



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
DO CEARÁ
PRÓ-REITORIA DE ENSINO
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
TELECOMUNICAÇÕES**

YUGO DIAS GALVÃO

**SISTEMA DE TELEMETRIA UTILIZANDO REDE DE SENSORES
PARA MONITORAMENTO DA QUALIDADE DO AR EM ÁREAS
METROPOLITANAS**

FORTALEZA

14 de janeiro de 2017

YUGO DIAS GALVÃO

SISTEMA DE TELEMETRIA UTILIZANDO REDE DE SENSORES PARA MONITORAMENTO DA QUALIDADE DO AR EM ÁREAS METROPOLITANAS

Dissertação submetida à
Coordenação de Pós-Graduação
em Engenharia de Telecomunicações
do Instituto Federal do Ceará, como
requisito parcial para obtenção do
grau de Mestre em Engenharia de
Telecomunicações.

Área de concentração: Sistemas de
Telecomunicações

Orientador: José Wally Mendonça
Menezes

Fortaleza
2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Instituto Federal do Ceará - IFCE
Sistema de Bibliotecas - SIBI
Ficha catalográfica elaborada pelo SIBI/IFCE, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

G182s Galvão, Yugo Dias Galvão.
SISTEMA DE TELEMETRIA UTILIZANDO REDE DE SENSORES PARA MONITORAMENTO
DA QUALIDADE DO AR EM ÁREAS METROPOLITANAS / Yugo Dias Galvão Galvão. - 2017.
107 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado) Instituto Federal do Ceará, Mestrado em Engenharia de Telecomunicações,
Campus Fortaleza, 2017.

Orientação: Prof. Dr. José Wally Mendonça Menezes.

1. Redes de Sensores Sem Fio (RSSF). 2. ZigBee. 3. Qualidade do ar. I. Título.

CDD 621.382



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO CEARÁ
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
TELECOMUNICAÇÕES

Yugo Dias Galvão

Esta Dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Telecomunicações, sendo aprovada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Telecomunicações do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará e pela banca examinadora:

Assinatura manuscrita em tinta azul de Prof. Dr. José Wally Mendonça Menezes.

Orientador: Prof. Dr. José Wally Mendonça Menezes
Instituto Federal do Ceará - IFCE

Assinatura manuscrita em tinta azul de Prof. Dr. Daniel Xavier Gouveia.

Prof. Dr. Daniel Xavier Gouveia
Instituto Federal do Ceará - IFCE

Assinatura manuscrita em tinta azul de Prof. Dr. Francisco José Alves de Aquino.

Prof. Dr. Francisco José Alves de Aquino
Instituto Federal do Ceará - IFCE

Assinatura manuscrita em tinta azul de Prof. Dr. Francisco Nivaldo Aguiar Freire.

Prof. Dr. Francisco Nivaldo Aguiar Freire
Universidade Federal do Ceará - UFC

Fortaleza, 14 de Janeiro de 2017

Dedico este trabalho à minha família e aos meus amigos.

Agradecimentos

Aos Meus pais e irmãos que sempre me apoiaram e incentivaram em todo o meu percurso acadêmico.

Aos colegas de graduação que nunca me negaram ajuda: Bruno Henrique de Moura Arlindo, Pedro Felipe Teixeira, Narcelio Sousa e Felipe Alves.

Aos colegas de mestrado: Madson Luiz Dantas Dias, Cleiton da Silva Marinho, Saulo Anderson Freitas de Oliveira, Alan Magalhães Braga, Jorge Fredericson de Macedo Costa da Silva

À Professora Dra. Roseline Freire Torres por abrir mão de seus afazeres para contribuir com enriquecimento dessa dissertação.

Aos Professores: Dr. Luiz Drude Lacerda e Dra. Rozane Valente Marins pela oportunidade de estagiar no Labomar/UFC.

Ao INPE pela oportunidade de adquirir conhecimentos na área acadêmica por intermédio dos professores Dr. Francisco de Assis Tavares Ferreira da Silva, Dr. Antonio Macilio Pereira de Lucena e Dr. Vicente de Paula Silva Filho , e aos colegas que por lá também passaram.

Ao CNPq pela bolsa concedida durante a realização do mestrado.

A todos que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

“Todas as vitórias ocultam uma abdicação”.

Simone de Beauvoir

Resumo

De um modo geral, a qualidade do ar é o resultado da ação mútua de um complexo conjunto de fatores como a magnitude das emissões e as condições meteorológicas da região, favoráveis ou não a dispersão dos poluentes. As queimadas, os processos industriais e os veículos automotores são, dentre as atividades antrópicas, as maiores causas da introdução de substâncias poluentes na atmosfera. Este trabalho apresenta um sistema de monitoramento da qualidade do ar recorrendo as Redes de Sensores sem Fios. Foi desenvolvido um protótipo cuja função é obter periodicamente os valores de propano (C_3H_8), GLP, metano (CH_4), etanol (C_2H_6O), hidrogênio (H_2), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO_2), fumaça(material particulado) e temperatura. O sistema foi instalado num ambiente exterior, de modo a permitir avaliar os efeitos do ambiente no desempenho da rede. Os dados referidos de cada nó são armazenados em cartão de memória local e percorrem a rede ZigBee até alcançar o coordenador, que tem como função armazenar numa base de dados e disponibilizar os dados em tempo real através da porta serial para tratamento e acompanhamento em tempo real. Como os dados são armazenados é sempre possível efetuar uma consulta à base de dados para realização de estudos e estatísticas de modo a facilitar a atividade das equipes de controle de qualidade. O sistema desenvolvido, descrito e fundamentado neste documento, pode ser ampliado com a inclusão de outros sensores.

Palavras-chave: Qualidade do ar, Redes de Sensores Sem Fio (RSSF), ZigBee.

Abstract

In general, the quality of the air is the result of the mutual action of a complex set of factors such as the magnitude of the emissions and the meteorological conditions of the region, favorable or not to the dispersion of pollutants. The burnt, industrial processes, and motor vehicles are, among the anthropic activities, the major causes of the introduction of polluting substances into the atmosphere. This work presents an air quality monitoring system using the Wireless Sensor Networks. A prototype was developed whose function is to periodically obtain the values of propane (C_3H_8), GLP, methane (CH_4), ethanol (C_2H_6O), hydrogen (H_2), carbon monoxide (CO), carbon dioxide (CO_2), smoke(particulate matter) and temperature. The system was installed in an outdoor environment, in order to evaluate the effects of the environment on network performance. The referenced data from each node are stored on local memory card and run through the ZigBee network until it reaches the coordinator, whose function is to store in a database and make the data available in real time through the serial port for real-time treatment and monitoring. As the data is stored, it is always possible to consult the database to carry out studies and statistics in order to facilitate the activity of the quality control teams. The system developed, described and based on this document, can be improved with the inclusion of other sensors.

Keywords: Air quality, Wireless Sensor Network (WSN), ZigBee.

Sumário

Lista de Figuras

Lista de Tabelas

Lista de Abreviações

1	Introdução	18
1.1	Objetivos	19
1.1.1	Objetivo Geral	19
1.1.2	Objetivos Específicos	19
1.2	Metodologia, Materiais e Métodos do Trabalho	19
1.3	Motivação	19
1.4	Organização do Trabalho	20
2	Aspectos Relacionados à Qualidade do Ar e Mudanças Climáticas	22
2.1	Poluição atmosférica e mudanças climáticas globais	22
2.2	Qualidade do ar e saúde pública	26
2.3	Os poluentes atmosféricos, gases traço e seus efeitos negativos na saúde humana	29
2.3.1	Compostos sulfurosos	30
2.3.2	Compostos nitrogenados	30
2.3.3	Óxidos de carbono	32
2.3.4	Compostos Orgânicos	33
2.3.5	Oxidantes Fotoquímicos	36

2.3.6	Material Particulado (MP)	36
2.4	Conclusão	37
3	Redes de Sensores Sem Fio	38
3.1	Introdução	38
3.2	Características das RSSF	39
3.3	Classificação	41
3.4	O padrão ZigBee	44
3.5	Topologias de rede ZigBee	46
3.6	Dispositivos XBee	49
3.6.1	Modos de Operação do XBee	50
3.7	Conclusão	51
4	Metodologia	52
4.1	Arquitetura da rede	52
4.2	Hardware	53
4.2.1	Sensores	54
4.2.2	Arduino UNO R3	55
4.2.3	Real Time Clock	57
4.2.4	Cartão SD	58
4.2.5	XBee	59
4.3	Nó sensor	61
4.4	<i>Software</i>	63
4.4.1	XCTU	63
4.4.2	Arduino (IDE)	66
4.4.3	Leitura dos dados	67
4.5	Conclusão	68

5	Resultados Experimentais	69
5.1	Experimento 1: Avaliar a correlação entre o gás injetado e os pontos de detecção	69
5.2	Experimento 2: Avaliar a eficiência no envio e recebimento de pacotes de dados	71
5.3	Experimento 3: Avaliar a taxa de transferência no envio de dados	74
5.4	Experimento 4: Avaliar o desempenho da RSSF em área aberta	77
5.5	Conclusão	92
6	Conclusão e Trabalhos Futuros	93
6.1	Conclusão	93
6.2	Trabalhos Futuros	93
	Referências Bibliográficas	94
	Anexo A – Datasheets	98
A.1	Datasheet Sensor MQ-2	98
A.2	Datasheet Sensor MQ-135	101
A.3	Guia de Usuário ZigBee RF Modules	104

Lista de Figuras

1	Histórico da operação das redes de monitoramento da qualidade do ar operadas pelos OEMA	20
2	Diagrama simplificado da absorção da luz solar e retenção térmica na atmosfera terrestre.	23
3	Teores de CO ₂ atmosférico medidos de 1958 a 2016 no observatório de Mauna Loa, Havaí.	24
4	Topologia em Estrela.	47
5	Topologia em Árvore.	48
6	Topologia em Malha.	49
7	Estrutura geral de um pacote API.	51
8	Topologia do Sistema (malha).	53
9	Sensores MQ2 e MQ135.	55
10	Arduino UNO R3.	57
11	RTC DS3231.	57
12	Barramento I2C.	58
13	Módulo SD Card.	58
14	Diagrama do barramento SPI.	59
15	XBee Explorer USB.	59
16	Módulo XBee.	60
17	Protótipo dos Nós Sensores em <i>protoboard</i>	61
18	Protótipo dos Nós Sensores em caixas de pvc.	62
19	Arquitetura do <i>Hardware</i>	63

20	XCTU tela inicial.	63
21	XCTU Configuração da porta de comunicação.	64
22	XCTU Lista de Dispositivos.	64
23	XCTU Módulo a configurar.	65
24	XCTU Função do módulo.	65
25	Arduino IDE.	66
26	Dados lidos pelo Coordenador oriundos dos nós sensores.	67
27	Teste com GLP.	69
28	Regressão Linear aplicada aos dados obtidos pelo sensor MQ2.	70
29	Regressão Polinomial.	71
30	Teste de envio de pacotes, nó 2.	72
31	Teste de envio de pacotes, nó 3.	72
32	Teste de envio de pacotes, nó 4.	73
33	Teste de envio de pacotes, nó 5.	73
34	Taxa de transferência de dados do nó 2.	74
35	Taxa de transferência de dados do nó 3.	75
36	Taxa de transferência de dados do nó 4.	75
37	Taxa de transferência de dados do nó 5.	76
38	Disposição dos nós no IFCE.	77
39	Posicionamento do Coordenador.	78
40	Posicionamento do Nó 2.	79
41	Posicionamento do Nó 3.	79
42	Posicionamento do Nó 4.	80
43	Posicionamento do Nó 5.	80
44	Medidas dos gases(ppm) H ₂ e CH ₄ em função do horário no nó 2.	81
45	Medidas dos gases(ppm) H ₂ e CH ₄ em função do horário no nó 3.	82

