a injeção de 3 ml (10 repetições) de CO durante a leitura de 30 segundos.

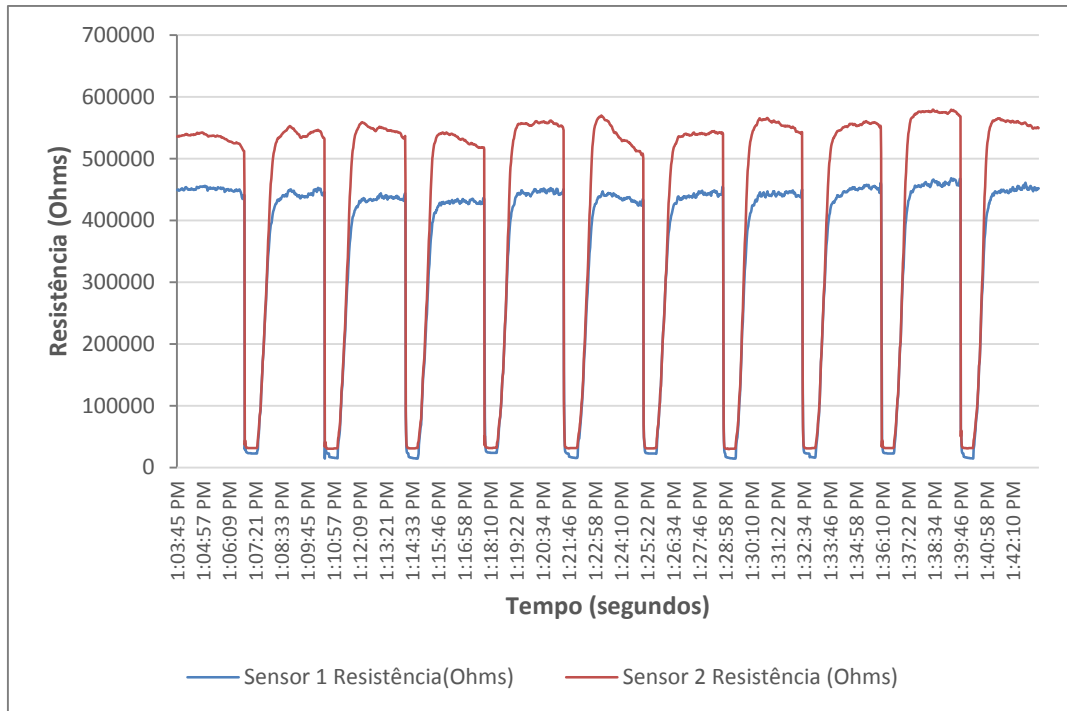


Figura 54. Gráfico apresentando a resposta da resistência R_s (Ohms) a 10 repetições de injeções de 3 ml de CO.

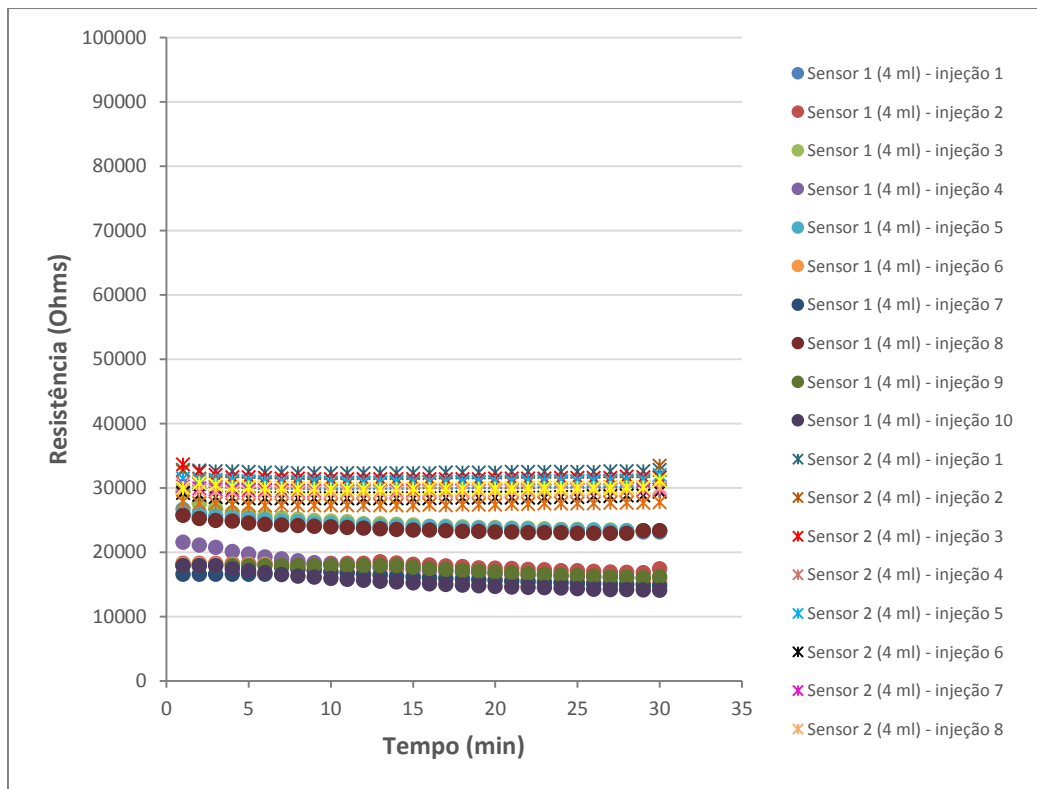


Figura 55. Resposta da resistência (Ohms) dos sensores 1 e 2 a injeção de 4 ml (10 repetições) de CO durante a leitura de 30 segundos.

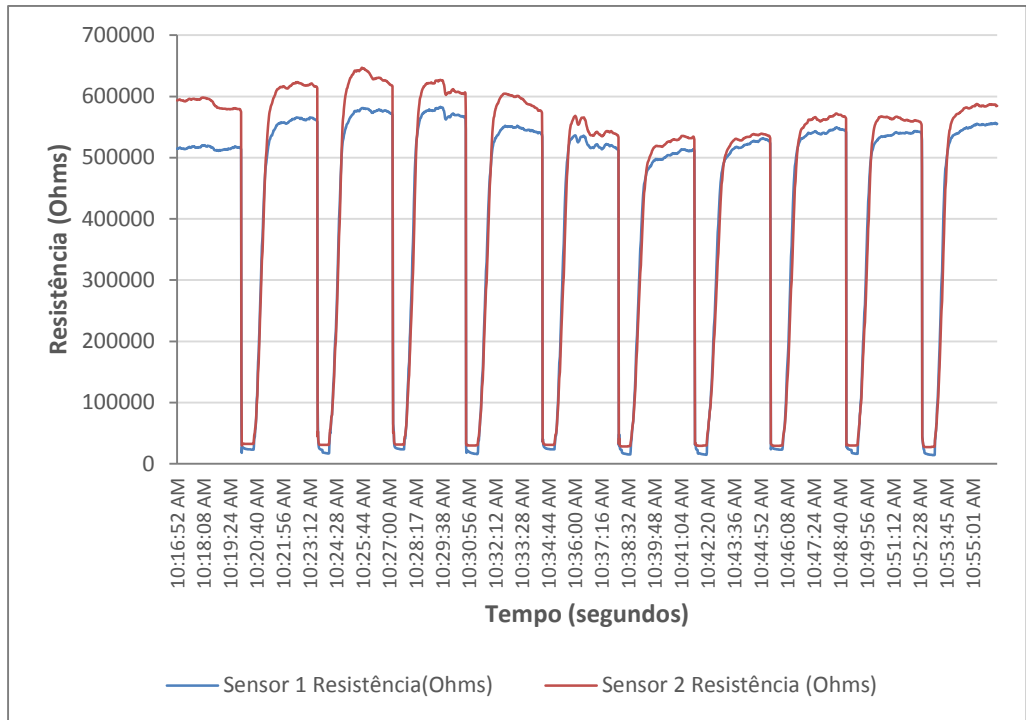


Figura 56. Gráfico apresentando a resposta da resistência R_s (Ohms) a 10 repetições de injeções de 4 ml de CO.

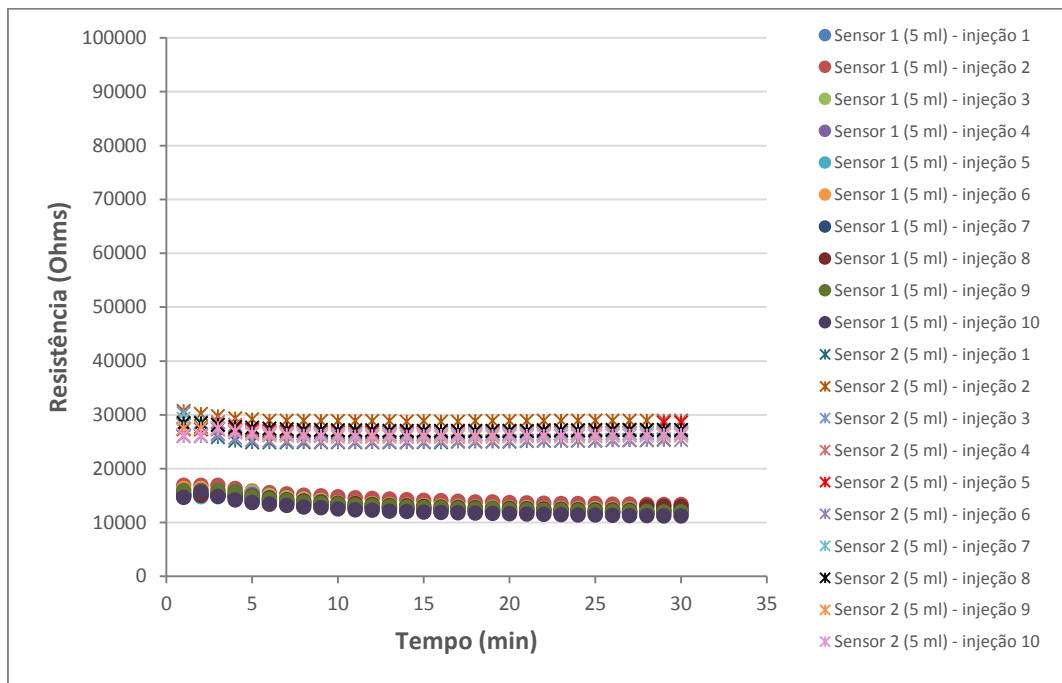


Figura 57. Resposta da resistência (Ohms) dos sensores 1 e 2 a injeção de 5 ml (10 repetições) de CO durante a leitura de 30 segundos.

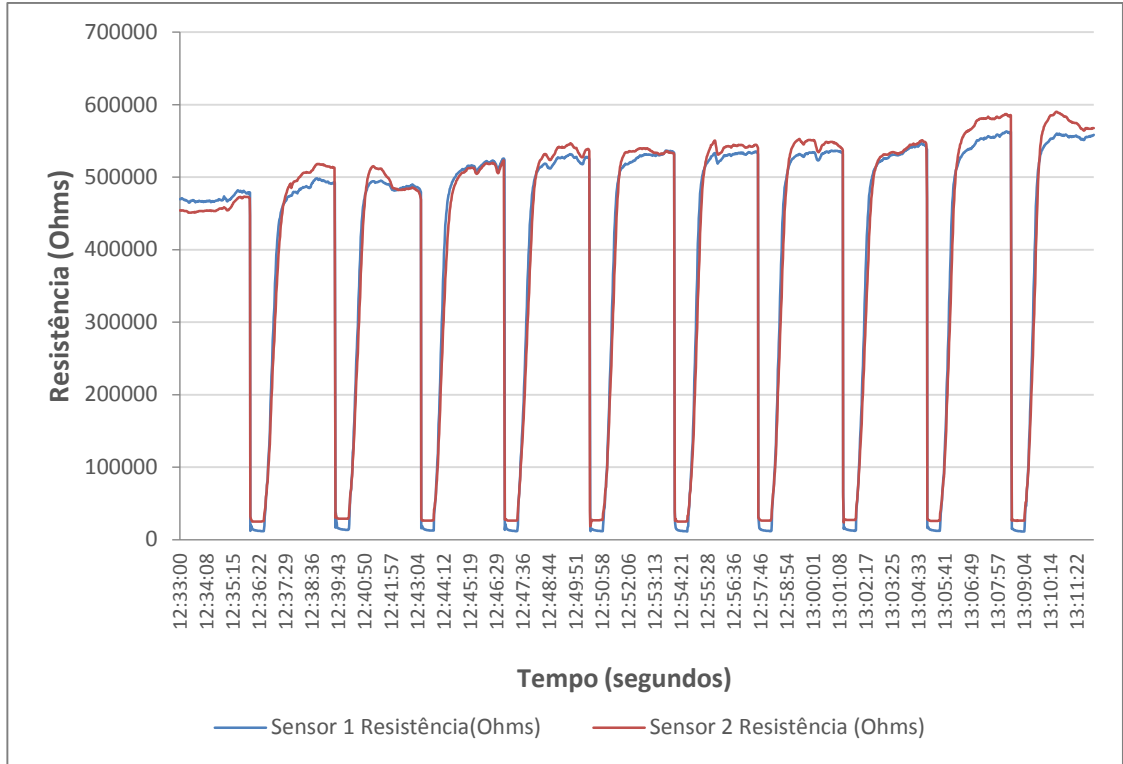


Figura 58. Gráfico apresentando a resposta da resistência R_s (Ohms) a 10 repetições de injeções de 5 ml de CO.

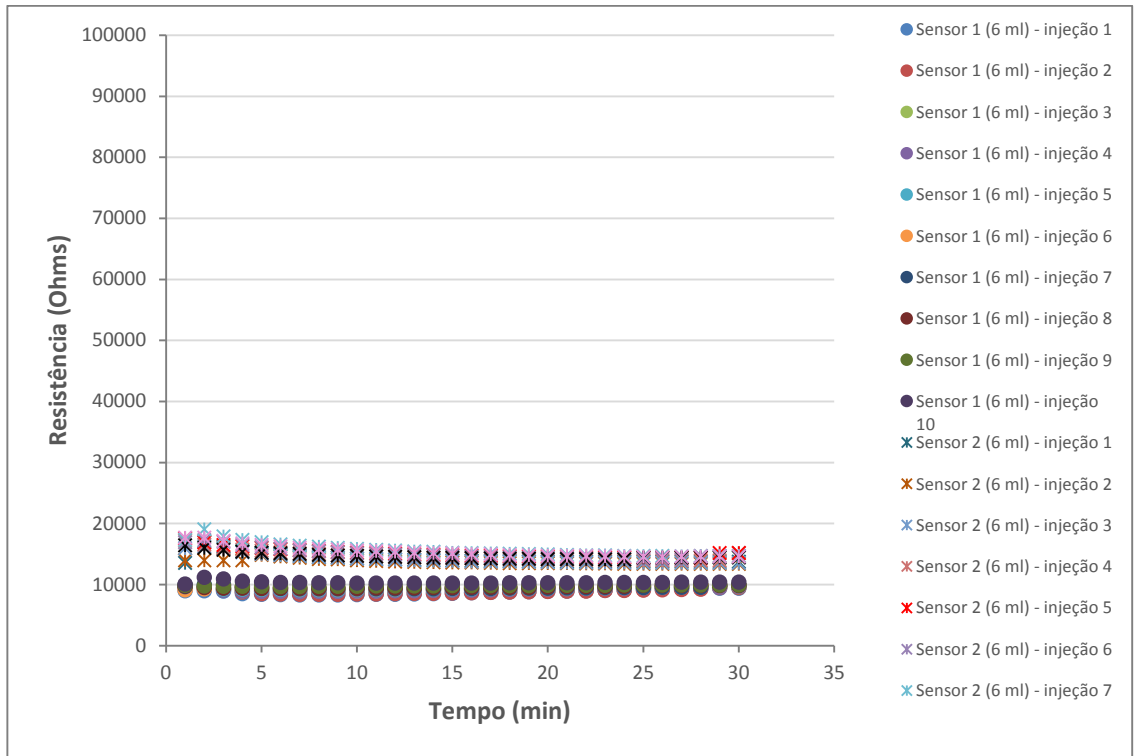


Figura 59. Resposta da resistência (Ohms) dos sensores 1 e 2 a injeção de 6 ml (10 repetições) de CO durante a leitura de 30 segundos.

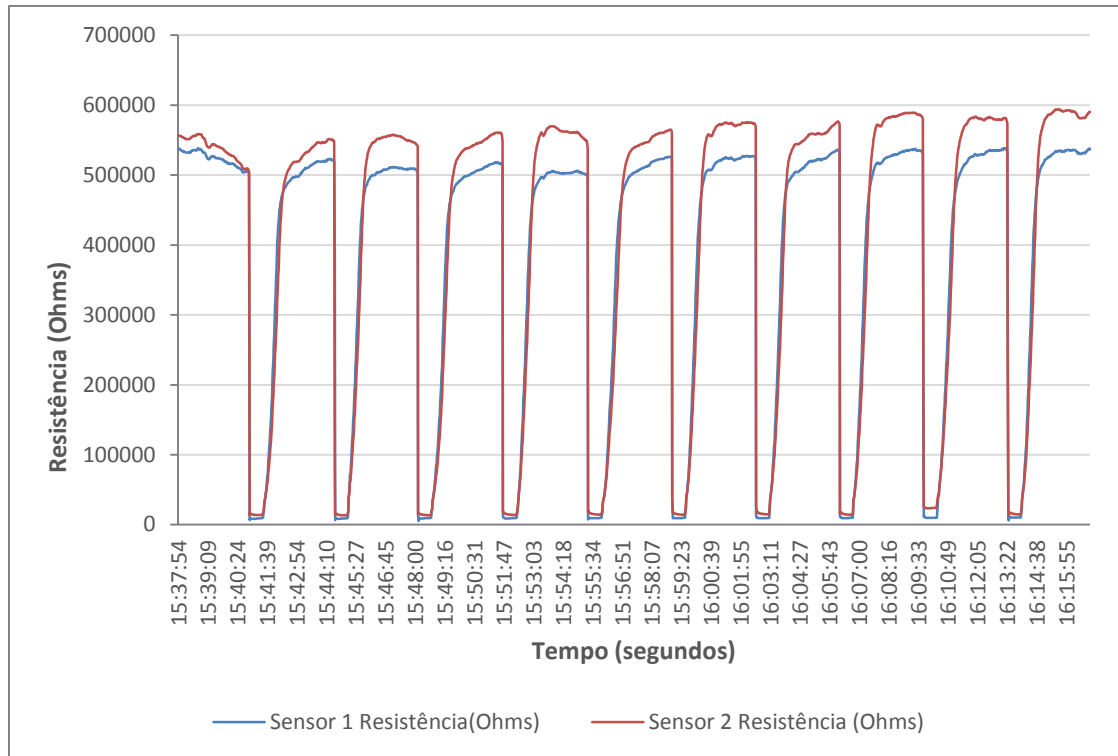


Figura 60. Gráfico apresentando a resposta da resistência R_s (Ohms) a 10 repetições de injeções de 5 ml de CO.