46	Medidas dos gases(ppm) H_2 e CH_4 em função do horário no nó 4. . . .	82
47	Medidas dos gases(ppm) H_2 e CH_4 em função do horário no nó 5. . . .	83
48	Medidas dos gases(ppm) CO_2 e CO em função do horário no nó 2. . .	83
49	Medidas dos gases(ppm) CO_2 e CO em função do horário no nó 3. . .	84
50	Medidas dos gases(ppm) CO_2 e CO em função do horário no nó 4. . .	84
51	Medidas dos gases(ppm) CO_2 e CO em função do horário no nó 5. . .	85
52	Medidas dos gases(ppm) etanol e propano em função do horário no nó 2.	85
53	Medidas dos gases(ppm) etanol e propano em função do horário no nó 3.	86
54	Medidas dos gases(ppm) etanol e propano em função do horário no nó 4.	86
55	Medidas dos gases(ppm) etanol e propano em função do horário no nó 5.	87
56	Medidas dos gases(ppm) glp e fumaça em função do horário no nó 2. .	87
57	Medidas dos gases(ppm) glp e fumaça em função do horário no nó 3. .	88
58	Medidas dos gases(ppm) glp e fumaça em função do horário no nó 4. .	88
59	Medidas dos gases(ppm) glp e fumaça em função do horário no nó 5. .	89
60	Medidas da temperatura($^{\circ}C$) em função do horário no nó 2.	89
61	Medidas da temperatura($^{\circ}C$) em função do horário no nó 3.	90
62	Medidas da temperatura($^{\circ}C$) em função do horário no nó 4.	90
63	Medidas da temperatura($^{\circ}C$) em função do horário no nó 5.	91

Lista de Tabelas

1	Concentração na atmosfera dos principais GEE, sua fórmula química, concentração atmosférica no período pré-industrial, concentração atmosférica em 2005, tempo de permanência na atmosfera (em anos), fontes de emissão e potencial de aquecimento global (G.W.P.).	25
2	Padrões de qualidade do ar para os principais poluentes segundo a <i>Environmental Protection Agency</i> (EPA) dos Estados Unidos.	29
3	Classificação das RSSF quanto à configuração.	42
4	Classificação das RSSF quanto ao sensoriamento.	43
5	Classificação das RSSF quanto ao tipo de processamento.	43
6	Classificação das RSSF quanto à comunicação.	44
7	Variação da Modulação de acordo com a Região.	45
8	Descrição e preços dos componentes de um nó sensor.	54
9	Características do Arduino UNO R3.	56
10	Configuração da String de dados.	68
11	Pontos de Detecção de GLP para o MQ-2.	70
12	Teste de Envio e recebimento dos pacotes para cada nó.	74
13	Taxa de transferência de dados para cada nó.	76
14	Distância entre os nós.	77

Lista de Abreviações

AD	Analógico Digital
API	Application Programming Interface
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CS	Chip Select
DIN	Digital Input
DOUT	Digital Output
EMQ	Erro médio quadrático
GDESTE	Grupo de Desenvolvimento de Sistemas de Telecomunicações e Sistemas Embarcados
GEE	Gases de Efeito Estufa
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
GWP	Global Warming Potentials
ICSP	In-Circuit Serial Programming
IDE	Integrated Development Environment
IFCE	Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Ceará
MOSI	Master Output Slave Input
MISO	Master Input Slave Output
MP	Material Particulado
NF	Noise Figure
OEMA	Órgãos Estaduais de Meio Ambiente

OMS	Organização Mundial da Saúde
PAN	Personal Area Network
PPM	Partes Por Milhão
PQA	Padrões de Qualidade do Ar
RF	Radio Frequencia
RSSF	Redes de sensores sem fio
RTC	Real Time Clock
SCK	Serial Clock
SNR	Signal Noise Ratio
SPI	Serial Peripheral Interface
USB	Universal Serial Bus

INTRODUÇÃO

O efeito estufa é um dos fenômenos naturais que possibilitam a vida humana na Terra. Ao passar pela atmosfera terrestre parte da energia solar é absorvida pelos oceanos e pela superfície da Terra, promovendo o seu aquecimento. Uma parcela desse calor é irradiada de volta ao espaço, mas é bloqueada pela presença de gases de efeito estufa (GEEs) que absorvem parte da radiação infravermelha (AMBIENTE, 2016).

De fato, é a presença desses gases na atmosfera que torna a Terra habitável, pois, caso não existissem naturalmente, a temperatura média do planeta seria da ordem de 18°C negativos. A troca de energia entre a superfície e a atmosfera mantém as atuais condições, que proporcionam uma temperatura média global, próxima à superfície, de 14°C (AMBIENTE, 2016).

As emissões de GEEs ocorrem praticamente em todas as atividades humanas e setores da economia: na agricultura, por meio da preparação da terra para plantio e aplicação de fertilizantes; na pecuária, por meio do tratamento de dejetos animais e pela fermentação entérica do gado; no transporte, pelo uso de combustíveis fósseis, como gasolina e gás natural; no tratamento dos resíduos sólidos, pela forma como o lixo é tratado e disposto; nas florestas, pelo desmatamento e degradação de florestas; e nas indústrias, pelos processos de produção, como cimento, alumínio, ferro e aço, por exemplo. Os danos ambientais causados pela ação antrópica desordenada afetam os ecossistemas, comprometendo a qualidade de vida do próprio homem (AMBIENTE, 2016).

Neste contexto, as técnicas de sensoriamento remoto podem auxiliar na solução de vários problemas ligados aos interesses e às necessidades das comunidades envolvidas, tais como previsão do tempo, avaliação de safras agrícolas, monitoração de desastres ambientais, entre outros.

De forma a tornar mais independentes as medidas de qualidade do ar, foi estudada

e fabricada uma rede de sensores cuja função é obter periodicamente os valores de temperatura e dos gases definidos para cada sensor junto às informações de data e hora.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Apresentar um sistema *wireless*, voltado para a monitoração da qualidade do ar. O sistema permitirá a supervisão em tempo real, remotamente, de um conjunto de dados e a visualização de históricos.

1.1.2 Objetivos Específicos

Projetar e implementar uma Rede de Sensores Sem Fio (RSSF) para obter dados da qualidade do ar, em tempo real e armazená-los, disponibilizando-os, posteriormente, para análise em um sistema supervisorio ou via Web.

1.2 Metodologia, Materiais e Métodos do Trabalho

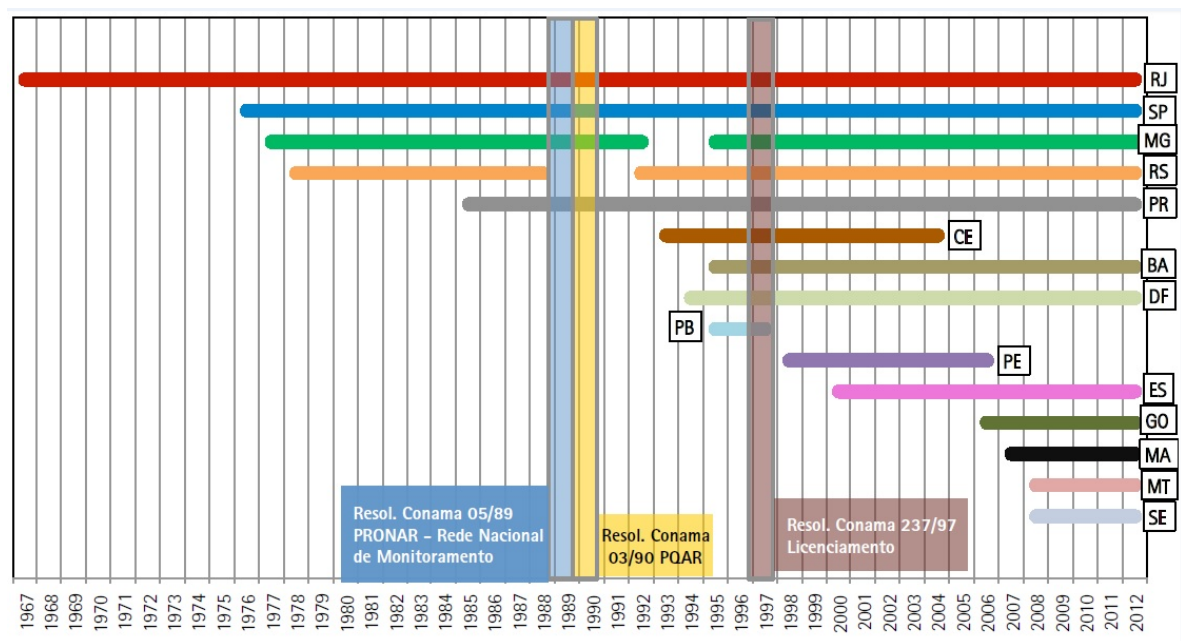
Foram examinados os diversos tipos de RSSF e escolhida uma arquitetura e tipo de rede que possibilitem a obtenção do objetivo. No caso, optou-se por uma rede do tipo ZigBee; tendo sido feito um conjunto de medições em laboratório para validar o funcionamento global: sensores, placa e comunicação. Todos os nós bem como o *hardware* coordenador foram testados individualmente e em seguida a rede completa foi testada para sua validação.

1.3 Motivação

A retenção da radiação terrestre através dos gases de efeito estufa é um fenômeno natural que já se processa na atmosfera da Terra há bilhões de anos. No entanto, evidências científicas apontam que os crescentes aumentos nas emissões antropogênicas de GEEs têm elevado suas concentrações na atmosfera a níveis sem precedentes na história da humanidade (IPCC, 2006).

Com base no histórico da operação das redes de monitoramento da qualidade do ar operadas pelos Órgãos Estaduais de Meio Ambiente (OEMA), percebe-se uma inconstância por uma grande parte dos Estados, como pode ser visto na Figura 1.

Figura 1: Histórico da operação das redes de monitoramento da qualidade do ar operadas pelos OEMA



Fonte: Instituto de Energia e Meio Ambiente

1.4 Organização do Trabalho

Capítulo 2: apresentam-se tópicos relacionados à qualidade do ar, considerando as mudanças climáticas, saúde pública e os poluentes atmosféricos; justificando a importância de se monitorar melhor esses temas.

Capítulo 3: o capítulo refere-se aos aspectos referentes às RSSFs: características, transceptores, o padrão Zigbee e suas topologias.

Capítulo 4: este capítulo é dedicado à metodologia de trabalho, configuração de rede utilizada, modelagem dos circuitos sensores e da rede sem fios, baseadas no protocolo ZigBee.

Capítulo 5: serão apresentados os resultados obtidos a partir dos testes realizados em laboratório. Os dados percorrem a rede ZigBee até a estação base, cuja função é processar, manipular, armazenar estes resultados numa base de dados em tempo

real.

Capítulo 6: capítulo reservado para as conclusões e trabalhos futuros.

ASPECTOS RELACIONADOS À QUALIDADE DO AR E MUDANÇAS CLIMÁTICAS

2.1 Poluição atmosférica e mudanças climáticas globais

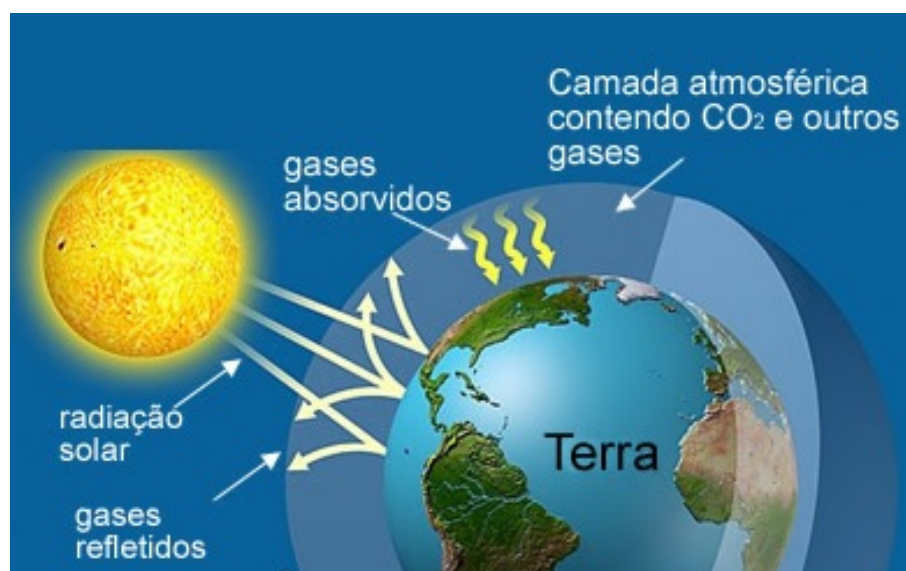
A atmosfera pode ser definida como um envoltório gasoso que recobre a Terra, compreendendo cinco camadas com características próprias. Essas camadas são classificadas pela variação das transições de temperatura em função da altitude em: troposfera, estratosfera, mesosfera, ionosfera e exosfera (BAIRD; CANN, 2011).