Na Figura 53 e Figura 55, o sensor 1 apresenta variações no volume de 3 ml e 4 ml, respectivamente. Nesses volumes, ao se observar a Figura 48, o ppm_v está na faixa em 500 ppm_v a 700 ppm_v , onde essa oscilação de resistência é explicada por Yoo (2011), sendo devido a alta sensibilidade com os óxidos de metal contidos no detector do sensor, demonstrando seletividade com o gás alvo. O sensor 2 apresentou variação notável a partir da injeção de 6 ml de CO (Figura 59), indicando possível degradação do material que compõe o sistema de resistência e baixa seletividade ao gás CO nessa concentração.

Li (2009) demonstrou que quanto maior a temperatura alcançada pela resistência (700°C a 900°C), maior a sensibilidade e seletividade do sensor a baixas concentrações de CO. Para isso, uma maior quantidade de energia tem de ser oferecida ao sistema micro controlado.

Percebe-se que o sensor se comporta com uma relação inversa. Quanto maior o volume do gás alvo, menor são os valores de resistência (Figura 61 e 62).

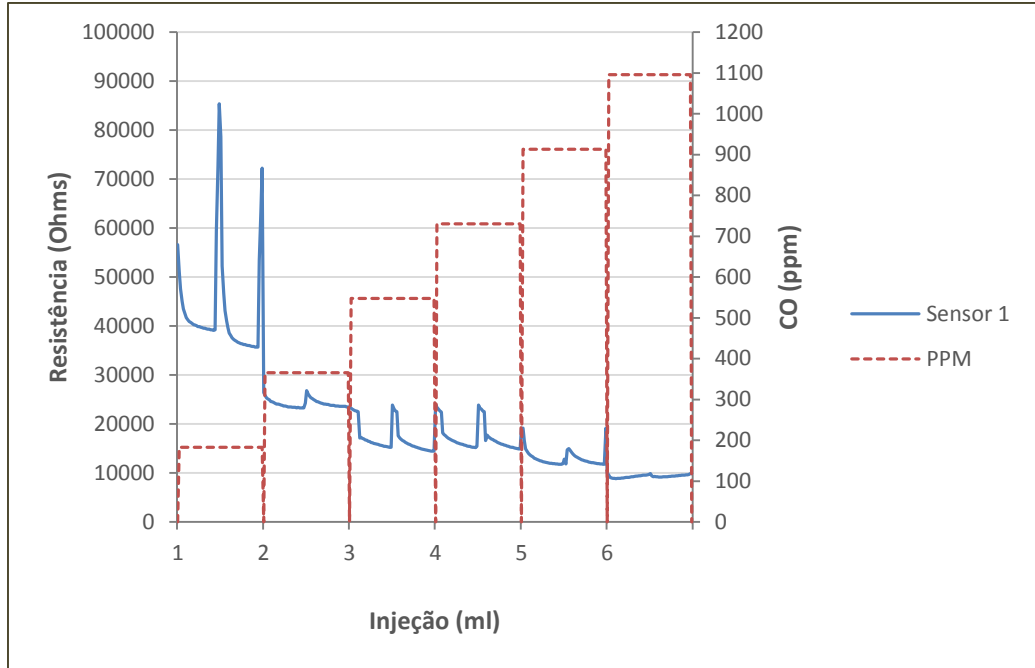


Figura 61. Resposta da resistência R_s (Ohms) em 2 momentos de cada injeção (ml), demonstrando a relação inversa com a concentração (Sensor 1).

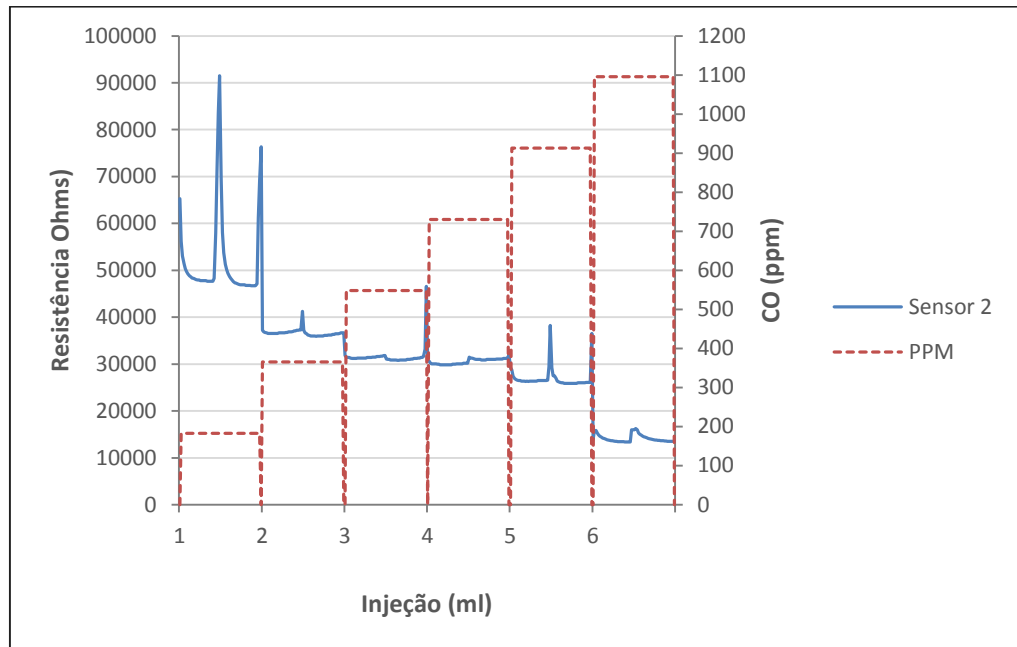


Figura 62. Resposta da resistência R_s (Ohms) em 2 momentos de cada injeção (ml), demonstrando a relação inversa com a concentração (Sensor 2).

A partir destes dados realizou-se uma análise estatística básica com vistas a verificar a qualidade dos dados. Foram calculados a média (10 injeções), o desvio padrão e o coeficiente de variação da resistência (Ohms) dos sensores para cada volume (ml) injetado, tabelas 17 e 18.

Segundo Zamberlan (2008), o coeficiente de variação (CV) é uma medida de dispersão relativa, pois expressa a relação percentual do desvio padrão em relação à média. Em análise estatística é usado o CV (coeficiente de variação), pois leva em consideração a medida de dispersão absoluta (desvio padrão) e a média da série. Portanto a medida de dispersão relativa (coeficiente de variação) prevalece sobre a medida de dispersão absoluta (desvio padrão), expresso pela eq.(10).

$$CV = \frac{\sigma(x)}{\bar{x}} \times 100 \quad (10)$$

onde $\sigma(x)$ é o desvio padrão e \bar{x} a média.

Quanto maior o valor do coeficiente de variação, maior é a dispersão dos valores do conjunto e quanto menor o valor do coeficiente de variação, mais homogêneo é o conjunto. O coeficiente de variabilidade pode ser útil para se comparar a variabilidade de diferentes conjuntos de dados em duas situações. Primeiro, médias muito diferentes, mas provenientes de uma mesma variável; e comparar a homogeneidade de variáveis diferentes (ZAMBERLAN, 2008).

As Tabelas 17 e 18 expressam que no geral, os valores de CV são baixos para todas as injeções (ml), indicando que para ambos os sensores, a dispersão dos dados em relação à média é pequena, ou seja, a dispersão relativa é baixa e os resultados podem ser considerados bons.

A Tabela 19 apresenta a média da resistência (Ohms) dos volumes injetados de 1 ml a 6 ml, com a soma dos produtos, covariância da população e covariância da amostra para os sensores 1 e 2.

Tabela 17. Média, Desvio padrão e Coeficiente de variação (%) da resistência (Ohms) por volume injetado (ml) – Sensor 1.

Sensor 1	Média	Desvio Padrão	Coeficiente de variação (%)
1 ml	41833	1341	3,20
2 ml	25910	622	2,40
3 ml	23894	481	2,01
4 ml	15978	130	0,81
5 ml	13366	410	3,07
6 ml	9350	139	1,49

Tabela 18. Média, Desvio padrão e Coeficiente de variação (%) da resistência (Ohms) por volume injetado (ml) – Sensor 2.

Sensor 2	Média	Desvio Padrão	Coeficiente de variação (%)
1 ml	51068	605	1,19
2 ml	35879	752	2,10
3 ml	31424	434	1,38
4 ml	30766	602	1,96
5 ml	17553	415	2,37
6 ml	14271	162	1,14

O resultado do coeficiente de correlação (r) se apresentou em torno de 0,96 entre a resistência alcançada nas leituras entre ambos os sensores. A soma dos produtos, covariância da população e covariância da amostra não indicaram significativas variações, demonstrando que a resistência manteve variações próximas, no total das injeções (ml). Contudo, o sensor 2 apresentou diferenças significantes de valores de resistência (Ohms) lidas, quando comparado ao sensor 1, podendo ser relacionado as interferências citadas anteriormente. Este fato deve ser levado em consideração e a curva de calibração deve ser revista, pois existe uma degradação do sinal e consequentemente uma leitura da concentração menor.

Tabela 19. Comparação entre as médias das resistências (Ohms) das injeções (1 ml a 6 ml) do sensor 1 e sensor 2, as respectivas covariâncias e o coeficiente de correlação.

	Sensor 1	Sensor 2
Média (Resistência)	21722	30160
Soma dos Produtos	-103981	-119810
Covariância da População	-17330	-19968
Covariância da Amostra	-20796	-23962
Correlação (Resistência (Ohms))	$r = 0,96$	

4.3 CALIBRAÇÃO PELO MÉTODO DE REGRESSÃO LINEAR SIMPLES

Ao analisar os dados de CO com o sensor MiCS – 5521, Loreto (2012) observou comparando os sensores de óxido de metal, que alguns apresentam uma pequena influência da temperatura, enquanto outros tendem a ter uma grande influência, podendo apresentar uma correlação positiva ou negativa com essa variável. Além disso, a influência da temperatura do sensor podem mudar ao longo do tempo com o seu uso e mudanças de estações.

Ainda cita que os resultados das medições dos sensores o sensor MiCS – 5521 junto à estação uma estação tradicional, se diferem significativamente dos resultados obtidos em laboratório.

Para o presente trabalho, foram correlacionadas duas variáveis, sendo elas a resistência (Ohms) e o volume das injeções (ml).

Segundo Landim (1998), o quadrado da correlação mostra o percentual da variância de uma das variáveis, que pode ser explicado a partir do valor da outra (coeficiente de determinação). Cita que o conceito de correlação refere-se a uma associação numérica entre duas variáveis, não implicando necessariamente numa relação de causa-efeito. Portanto, mesmo que duas variáveis apresentem-se matematicamente relacionadas, não significa que deva existir uma relação lógica entre elas.

No entanto, há uma relação causa-efeito observado no procedimento, pois quando há a injeção (ml) no *box*, a resistência (Ohms) tende a cair.

A Figura 63 ilustram uma boa a correlação dos dados de leitura de resistência por volume injetado para o sensor 1 ($r = 0,88$), também encontrada para o sensor 2 ($r = 0,89$).

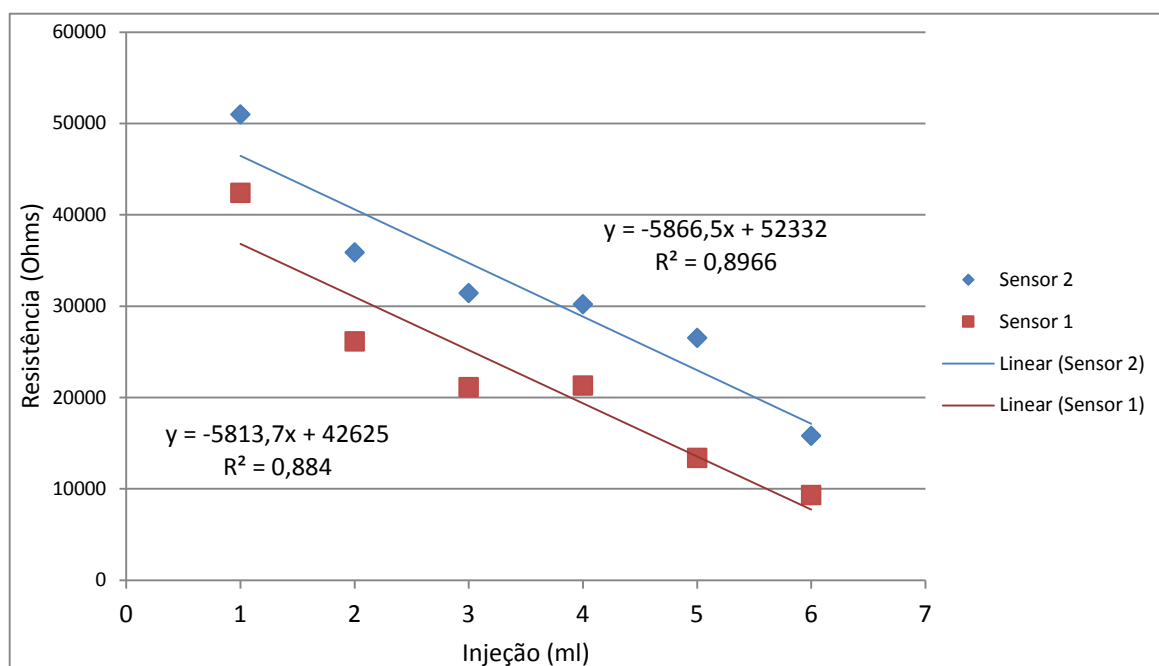


Figura 63. Coeficiente de determinação da resistência (Ohms) em relação a injeção (ml) de CO.

Cerca de 88 % (sensor 1) e 89% (sensor 2) da variabilidade da resistência (Ohms) pode ser explicada pela variabilidade da concentração de CO (ppm). O restante (12% e 11%) pode ser explicado por outros fatores não medidos, como por exemplo, a interferência de sensibilidade cruzada com outros gases, redução de vida útil, partículas estranhas na camada do material que compõe a resistência, que são fatores que provocam alterações significativas nas leituras.

O comportamento da reta para ambos sensores indica que, quanto maior a concentração (CO), menor a resistência (Ohms). Observou-se que após o volume da caixa (5,4 litros) ser homogeneizado com 6 ml, que equivale a 1096 ppm_v, ultrapassando o limite máximo de detecção para esse sensor, a resposta é de redução de sensibilidade da resistência com as partículas em dispersão no micro ambiente.

As duas linhas são quase paralelas indicando um mesmo comportamento o que muda é o ‘b’ que representa provavelmente o grau de sensibilidade do sensor, ou a degradação, necessitando correção.

Ao analisar os dados de CO com o sensor MiCS – 5521, Loreto (2012) observou comparando os sensores de óxido de metal, que alguns apresentam uma pequena influência da temperatura, enquanto outros tendem a ter uma grande influência, podendo apresentar uma

correlação positiva ou negativa com essa variável. Além disso, a influência da temperatura do sensor podem mudar ao longo do tempo com o seu uso e mudanças de estações. Ainda cita que os resultados das medições dos sensores o sensor MiCS – 5521 junto à estação uma estação tradicional, se diferem significativamente dos resultados obtidos em laboratório. Para o mesmo modelo de sensor, o autor encontrou correlação muito forte ($r = 0,99$), quando se comparou a resistência de leitura por volume de gás (CO) em laboratório. Porém explica que essa resposta pode se apresentar de forma não linear em determinadas concentrações e diferenças de leituras para o mesmo tipo de sensor. Cita que para as observações de campo, o sensor não se comporta como no experimento de laboratório, por conta das interferências das variáveis já citadas, com recomendação de tratamento dessas variáveis no sistema que receberá os sensores. Apresentou uma análise *outdoor* feita para a *VMM Borgerhout station* na Bélgica, onde os resultados indicaram claramente que os sensores MiCS - 5521 não tendenciavam seguir o sinal de referência obtido em laboratório

4.4 RESULTADOS DAS ANÁLISES DE CAMPO

As análises de campo buscaram demonstrar, nas áreas selecionadas segundo a descrição contida no Capítulo 3, as situações locais de leituras de interações com o CO. Procurou-se avaliar os comportamentos adversos aos obtidos em laboratório, em ambientes que possuem características heterogêneas. Essa proposta se dá no sentido de se obter leituras com variações similares para os dois sensores.

A seguir, é apresentado os resultados das amostragens realizadas em ambientes *indoor* e *outdoor*.

4.4.1 ZONA CENTRAL DE BRASÍLIA

As análises *outdoor* na região central de Brasília, foram realizadas a partir da escolha de pontos randômicos, descritas no Capítulo 3.

Essa seleção gerou oito pontos, amostrados na data de 06/06/2014, durante 5 minutos (segundo a segundo) de coletas de dados em cada localidade.

Como citado por Loreto (2012) e Hasenfrazt *et al.* (2012), o monitoramento da qualidade do ar em ambiente *outdoor* envolve uma preparação prévia para o sistema micro controlado, no sentido de se evitar interferências na leitura. A intenção das análises de campo para o presente trabalho, é entender os fatores de interferência no material de resistência do sensor MiCS – 5521. Com isso, auxiliar em trabalhos futuros com esse modelo de sensor.

O primeiro ponto avaliado foi o da praça da SQS 202 (Figura 64), onde os sensores demonstraram respostas bastante próximas leituras de resistências; Por ser uma região com característica residencial, com reduzido tráfego de automóveis no horário analisado, a resistência não apresentou oscilações consideráveis (Figura 65).

SQS 202	Setor Bancário Sul
	
<p style="text-align: center;">Dados da coleta</p> <ul style="list-style-type: none"> • Data: 06/06/2014 • Hora: 14:15 • Latitude: -15,806538 • Longitude: -47,886937 • Temperatura: 29°C • Umidade: 30% • Sistema de Coordenadas Geográficas • Datum: SIRGAS 2000 • Tipo: <i>Outdoor</i> 	<p style="text-align: center;">Dados da coleta</p> <ul style="list-style-type: none"> • Data: 06/06/2014 • Hora: 14:52 • Latitude: -15,79973 • Longitude: -47,881064 • Temperatura: 29°C • Umidade: 30% • Sistema de Coordenadas Geográficas • Datum: SIRGAS 2000 • Tipo: <i>Outdoor</i>

Figura 64. Localização dos pontos na SQS 202 e Setor Bancário Sul.

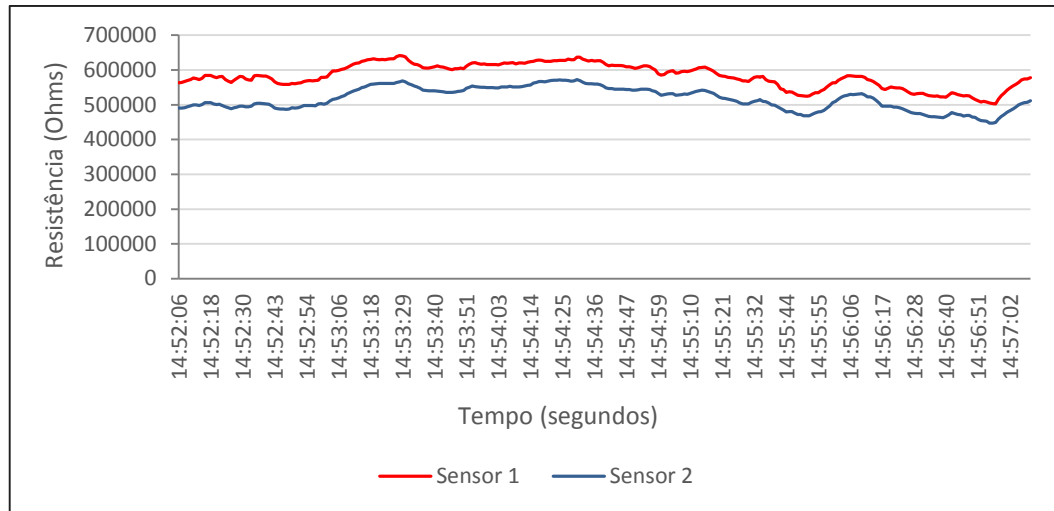


Figura 65. Amostragem na praça da SQS 202.

Em seguida, foi amostrado um ponto de estacionamento do Setor Bancário Sul (Figura 66), que possui tráfego intenso de carros no horário comercial, se caracterizando por ser uma área que concentra atividades de serviços públicos. Porém nesse ponto avaliado, não houveram grandes variações da resistência do sensor, o que se pode comprovar na Figura 68. O possível comportamento desses resultados pode ser atribuído ao horário da análise, visto que é um período aonde não verificou fluxo acentuado de tráfego, sendo percebido esse mesmo comportamento do ponto coletado no Setor de Autarquias Sul (Figura 69 e 70). O que se observou é que parte da área é ocupada por estacionamentos. Durante o período da coleta dos dados, o trânsito apresentava fluxo pequeno de automóveis. O mesmo comportamento foi observado para a via Eixão Sul (Figura 72 e 74), que é considerada de grande fluxo em Brasília.

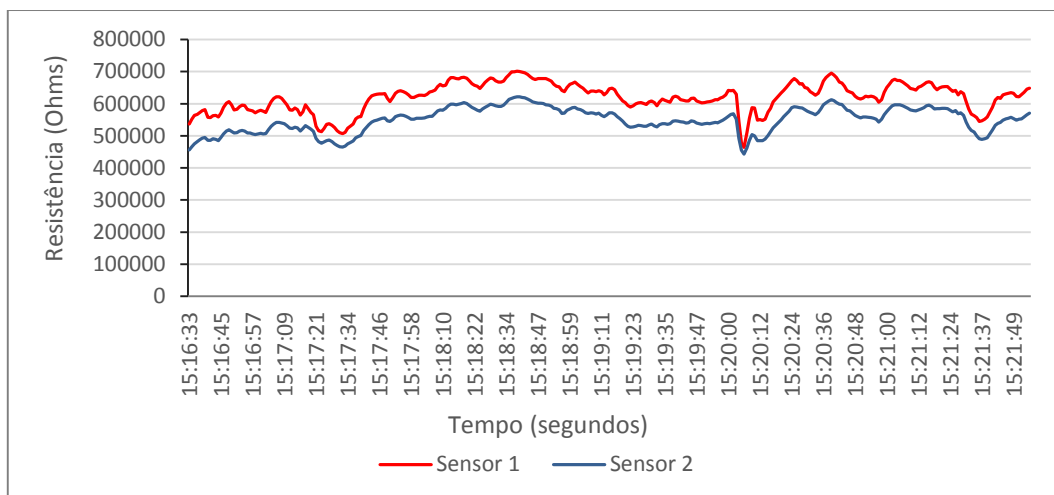


Figura 66. Amostragem no estacionamento do Setor Bancário Sul.



Figura 67. Localização dos pontos no Setor de Autarquias Sul.

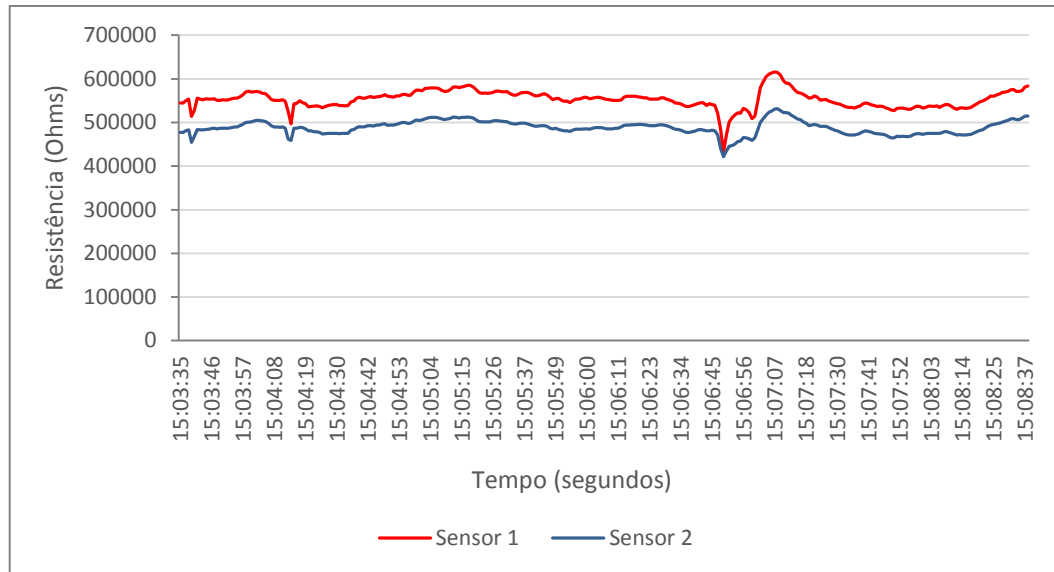


Figura 68. Amostragem no Setor de Autarquias Sul.

Posteriormente, o quarto ponto de amostragem foi coletado no Setor Comercial Sul, conhecido por estar em uma região com elevada circulação de automóveis, localizada em uma área comercial e de serviços. Segundo relatórios de qualidade do ar das estações fixas (SEMARH, 2014), essa região apresentou índices bons para PTS e moderados a insatisfatórios de fumaça (Janeiro/2014 a Julho/2014), indicando que é uma área que necessita de um monitoramento mais apurado de gases derivados da queima de combustível fóssil. O ponto 1 (Figura 69) está localizado próximo a estação de monitoramento do IBRAM. Averiguou-se que esse ponto não obteve grandes variações da resistência do sensor (Figura 69 e 70). Já o ponto 2 (Figura 69 e 71), situado no estacionamento frontal do setor, como referência a via W3 sul, apresentou oscilações significativas em um dos sensores (sensor 2). Justifica-se pelo intenso movimento de automóveis, constatado na Figura 69.



Setor Comercial Sul (Ponto 1)	Setor Comercial Sul (Ponto 2)
	
<p style="text-align: center;">Dados da coleta</p> <ul style="list-style-type: none"> • Data: 06/06/2014 • Hora: 15:35 • Latitude: -15,798215 • Longitude: -47,88952 • Temperatura: 29°C • Umidade: 33% • Sistema de Coordenadas Geográficas • Datum: SIRGAS 2000 • Tipo: <i>Outdoor</i> 	<p style="text-align: center;">Dados da coleta</p> <ul style="list-style-type: none"> • Data: 06/06/2014 • Hora: 15:47 • Latitude: -15,796687 • Longitude: -47,89093 • Temperatura: 28°C • Umidade: 33% • Sistema de Coordenadas Geográficas • Datum: SIRGAS 2000 • Tipo: <i>Outdoor</i>

Figura 69. Localização dos pontos no Setor Comercial Sul.

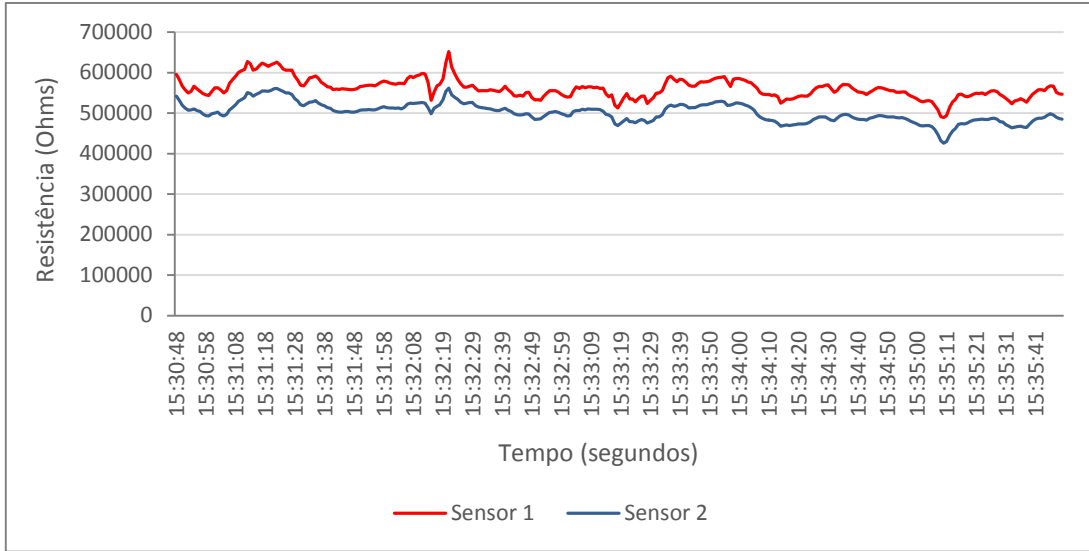


Figura 70. Amostragem no Setor Comercial Sul (Ponto 1).

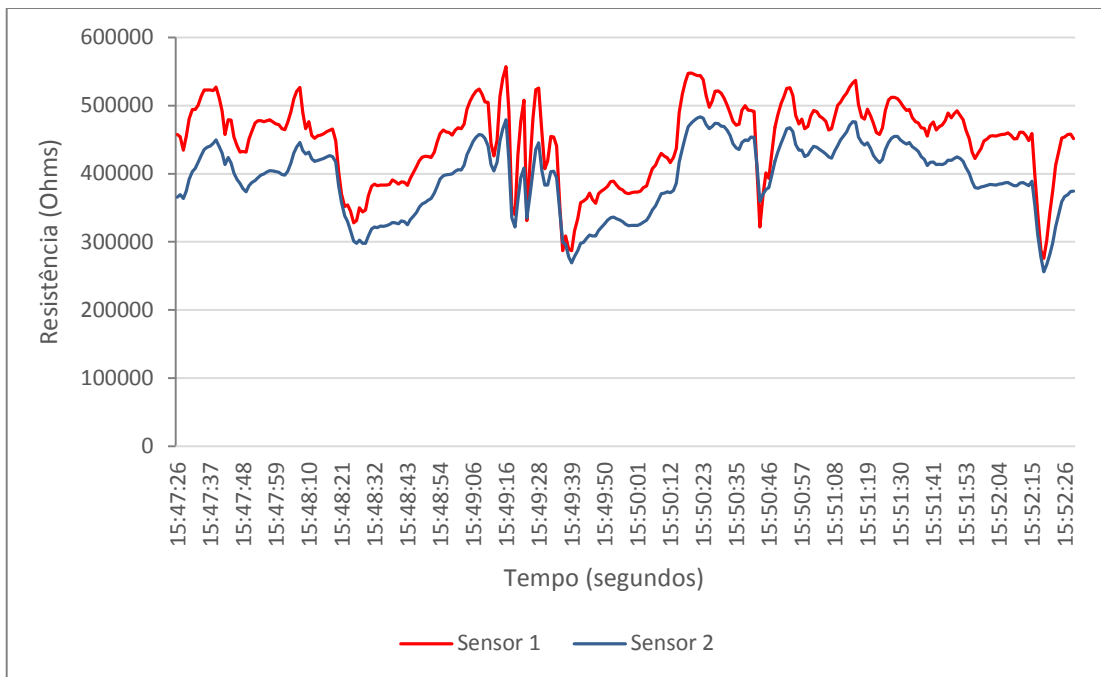


Figura 71. Amostragem no Setor Comercial Sul (Ponto 2).

Setor Hoteleiro Sul	Eixão Sul
	
<p style="text-align: center;">Dados da coleta</p> <ul style="list-style-type: none"> • Data: 06/06/2014 • Hora: 15:56 • Latitude: -15,793749 • Longitude: -47,888681 • Temperatura: 28°C • Umidade: 33% • Sistema de Coordenadas Geográficas • Datum: SIRGAS 2000 • Tipo: <i>Outdoor</i> 	<p style="text-align: center;">Dados da coleta</p> <ul style="list-style-type: none"> • Data: 06/06/2014 • Hora: 16:37 • Latitude: -15,806479 • Longitude: -47,89026 • Temperatura: 28°C • Umidade: 37% • Sistema de Coordenadas Geográficas • Datum: SIRGAS 2000 • Tipo: <i>Outdoor</i>

Figura 72. Localização dos pontos no Setor Hoteleiro Sul e Eixão Sul.

Variações consideráveis ocorreram no Setor Hoteleiro Sul (Figura 72), em que o ponto analisado está próximo de uma das principais vias da área central de Brasília. Esse setor apresenta características de comércio de turismo, porém está ao lado da via S1 – lado sul. Nas coletas realizadas, apresentou-se oscilações nas resistências dos sensores (Figura 73) acima das encontradas no Setor Comercial Sul (ponto 1 – Figura 70), considerada área vizinha a esse ponto. Pode-se atribuir os valores encontrados a essa via ser responsável por dar vazão ao fluxo de trânsito para a Esplanada dos Ministérios, sendo cortada pelo eixo rodoviário, que quando comparada a via W3 sul (SCS), tem maior número de faixas e conseqüentemente, aporta maior volume de automóveis.

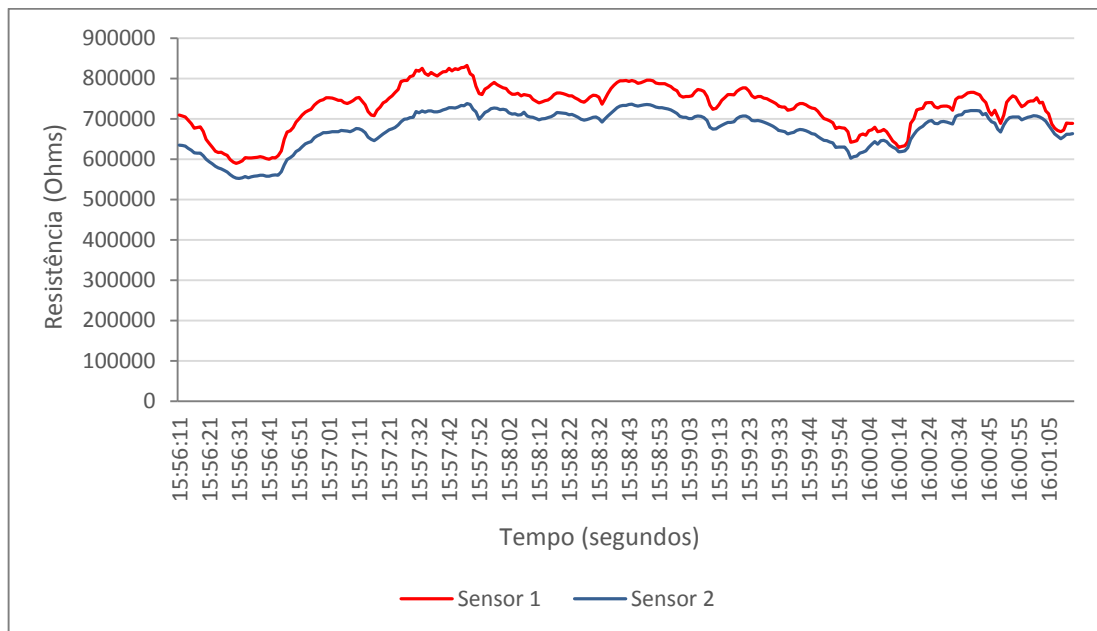


Figura 73. Amostragem no Setor Hoteleiro Sul.

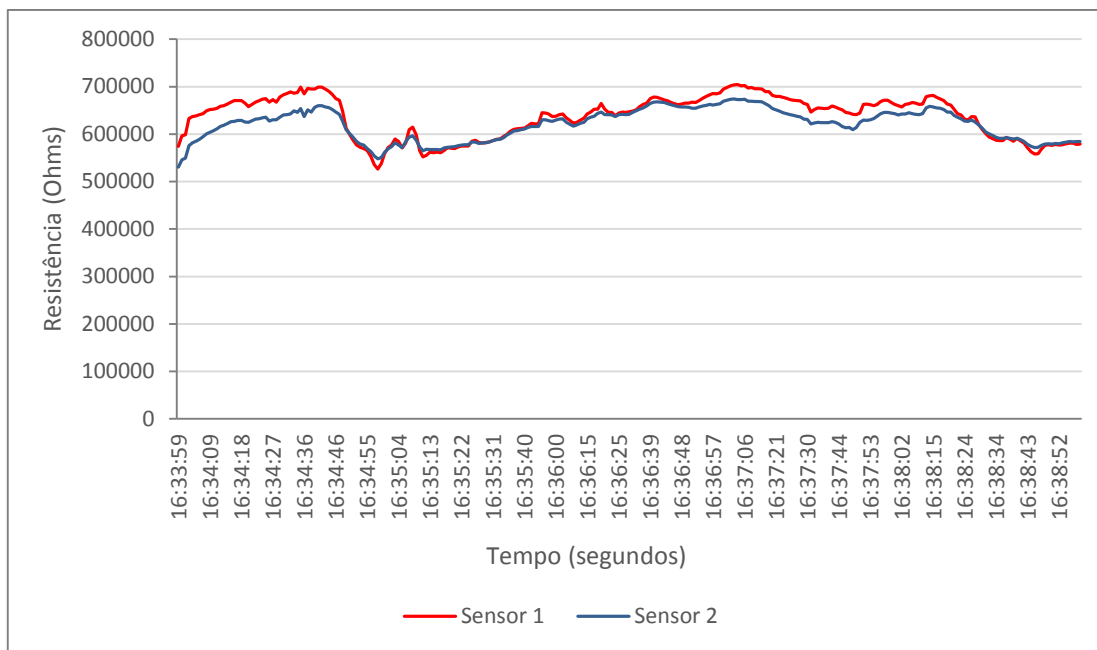


Figura 74. Amostragem no Eixão Sul.

Segundo o relatório de monitoramento da qualidade do ar da Semarh (2014), a rodoviária de Brasília é o ponto crítico de emissões na região central de Brasília. A Figura 75 ilustra o ponto de coleta para essa região, no estacionamento da plataforma superior. Em alguns momentos, os valores de oscilações das resistências dos sensores (Figura 76) foram quase quatro vezes maior que a apresentada no Setor Hoteleiro Sul, região próxima ao eixo rodoviário. A frota que circula nessa região é diversificada, tendo automóveis de grande porte (ônibus coletivo) e, por estar localizada no eixo rodoviário, faz a ligação entre Asa Sul e Asa Norte em um sentido, Esplanada dos Ministérios no sentido via S1 – lado sul e N1 – lado norte.