A atmosfera possui massa estimada em aproximadamente 5×10^{18} kg e é composta por uma mistura de gases estáveis e altamente compressíveis. Os principais gases atmosféricos são: o nitrogênio (N_2) ou azoto (que responde por 78% de toda a massa atmosférica), o oxigênio (O_2) (abrange cerca de 21%), outros gases como o argônio (Ar), o dióxido de carbono (CO_2), o ozônio (O_3), o neônio (Ne), hélio (He), o dióxido de enxofre (SO_2), o óxido nitroso (N_2O) e o vapor d'água (MANAHAN, 2011).

Poluentes atmosféricos são gases e partículas sólidas (poeiras, pós e fumos) resultantes das atividades humanas e de fenômenos naturais dispersos no ar atmosférico (BAIRD; CANN, 2011). Desse modo, estão incluídos nessa categoria, os gases e partículas expelidos por veículos e indústrias e também aqueles oriundos da degradação da matéria orgânica, vulcanismos e outros fenômenos naturais, como também, as substâncias formadas pelos processos fotoquímicos mediados pela reação de certos poluentes com a radiação advinda do sol (SPIRO; STIGLIANI; YAMAMOTO, 2009).

Gases como o dióxido de carbono (CO_2), o metano (CH_4), clorofluorcarbonetos (CFCs), hidrofluorcarbonetos (HFCs), perfluorcarbonetos (PFCs), o hexafluoreto de enxofre (SF_6), o óxido nitroso (N_2O) e o vapor d'água, embora representem uma proporção menor que 1% da atmosfera, apresentam um papel fundamental para a vida na Terra, estando diretamente envolvidos no equilíbrio térmico do planeta absorvendo parte da radiação solar incidente na superfície da Terra, fenômeno definido como efeito estufa sendo chamados de gases de efeito estufa (GEE) (TEIXEIRA *et al.*, 2001; GIDDENS, 2010), ver Figura 2.

Figura 2: Diagrama simplificado da absorção da luz solar e retenção térmica na atmosfera terrestre.

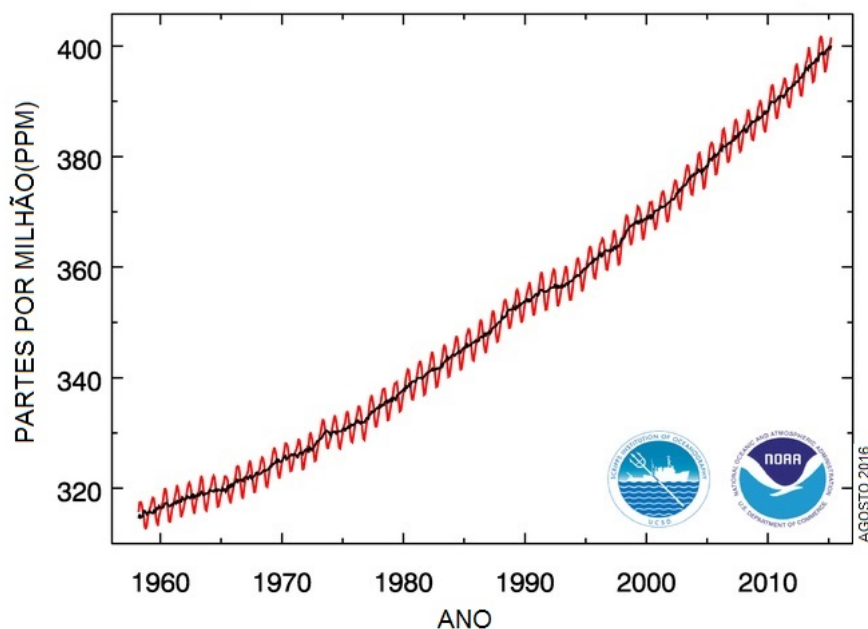


Fonte: Adaptado de

<http://mundoeducacao.bol.uol.com.br/quimica/oxidos-efeito-estufa.htm>

Com o objetivo de acompanhar o aumento nas emissões de GEEs, as concentrações do CO_2 atmosférico são monitoradas desde 1958 pelo Programa de CO_2 do Scripps Institution of Oceanography, no Observatório de Mauna Loa, no Havaí, configurando o mais longo registro de alta precisão do CO_2 atmosférico. Os níveis de dióxido de carbono (CO_2) na atmosfera aumentaram de 280 ppm (partes por milhão), desde o período que antecede a Revolução Industrial, para níveis acima de 400 ppm atualmente (NOAA, 2015), conforme pode ser visto na Figura 3.

Figura 3: Teores de CO₂ atmosférico medidos de 1958 a 2016 no observatório de Mauna Loa, Havaí.



Fonte: Adaptado de Scripps Institution of Oceanography e NOAA.

Apesar do dióxido de carbono (CO₂) contribuir com cerca de 53% do total dos gases estufa, não é o único gás capaz de impedir que a radiação infravermelha emitida da Terra escape. Outros gases produzidos pelas atividades humanas também contribuem para o efeito estufa como o metano, CFCs e óxido nitroso entre outros (USP, 2006). Entretanto, nem todos os gases de efeito estufa absorvem igualmente o calor sendo representado a sua capacidade de absorção pelo Potencial de Aquecimento Global (em inglês, Global Warming Potential) que é uma medida da variação na forçante radiativa na atmosfera em um determinado período de tempo para cada gás em função do CO₂ (Tabela 1).

Tabela 1: Concentração na atmosfera dos principais GEE, sua fórmula química, concentração atmosférica no período pré-industrial, concentração atmosférica em 2005, tempo de permanência na atmosfera (em anos), fontes de emissão e potencial de aquecimento global (G.W.P.).

	Gases do Efeito Estufa						
	Dióxido de Carbono	Metano	Óxido Nítrico	CFC-12	HCFC-12	Perfluormetano	Hexafluoreto de Enxofre
Fórmula química	CO_2	CH_4	N_2O	CCl_2F_2	$CHClF_2$	CF_4	SF_6
Concentração pré-industrial (ppbv)	278000	715	270	0	0	0	0
Concentração em 2005 (ppbv)	379000	1774	319	0,503	0,105	0,070	0,032
Permanência na atmosfera (ano)	Variável	12,2±3	120	102	12,1	50.000	3200
Fontes antropogênicas	Combustíveis, uso do solo, produção de cimento	Combustível, Cultura de arroz, Lixões, Gado	Fertilizantes, Processos industriais	Líquidos Refrigerantes, Espumas	Líquidos Refrigerantes	Produção de Alumínio	Fluidos Dielétricos
Potencial de Aquecimento Global	1	21	310	6200-7100	1300-1400	6500	23900

Fonte: IPCC, 2007

Apesar das emissões de origem antrópica terem aumentado linearmente com o tempo (1958 a 2016), existe uma variação sazonal na concentração do CO_2 devido à existência de reservatórios naturais e sumidouros de GEE presentes na biosfera como os vegetais, o solo, o fitoplâncton e os oceanos, que possuem a propriedade de captar e reter tais gases presentes na atmosfera (MANAHAN, 2011). Contudo, sua capacidade de retenção pode sofrer alterações quando afetados por ações antrópicas, como as queimadas e desmatamentos, quando se trata de florestas ou acidentes ambientais que contaminam o solo e os oceanos (SCHLESINGER; BERNHARDT, 2013).

A atividade antrópica tem alterado o ciclo biogeoquímico do carbono principalmente através da queima de combustíveis fósseis e da utilização de rochas carbonatadas para a produção de cimento (contribuindo com, aproximadamente, 75% das emissões), e por meio do desmatamento e das mudanças no uso da terra (BAIRD, 2001).

O aumento nas temperaturas globais e a nova composição da atmosfera devido ao aumento das emissões antrópicas de CO_2 desencadeiam alterações importantes em todos os sistemas e ciclos naturais da Terra. Dentre elas destacam-se: (a) a elevação do nível dos mares, mudanças nas correntes marinhas e na composição química da água (acidificação e anoxia); (b) alterações nos ciclos da água, do carbono do nitrogênio e de outros compostos; promovendo o degelo das calotas polares, do solo congelado das regiões frias (*permafrost*) e dos glaciares de montanha; (c) redução da disponibilidade de água potável; afetando o regime de chuvas e os

padrões dos ventos, (d) desertificação das regiões florestadas tropicais, enchentes e secas mais graves e frequentes; (e) aumento na frequência e na intensidade de tempestades e outros eventos climáticos extremos como as ondas de calor e de frio; (f) mudanças nos sistemas biológicos, químicos e físicos do planeta provocando uma grande redistribuição geográfica da biodiversidade, induzindo o declínio populacional de grande número de espécies, modificando e desestruturando ecossistemas em larga escala, e gerando por consequência problemas sérios para a produção de alimentos, o suprimento de água e a produção de bens diversos para a humanidade (CLIMATECHANGE, 2007).

2.2 Qualidade do ar e saúde pública

A poluição do ar pode ser entendida como a emissão de qualquer forma de matéria ou energia com intensidade, concentração, tempo ou características que possam tornar o ar impróprio, nocivo ou ofensivo à saúde, inconveniente ao bem-estar público, danoso aos materiais, à fauna e flora, prejudicial à segurança, ao uso e gozo da propriedade e às atividades normais da comunidade (BRASIL, 1990).

Além dos impactos nos sistemas naturais, outro compartimento ambiental bastante agredido pelo homem é o ar. Os primeiros relatos da degradação da qualidade do ar devido ao uso do carvão como combustível nas grandes cidades surgiram na era pré-cristã, tendo se agravado durante os primeiros séculos da história pós-cristã, quando então, os primeiros atos de controle da emissão de fumaça foram baixados na Inglaterra no final do século XIII (BRAGA; SALDIVA, 2001).

Entretanto, somente a partir da Revolução Industrial a poluição atmosférica passou realmente a ser considerada um problema ligado à saúde pública, quando passaram a ser implantadas técnicas de produção baseadas primeiramente na queima de grandes quantidades de carvão e lenha e, posteriormente de óleo combustível, que resultaram na perda gradativa da qualidade do ar nos grandes centros urbano-industriais com reflexos nítidos na saúde de seus habitantes (BRANCO, 2005).

Inicialmente, esse risco estava praticamente limitado aos trabalhadores de certas atividades, como os operários de minas de carvão e indústrias, que frequentemente morriam devido às intoxicações causadas pelo ar insalubre do interior das minas e das fábricas, como a história recente nos mostra ocorrências com milhares de mortes nas grandes cidades de Londres, México, Detroit, Tóquio, entre outras. Com

a intensificação das atividades urbano-industriais, esses episódios adquiriram maior abrangência espacial, passando a atingir de forma mais ampla a população das cidades. Dessa forma, a qualidade do ar deixou de ser um problema de bem-estar e passou a representar efetivamente um risco à população (BRAGA; SALDIVA, 2001).

O primeiro caso que despertou o interesse do meio científico ocorreu na Bélgica em 1930 no Vale do Rio Meuse, quando uma espessa névoa com alta concentração de resíduos emitidos pelas indústrias locais permaneceu estacionada sobre a região devido às condições meteorológicas desfavoráveis no período provocando a morte de mais de 60 pessoas e acometendo a população por sintomas como dores no peito, tosse, irritação nos olhos e na mucosa nasal e dificuldade de respirar (MOUVIER, 1994).

Episódios semelhantes ocorreram em 1948, na Pensilvânia nos Estados Unidos e em 1952, em Londres, devido à ocorrência de inversões térmicas que impediram a dispersão dos poluentes provocando a morte de 20 pessoas na pequena cidade de Donora na Pensilvânia e de mais de 4 mil mortes em Londres, ficando conhecido como o mais trágico caso dos efeitos deletérios dos poluentes atmosféricos sobre a população (LIMA; FARIAS; LIMA, 2016).