Figura 75. Localização do ponto na plataforma superior da Rodoviária de Brasília.

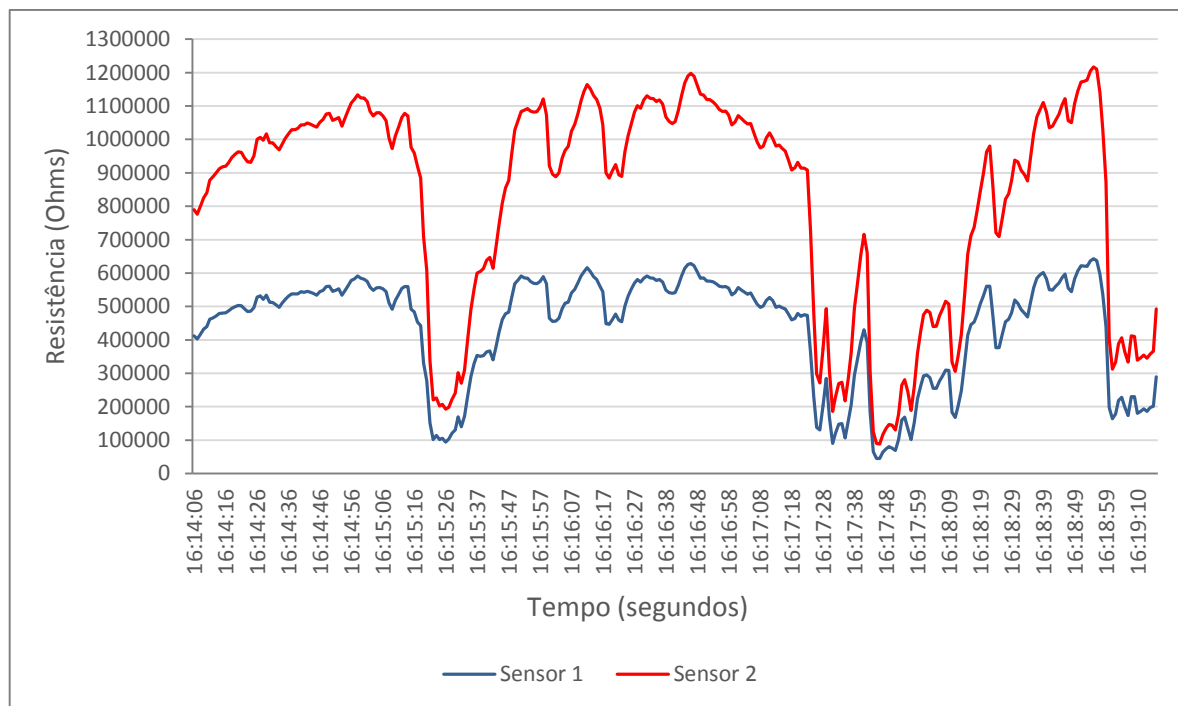


Figura 76. Amostragem na plataforma superior da Rodoviária de Brasília.

4.4.2 ESTÁDIO NACIONAL DE BRASÍLIA

Observou-se no estacionamento do estádio a movimentação de carros autorizados pelo evento (Figura 77). Esse momento é ilustrado na Figura 78, em que se visualiza a variação das resistências lidas pelos sensores. Outras fontes com potencial de interferência não foram percebidas nessa localidade.

A amostragem nas proximidades da portaria 1 (Figura 79) apresentaram tendência a baixa oscilação da resistência, demonstrando baixa dispersão do gás.

Estacionamento – Estádio Nacional de Brasília	Portaria 1 – Estádio Nacional de Brasília
	
<p style="text-align: center;">Dados da coleta</p> <ul style="list-style-type: none"> • Data: 15/06/2014 • Hora: 13:27 • Latitude: -15,784852 • Longitude: -47,901658 • Temperatura: 22°C • Umidade: 40% • Sistema de Coordenadas Geográficas • Datum: SIRGAS 2000 • Tipo: <i>Outdoor</i> 	<p style="text-align: center;">Dados da coleta</p> <ul style="list-style-type: none"> • Data: 15/06/2014 • Hora: 14:14 • Latitude: -15,785044 • Longitude: -47,902836 • Temperatura: 24°C • Umidade: 40% • Sistema de Coordenadas Geográficas • Datum: SIRGAS 2000 • Tipo: <i>Outdoor</i>

Figura 77. Localização dos pontos na Portaria 1 e Estacionamento do Estádio Nacional de Brasília.

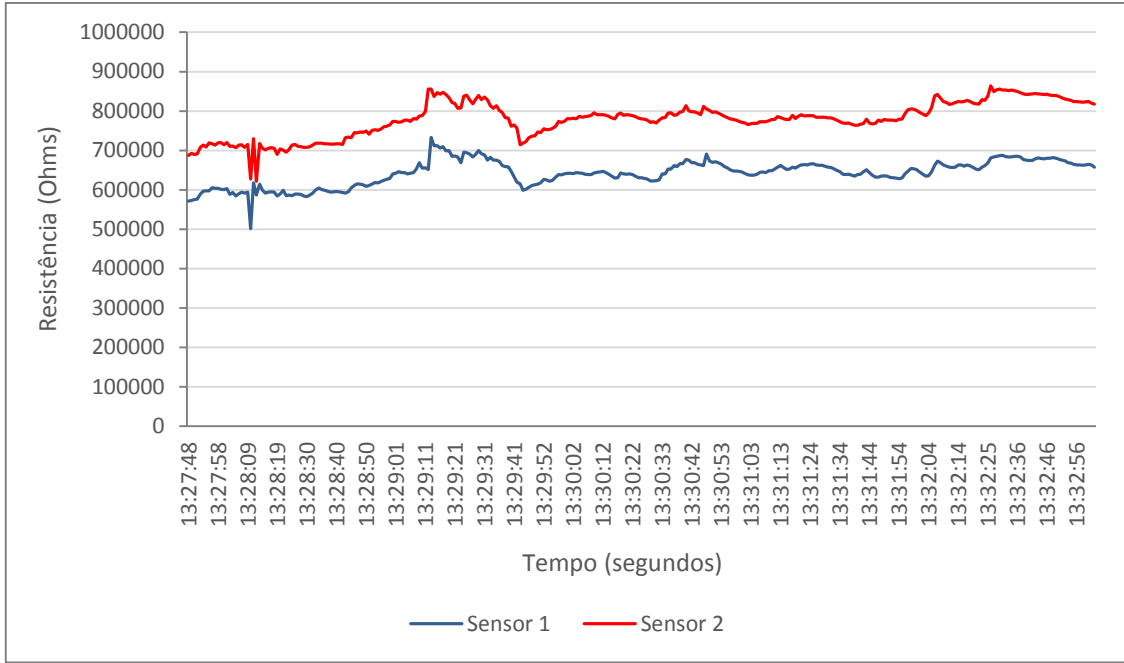


Figura 78. Amostragem no estacionamento do Estádio Nacional de Brasília.

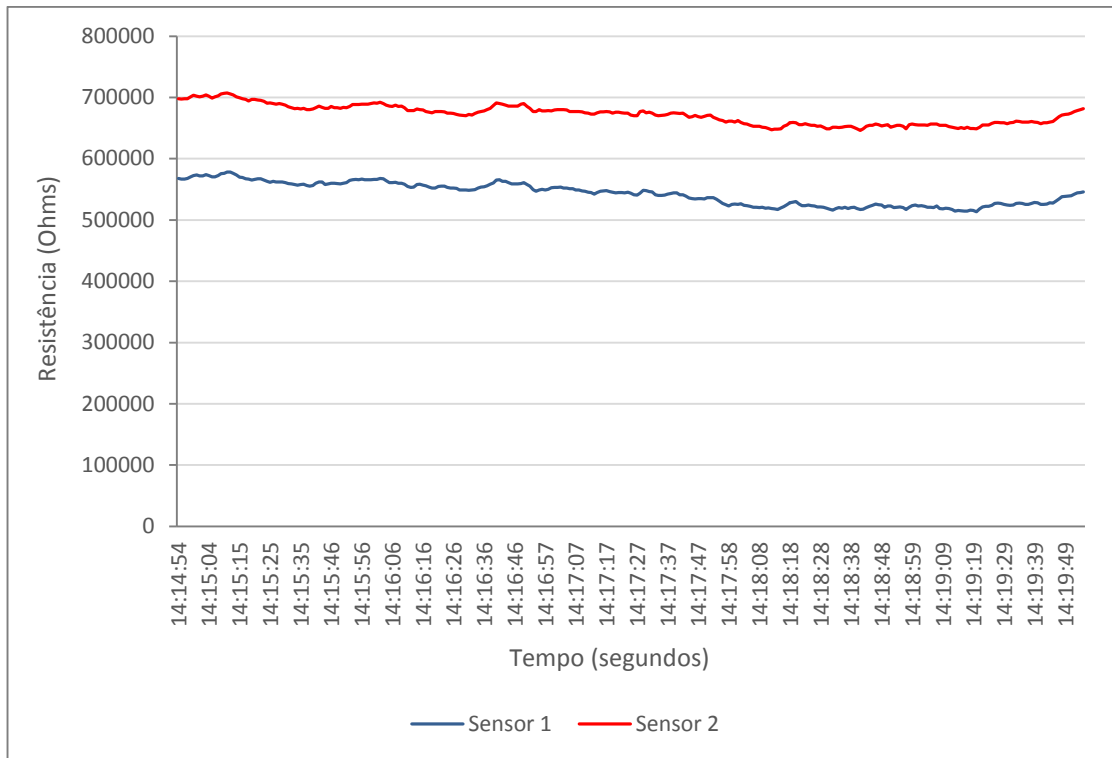


Figura 79. Amostragem na Portaria 1 do Estádio Nacional de Brasília.

Para as portarias 2 e 3 (Figura 80), verificou-se a presença de geradores de energia das redes de televisão presentes no evento, movidas a óleo. Nesses pontos, as possíveis interferências são demonstradas nas Figura 81 e Figura 82.

Portaria 2 – Estádio Nacional de Brasília	Portaria 3 – Estádio Nacional de Brasília
	
<p style="text-align: center;">Dados da coleta</p> <ul style="list-style-type: none"> • Data: 15/06/2014 • Hora: 13:42 • Latitude: -15,78619 • Longitude: -47,898833 • Temperatura: 24°C • Umidade: 40% • Sistema de Coordenadas Geográficas • Datum: SIRGAS 2000 • Tipo: <i>Outdoor</i> 	<p style="text-align: center;">Dados da coleta</p> <ul style="list-style-type: none"> • Data: 15/06/2014 • Hora: 13:55 • Latitude: -15,785477 • Longitude: -47,897452 • Temperatura: 24°C • Umidade: 40% • Sistema de Coordenadas Geográficas • Datum: SIRGAS 2000 • Tipo: <i>Outdoor</i>

Figura 80. Localização dos pontos da Portaria 2 e 3 do Estádio Nacional de Brasília.

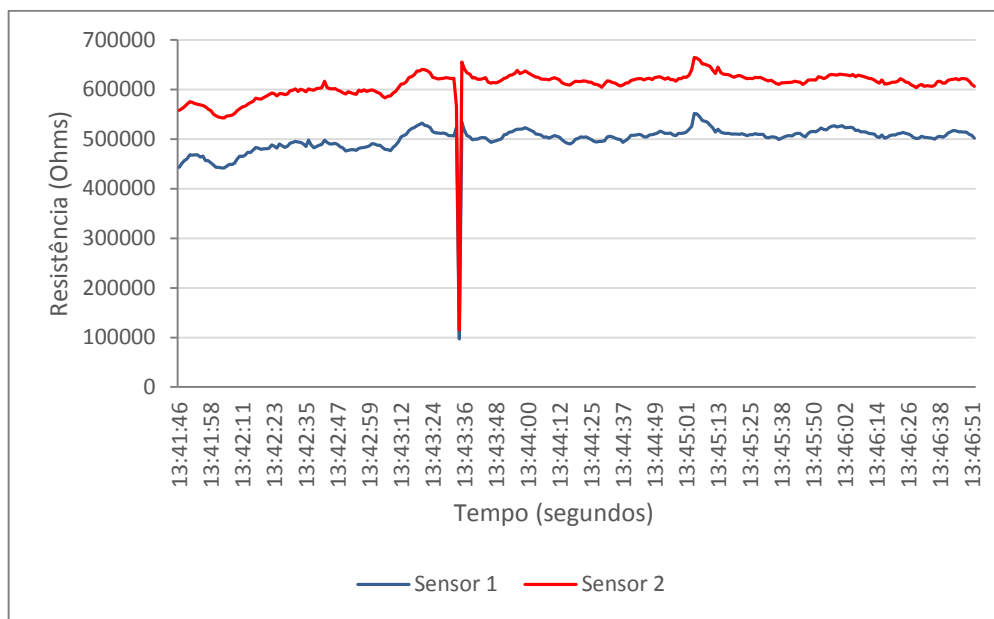


Figura 81. Amostragem na Portaria 2 do Estádio Nacional de Brasília.

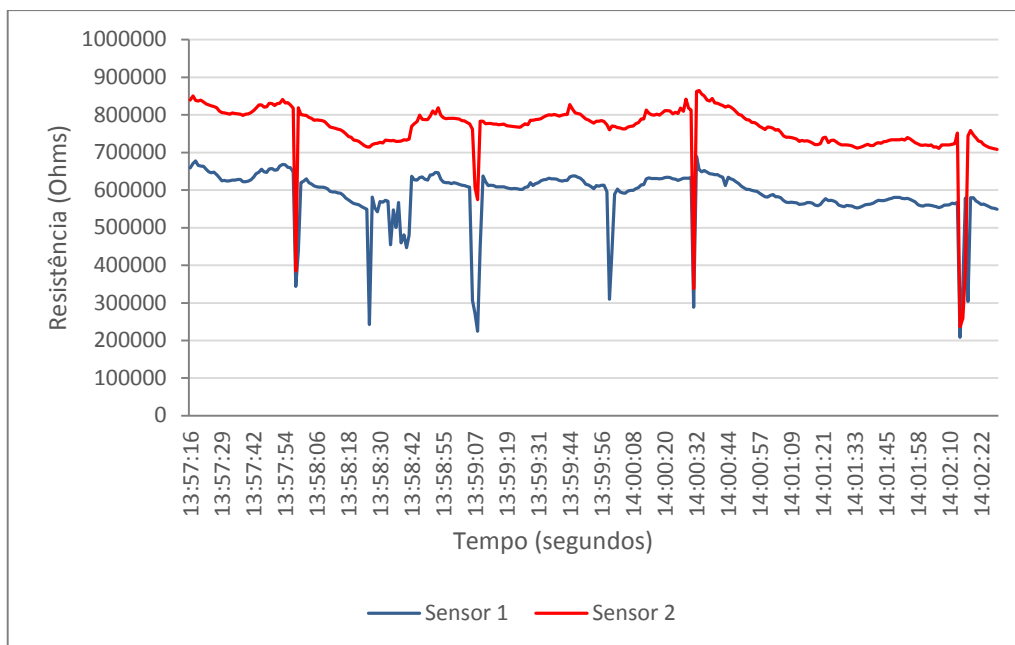


Figura 82. Amostragem na Portaria 3 do Estádio Nacional de Brasília.

4.4.3 CAMPUS DARCY RIBEIRO

4.4.3.1 ANÁLISES *OUTDOOR*

As análises *outdoor* nas proximidades do *campus* Darcy Ribeiro – Universidade de Brasília, demonstraram o ponto da via L4 Norte – CESPE (Figura 83 e Figura 84) como sendo o único em que houve variações altas nas oscilações das resistências dos sensores. Essa via é conhecida pelo seu fluxo de tráfego intenso, já que dá vazão para a UnB, Setor de Clubes Norte, autarquias (IBAMA, Correios, etc.) e se ligando a outras vias como a L3 Norte e L2 Norte.

A via L3 Norte (Figura 83 e 85) não demonstrou variações ao longo do levantamento e percebeu-se baixo fluxo de tráfego no horário do levantamento.

L4 Norte – CESPE	L3 Norte – FINATEC
	
<p style="text-align: center;">Dados da coleta</p> <ul style="list-style-type: none"> • Data: 13/06/2014 • Hora: 13:09 • Latitude: -15,771652 • Longitude: -47,863962 • Temperatura: 22°C • Umidade: 60% • Sistema de Coordenadas Geográficas • Datum: SIRGAS 2000 • Tipo: <i>Outdoor</i> 	<p style="text-align: center;">Dados da coleta</p> <ul style="list-style-type: none"> • Data: 13/06/2014 • Hora: 13:23 • Latitude: -15,77435 • Longitude: -47,871684 • Temperatura: 23°C • Umidade: 57% • Sistema de Coordenadas Geográficas • Datum: SIRGAS 2000 • Tipo: <i>Outdoor</i>

Figura 83. Localização dos pontos nas vias L4 Norte (CESPE) e L3 Norte (Finatec).

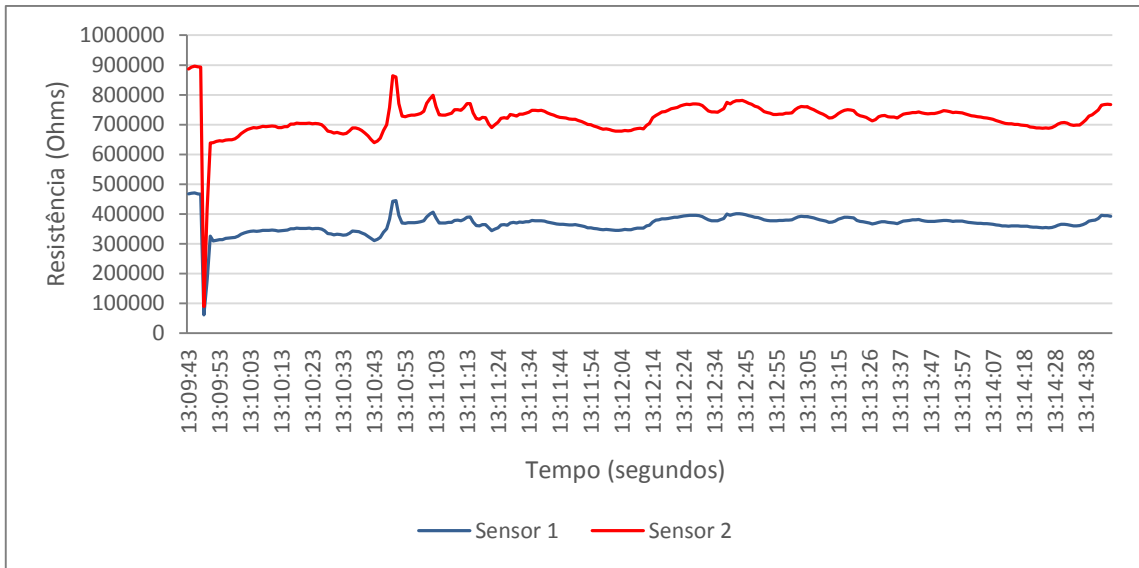


Figura 84. Amostragem na via L4 Norte (CESPE).

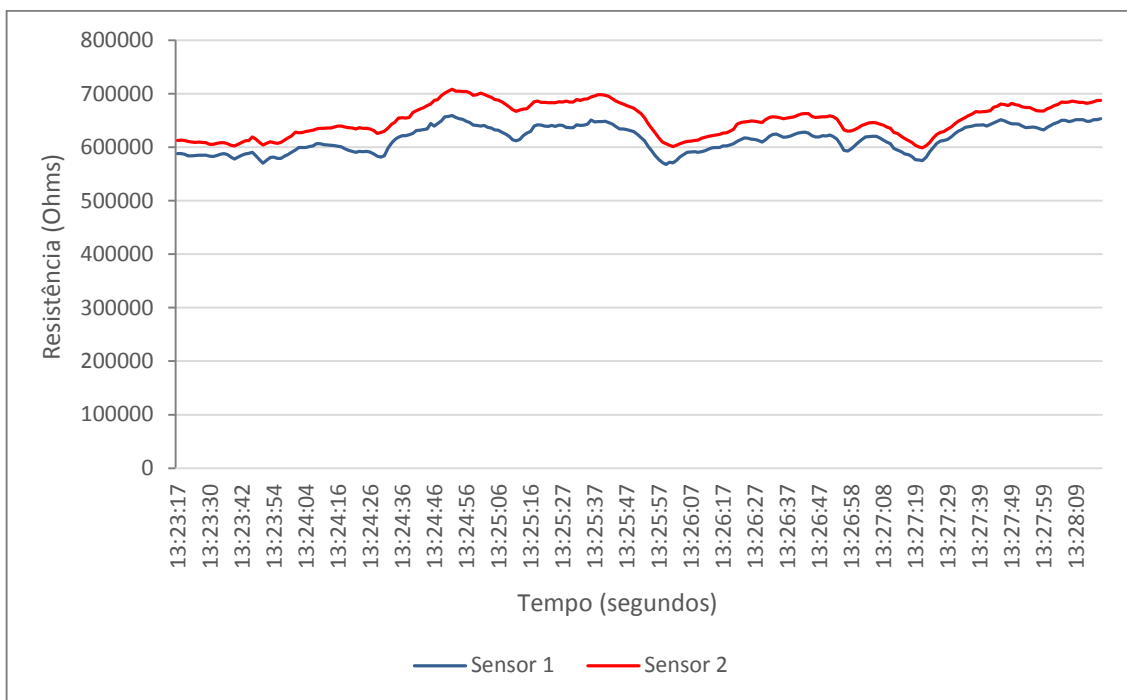


Figura 85. Amostragem na via L3 Norte (FINATEC).

O estacionamento do ICC Ala Sul na UnB (Figura 86 e 87) não apresentou variações consideráveis nas oscilações das resistências dos sensores, apesar de ser considerado um local de alta rotatividade de veículos. A L2 Norte, nas proximidades do Centro de Ensino da Asa Norte – CEAN (Figuras 86 e 88), tem vazão intensa de tráfego, por ser uma região escolar,

tendo como ponto de ligação nessa localidade, a L3 Norte (*Campus Darcy Ribeiro*). Porém, no ponto onde ocorreu a medição, não se constatou variações consideráveis do gás (CO).


Estacionamento ICC Ala Sul – UnB	L2 Norte – CEAN
	
<p style="text-align: center;">Dados da coleta</p> <ul style="list-style-type: none"> • Data: 13/06/2014 • Hora: 13:33 • Latitude: -15,766877 • Longitude: -47,875374 • Temperatura: 23°C • Umidade: 57% • Sistema de Coordenadas Geográficas • Datum: SIRGAS 2000 • Tipo: <i>Outdoor</i> 	<p style="text-align: center;">Dados da coleta</p> <ul style="list-style-type: none"> • Data: 13/06/2014 • Hora: 13:42 • Latitude: -15,766234 • Longitude: -47,868726 • Temperatura: 23°C • Umidade: 57% • Sistema de Coordenadas Geográficas • Datum: SIRGAS 2000 • Tipo: <i>Outdoor</i>

Figura 86. Localização dos pontos no estacionamento do ICC Ala Sul e na via L2 Norte (CEAN).

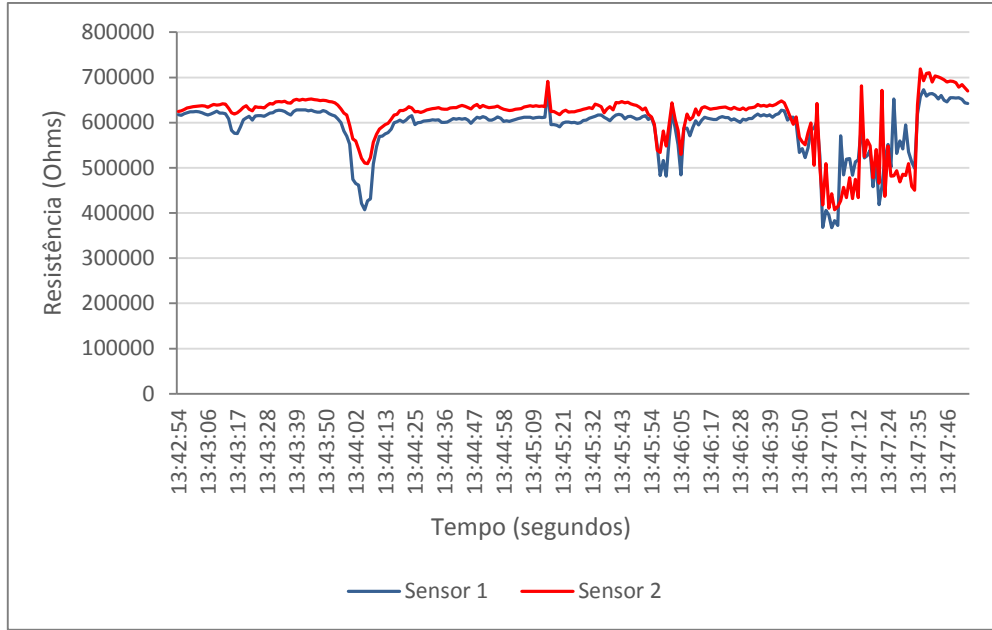


Figura 87. Amostragem no estacionamento do ICC Ala Sul.

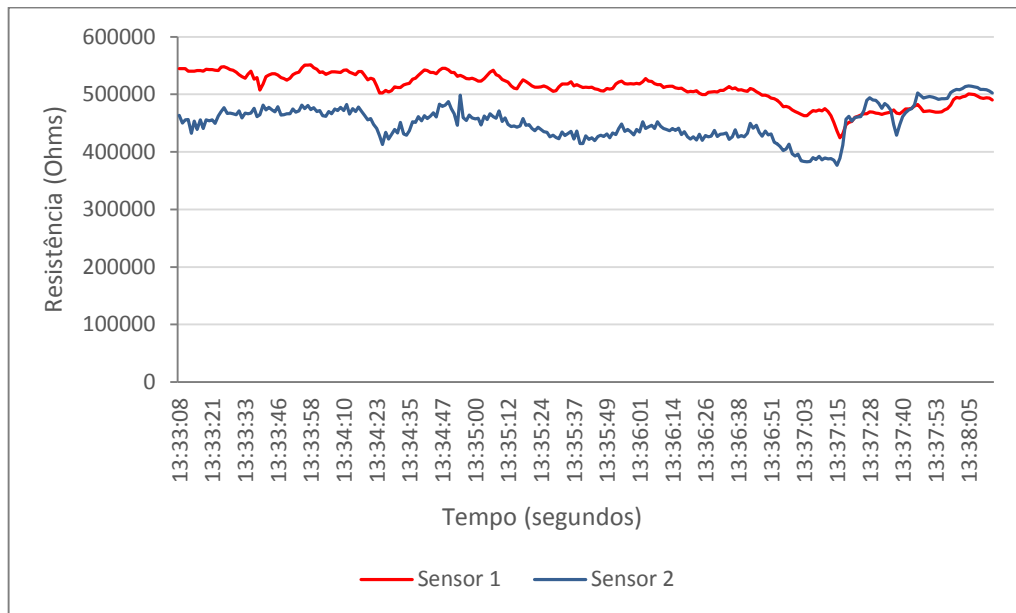


Figura 88. Amostragem na via L2 Norte (CEAN).

4.4.3.2 ANÁLISES INDOOR

Nestas análises, procurou-se traçar três perfis ao longo de toda a extensão do “minhocão” (ICC Ala Central, ICC Ala Sul e ICC Ala Norte).

Na Ala Central, o levantamento foi realizado no IG/UnB e posteriormente, na garagem do departamento (Figura 89).

Boechat e Rios (2011) descrevem que os COVs (Compostos Orgânicos Voláteis) também podem ter origem em inúmeras fontes residenciais e comerciais, incluindo materiais de construção, adesivos, tintas, artigos para limpeza, fumaça de cigarro etc. Muitas vezes os níveis de COVs no ar de interiores são maiores que os níveis do ar exterior, indicando uma má qualidade do sistema de ventilação ou um grande número de fontes poluentes internas.

O sensor MiCS – 5521 tem sensibilidade para detecção de COVs, porém, os dois ambientes não apresentaram variações de gases nesses locais (Figuras 90 e 91).

ICC Ala Central – Instituto de Geociências	ICC Ala Central – Garagem (IG)
	
<p style="text-align: center;">Dados da coleta</p> <ul style="list-style-type: none"> • Data: 13/06/2014 • Hora: 15:12 • Latitude: -15,763647 • Longitude: -47,869265 • Temperatura: 24°C • Umidade: 52% • Sistema de Coordenadas Geográficas • Datum: SIRGAS 2000 • Tipo: <i>Indoor</i> 	<p style="text-align: center;">Dados da coleta</p> <ul style="list-style-type: none"> • Data: 13/06/2014 • Hora: 15:19 • Latitude: -15,763615 • Longitude: -47,869299 • Temperatura: 24°C • Umidade: 52% • Sistema de Coordenadas Geográficas • Datum: SIRGAS 2000 • Tipo: <i>Indoor</i>

Figura 89. Localização dos pontos no ICC Ala Central (Garagem IG) e ICC Ala Central (IG).

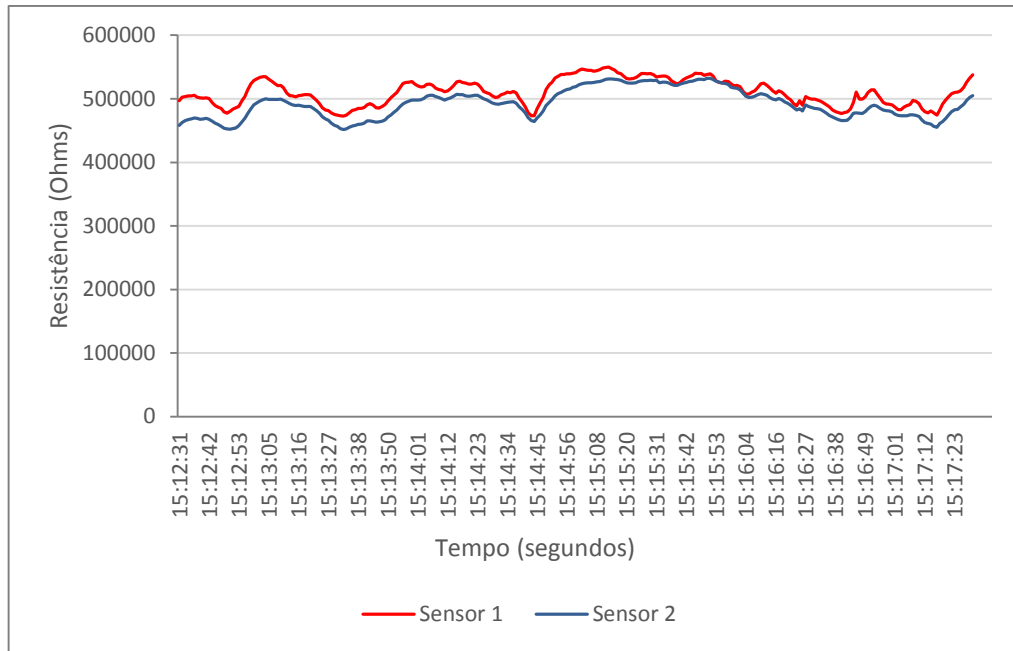


Figura 90. Amostragem no ICC Ala Central – Instituto de Geociências.

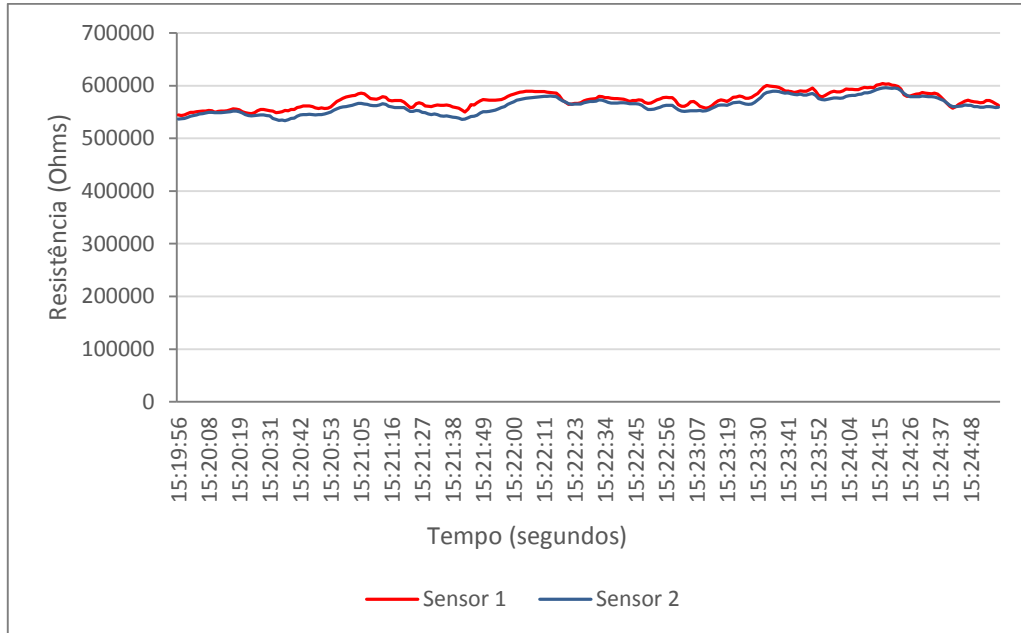


Figura 91. Amostragem no ICC Ala Central – Garagem (IG).

As variações encontradas no ICC Ala Sul, nas proximidades do CA de Psicologia e garagem (Figuras 92, 93 e 94), também não apresentaram grandes oscilações das resistências dos sensores, analisando que na garagem, a leitura se manteve praticamente estável e nas imediações do CA, houve decaimento na leitura. Todavia, quando há movimentação de veículos na via interna da garagem, essa pode vir a sofrer alterações.

ICC Ala Sul – CA de Psicologia	ICC Ala Sul – Garagem
	
<p style="text-align: center;">Dados da coleta</p> <ul style="list-style-type: none"> • Data: 13/06/2014 • Hora: 15:50 • Latitude: -15,765163 • Longitude: -47,867345 • Temperatura: 24°C • Umidade: 52% • Sistema de Coordenadas Geográficas • Datum: SIRGAS 2000 • Tipo: <i>Indoor</i> 	<p style="text-align: center;">Dados da coleta</p> <ul style="list-style-type: none"> • Data: 13/06/2014 • Hora: 15:57 • Latitude: -15,765128 • Longitude: -47,867382 • Temperatura: 24°C • Umidade: 52% • Sistema de Coordenadas Geográficas • Datum: SIRGAS 2000 • Tipo: <i>Indoor</i>

Figura 92. Localização dos pontos no ICC Ala Sul (CA de Psicologia) e Garagem.

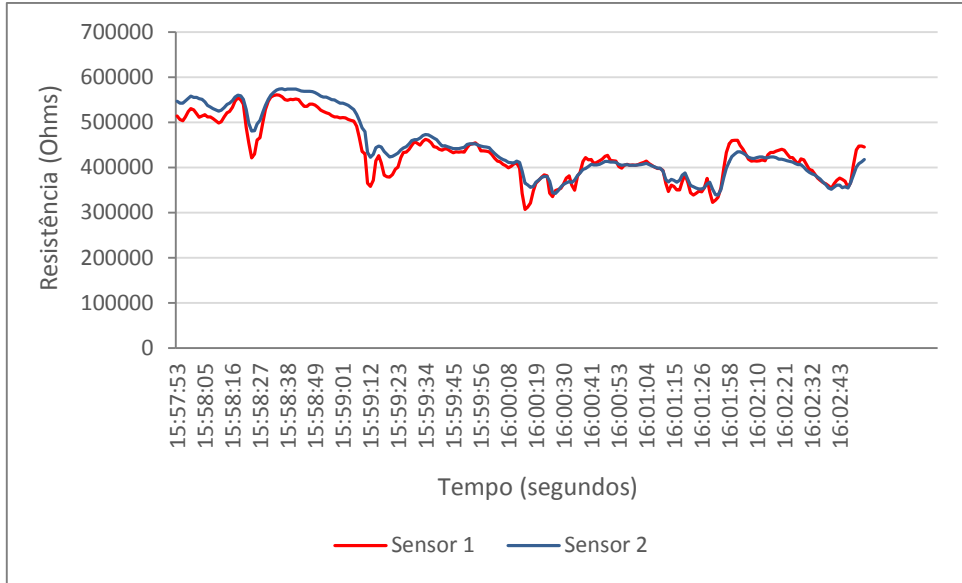


Figura 93. Amostragem no ICC Ala Sul (Garagem).

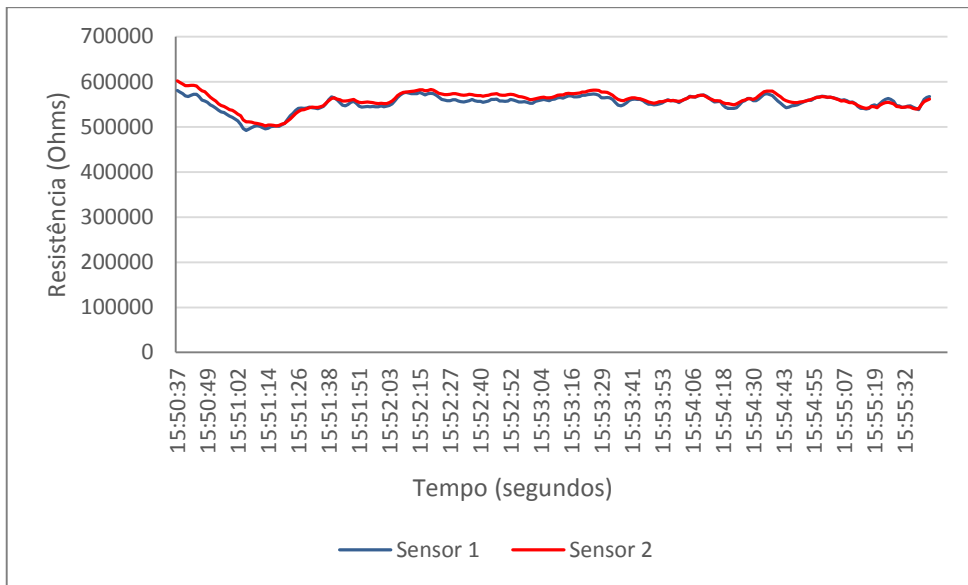


Figura 94. Amostragem no ICC Ala Sul (CA de Psicologia).