Em relação à natureza, as fontes emissoras se classificam como móveis e fontes fixas. As fontes móveis são emissões provenientes de fontes em movimento e compreendem os veículos automotores, trens, aviões e embarcações marítimas. As fontes fixas são assim denominadas as emissões lançadas à atmosfera por um ponto específico, fixo, como uma chaminé, por exemplo. Representam as emissões atmosféricas resultantes dos processos produtivos industriais e de geração de energia, como é o caso das termelétricas (BRANCO, 2005).

Os poluentes atmosféricos são geralmente classificados como primários ou secundários. Os poluentes primários são os contaminantes diretamente emitidos diretamente pelas fontes para o ambiente, como, por exemplo os gases e a fuligem expelidos por veículos e chaminés. Já os poluentes secundários resultam de reações dos poluentes primários com substâncias presentes na camada baixa da atmosfera e frações da radiação solar, por exemplo a formação e precipitação ácida dos compostos de nitrogênio e a formação de ozônio através da radiação ultravioleta oriunda do sol (BRANCO, 2005).

Mesmo presentes em baixas concentrações, compostos sulfurosos como os óxidos de enxofre ($\text{SO}_2 - \text{SO}_3$) e o ácido sulfúrico (H_2SO_4); compostos nitrogenados

como os óxidos de nitrogênio ($\text{NO} - \text{NO}_2$) e a amônia (NH_3); compostos orgânicos como hidrocarbonetos, álcool, aldeídos, ácidos orgânicos; óxidos de carbono como o monóxido de carbono (CO); oxidantes fotoquímicos (ozônio – O_3) e emissões não-gasosas (material particulado) apresentam elevada toxicidade e representam uma crescente ameaça à saúde de bilhões de pessoas (SEINFELD; PANDIS, 2016).

Estudos indicam a correlação entre a exposição humana a alguns poluentes e o agravamento de doenças respiratórias, cardiovasculares e neurológicas, especialmente em crianças e idosos, além da ocorrência de diferentes tipos de câncer (PEREIRA *et al.*, 2011; OLMO *et al.*, 2011).

A poluição atmosférica também traz impactos sobre os ecossistemas aquáticos e terrestres. A deposição dos poluentes atmosféricos nas plantas pode levar à redução da sua capacidade fotossintetizante, provocando, por exemplo, a redução de espécies vegetais e queda da produtividade agrícola (MANAHAN, 2011). A acidificação das águas da chuva provoca alteração do pH, mortandade de peixes e a perda da fertilidade dos solos (BAIRD; CANN, 2011).

Ao longo das últimas décadas, os países desenvolvidos têm realizado um grande número de estudos sobre os efeitos da poluição sobre a saúde humana (OLMO *et al.*, 2011). Esse conhecimento científico adquirido tem influenciado as políticas públicas de controle ambiental nesses países aumentando o rigor e a fiscalização das emissões provocadas por fontes fixas e principalmente pelas fontes móveis ou veiculares que se tornaram um problema de grande magnitude, devido ao número e estado de conservação desses veículos.

Nesse contexto, foram criados pelas agências ambientais para a prevenção dos efeitos deletérios da poluição atmosférica os padrões de qualidade do ar (PQA), constituindo-se na referência básica na identificação dos principais contaminantes e no estabelecimento dos níveis minimamente seguros de proteção das condições de saúde da população, expressos em termos de valores de sua concentração no ar (WHO *et al.*, 2006).

A Organização Mundial da Saúde (OMS), lista como principais poluentes do ar as seguintes substâncias: dióxido de enxofre (SO_2), dióxido de nitrogênio (NO_2), monóxido de carbono (CO), partículas em suspensão (material particulado) e ozônio troposférico (O_3) (WHO *et al.*, 2006), ver Tabela 2.

Tabela 2: Padrões de qualidade do ar para os principais poluentes segundo a *Environmental Protection Agency* (EPA) dos Estados Unidos.

Poluentes	Padrões Primários	Tempo médio
Partículas inaláveis	50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Média aritmética anual
(PM ₁₀)	150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Nível limite para 24 horas
Ozônio(O ₃)	0,12 ppm (235 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Média de 1 hora máxima diária
Dióxido de Enxofre (SO ₂)	0,03 ppm (80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 0,14 ppm (365 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Média aritmética anual Nível máximo em 24 horas diária
Monóxido de Carbono (CO)	9 ppm (10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 35 ppm (40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Média máxima de 8 horas Nível máximo de 1 hora
Dióxido de Nitrogênio (NO ₂)	0,053 ppm (100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Média aritmética anual

Fonte: (BASCOM *et al.*, 1996).

Visando a necessidade de se estabelecer base de referência nacional sobre limites de emissão de poluentes atmosféricos e buscando coibir excessos não condizentes com a defesa do meio ambiente, o Governo Federal estabelece através do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), em sua Resolução 03/1990, valores máximos toleráveis de concentrações de poluentes atmosféricos, ou seja, institui os padrões de qualidade do ar. São estabelecidos dois tipos de padrões de qualidade do ar: os primários e os secundários (CETESB, 2012).

2.3 Os poluentes atmosféricos, gases traço e seus efeitos negativos na saúde humana

A poluição atmosférica constitui um problema de múltiplas consequências e causas. Existem diversos fatores que influenciam na degradação da qualidade do ar dentre eles estão a localização e o porte das fontes emissoras, as características dos poluentes emitidos, bem como a dispersão destes na atmosfera e a reatividade química entre tais compostos.

Desse modo, dois fatores irão determinar a qualidade do ar: (1) a quantidade de poluentes lançados, o que está diretamente relacionado às ações humanas e (2) a capacidade de a atmosfera dispersar esses poluentes, fator dependente das condições meteorológicas, variações de temperatura, velocidade do vento, radiação e a ocorrência de fenômenos climáticos como as “inversões térmicas”.

Nesse sentido, a gestão da qualidade do ar deve fazer uso de instrumentos que levem em conta o conhecimento do conjunto de fatores que influenciam na degradação

da qualidade do ar somados ao planejamento urbano, a produção de bens e energia para o gerenciamento dessas áreas afim de minimizar os impactos sobre o ambiente e os efeitos danosos à saúde da população.

2.3.1 Compostos sulfurosos

Uma grande variedade de compostos de enxofre é lançada na atmosfera sob a forma de óxidos de enxofre (SO_x) e gás sulfídrico (H₂S) originários principalmente de fontes antropogênicas como refinarias de petróleo, veículos a diesel, fornos e metalurgia e fabricação de papel e uma pequena fração por fontes naturais como a atividade vulcânica e a degradação da matéria orgânica (CETESB, 2014).

Dióxido de Enxofre (SO₂)

É um gás incolor, ácido, irritativo capaz de exalar forte odor, sendo considerado um dos mais frequentes poluentes atmosféricos. Sua reatividade é mediada pela presença de luz solar, temperatura, umidade, adsorção do gás na superfície das partículas e pelo seu tempo de permanência no ar. Possui alta solubilidade na água e uma vez lançado na atmosfera pode ser modificado para SO₃ e tornar-se ácido sulfúrico (H₂SO₄) formando aerossóis ácidos e chuva ácida (CETESB, 2014).

O longo tempo na atmosfera permite que o SO₂ e seus derivados (aerossóis ácidos) sejam transportados para regiões distantes das fontes primárias de emissão, aumentando significativamente a área de atuação desses poluentes no ambiente (IPCC, 2006).

Dentre os efeitos danosos a saúde, podem ser citados irritação nas mucosas oculares, o agravamento dos sintomas da asma, aumento de internações hospitalares, decorrentes de lesões do trato respiratório além de agravar problemas cardiovasculares (CETESB, 2014).

2.3.2 Compostos nitrogenados

Os óxidos de nitrogênio (NO – NO₂) e a amônia (NH₃) são os compostos gasosos de nitrogênio mais comuns encontrados na atmosfera além do próprio nitrogênio (N₂) que compõe 78% do ar atmosférico (CETESB, 2012).

Os óxidos de nitrogênio são gases formados na atmosfera devido a interações químicas que se processam entre o nitrogênio e o oxigênio. Nesse grupo estão incluídos o óxido nítrico (NO), o dióxido de nitrogênio (NO₂) e o óxido nitroso (N₂O).

Óxido nitroso (N₂O)

É um gás traço, incolor, inodoro, de baixa solubilidade no sangue que age como agente anestésico fraco em forma de gás respiratório inorgânico. O N₂O pode provocar modestos aumentos da frequência respiratória e quando administrado isoladamente pode aumentar de forma expressiva o fluxo sanguíneo cerebral e a pressão intracraniana (BRAGA; SALDIVA, 2001).

As principais fontes de óxido nitroso na atmosfera são as reações de nitrificação e a desnitrificação mediadas por microorganismos que ocorrem nos solos. A emissão antrópica está associada as mudanças no uso e cobertura dos solos, o desmatamento e o expressivo uso de fertilizantes e pesticidas nas lavouras (CETESB, 2014).

Atualmente, o óxido nitroso (N₂O) tem recebido maior atenção, principalmente por contribuir para o efeito estufa e para a destruição da camada de ozônio (CETESB, 2013).

Dióxido de Nitrogênio (NO₂)

É um gás marrom avermelhado com odor muito forte e muito irritante, altamente tóxico e relativamente solúvel em água. Sua presença na atmosfera é fator chave na formação do ozônio troposférico (BRAGA; SALDIVA, 2001).

Suas fontes podem ser naturais através de vulcanismos, ações bacterianas, descargas elétricas e antropogênicas através de processos de combustão em fontes móveis e fixas. As emissões naturais são em maior escala que as antropogênicas, no entanto, em razão de sua distribuição sobre o globo terrestre, tem menor impacto sobre as concentrações deste poluente nas áreas urbanas.

Durante o processo de combustão sob elevadas temperaturas, o oxigênio reage com o nitrogênio formando óxido nítrico (NO), dióxido de nitrogênio (NO₂) e outros óxidos de nitrogênio (NO_x). Por apresentar elevada afinidade química com o oxigênio (O₂), o óxido nítrico (NO) se transforma rapidamente em dióxido de nitrogênio (NO₂), composto que na presença de luz do sol reage com hidrocarbonetos e oxigênio dando

origem ao ozônio (O_3) (CETESB, 2012).

Seu efeito tóxico está relacionado ao fato de ser um agente oxidante. Quando inalado, atinge as porções mais periféricas do pulmão devido à sua baixa solubilidade podendo provocar lesões nos brônquios e alvéolos pulmonares. Em concentrações elevadas é capaz de provocar edema pulmonar, e em menores concentrações, bronquite crônica e enfisema (BRAGA; SALDIVA, 2001).

Amônia (NH_3)

Gás tóxico, incolor, de odor acre e mais leve que o ar. Apresenta vasta aplicação industrial, dentre as quais pode-se destacar seu uso como fonte de nitrogênio na fabricação de fertilizantes, agente neutralizador na indústria do petróleo e gás de refrigeração em sistemas industriais. Como fonte natural podemos destacar a decomposição microbiana de compostos nitrogenados como a uréia existente na urina de animais (GUSTAFSSON, 1997).

A exposição direta à amônia pode provocar efeitos tóxicos diretos como irritação nas mucosas, asfixia e convulsões. A exposição contínua pode desencadear o aparecimento de doenças alérgicas e respiratórias severas.

2.3.3 Óxidos de carbono

Enormes quantidades de óxidos de carbono são emitidas a cada segundo para a atmosfera sob a forma de dióxido de carbono (CO_2) principalmente e como monóxido de carbono (CO) originários tanto de fontes naturais como antrópicas.

O CO_2 é considerado um gás traço devido à sua baixa concentração atmosférica menos de 1%. Está diretamente associado aos processos de combustão, respiração e fermentação possuindo papel fundamental na regulação do clima global.

É fornecido para a atmosfera através dos seguintes processos: erupções vulcânicas, fenômenos geológicos, combustão ou decaimento de compostos orgânicos; decomposição de carbonatos, difusão através dos corpos d'água (CETESB, 2014).

Monóxido de Carbono (CO)

Gás incolor e inodoro que apresenta menor densidade que o ar. É considerado um poluente local e tem sua origem associada a um processo de combustão incompleta, ou seja, se forma toda vez que o carbono é queimado com insuficiência de oxigênio (O_2). Apresenta relativa estabilidade na atmosfera com tempo médio global na troposfera de aproximadamente um mês para climas tropicais e quatro meses em climas temperados (IPCC, 2001).