A mesma situação de ausência de variação significativa de gases ocorreu nos pontos do ICC Ala Norte (Figura 95).

Ambas as localidades (Figuras 96 e 97), se mantiveram relativamente constantes ao longo do tempo da medição, não apresentando fontes de emissões críticas próxima desses pontos.

ICC Ala Norte – FAC	Ala Norte – Garagem (FAU)
	
<p style="text-align: center;">Dados da coleta</p> <ul style="list-style-type: none"> • Data: 13/06/2014 • Hora: 15:30 • Latitude: -15,761008 • Longitude: -47,870344 • Temperatura: 24°C • Umidade: 52% • Sistema de Coordenadas Geográficas • Datum: SIRGAS 2000 • Tipo: <i>Indoor</i> 	<p style="text-align: center;">Dados da coleta</p> <ul style="list-style-type: none"> • Data: 13/06/2014 • Hora: 15:37 • Latitude: -15,761194 • Longitude: -47,87024 • Temperatura: 24°C • Umidade: 52% • Sistema de Coordenadas Geográficas • Datum: SIRGAS 2000 • Tipo: <i>Indoor</i>

Figura 95. Localização dos pontos no ICC Ala Norte (FAC) e Garagem (FAU).

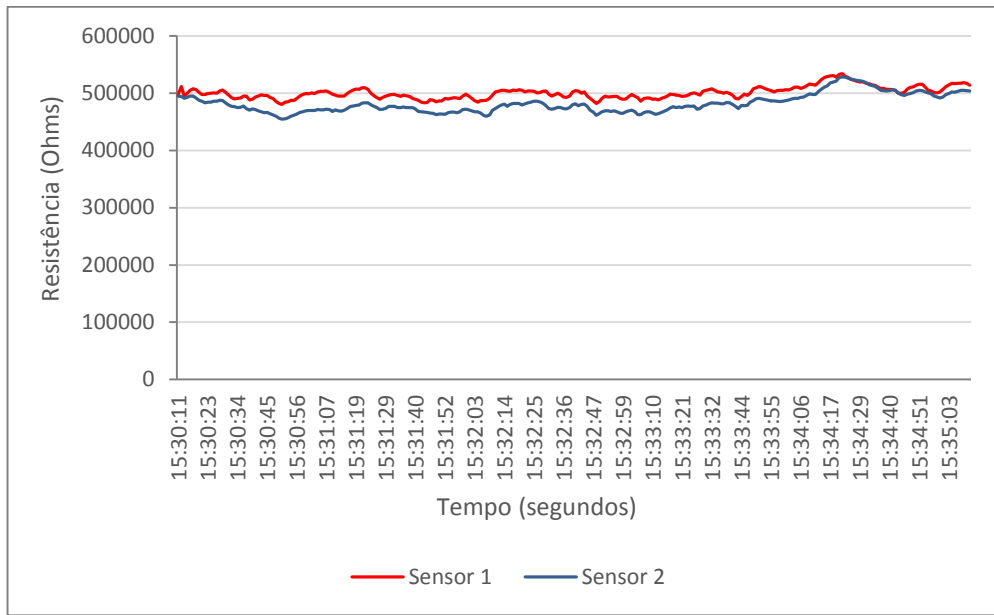


Figura 96. Amostragem no ICC Ala Norte (FAC).

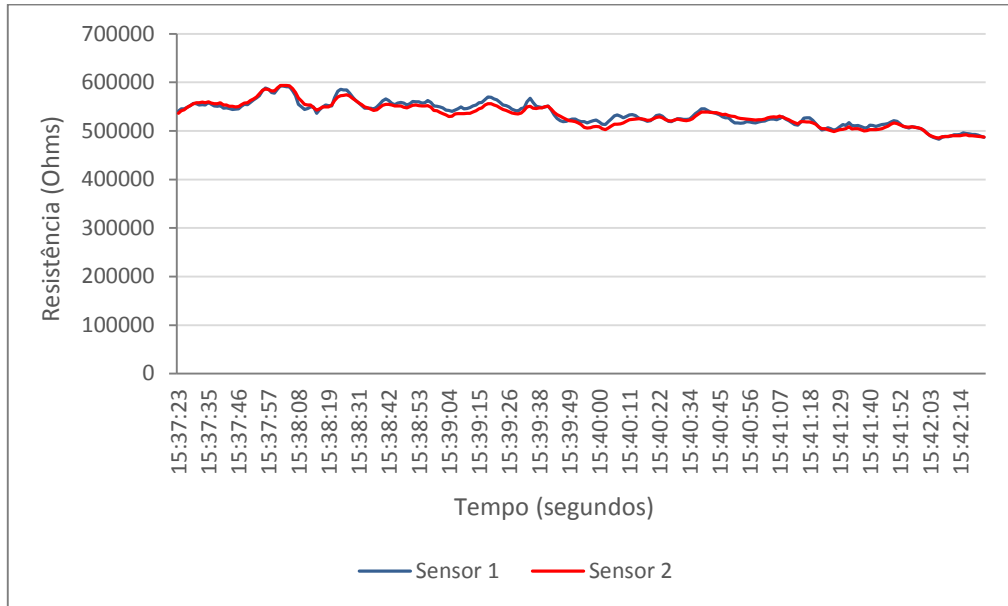


Figura 97. Amostragem no ICC Ala Norte – Garagem (FAU).

4.5 RESULTADOS DO WEBGIS (PAINEL)

Os resultados analisados nos levantamentos *indoor* e *outdoor* foram geoespacializados no sentido de se disponibilizar os dados em um formato de painel *online* (*WebGIS*).

Nesse sentido, foram configuradas ferramentas (*widgets*) para a interação com as informações disponibilizadas.

A Figura 98 ilustra o *widget* de desenho, que permite aos usuários finais a possibilidade de desenhar gráficos e texto simples para a visualização no mapa.

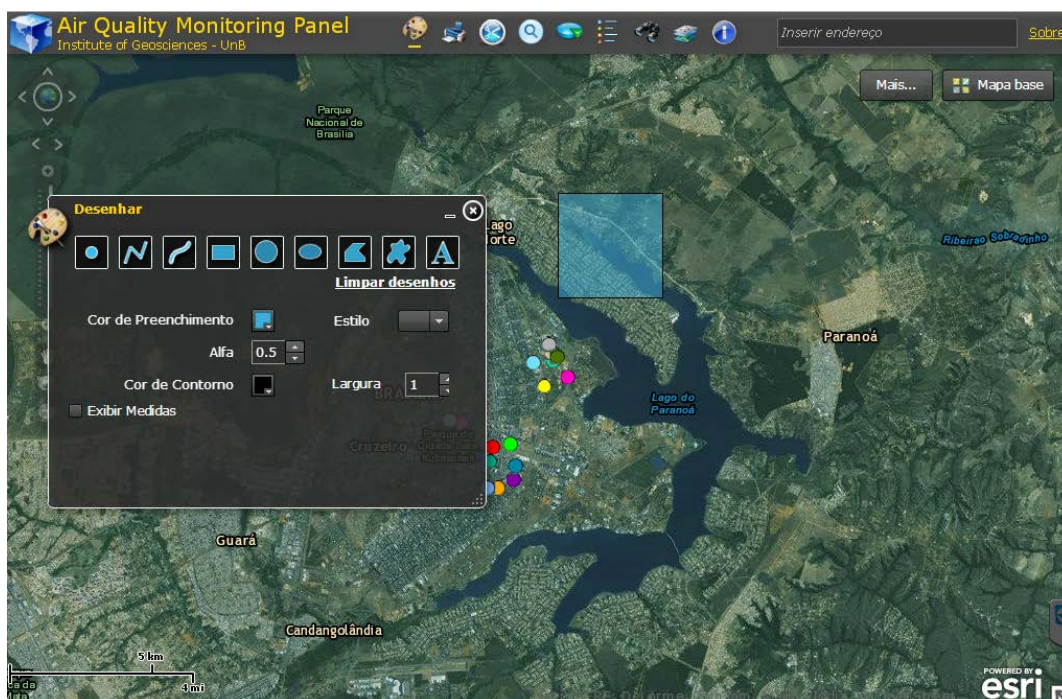


Figura 98. Tela do painel com a ferramenta de desenho.

Foi implementado o *widget* de impressão (Figura 99), que trabalha com a classe *PrintTask*, gerando uma versão de serviço *ExportWebMap*. Esta tarefa pode ser configurada com modelos de *layout* personalizados, podendo ser exportado nos formatos como PDF, PNG e SVG.

A Figura 100 apresenta o *widget* de consulta que permite aos usuários finais consultarem informações por meio da execução de uma consulta predefinida. A nível do usuário final, a execução da consulta é simples e é realizada com um único clique de botão, trabalhando em uma única camada por consulta.

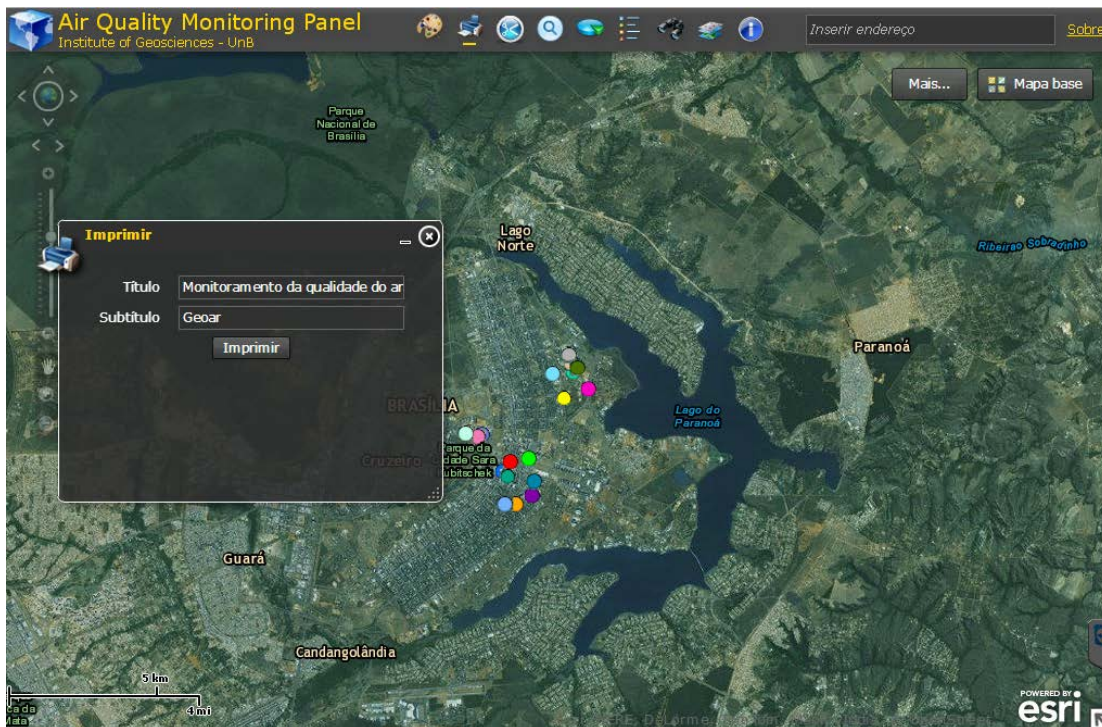


Figura 99. Tela do painel com a ferramenta de impressão.

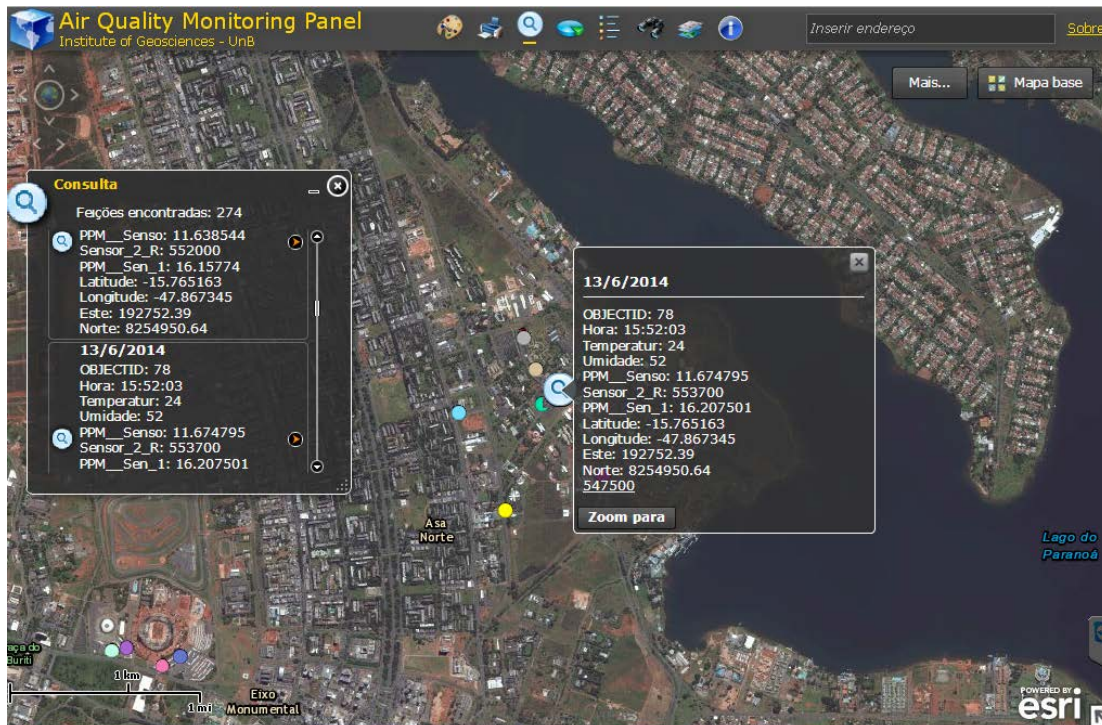


Figura 100. Tela do painel com a ferramenta de consulta.

Para a análise gráfica das variações da resistência (Ohms) e horário, foi implementado o *widget* de gráficos, afim de que se tenha as comparações em cada ponto coletado (Figuras 101 e 102).

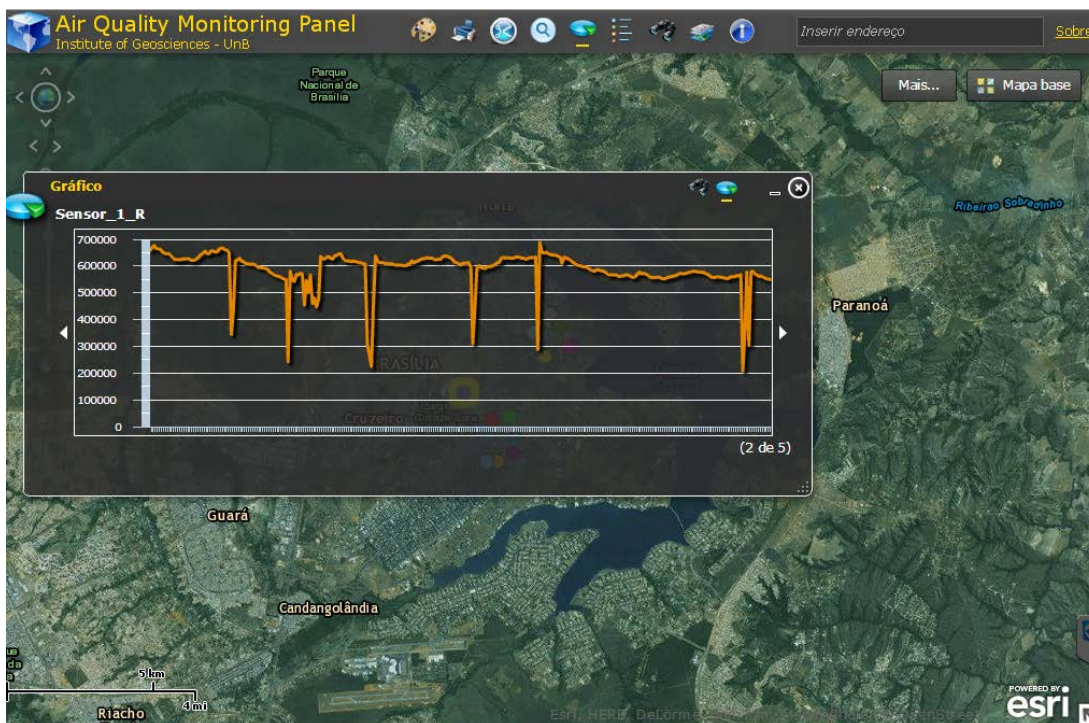


Figura 101. Tela do painel com a ferramenta de gráficos (linha).

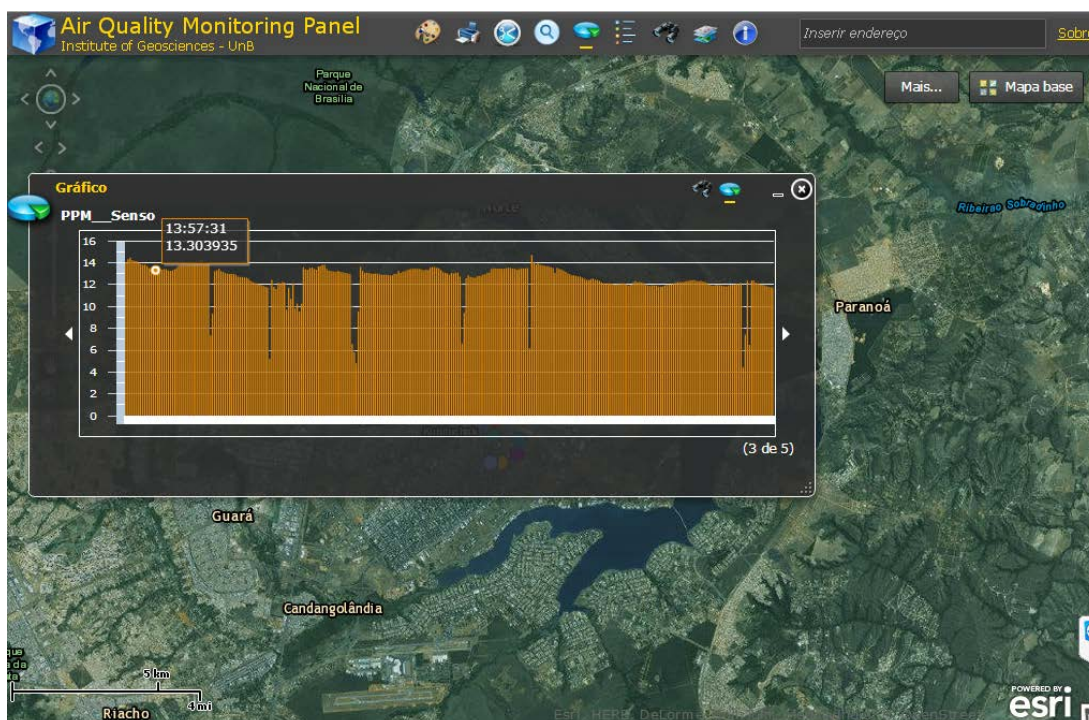


Figura 102. Tela do painel com a ferramenta de gráficos (coluna).