Devido a suas implicações à saúde humana, o monóxido de carbono é considerado um severo poluente atmosférico sendo considerado um gás asfixiante por apresentar alta afinidade química com a hemoglobina no sangue (210 vezes maior que a do oxigênio), substituindo o oxigênio nas células sanguíneas e impedindo o seu transporte através do processo de respiração. Em baixa concentração causa fadiga e dores no peito, sob altas concentrações pode causar lesões ao sistema nervoso, cefaléias, paralisção de membros, asfixia e morte (CETESB, 2013).

2.3.4 Compostos Orgânicos

São compostos formados basicamente por carbono e hidrogênio, podendo se apresentar sob a forma de gases, partículas finas ou gotas. Dentre eles estão os hidrocarbonetos, álcoois, aldeídos e os ácidos orgânicos.

Provêm de uma grande variedade de processos industriais e naturais. Nos centros urbanos as principais fontes emissoras são os carros, ônibus e caminhões, nos processos de queima e evaporação de combustíveis.

Hidrocarbonetos (HC)

Representam um vasto número de compostos orgânicos formados unicamente por átomos de carbono e hidrogênio sob a forma de cadeias simples ou ramificadas, cíclicas ou associadas a compostos cíclicos, unidos através de ligações simples ou duplas.

Na atmosfera os hidrocarbonetos podem reagir com átomos de oxigênio, nitrogênio, enxofre e cloro formando uma enorme variedade de compostos derivados, tais como aldeídos, álcoois, éteres, cetonas, ácidos, etc.

Metano (CH₄)

O metano é um gás incolor, insípido, inodoro e mais leve que o ar. Possui baixa toxicidade, porém, em níveis extremos pode provocar danos à saúde sendo asfixiante sob concentrações elevadas (acima de 500000 ppm)(CETESB, 2014).

É um dos principais gases que contribuem para o efeito estufa e indiretamente, por alterações climáticas absorvendo a luz infravermelha a 7,66 μm , que corresponde a uma região espectral que a água e o gás carbônico praticamente não absorvem (BAIRD; CANN, 2011).

Pode ter origem na atmosfera através de diversas fontes: (a) biogênica como produto dos processos biológicos como na decomposição anaeróbica da matéria orgânica, na digestão de ruminantes e nas emissões naturais de áreas alagadas e, (b) pirogênica englobando as atividades relacionadas a queima de recursos naturais (combustíveis fósseis e biomassa)(IPCC, 2006).

Propano (C₃H₈)

É um gás incolor, insolúvel em água e extremamente inflamável. É o principal gás formador do Gás Liquefeito de Petróleo (GLP), que é uma mistura do propano com pequenas quantidades de propileno, butano, butileno e etanotiol utilizado como odorizante a fim de lhe conferir odor facilmente identificável, para o caso de uma eventual situação de vazamento (ANP, 2016).

Como uso doméstico do propano podemos citar seu uso como fonte de energia para cozimento dos alimentos em fogões, calefação da água, o aquecimento de ambientes e atividades de lazer. Pode também ser utilizado como matéria-prima nos segmentos: comercial (hospitais, lavanderias, restaurantes, padarias, hotelaria), siderúrgico (fundição, corte e solda de metais), petroquímico (fabricação de borracha, polímeros, álcoois e éteres), combustível industrial (indústria de vidros, papel, celulose e na indústria alimentícia), agropecuário (secagem de grãos, controle de pragas aquecimento e esterilização de ambiente de criação de animais), uso automotivo, além de seu uso em caldeiras, saunas e piscinas (FARAH, 2012).

Hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs)

São poluentes orgânicos de importância ambiental e interesse toxicológico em razão de apresentarem propriedades carcinogênicas e/ou mutagênicas para homens e animais. Vários componentes deste grupo são capazes de reagir diretamente, ou após sofrerem transformações metabólicas, com o DNA, tornando-se potenciais carcinógenos e eficientes mutágenos (ANDRADE et al., 2002). Entre eles destacam-se o benzeno, o tolueno, o benzo[a]antraceno, e o benzo[a]pireno.

São substâncias lipofílicas podendo apresentar grande persistência no meio ambiente distribuindo-se nos diferentes compartimentos ambientais (solo, água, biota) sendo vias de contaminação humana (BAIRD; CANN, 2011).

Dentre suas inúmeras fontes, podem ser citados os processos de combustão de material orgânico (principalmente a exaustão de motores a diesel ou a gasolina), a queima de carvão, a exaustão de plantas de incineração de rejeitos, a fumaça de cigarro além de vários processos industriais como, por exemplo, a produção de alumínio e a gaseificação do coque. Como fonte natural destaca-se o vulcanismo (WHO et al., 2006).

Aldeídos (RCHO)

São compostos químicos resultantes da combustão incompleta, ou seja, da oxidação parcial em motores a combustão que utilizam álcool (etanol) ou de reações fotoquímicas na atmosfera, envolvendo hidrocarbonetos. Esses hidrocarbonetos não queimados reagem com os óxidos de nitrogênio e, na presença de luz solar, se transformam em NO₂ assumindo um papel importante na formação de compostos fotoquímicos, tais como o ozônio (CETESB, 2012).

Os aldeídos mais comuns emitidos são o formaldeído e o acetaldeído. Seus principais efeitos estão associados a irritação das mucosas, dos olhos, do nariz e das vias respiratórias e a ocorrência de crises asmáticas, principalmente em idosos e crianças. São considerados compostos carcinogênicos potenciais constituindo em ameaça significativa à saúde humana, além de contribuírem para o aquecimento global de uma forma substancial (BAIRD, 2001).

2.3.5 Oxidantes Fotoquímicos

Quando ocorre uma queima incompleta dos combustíveis utilizados nos motores à combustão há a formação de subprodutos de composição variada como gases e material particulado. Tais substâncias, são de modo geral bastante reativas e em contato com os raios solares e os gases atmosféricos podem dar origem a poluentes secundários de alta toxicidade, capazes de provocar danos a longo e a curto prazo à saúde da população e aos ecossistemas (BAIRD, 2001). Estão entre eles o ozônio (O_3), o nitrato de peroxi-acetila (PAN), os óxidos de nitrogênio (NO_x), o dióxido de enxofre (SO_2) e os hidrocarbonetos.

Ozônio (O_3)

O ozônio é considerado um poluente secundário, ou seja, não é emitido diretamente para a atmosfera, mas formado a partir de outros poluentes atmosféricos através de uma série de reações catalisadas pelos raios solares ultravioletas envolvendo como precursores os óxidos de nitrogênio (NO_x) e hidrocarbonetos, derivados de fontes de combustão móveis, como os veículos automotivos, de fontes estacionárias, como usinas termoeletricas, e até mesmo fontes naturais como os vegetais superiores, que contribuem na produção de compostos orgânicos voláteis (BAIRD; CANN, 2011).

É um potente oxidante citotóxico capaz de provocar inúmeros efeitos deletérios sobre a saúde humana incluindo o agravamento dos sintomas de asma, de deficiência respiratória, bem como de outras doenças cardiovasculares (arteriosclerose) e pulmonares (enfisemas, bronquites, etc.). O longo tempo de exposição pode ocasionar redução na capacidade pulmonar, desenvolvimento de asma e redução na expectativa de vida.

2.3.6 Material Particulado (MP)

O material particulado é uma complexa mistura de partículas líquidas e sólidas em suspensão no ar, cujos componentes apresentam características físicas e químicas diversas. Composto por carbono orgânico e por carbono elementar (carbono negro) o material particulado atmosférico pode trazer inúmeros transtornos ao clima regional e à saúde pública. As partículas do carbono negro possuem uma grande

área superficial e porosa adsorvendo uma grande variedade de compostos de elevada toxicidade incluindo carcinogênicos e mutagênicos como os hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs), ozônio (O_3) e óxidos de nitrogênio e enxofre (NO_x , SO_2) (III *et al.*, 2002). Apresentando também relação direta com patologias do sistema respiratório, arteriosclerose, doenças cardíacas e mortalidade infantil (GOUVEIA *et al.*, 2003).

Em geral, o material particulado é classificado em relação ao tamanho de suas partículas, devido à relação existente entre diâmetro e possibilidade de penetração no trato respiratório. Estão divididas segundo as seguintes classes de tamanho: PM₁₀ (partículas grossas $\leq 10 \mu m$ de diâmetro), oriundas da dispersão mecânica do solo ou outros materiais da crosta terrestre, materiais biológicos, pólenes e esporos; PM_{2,5} (partículas finas $\leq 2,5 \mu m$ de diâmetro), originadas principalmente da combustão de fontes móveis e estacionárias, como automóveis, incineradores e termoelétricas; e as partículas ultrafinas ($\leq 0,1 \mu m$ de diâmetro) (CETESB, 2012).

2.4 Conclusão

Foram expostos nesse capítulo os principais aspectos relacionados à qualidade do ar e às mudanças climáticas globais, levando em consideração a poluição atmosférica, a saúde pública e os GEE.

REDES DE SENSORES SEM FIO

3.1 Introdução

Redes de sensores sem fio (RSSFs) diferem de redes de computadores tradicionais em vários aspectos. Normalmente essas redes possuem um grande numero de nós distribuídos, tem restrições de energia, e devem possuir mecanismos para auto-configuração e adaptação devido a problemas como falhas de comunicação e perda de nós. Uma RSSF tende a ser autônoma e requer um alto grau de cooperação para executar as tarefas definidas para a rede. Isto significa que algoritmos distribuídos tradicionais, como protocolos de comunicação e eleição de líder, devem ser revistos para esse tipo de ambiente antes de serem usados diretamente. Os desafios e considerações de projeto de RSSFs vão muito além das redes tradicionais (LOUREIRO *et al.*, 2003).

Ao escolher os componentes de *hardware* de um nó sensor, evidentemente, os requisitos da aplicação são fatores decisivos no que diz respeito principalmente ao tamanho, custos e consumo de energia dos nós. Facilidades de comunicação, como tal, são muitas vezes consideradas de qualidade aceitável, mas a relação entre os recursos e os custos é crucial. Em aplicações menos criteriosas, a simples dimensão de um nó não é tão importante; em vez disso, a conveniência, fonte de alimentação simples, e custo são prioridades.

No caso da comunicação sem fio, em geral, a primeira escolha a se fazer, é a do meio de transmissão; as escolhas habituais incluem frequências de rádio, comunicação óptica e de ultrassom. Destas escolhas, Rádio Frequência (RF) à base de comunicação é, de longe, a mais relevante, uma vez que melhor se adapta aos requisitos da maioria das aplicações de RSSF pois fornece altas taxas de dados, taxas de erro aceitáveis, gasto de energia razoável, e não requer uma linha de visão entre o emissor e o receptor.

3.2 Características das RSSF

Para Loureiro *et al.* (2003), os nós sensores são capazes de coletar determinado tipo de dado e enviar os dados coletados por ele, ou recebidos de outro nó, para um dos nós vizinhos. Esta comunicação sem fio entre os nós é realizada até que o nó coordenador receba os dados. O nó coordenador é capaz de enviar os dados coletados através da internet, de uma conexão por satélite ou de outra infraestrutura de rede. Esta topologia baseada em múltiplos saltos é chamada de *multihop*. A topologia *multihop* permite a redução do consumo de energia na transmissão, pois evita que todos os nós da rede precisem transmitir dados diretamente ao nó sorvedouro. Em vez disso, os nós só precisam realizar transmissões aos seus vizinhos e podem utilizar rádios de baixa potência.

Redes de sensores sem fio apresentam particularidades conforme as áreas de aplicação. Algumas são discutidas em (ZHANG; LI, 2009) e estão relacionadas a seguir.

Endereçamento dos sensores ou nós. Dependendo da aplicação, cada sensor pode ser endereçado unicamente ou não. Por exemplo, sensores embutidos em peças numa linha de montagem ou colocados no corpo humano devem ser endereçados unicamente se deseja saber exatamente o local de onde o dado está sendo coletado. Por outro lado, sensores monitorando o ambiente numa dada região externa possivelmente não precisam ser identificados individualmente já que o ponto importante é saber o valor de uma determinada variável nessa região (GARCIA, 2014).