O *widget* de legenda foi configurado para que tenha um comportamento dinâmico, atualizando automaticamente quando a visibilidade de uma camada ou subcamada sofre alterações. Simbologias diversas podem ser configuradas para a representação das informações a serem disponibilizadas no painel (Figura 103).

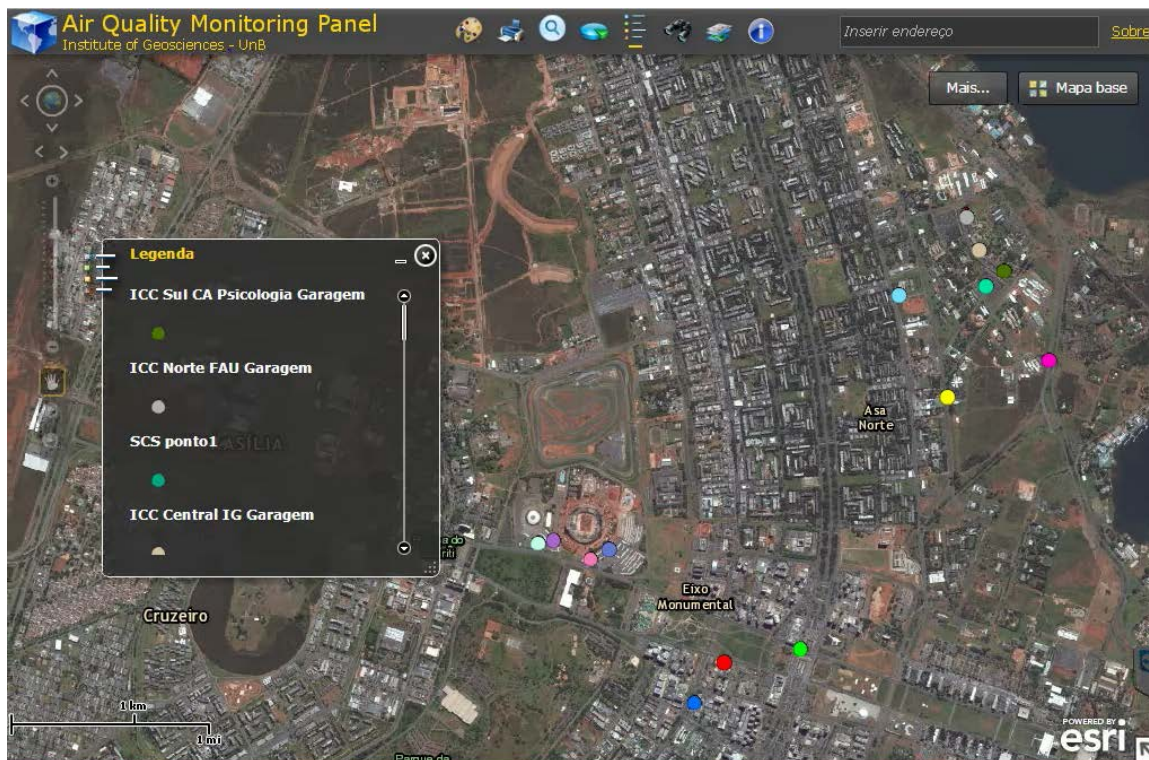


Figura 103. Tela do painel com a ferramenta de legenda dinâmica.

O *widget* de pesquisa permite ao usuário buscar recursos em uma camada específica, fornecendo duas opções para realização de uma pesquisa: atributo (pesquisa de texto) ou espacialmente (utilizando uma ferramenta de pesquisa gráfica), conforme mostrado na Figura 104.

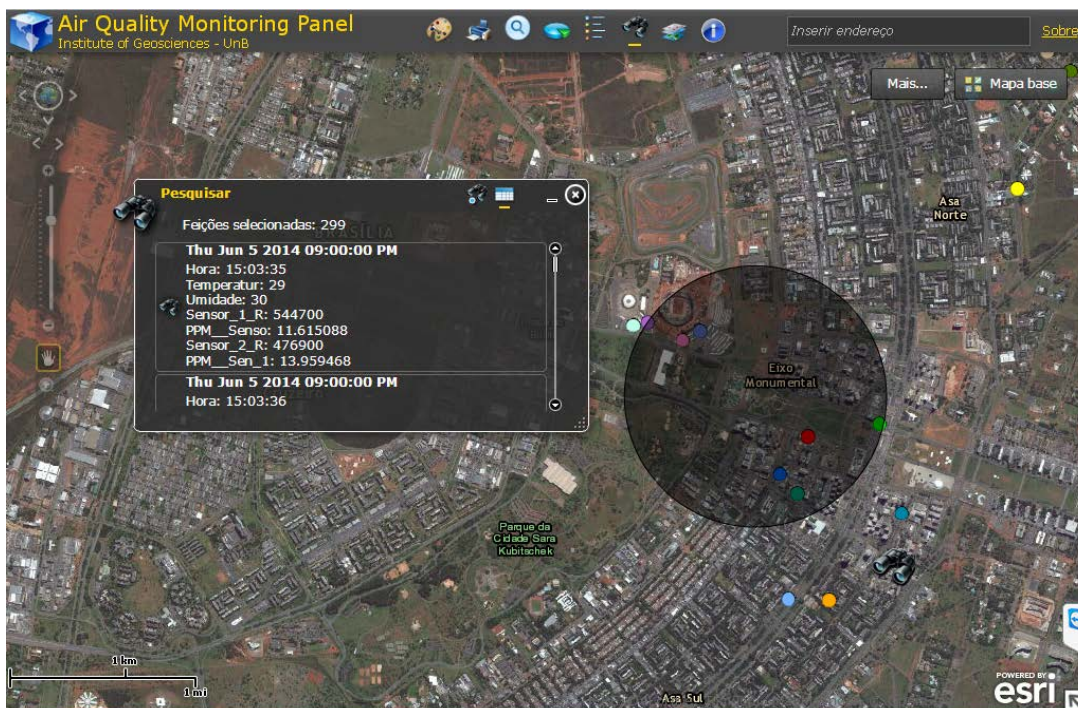


Figura 104. Tela do painel com a ferramenta de pesquisa.

A lista de camada (Figura 105) fornece ao usuário, a opção de visualização das camadas ou desligamento das feições. O que é apresentado no *widget* são as camadas operacionais, listados no arquivo configurado no ArcGIS Server e atribuído como serviço no *Viewer Flex*.



Figura 105. Tela do painel com a ferramenta lista de camada.

4.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE OS RESULTADOS

Primeiramente, vale reunir uma síntese das apreciações sobre os testes aplicados:

- A calibração dos sensores (1 e 2) indicou forte correlação entre a resistência (Ohms) e a volumetria de injeção (ml), com os valores de r ultrapassando 0,8;
- O uso desses sensores em sistemas micro controlados para o monitoramento da qualidade do ar, se faz necessária a utilização das equações geradas na calibração. A aplicação dela se dá diretamente no *software* de leitura, aonde estão armazenados os algoritmos de processamento dos dados de entrada (leituras). Para o sensor 1, temos a seguinte eq.(11), com $r = 0,88$:

$$y = -3634,9x + 29491 \quad (11)$$

onde y é a variável dependente e x a variável independente.

Para o sensor 2 ($r = 0,89$), a eq.(12) de calibração encontrada é:

$$y = -5866,6x + 52333 \quad (12)$$

onde y é a variável dependente e x a variável independente.

Contudo, os resultados da presente pesquisa foram similares com os resultados de outros estudos, que tinha o objetivo de calibração de sensores de baixo custo (MiCS – 5521). Loreto (2012) encontrou no teste de calibração em laboratório para o mesmo modelo de sensor, correlação quase perfeita ($r = 0,95$). Liu (2012) utilizou os sensores MiCS – 5525, para a obtenção de dados de leitura de CO. Para isso, realizou uma análise de regressão linear dos dados de sensoriamento gerados pelo sensor MiCS – 5521. Com base no resultado de regressão linear, foi criada uma equação de calibração, utilizada para corrigir as leituras do sensor MiCS - 5525 a partir do sensor MiCS – 5521, ao qual apresentou forte correlação ($r = 0,85$).

Monroy *et. al* (2012) utilizou três métodos de calibração para sensores de óxido de metal (MOX), sendo eles: Processo Gaussiano (GP), Regressão por Mínimos Quadrados Parciais (PLSR) e regressão por vetores-suporte (SVR). Os resultados demonstraram que o sensor MiCS – 5521 e TGS – 2611 (metano) obtiveram os valores intervalo de confiança mais próximos (MiCS – 5521: 23.84 ± 5.58 (GP); 25.44 ± 4.20 (PLSR) e 24.18 ± 5.91 (SVR)) na calibração para os três métodos, na indução de fluxo de ar artificial com vazão de 10 cm/s e dezoito análises com três repetições para cada metodologia. As variáveis utilizadas para os métodos foram concentração (ppm) pelo tempo (segundos).

O painel estruturado, possui a capacidade de receber informações em tempo real e possíveis configurações, de acordo com a especificidade das demandas estabelecidas. A *King's College London* (2014) sistematizou um painel (*WebGIS*) denominado *London Air Quality Network*, que mostra as leituras (CO, CO₂, O₃, etc.) de pico registradas em toda a região, pela rede de monitoramento da qualidade do ar. Boletins diários podem ser acessados pelo usuário, com a possibilidade de interações com animações e explicações textuais (quando disponível), a partir do momento em que as informações são selecionadas, a cada ponto de vista diferente do mapa. Um painel semelhante, foi desenvolvido na Escócia (*Air Quality in Scotland*), que monitora 91 pontos na região, disponibilizando dados (média horária) de PM₁₀, dióxido de nitrogênio (NO₂), óxido nítrico (NO), óxidos de nitrogênio (NO_x) e dióxido de nitrogênio (NO₂). Ainda apresenta classificação quanto ao índice de qualidade, classificado com atribuição de cores as notas de 1 a 10. Nos Estados Unidos, há um *WebGIS* (*AirNow*) com a previsão de dados coletados por meio de técnicas de monitoramento com referência federal ou técnicas equivalentes, aprovadas pelo Estado e órgãos de fiscalização locais. Para manter os mapas "em tempo real", os dados são exibidos após o final de cada hora. Ainda apresenta o Índice de Qualidade do Ar (IQA), categorizado por rótulos de qualidade (bom, moderado, insalubre, etc).

As análises *outdoor* apresentaram dados com grandes oscilações nas resistências dos sensores, em algumas regiões consideradas de grande tráfego de veículos, a exemplo da L4 Norte, Rodoviária e Setor Comercial Sul. Porém, Carrapetta e Sivaraman (2010) encontraram índices altos (25 ppm), utilizando sensores de óxido de metal (CO) para algumas vias (M5 *Tunnel* e *Sydney Harbour Tunnel*) na cidade de Sydney na Austrália, consideradas de tráfego intenso de automóveis.

Os dados das análises *indoor* não apresentaram significativas variações nas resistências dos sensores. Papakonstantinou (2003) simulou em ambiente computacional, a ventilação de uma garagem subterrânea. Os dados analisados nessa pesquisa (no interior da

garagem) encontraram as médias das concentrações máximas de CO (ppm), em cinco intervalos de tempo: 5 min., 15 min., 30 min., 1h e 8h. Os índices críticos levantados (comparados a WHO (2005)), se deram após 30 min de análise, chegando a 67,3 ppm e, após 8h de monitoramento, 43,2 ppm. Wisdom (2002), utilizou monitores portáteis de gás para o monitoramento de ambientes domésticos e garagens, no Alaska. Para obtenção de uma ideia geral da qualidade do ar ambiente, as leituras foram efetuadas durante dois dias, com coletas a cada dois minutos, com um monitor colocado na garagem e outra na sala de estar. Os valores dos resultados mostraram que as concentrações nos ambientes (garagem e sala de estar) excederam o recomendado para o intervalo de 1 hora e de 8 horas (WHO, 2005), sendo de 35 ppm e 9 ppm, respectivamente.

CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1 CONCLUSÃO

Diante do exposto, é possível responder o questionamento realizado na parte introdutória do presente trabalho. Assim, com algumas restrições, confirma-se a hipótese apresentada – há uma correlação forte (r) nas amostragens volumétricas realizadas para os sensores. Porém, a restrição para a confirmação da hipótese se deu no teste de calibração, onde demonstrou-se o sensor 1 está dentro do *range (datasheet)* estabelecido pelo fabricante quanto a oscilação da resistência nas concentrações de CO (ml) injetadas. O sensor 1 é novo, livre de desgaste de utilização. Portanto, destaca-se, que em relação as respostas analisadas, a hipótese foi confirmada, sendo que a volumes maiores que 6 ml, o sensor 1 responde com decaimento próximo ao zero dos valores de resistência (Ohms), indicando que não se tem mais leituras nessas faixas de concentração de CO. Assim, pode-se afirmar que ambos sensores tem potencial para serem usados em medições de emissões geradas nos tráfegos urbanos, como equipamento alternativo de monitoramento da qualidade do ar, sendo corrigido o sensor 2 em função da precisão do sensor 1. Todavia, não são adequados para serem utilizados como sensores de qualidade do ar autônomos, devido aos problemas com sensibilidade cruzada. Contudo, ao serem combinados com outros sensores em um sistema de multisensores, podem eliminar essas interferências. Outro detalhe que o torna viável para um sistema de monitoramento, é o seu reduzido consumo de energia (menos de 100 mW).

Os resultados das análises *outdoor* apontaram áreas críticas, com variações altas nas resistências dos sensores, como a Rodoviária de Brasília e o Setor Comercial Sul (ponto 2), onde essas mesmas localidades, quando visualizadas pelos dados disponibilizados pelo IBRAM (2014), apresentam concentração crítica para as variáveis PTS e fumaça. Ressalta-se que na possibilidade de comparação com estações tradicionais de monitoramento da qualidade do ar que possuem sensores de CO (referência), os dados poderão ser validados com a precisão encontrada nesses detectores. Enfatiza-se que testes contínuos nas análises *indoor* verificarão, ao longo do tempo, as fontes que possam a vir contribuir com emissões de CO no ambiente do ICC. Durante as análises, não foi observada nenhuma fonte que contribuiu significativamente com uma variação considerável na concentração do CO. Contudo, como citado acima, outras variáveis (umidade, temperatura) interferentes para os dois ambientes de

monitoramento (*indoor* e *outdoor*) devem ser observadas com uma escala temporal ampla, como também a exemplo do comportamento e perfil de prováveis gases que podem interagir negativamente ou como ruído de leitura no que tange a seletividade cruzada do sensor.

O sistema *WebGIS* (Painel) apresentou-se como plataforma adequada para disponibilização dos dados coletados nos ambientes citados acima. Demonstrou a capacidade de configuração dinâmica no quesito de customização de ferramentas (*widgets*). Percebeu-se que tem facilidade de atualização com a inclusão de novos dados, de forma automatizada, podendo se conectar a partir de um banco de dados pré-configurado com a aplicação, ou a partir da atualização de um projeto construído em ambiente *ArcGIS Desktop*, com conexão ao *ArcGIS Server*. Inúmeras possibilidades de configuração são visualizadas para a mesma plataforma, indicando que o painel criado pode se adequar a qualquer outro ajuste que venha a ser redesenhado, a partir de novas necessidades.

A pesquisa apresentou limitações no sentido em que não se monitorou variáveis de ambiente, que podem causar sensibilidade cruzada, contidas no espaço do laboratório. É necessária uma calibração em campo junto às estações de referência, para comparação com o procedimento executado em ambiente controlado. Se torna importante a calibração de um número maior de unidades de sensores MiCS - 5521, chegando-se assim a um resultado com um universo maior de amostragem e, posteriormente, dados com maior grau de confiança. E por fim, avaliações em diferentes configurações de ambientes *indoor* e *outdoor* para se ter o panorama do comportamento de CO, na diversidade dessas situações.

É relevante destacar as outras oportunidades de pesquisa no Distrito Federal não preenchidas por este trabalho. Mesmo esta pesquisa sendo pioneira com o seu tema, na região de estudo. Outros pesquisadores, indicados no segundo capítulo, calibraram sensores avaliando outros gases (CO₂, O₃, NO₂, etc), o que poderia ser aplicado no Distrito Federal, juntamente com novas campanhas de campo comparadas aos dados de estações de referência, de forma a auxiliar no processo de calibração e entendimento das interferências citadas ao longo desse capítulo.

Outro ponto que pode ser correlacionado, é o estudo da dinâmica de ilhas de calor, que trará novas abordagens no sentido de entendimento climático regional e de diagnósticos do comportamento das concentrações de gases nas regiões.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AB'SABER, A. N. **Os domínios de natureza no Brasil: potencialidades paisagísticas**. São Paulo: Ateliê Editora, 2003.

AIRNOW. Disponível em: <<http://www.airnow.gov/index.cfm?action=airnow.main>>. Acesso em: 14/07/14.

AIR QUALITY IN SCOTLAND. Disponível em: <<http://www.scottishairquality.co.uk/>>. Acesso em: 14/07/14.

ATSDR. Agency for Toxic Substances and Disease Registry. **Air Pollution**. Atlanta, GA: 2014.

AYOADE, J.O. **Introdução a climatologia para os trópicos**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1998. 332 p.

BAHIA (Estado). Prefeitura de Camaçari. **Prevenção e Controle**. Bahia: 2014. Disponível em: <http://secult.camacari.ba.gov.br/noticia.php?cod_noticia=5011>. Acesso em: 25/04/14.

BARBI, G.B.; SANTOS, J.P.; SERRINI, P.; GIBSON, P.N.; HERRILLO, M.C.; MANES, L. **Ultrafine grain-size tin-oxide films for carbon monoxide monitoring in urban environments**. Sens. Actuat. B-Chem. 1995, 25, 559–563.

BARROS, M. V. G.; REIS, R. S. **Análise de dados em atividade física e saúde: demonstrando a utilização do SPSS**. Londrina: Midiograf, 2003.

BATTY, M. **New technology and GIS**. In: LONGLEY, PA., GOODCHILD, M.P., MAGUIRE, DJ., RHIND, D.W. (Eds.), *Geographic Information Systems*. Wiley, Chichester, pp. 309-316, 1999.