Agregação dos dados. Indica a capacidade de uma RSSF de agregar ou sumarizar dados coletados pelos sensores. Caso a rede tenha essa funcionalidade, é possível reduzir o número de mensagens que precisam ser transmitidas por ela. Os dados coletados são combinados e sumarizados ainda na rede, antes de serem enviados a estação base (GARCIA, 2014).

Mobilidade dos sensores. Indica se os sensores podem se mover ou não em relação ao sistema em que estão coletando dados. Por exemplo, sensores colocados numa floresta para coletar dados de umidade e temperatura são tipicamente estáticos, enquanto sensores colocados na superfície de um oceano para medir o nível de poluição da água são móveis. Sensores colocados no

corpo de uma pessoa para monitorar o batimento cardíaco durante o seu dia de trabalho são considerados estáticos (GARCIA, 2014).

Restrições dos dados coletados. Indica se os dados coletados pelos sensores tem algum tipo de restrição como um intervalo de tempo máximo para disseminação de seus valores para uma dada entidade de supervisão (GARCIA, 2014).

Quantidade de sensores. Redes contendo de 10 a 100 mil sensores são previstas para aplicações ambientais como monitoramento em oceanos e florestas. Logo, escalabilidade é uma questão importante. Possivelmente, para a maior parte das aplicações discutidas anteriormente, os sensores serão estáticos em relação ao sistema de sensoriamento (GARCIA, 2014).

Limitação da energia disponível. Em muitas aplicações, os sensores serão colocados em áreas remotas, o que não permitirá facilmente o acesso a esses elementos para manutenção. Neste cenário, o tempo de vida de um sensor depende da quantidade de energia disponível. Aplicações, protocolos, e algoritmos para RSSFs não podem ser escolhidos considerando apenas sua elegância e capacidade, mas definitivamente a quantidade de energia consumida. Assim, o projeto de qualquer solução para esse tipo de rede deve levar em consideração o consumo, o modelo de energia e o mapa de energia da rede (GARCIA, 2014).

Auto-organização da rede. Sensores numa RSSF podem ser perdidos por causa de sua destruição física ou falta de energia. Sensores também podem ficar incomunicáveis devido a problemas no canal de comunicação sem fio ou por decisão de um algoritmo de gerenciamento da rede. Neste caso, isso pode acontecer por diversas razões como, por exemplo, para economizar energia ou por causa da presença de outro sensor na mesma região que já coleta o dado desejado (GARCIA, 2014).

A situação contrária também pode acontecer: sensores inativos se tornarem ativos ou novos sensores passarem a fazer parte da rede. Em qualquer um dos casos, se sensores ficarem inoperantes ou passarem a participar de sua estrutura, é necessário haver mecanismos de auto-organização para que a rede continue a executar a sua função. Essa configuração deve ser automática e periódica já que a configuração manual não é viável devido a problemas de escalabilidade (GARCIA, 2014).

Tarefas colaborativas. O objetivo principal de uma RSSF é executar alguma tarefa colaborativa onde é importante detectar e estimar eventos de interesse e não apenas prover mecanismos de comunicação. Devido as restrições das RSSFs, normalmente os dados são “fundidos” ou sumarizados para melhorar o desempenho no processo de detecção de eventos. O processo de sumarização é dependente da aplicação que está sendo executada (GARCIA, 2014).

Capacidade de responder a consultas. Uma consulta sobre uma informação coletada numa dada região pode ser colocada para um nó individual ou um grupo de nós. Dependendo do grau de sumarização executado, pode não ser viável transmitir os dados através da rede até o nó coordenador. Assim, pode ser necessário definir vários nós coordenadores que irão coletar os dados de uma dada área e responderão consultas referentes aos nós sob sua “jurisdição” (GARCIA, 2014).

3.3 Classificação

A classificação de uma RSSF depende de seu objetivo e área de aplicação. A aplicação influenciará diretamente nas funções exercidas pelos nós da rede, assim como na arquitetura desses nós (processador, memória, dispositivos sensores, fonte de energia, transceptor), na quantidade de nós que compõem a rede, na distribuição inicialmente planejada para a rede, no tipo de deposição dos nós no ambiente, na escolha dos protocolos da pilha de comunicação, no tipo de dado que será tratado, no tipo de serviço que será provido pela rede e consequentemente no tempo de vida dessa rede (RUIZ *et al.*, 2004).

De acordo com Ruiz (2003), as RSSFs podem ser classificadas segundo a configuração (ver Tabela 3), o sensoriamento (ver Tabela 4), o tipo de processamento (ver Tabela 5) e o tipo de comunicação (ver Tabela 6).

Tabela 3: Classificação das RSSF quanto à configuração.

Configuração		
Composição	Homogênea	Rede composta por nós que apresentam a mesma capacidade de <i>hardware</i> . Eventualmente os nós podem executar <i>softwares</i> diferentes.
	Heterogênea	Rede composta por nós com diferentes capacidades de <i>hardware</i> .
Organização	Hierárquica	Rede em que os nós estão organizados em grupos (<i>clusters</i>). Cada grupo terá um líder (<i>cluster-head</i>) que poderá ser eleito pelos nós comuns. Os grupos podem organizar hierarquias entre si.
	Plana	Rede em que os nós não estão organizados em grupos.
Mobilidade	Estacionária	Todos os nós sensores permanecem no local onde foram depositados durante todo o tempo de vida da rede.
	Móvel	Rede em que os nós sensores podem ser deslocados do local onde inicialmente foram depositados.
Densidade	Balanceada	Rede que apresenta uma concentração e distribuição de nós por unidade de área considerada ideal segundo a função objetivo da rede.
	Densa	Rede que apresenta uma alta concentração de nós por unidade de área.
	Esparsa	Rede que apresenta uma baixa concentração de nós por unidade de área.
Distribuição	Irregular	Rede que apresenta uma distribuição não uniforme dos nós na área monitorada.
	Regular	Rede que apresenta uma distribuição uniforme dos nós na área monitorada.

Fonte: (RUIZ, 2003)

Tabela 4: Classificação das RSSF quanto ao sensoriamento.

Sensoriamento	
Coleta Periódica	Os nós sensores coletam dados sobre o(s) fenômeno(s) em intervalos regulares. Um exemplo são as aplicações que monitoram o canto dos pássaros, onde os sensores fazem a coleta durante o dia e permanecem desligados durante a noite, no caso de pássaros de canto diurno.
Coleta Contínua	Os nós sensores coletam os dados continuamente. Um exemplo são as aplicações de detecção de atividades sísmicas que coletam dados
Coleta Reativa	Os nós sensores coletam dados quando ocorrem eventos de interesse ou quando solicitados pelo observador. Um exemplo são as aplicações que detectam a presença de objetos na área monitorada.
Coleta Tempo real	Os nós sensores coletam a maior quantidade de dados possível no menor intervalo de tempo. Um exemplo são aplicações que envolvem risco para vidas humanas tais como aplicações em escombros ou áreas de desastres.

Fonte: (RUIZ, 2003)

Tabela 5: Classificação das RSSF quanto ao tipo de processamento.

Tipo de processamento	
Infraestrutura	Os nós sensores executam procedimentos relacionados à infraestrutura da rede como, por exemplo, algoritmos de controle de acesso ao meio, roteamento, eleição de líderes, descoberta de localização e criptografia.
Localizado	Os nós sensores executam além dos procedimentos de infraestrutura, algum tipo de processamento local básico como, por exemplo, interpretação dos dados coletados pelos sensores.
Correlação	Os nós estão envolvidos em procedimentos de correlação de dados como, por exemplo, fusão, supressão seletiva, contagem, compressão e agregação.

Fonte: (RUIZ, 2003)

Tabela 6: Classificação das RSSF quanto à comunicação.

Comunicação		
Disseminação	Programada	Os nós disseminam dados em intervalos regulares.
	Contínua	Os nós disseminam os dados continuamente.
	Sob demanda	Os nós disseminam os dados em resposta à consulta do observador e à ocorrência de eventos.
Tipo de Conexão	Simétrica	Todas as conexões existentes entre os nós sensores, com exceção do nó coordenador têm o mesmo alcance.
	Assimétrica	As conexões entre os nós comuns têm alcances diferentes.
Transmissão	<i>Simplex</i>	Os nós sensores possuem transceptor que permite apenas a transmissão da informação.
	<i>Half-Duplex</i>	Os nós sensores possuem transceptor que permite transmitir ou receber em um determinado instante.
	<i>Full-Duplex</i>	Os nós sensores possuem transceptor que permite transmitir e receber dados ao mesmo tempo.
Alocação de Canal	Estática	Neste tipo de rede, se existir n nós, a largura de banda é dividida em n partes iguais.
	Dinâmica	Neste tipo de rede não existe atribuição fixa de largura de banda. Os nós disputam o canal para comunicação dos dados.
Fluxo de Informação	Inundação (<i>Flooding</i>)	Neste tipo de rede, os nós sensores fazem difusão de suas informações para seus vizinhos que por sua vez repetem esse processo até alcançar o ponto de acesso. Esta abordagem promove um alto <i>overhead</i> , mas é imune às alterações dinâmicas de topologia.
	<i>Multicast</i>	Neste tipo de rede os nós formam grupos e usam o multicast para comunicação entre os membros do grupo.
	<i>Unicast</i>	Neste tipo de rede, os nós sensores podem se comunicar diretamente com o ponto de acesso usando protocolos de roteamento <i>multihop</i> (múltiplos saltos).
	<i>Gossiping</i>	Neste tipo de rede, os nós sensores selecionam os nós para os quais enviam os dados.
	<i>Bargaining</i>	Neste tipo de rede, os nós enviam os dados somente se o nó destino manifestar interesse.

Fonte: (RUIZ, 2003)

3.4 O padrão ZigBee

O padrão IEEE 802.15.4 foi homologado com o nome de ZigBee por um acordo de empresas de diferentes segmentos denominada ZigBee Alliance. Trata-se de uma

tecnologia de transmissão e recepção de dados usando baixa taxa de dados, baixa potência, baixa complexidade e transmissões de rádio frequência de pequeno alcance permitindo grande escalabilidade e expansão, tornando esta tecnologia a ideal para sensores, controladores, monitorização remota e dispositivos eletrônicos portáteis, permitindo que sejam implementadas soluções de baixo custo e de alta eficiência em energia. Essa tecnologia oferece diferentes faixas de frequência, que são aplicadas de acordo com a região. Nos Estados Unidos, a frequência utilizada é de 902-928 MHz, possibilitando uma taxa de 40Kbps. Na Europa, usa-se a frequência 868-868.6 MHz, que atinge uma taxa de 20Kbps. Já a frequência 2400-2483.5 MHz é usada em todo o mundo, a taxa nesse caso é de 250Kbps (ESCHNER, 2011), conforme Tabela 7.

Tabela 7: Variação da Modulação de acordo com a Região.

Camada Física	Frequência	Canais	Taxa de bit (Kbits/s)	Modulação
868/915 MHz	868-870 MHz	0	20	BPSK
868/915 MHz	902-928 MHz	1-10	40	BPSK
2.4 GHz	2.4-2.4835 GHz	11-26	250	O-QPSK

Fonte: (ESCHNER, 2011)

É importante ressaltar a diferença entre os padrões IEEE 802.15.4 e ZigBee. O padrão IEEE 802.15.4 define as duas camadas de mais baixo nível: a camada física (PHY, *Physical*) e de controle de acesso ao meio (MAC, *Medium Access Control*) para redes sem fio caracterizadas por possuírem custo e taxa de transmissão reduzidos (LR-PAN, *Low-Rate Wireless Personal Area Networks*). Já o padrão ZigBee, define as cinco camadas de mais alto nível: a camada de rede (NWK, *Network Layer*) e a camada de aplicação (APL, *Application Layer*), que por sua vez engloba as camadas de Quadros da Aplicação (*Application Framework*), de Objetos de Dispositivos ZigBee (ZDO, *ZigBee Device Objects*) e a subcamada de suporte a aplicação (APS, *Application SubLayer*) (BARONTI *et al.*, 2007).