BEYCHOK, M. R. **Fundamentals of Stack Gas Dispersion**. 4th edition, 2005.

BOECHAT, L. **Poluição de ambientes internos**. Revista Brasileira de alergia imunopatológica, 83–89, 2011.

BRAGA, et al., **Introdução a Engenharia Ambiental**, 2ªed, Prentice Hall Brasil, 2005.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente, Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução n.º 03**. Brasília: Conselho Nacional do Meio Ambiente. 1990.

CALLISTO, M.; GONÇALVES, Jr., J. F.; MORENO, P. **Invertebrados aquáticos como bioindicadores**. In: **Navegando o Rio das Velhas das Minas aos Gerais**. Belo Horizonte : UFMG, 2004. v. 1, p. 1-12.

CAMARA, G.; MONTEIRO, A. M. V. **Conceitos Básicos em Ciência da Geoinformação**. In: **CAMARA, G. et al. Introdução a Ciencia da Geoinformação**. São José dos Campos, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, 2001. Disponível em <<http://www.dpi.inpe.br/igilberto/ivro/introdt>>. Acesso em: 15/02/14.

CAMARA, G.; QUEIROZ, G. R. **Arquiteturas de Sistemas de Informação Geográfica**. In: **CAMARA, G. et al. Introdução a Ciencia da Geoinformação**. São José dos Campos, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, 2001. Disponível em <<http://www.dpi.inpe.br/igilberto/ivro/introdt>>. Acesso em: 15/02/14.

CAVALCANTI, R. B. **Conservação de aves migratórias neárticas no Brasil**. Distrito Federal. Disponível em: <http://www.conservation.org.br/publicacoes/files/avesmigratorias/Centrooeste/Aves_DF.pdf>. Acesso em: 25/06/14.

CETESB. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. **Relatório de qualidade do ar no Estado de São Paulo**. 2003. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br>>. Acesso em 10/05/14.

CETESB. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. **Qualidade do ar**. 2013. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/ar/Informa%C3%A7%C3%B5es-B%C3%A1sicas/22->>. Acesso em 10/05/13.

CETESB. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. **Qualidade do ar**. 2014. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/ar/Informa%C3%A7%C3%B5es-B%C3%A1sicas/22->>. Acesso em 12/06/14.

COLEMAN, D.J. **Geographic information systems in networked environments**. In: LONGLEY, P.A., GOODCHILD, M.P., MAGUIE, D.J., RHIND, D.W. (Eds.), Information Systems. Wiley. Chichester, pp. 317-329, 1999.

COLLEGE OF THE ENVIRONMENT. University of Washington. Department of Atmospheric Sciences. **Notes**. Disponível em: <http://www.atmos.washington.edu/~robwood/teaching/slides/15~chapter%205%20table%205_1.pdf>. Acesso em: 20/05/2014.

COSTA, E. S. **Efeitos da poluição do ar relacionados com o crescimento da área urbanizada e do número de veículos automotores do Distrito Federal**. Dissertação de mestrado em Planejamento e Gestão Ambiental - Universidade Católica de Brasília. Brasília, 2002.

COUNCIL DIRECTIVE 96/62/EC, of 27 September 1996. **On ambient air quality assessment and management (The Framework Directive)**. From the Official Journal of the European Communities, 21.11.1996, En Series, L296/55.

COUNCIL DIRECTIVE 2001/81/CE, of 23 October 2001. **National emission ceilings for certain atmospheric pollutants**. From the Official Journal of the European Communities, 23/10/2001.

COUNCIL DIRECTIVE 2008/50/EC, of 21 May 2008. **On ambient air quality and cleaner air for Europe**. From the Official Journal of the European Union, 11.6.2008, En series, L152/1.

COWEN, D. **GIS versus CAD versus DBMS: what are the differences?** In.: PEUQUET, Donna, MARBLE, Duane. Introductory readings in Geographic Information Systems. London: Taylor & Francis, 1990. p. 52-61.

CRUZ, L. P. S. **Amostragem passiva de poluente atmosféricos. Aplicação ao Dióxido de Enxofre.** Revista Química, Nova Vol.25 N° 3, São Paulo, 2002.

CRUZ, L. P. S. **Métodos de amostragem e análise para compostos reduzidos de enxofre atmosférico.** Revista Química Nova, Vol. 31, N° 5. São Paulo, 2008.

DEVORE, J. L. **Probabilidade e estatística: para engenharia e ciências.** São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2006.

DISTRITO FEDERAL (Estado). Instituto Brasília Ambiental. **Qualidade do ar.** Distrito Federal: 2014. Disponível em: <<http://www.ibram.df.gov.br/informacoes/meio-ambiente/qualidade-do-ar.html>>. Acesso em: 25/04/14.

DISTRITO FEDERAL. **QUALIAR.** Brasília: 2012. Disponível em: <<http://www.semarh.df.gov.br/qualiar/Pdf/PROGRAMA-QUALIDADE-AR.pdf>>. Acesso em: 15/06/14.

DISTRITO FEDERAL. **QUALIAR.** Brasília: 2014. Disponível em: <http://www.semarh.df.gov.br/qualiar/tabela_fixo/Fixo%20qualiar.html>. Acesso em: 15/06/14.

DURRANI, S.M.A.; AL-KUHAILI, M.F.; BAKHTIARI, I.A. **Carbon monoxide gas-sensing properties of electron-beam deposited cerium oxide thin films.** Sens. Actuat. B-Chem. 2008, 134, 934–939.

E2V. **e2v Metal Oxide Semiconductor (MOS) Gas Sensor Evaluation Kit User Guide**, 44 (February), 1–29, 2010.

E2V. **MiCS-5521 CO/VOC Sensor.** Precautions, Response, S., & Mode, O. (2008). CO/VOC Sensor, 44(July), 4–6.

EITEN, G. **The cerrado vegetation of Brazil.** Botanical Review 38: 201-341, 1972.

EITEN, G. **Vegetation of Brasilia.** Phytocoenologia 12: 271-292, 1984.

FERREIRA, M. C. C. S. **Modelos de Regressão: uma aplicação em Medicina Dentária**. Lisboa, 2013.

FIGARO. **Gas box test SR#3**. Disponível em: < <http://www.figaro.co.jp/en/product/entry/sr3-100vac.html.html>>. Acesso em: 13/06/2014.

FINE, G. F., CAVANAGH, L. M., AFONJA, A., & BINIONS, R. **Metal oxide semiconductor gas sensors in environmental monitoring**. Switzerland: 2010.

FINNSETH, A.; EVERTSEN, G.; JOKULSSON, G.; WASMUTH, M.L.H. **Information system for environmental monitoring**, Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2004. IGARSS '04. Proceedings. 2004 IEEE International, vol.3, no., pp.2178-2181 vol.3, 20-24 Sept. 2004 doi: 10.1109/IGARSS.2004.1370792.

GFG INSTRUMENTATION, INC. **Principles and Techniques of Gas and Vapor Detection**. 2009. Disponível em: <<http://www.protecaoespiratoria.com/2011/06/sensores-de-gas-principios-e.html>>. Acesso em: 26/06/14.

GODISH, T. **Air quality**. 4ª ed. Florida: Lewis Publishers, 2004.

GROUP, E. C. W. (n.d.). **Guide for the Demonstration of Equivalence of Methods of Measurement**, January 2010.

HASENFRATZ, D., SAUKH, O., & THIELE, L. **On-the-fly Calibration of low cost Gas Sensors**. 2012.

HENDERSON, R. E. **Using Electrochemical Sensors for toxic gas measurement**. Thermofisher, 2012.

HUSNI, N. L., SILVIA, A., & NURMAINI, S. **New Challenges in Air Quality Sensing using Robotic Sensor Network**. International Conference on Innovations in Engineering and Technology (ICIET'2013) Dec. 25-26, 2013 Bangkok (Thailand).

IBGE. **Censo Demográfico 2000**. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2001.

IBGE. **Censo Demográfico 2010**. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2011.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. Disponível em: <www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_sp.pdf>. Acesso em: 15/04/14.

INTERNATIONAL SENSOR TECHNOLOGY. **Electrochemical Sensor**. 2010. Disponível em: <<http://www.intlsensor.com/pdf/electrochemical.pdf>>. Acesso em: 23/06/14.

IZU, N.; NISHIZAKI, S.; ITOH, T.; NISHIBORI, M.; SHIN, W.; MATSUBARA, I. **Gas response, response time and selectivity of a resistive CO sensor based on two connected CeO₂ thick films with various particle sizes**. Sens. Actuat. B-Chem. 2009, 136, 364–370.

KATULSKI, R. J., & NAMIE, J. (n.d.). **Monitoring of Gaseous Air Pollution**. Intechopen, 2011.

KILL, E. F. & ROIG, H.L. **Air Pollution Dispersion Mapping by Remote Sensing: Case Study from the Federal District**. GEOProcessing 2014: The Sixth International Conference on Advanced Geographic Information Systems, Applications, and Services. 2014. 15-23.

KING'S COLLEGE LONDON. **London air**. Disponível em: <<http://www.londonair.org.uk/london/asp/PublicEpisodes.asp>>. Acesso em: 14/07/14.

KORB, C. L. **Differential absorption lidar technique for measurement of the atmospheric pressure profile**. US National Library of Medicine National Institutes of Health, 1983, December.

LANDIM, P. M. B. **Análise Estatística de Dados Geológicos**. Ed. UNESP, São Paulo, 226p, 1998.

LEVIN, Jack. **Estatística aplicada a ciências humanas**. São Paulo: Harbra, 2002.

LI, X.; RAMASAMY, R.; DUTTA, P.K. **Study of the resistance behavior of anatase and rutile thick films towards carbon monoxide and oxygen at high temperatures and possibilities for sensing applications**. Sens. Actuat. B-Chem. 2009, 143, 308–315.

LIMA, J. S. **O biomonitoramento como ferramenta complementar na avaliação de impactos ambientais: Discutindo conceitos.** EcoTerra Brasil. Junho, 2000. Disponível em: <<http://www.ecoterrabrasil.com.br/home/index.php?pg=temas&tipo=temas&cd=92>>. Acesso em 15/04/14.

LISBOA, H. M.; KAWANO, M. **Controle da poluição atmosférica.** Florianópolis / SC: Montreal, 2007.

LISBOA, H. M.; KAWANO, M. **Monitoramento de Poluentes Atmosféricos.** In: LISBOA, H. M. **Controle da poluição atmosférica.** Montreal: ENS/UFSC, 2007, p. 2-70.

LIU, J. **An air quality monitoring system for urban areas based on the technology of wireless sensor networks.** 5(1), 191–214, 2012.

LORETO, V. **D1.1: Report on: sensor selection, calibration and testing;** EveryAware platform; smartphone applications, 1–73, 2012.

LOUZADA, J. N. C. **Bioindicadores de qualidade ambiental.** Departamento de Biologia, UFL. V Congresso Brasileiro de Ecologia. Porto Alegre, RS, 2001.

MACINTYRE, A. J. **Ventilação industrial e controle da poluição.** 2ª ed. Rio de Janeiro: Guanabara, 1990.

MATSUURA, K. **Bioindicadores em Ecossistemas.** Unesco, 2000.

MINIUM, R. G. et al. **Elements of Statistical Reasoning.** New York: Wiley, 1999.

MITCHELL, T. **Web Mapping Illustrated.** O'Reilly Media, 2005.

MONROY, J. G. **Calibration of MOX gas sensors in open sampling systems based on Gaussian Processes,** 8–11, 2012.

MORAES, M. V. R. **Dinâmica do meio ambiente no Distrito Federal.** In: PINTO, MN. (Org.). **Cerrado: caracterização, ocupação e perspectivas.** 2º edição. Brasília: Editora Universidade de Brasília. p. 543-563, 1993.

NIST. National Institute of Standards and Technology. **Chemistry WebBook**, 2011. Disponível em: <<http://webbook.nist.gov/chemistry/>>. Acesso em: 23/06/14.

PAPAKONSTANTINO, K. **Air quality in an underground garage: computational and experimental investigation of ventilation effectiveness**. Greece: 2003.

PAQUET E. et al (2013), **The SCHADEX method: a semi-continuous rainfall-runoff simulation for extreme flood estimation**, Journal of Hydrology, 495: 23-37.

PENG Z-R; BEIMBORN E. **Internet GIS applications in transportation**. In Transportation Research News, March-April, Issue 195, pp 22-26, 1998.

PENG Z-R. **An assessment framework for the development of Internet GIS**. in Environment and Planning B: Planning and Design. Vol. 26. pp 117-132, 1999.

PEREIRA, P. C. R. **Alguns fatores determinantes nos resultados obtidos pelos alunos do 9º e 12º anos nos exames nacionais de português e matemática e o efeito escola**. Universidade Católica Portuguesa. Portugal, 2012.

PESTANA, M. H. e GAGEIRO, J. N. (2003). **Análise de Dados para Ciências Sociais: A Complementaridade do SPSS**. Lisboa: Edições Sílabo.

PLEWE, B, 1997. **GIS Online: Information Retrieval, Mapping, and the Internet**. OnWord Press. Santa Fe, New Mexico, 1997.

PORFIRIO, M. **Proposta mercadológica para o monitoramento de gases poluentes derivados de veículos automotores em centros urbanos**. Brasília - DF, 2008. Dissertação (Mestrado em Transportes – Universidade de Brasília – DF).

RADA, E. C., RAGAZZI, M., BRINI, M., MARMO, L., ZAMBELLI, P., CHELODI, M., & CIOLLI, M. (2012). **Perspectives of low cost sensors adoption for air quality monitoring**, 74.

REIS, E. (1997). **Estatística multivariada aplicada**. Lisboa: Edições Sílabo.

RÉQUIA W. J. J.; ABREU, M. L. **Poluição atmosférica e a saúde de crianças e idosos no Distrito Federal no período de 2007 a 2009: utilização do método de correlação com *time delay***. Revista Brasileira de Geografia Médica e da Saúde, v.7, p.95-108, 2011.

RIVIERE, B.; VIRICELLE, J.P.; PIJOLAT, C. **Development of tin oxide material by screen-printing technology for micro-machined gas sensors**. Sens. Actuat. B-Chem. 2003, 93, 531–537.

ROCHA, J. C.; ROSA, A. H.; CARDOSO, A. A. **Introdução à química ambiental**. 2 ed. Porto Alegre: Bookman, 2009.

SALDIVA P.H.N.; BRAGA, A. L. F.; PEREIRA, L. A. A. **Health effects of ambient levels of air pollution**. In: HOGAN DJ, BERQUÓ E, COSTA HSM, editors. Population and environment in Brazil: Rio + 10. Campinas: Comissão Nacional de População e Desenvolvimento/Associação Brasileira de Estudos Populacionais/Núcleo de Estudos de População, Universidade Estadual de Campinas; 2002. p. 207-23.

SÃO PAULO (Estado). **Decreto Estadual nº 59.113**, de 23 de abril 2013. Estabelece novos padrões de qualidade do ar e dá providências correlatas. São Paulo: 2013.

SCIENTIFIC COMMITTEES EUROPEAN. Primary Pollutant and Secondary Pollutant. Disponível em: <<http://ec.europa.eu/health/opinions/en/indoor-air-pollution/glossary/pqrs/primary-pollutant-secondary-pollutant.htm>>. Acesso em: 14/06/2014.

SEINFELD, J. H.; PANDIS, S. N. **Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change**, 1998.

SENNEQUIER, P. **Signal conditioning for electrochemical sensors**. Application Note, AN4348, 2013.

SILVA, S. T. **A proteção da qualidade do ar**. França, 1997, Tese de doutorado (Doutorado em Direito Ambiental na Universidade de Paris I – França).

SIVARAMAN, V., CARRAPETTA, J., HU, K., & LUXAN, B. G. **HazeWatch: A participatory sensor system for monitoring air pollution in Sydney**. 38th Annual IEEE Conference on Local Computer Networks - Workshops, 56–64, 2010.

SPINELLE, L., ALEIXANDRE, M., & GERBOLES, M. **Protocol of evaluation and calibration of de baixo custo gas sensors for the monitoring of air pollution**. doi:10.2788/9916, 2013.

STEINKE, E. T. **Considerações sobre variabilidade e mudanças climáticas no Distrito Federal, suas repercussões nos recursos hídricos e informações ao grande público**. 201p. Tese. (Doutorado em Ecologia) Universidade de Brasília. Instituto de Biologia. Departamento de Ecologia. Brasília. 2004.

STRAHLER, A. N. **Elements of physical geography**. New York: John Wiley, 1976.

THEPANONDH, S. and TORUKSA W. **Proximity analysis of air pollution exposure and its potential risk**. Journal of Environmental Monitoring, Vol. 13(5) 1264-1270, 2011.

TISCHNER, A.; MAIER, T.; STEPPER, C.; KÖCK, A. **Ultrathin SnO₂ gas sensors fabricated by spray pyrolysis for the detection of humidity and carbon monoxide**. Austria:. 2008.

TRIOLA, M.F. **Introdução à estatística**. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2005.

U.S ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Clean Air Act**. USA: 1990. Disponível em: <www.eoa.cio.v/air/caat>. Acesso em: 20/05/14.

VESILIND, P. A.; MORGAN, S. M. **Introdução à Engenharia Ambiental**. São Paulo: Cengage Learning, 2^oed, 2011.

WANDIGER, U. **Introduction to lidar, in Lidar - Range-resolved optical remote sensing of the atmosphere**, C. Weitkamp (Ed.), Springer, New York (2005).

WEBSTER, A. L. **Estatística aplicada à administração e economia**. São Paulo: McGraw-Hill, 2006.

WHO. World Health Organization. **Air quality guidelines for Europe - second edition**, 2000.

WHO. World Health Organization, **Air quality guidelines for Europe**, 2005.

WIEGLEB, G.; HEITBAUM, J. **Semiconductor gas sensor for detecting NO and CO traces in ambient air of road traffic**. Sens. Actuat. B-Chem. 1994, 17, 93–99.

WOODFIN, W. J. **Portable Electrochemical Sensor Methods**. NIOSH/DPSE, 2003.

WISDOM, S. (2002). **Indoor Air Quality & Ventilation Strategies in New Homes in Alaska**. Alaska: 2002.

YAMAUTI, M. M. **Regressão Linear Simples nos livros de Estatística para cursos de Administração: um estudo didático**. Dissertação apresentada no programa de pós graduação em Educação Matemática. São Paulo: 2013.

YASWANTH, D., & UMAR, S. **A Study on Pollution Monitoring system in Wireless Sensor Networks**, 3(9), 324–328, 2013.

YOO, K. S. (n.d.). **Gas Sensors for Monitoring Air Pollution**. Department of Materials Science and Engineering, University of Seoul, Korea, 2011.

ZAMBERLAN, E. S. Notas de aula: Estatística. Disponível em: <<http://academicosmedicina.files.wordpress.com/2011/05/interpretac3a7c3a3o-desvio-padrc3a3o.doc>>. Acesso em: 16/06/14.