No protocolo ZigBee são definidos três tipos de dispositivos: o coordenador, roteador e dispositivos finais. O coordenador é o responsável pelo estabelecimento da rede ZigBee e pela interligação entre redes, tornando obrigatória a sua presença. O coordenador constrói um canal de operação e um número lógico para formar a rede. Após selecionado o endereço de rede (PAN ID) o coordenador permitirá a comunicação entre os dispositivos finais e roteadores. O roteador, por sua vez,

armazena informações dos nós da rede e com elas determina as melhores rotas para os pacotes de dados. Os dispositivos finais sempre devem estar vinculados a um roteador ou ao coordenador, não possuem a capacidade de se comunicarem diretamente com outros dispositivos finais (CRUZ, 2013).

3.5 Topologias de rede ZigBee

De acordo com as especificações do ZigBee, dependendo da aplicação, três topologias de rede diferentes (Estrela, Árvore e Malha) podem ser implementadas.

Estrela

Na configuração Estrela um dispositivo atua como o coordenador da Personal Area Network (PAN), o qual se encarrega de toda a comunicação em um dado canal de rádio. O coordenador da PAN deve ser capaz de se comunicar com qualquer outro dispositivo na rede. Essa funcionalidade é existente em um dispositivo de funções completas (FFD) e é implementada usando uma pilha de *software* de aproximadamente 30Kbytes. Um coordenador de PAN deve estar no modo de recepção quando ele não estiver transmitindo. Esta unidade provavelmente irá consumir muita potência para permitir operação com bateria, e provavelmente deverá ter uma fonte principal de alimentação. Um dispositivo de funções reduzidas (RFD) pode ser implementado utilizando um microcontrolador de baixo custo e pequena quantidade de memória. O RFD pode apenas se comunicar com um FFD. Ele deverá receber ou transmitir por um curto período de tempo para se tornar adequado para operação com bateria (MONSIGNORE, 2007).



Figura 4: Topologia em Estrela.

Fonte: (SOARES, 2012)

Árvore

A topologia Árvore é formada apenas modificando a topologia Estrela. Um ou mais dos RFDs conectados ao coordenador da PAN é substituído por um FFD, e destes FFDs, mais RFDs ou FFDs podem ser conectados. Uma vantagem desta topologia é que ela pode ser usada para aumentar a cobertura geográfica da rede (MONSIGNORE, 2007).

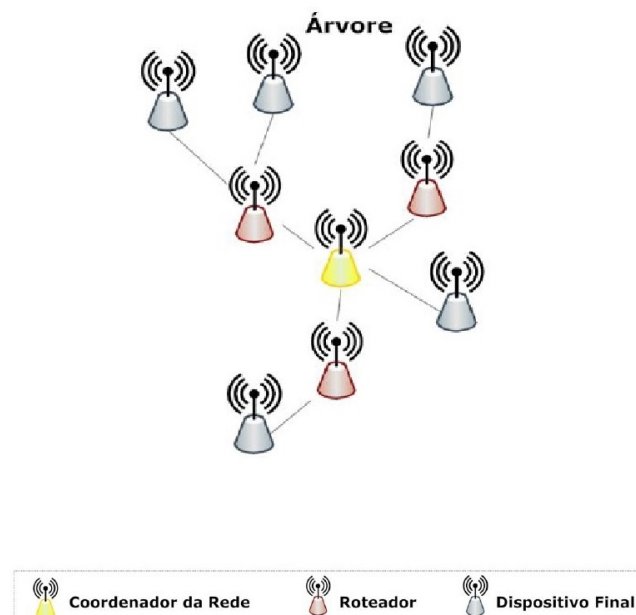


Figura 5: Topologia em Árvore.

Fonte: (SOARES, 2012)

Malha

A terceira topologia suportada pelo ZigBee é a Malha. Nessa configuração existe muita conectividade de uma das FFDs, que está atuando como o coordenador da PAN, com todas as outras FFDs participantes da rede. As RFDs também podem participar da rede, mas estarão conectadas apenas ao seu FFD pai, e não participam no roteamento. A principal vantagem da topologia malha é a confiança e rendimento da rede provido através do amplo número de caminhos (MONSIGNORE, 2007).

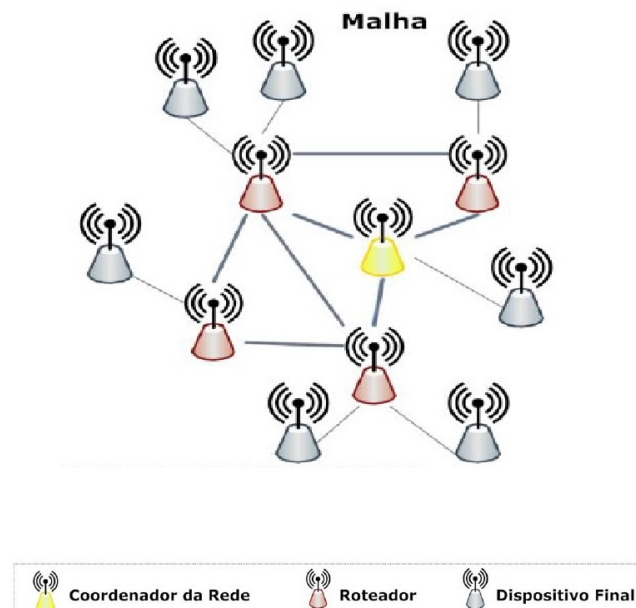


Figura 6: Topologia em Malha.

Fonte: (SOARES, 2012)

3.6 Dispositivos XBee

Os módulos XBee são formados, de modo geral, por um microcontrolador e um transceptor. O microcontrolador contém o *firmware* com a implementação do protocolo ZigBee e a especificação do comportamento do dispositivo (Coordenador, Roteador ou End Device).

Cada dispositivo possui dois endereços, o MY (16 bits) e o Número Serial (64 bits). O MY é o endereço de rede, variável, e é distribuído automaticamente pelo coordenador assim que o nó entra na rede. Uma analogia interessante é associar o endereço MY com o endereço IP nas redes TCP/IP com DHCP, em que cada máquina recebe um endereço automaticamente. Já o Número Serial é único e invariável para cada dispositivo fabricado (semelhante ao endereço MAC das placas de rede Ethernet).

Uma rede formada por dispositivos XBee possui apenas um coordenador, com endereço de rede (MY) igual a zero. Roteadores e dispositivos finais podem ser

utilizados em várias quantidades, de acordo com a necessidade. No entanto, dispositivos finais só se comunicam com roteadores ou com o coordenador da rede. Transmissões *broadcast* e *unicast* estão disponíveis. No caso da transmissão *broadcast* utiliza-se o endereço de 64 bits de destino igual a 0x000000000000FFFF.

3.6.1 Modos de Operação do XBee

Para Digi (2011), existem dois modos de operação para os módulos XBee, são eles: modo Transparente (AT) e modo API (Application Programming Interface).

Modo de operação transparente (AT)

No modo de operação transparente, o dispositivo atua simplesmente como um substituto da linha de comunicação serial. Assim, todos os dados que são recebidos via RS232 no pino de entrada (DIN) são transmitidos via Rádio Frequência (RF) para o módulo de destino. Da mesma maneira, os dados que chegam por meio da antena RF são direcionados ao pino de saída (DOUT).

Nesse modo de operação, os comandos de configuração só podem ser recebidos localmente, por intermédio da interface serial (RS232), o que impossibilita a configuração e a utilização à distância dos periféricos contidos no XBee (entradas e saídas digitais, conversores AD, etc). Também não é possível identificar o endereço de origem de dados recebidos ou receber mensagens de status indicando o sucesso ou a natureza de uma falha na transmissão.

Modo de operação API

O modo de operação API é uma alternativa ao modo de operação transparente. A API, baseada em quadros (*frames*), estende o nível no qual a aplicação pode interagir com os recursos de rede do módulo. Nesse modo de operação, todos os dados enviados e recebidos pelo módulo XBee são organizados em pacotes (com formato especificado pelo fabricante) que definem as operações ou eventos dentro do módulo.

O primeiro byte é o delimitador de início, que possui o valor 7E em hexadecimal. Qualquer dado recebido antes do delimitador de início é descartado. Os bytes 2 e 3 informam o tamanho do quadro que está sendo recebido. Os bytes 4 a n compõem o quadro de dados e definem a operação a ser realizada. O último byte contém a soma

de verificação (*checksum*) do quadro de dados, calculado pela Equação 3.3 ($0xFF - \text{Somatório dos bytes 4 a } n \text{ do pacote}$).

$$Checksum = 0xFF - \sum_{i=4}^n byte[i] \quad (3.1)$$

Caso o recebimento dos dados ou o valor do checksum esteja incorreto, um pacote de status indicando a natureza do erro é retornado. A Figura 5 apresenta a estrutura geral de um pacote API.

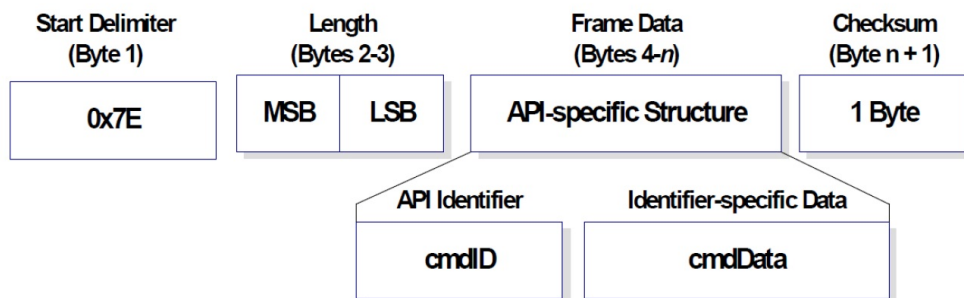


Figura 7: Estrutura geral de um pacote API.

Fonte: (DIGI, 2011)

3.7 Conclusão

Nesse capítulo foram apresentados conceitos gerais sobre RSSFs: características, classificações, transceptores, o padrão ZigBee e suas topologias e rede bem como os dispositivos e modos de operação.

METODOLOGIA

Neste capítulo são mencionadas as várias fases do processo de desenvolvimento do protótipo, Como a montagem do protótipo em *proto board*, a disposição do mesmo incorporado a uma caixa de pvc. É descrito no terceiro ponto a configuração de uma rede Zigbee, onde serão mencionados aspectos referentes à configuração dos rádio XBee. As ferramentas de *software* utilizadas, nomeadamente o XCTU juntamente com fluxogramas para uma melhor percepção do código perfazem o quarto ponto. Segue-se o tratamento, armazenamento e visualização dos dados recebidos pela rede Zigbee.

4.1 Arquitetura da rede

A topologia da rede foi definida como malha conforme Figura 8 mas também poderia ser do tipo árvore. Contudo, na topologia em árvore, as mensagens oriundas dos nós sensores tem apenas um caminho a seguir até atingir o coordenador, o que não é viável para um sistema de monitoramento. Após a mensagem do nó sensor chegar ao coordenador, este, por sua vez, a transmite para o PC de monitoramento local pela Universal Serial Bus (USB) para ser avaliado por um *software* supervisor.

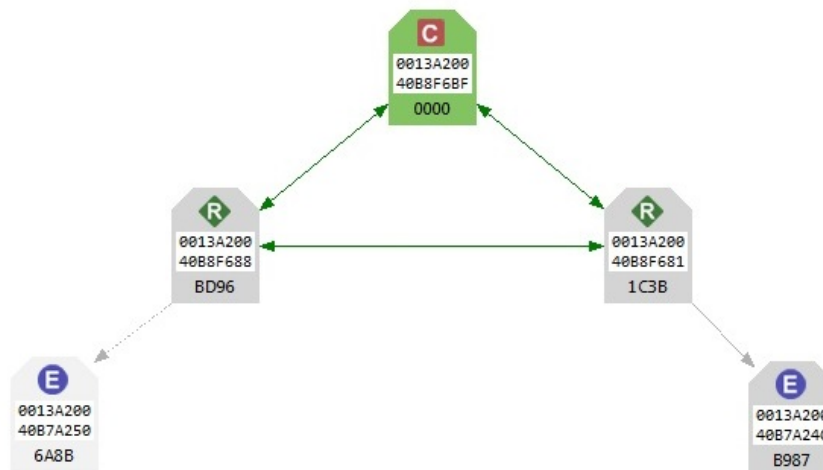


Figura 8: Topologia do Sistema (malha).

Fonte: O autor

4.2 Hardware

Para a construção da rede de sensores sem fio (RSSF) foram inicialmente selecionados os sensores de gás e fumaça MQ-2 e MQ-135 *Module* em conjunto com a placa Arduino Uno, uma tomada de energia, um módulo cartão SD, um relógio de tempo real (RTC), um Xbee *Shield* e um módulo ZigBee. Na Tabela 8 são apresentados os componentes com uma curta descrição, com o fabricante de cada componente e com o preço.

Tabela 8: Descrição e preços dos componentes de um nó sensor.

Qt	Descrição do produto	Nome e ref. Fabricante	Preço(R\$)
1	Arduino UNO R3	Arduino	50,00
1	Fonte regulável p/ <i>Protoboard</i>	<i>YwRobot Corporation</i>	13,90
1	RTC DS3231	<i>Maxim Integrated</i>	14,90
1	Módulo SD Card	Não consta	12,90
1	Sensor MQ-2	<i>Hanwei Eletronics</i>	12,93
1	Sensor MQ-135	<i>Hanwei Eletronics</i>	28,90
1	Cartão SD 8GB	<i>Kingston Technology Corporation</i>	17,99
1	Módulo XBee	<i>Digi international</i> xb24-bsit-004	135,00
1	XBee Shield para Arduino	Não consta	44,90
16	Jumper	Não consta	10,90
TOTAL			342,32

Fonte: O autor

Como observado, o preço de um nó sensor, é R\$ 342,32.

4.2.1 Sensores

O sensor de gás semicondutor é, basicamente, construído por um material capaz de mudar suas propriedades elétricas na presença de um determinado componente químico, em sua forma gasosa. Especificamente, no caso dos sensores de dióxido de estanho, a característica explorada é a resistência ou impedância, as quais se alteram de forma proporcional à presença e à concentração do gás a ser medido (LICZNEFSKI, 2004).

O sensor é dividido em duas partes. A primeira é o próprio elemento sensor, depositado em um substrato isolante e em terminais de ouro interdigitados. A outra parte é o aquecedor, que proporciona o aquecimento do elemento sensor até seu ponto de operação. Os sensores são caracterizados, de acordo com suas respostas elétricas em DC, AC, em diferentes concentrações do gás, e em diferentes valores de temperatura do aquecedor (GASPARETTI, 2007).

A detecção dos gases pelos sensores se dá através do efeito sobre a condutividade apresentada num óxido metálico presente no sensor, o dióxido de estanho (SnO_2) que, sob condições normais, absorve oxigênio na superfície cristalina através da indução térmica promovida pela corrente elétrica resultando, dessa forma, na geração de cargas positivas.

O sensor de gás MQ-2 detecta a emissão de gases que formam o gás liquefeito de petróleo (GLP) como o propano (C_3H_8), butano (C_4H_{10}), além do metano (CH_4), etanol (C_2H_6O), hidrogênio (H_2), ou seja, gases inflamáveis e combustíveis, e ainda o monóxido de carbono (CO) e fumaça. O sensor MQ-135 detecta a emissão dos gases amônia (NH_3), benzeno (C_6H_6), dióxido de carbono (CO_2) e óxido nitroso (NO_x).



Figura 9: Sensores MQ2 e MQ135.

Fonte: O autor

4.2.2 Arduino UNO R3

O Arduino UNO R3 é uma plataforma *open-source* de computação utilizada para prototipação de circuitos eletrônicos que pode interagir com seu ambiente por meio de *hardware* e *software* (MCROBERTS; LEVY; WOOTTON, 2010). É composto por uma placa com microcontrolador Atmel AVR, 14 pinos de *input* ou *output* digitais (sendo que 6 deles podem ser usados para saída PWM), 6 entradas analógicas, um cristal oscilador de 16MHz, conexão USB, conexão de energia, um botão de *reset* e um ambiente de programação baseado em *Wiring* e C++ (ARDUINO, 2016). Suas aplicações são as mais diversas podendo ser utilizado em sistemas embarcados, tais como: acionamento de LEDs internos e externos, alarmes, controle de servomotores, teclados virtuais, sensoriamentos, serviços web, transmissão e recepção via radiofrequência, entre outras. A Tabela 9 apresenta as principais características do Arduino UNO R3.

Tabela 9: Características do Arduino UNO R3.

CARACTERÍSTICAS	DESCRIÇÃO
Microcontrolador	ATmega328
Tensão de operação	5V
Tensão de entrada	7-12V
Pinos de I/O digitais	14
Pinos de entrada analógica	6
Corrente DC por pino I/O	40mA
Corrente DC por pino 3.3V	50mA
Memória Flash	32KB
Clock	16MHz
SRAM	2KB
EEPROM	1KB

O *software* para programação do Arduino é uma IDE (*Integrated Development Environment*) que permite o desenvolvimento de programas em alto nível convertendo-os para linguagem de máquina. Há diferentes modelos de Arduino variando em relação ao seu tamanho, memória e pinos de entrada e saída. O modelo Duemilanove, versão anterior ao Arduino Uno utilizado nesse projeto, dispõe de 16 KB de memória *flash* enquanto o Uno possui 32 KB e maior versatilidade.

O ICSP da placa Arduino armazena os dados preteritamente mensurados pelos sensores MQ-2, MQ-135 e RTC DS3231, bem como, o endereço do nó utilizando o protocolo serial SPI.

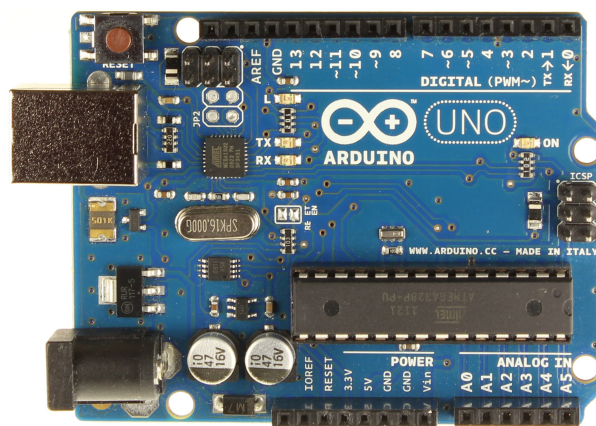


Figura 10: Arduino UNO R3.

Fonte: <https://solarbotics.com/product/50450/>

4.2.3 Real Time Clock

O relógio de tempo real (RTC) modelo DS3231 é um dispositivo de alta precisão, porém, de baixo custo com um cristal oscilador e um sensor digital de temperatura integrados. O dispositivo incorpora uma bateria interna de 3,3 V, que mantém a sua exata precisão do tempo mesmo com o sistema desligado.

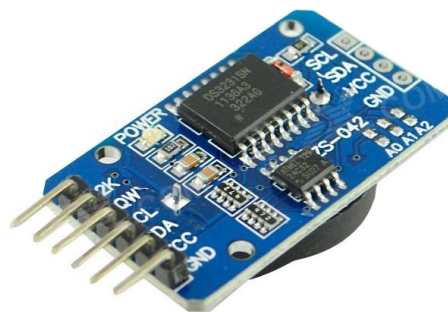


Figura 11: RTC DS3231.

Fonte: goo.gl/BMBLHI

O RTC fornece dados de temperatura entre 0°C e 70°C e de temporização tanto no formato de 24h quanto no formato de 12h com indicador AM/PM em segundos, minutos, hora, dia, mês e ano, transmitindo-os por meio do protocolo I2C que consiste fisicamente de duas vias, SDA e SCL, e alimentação (VDD), tipicamente de 3.3V ou 5V. Nesse tipo de protocolo o barramento é bidirecional, de baixa velocidade e síncrono com um clock em comum. O número de nós em um único barramento é limitado tanto pelo tamanho do endereço como por restrição de espaço.

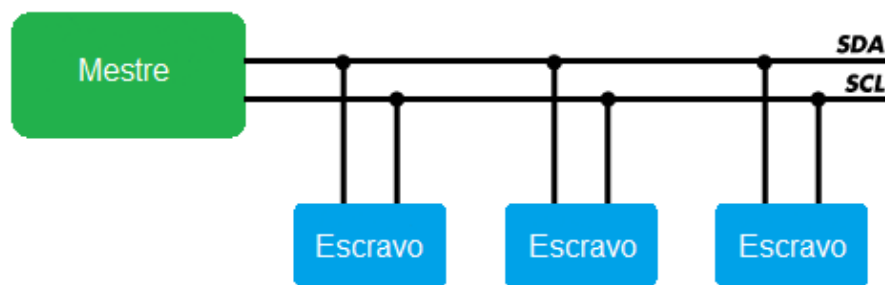


Figura 12: Barramento I2C.

Fonte: O autor

4.2.4 Cartão SD

O módulo cartão SD *card* permite a leitura e escrita em cartão SD com suporte para formatos de arquivo FAT16 e FAT32 e alimentação 3.3 ou 5V. A comunicação é feita pela interface SPI utilizando os pinos MOSI, MISO, SCK e CS. O MOSI (*Master Output Slave Input*) é reservado para o envio de dados do mestre (*master*) para o escravo (*slave*). O MISO (*Master Input Slave Output*) é reservado para recebimento de dados do mestre pelo escravo. O SCK (*Serial Clock*) é o clock gerado pelo mestre para fazer a sincronização dos dados. O pino CS (*Chip Select*), por sua vez, indica qual o dispositivo escravo tem permissão para enviar ou receber os dados.

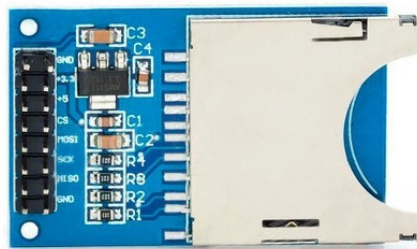


Figura 13: Módulo SD Card.

Fonte: <http://www.filipeflop.com/pd-6b847-modulo-cartao-sd-card.html>

O protocolo serial SPI é caracterizado pela presença de dois transistores definindo o estado de um pino (*Push-Pull*) permitindo, dessa forma, que os dados sejam transmitidos e recebidos simultaneamente. Cada bit de dados enviado do mestre para o escravo transfere também um bit de dados do escravo para o mestre obrigatoriamente.

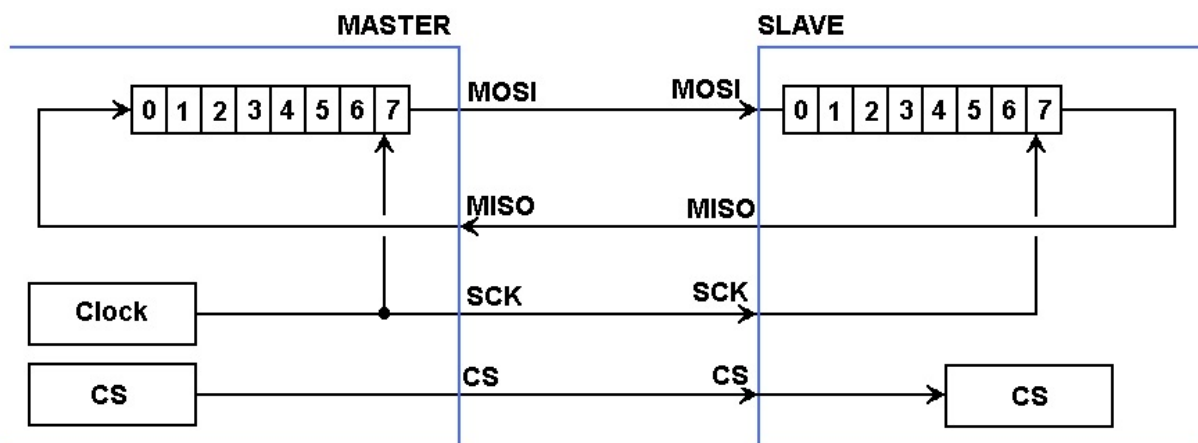


Figura 14: Diagrama do barramento SPI.

Fonte: Modificado de <https://www.embarcados.com.br/spi-parte-1/>

4.2.5 XBee

O XBee Explorer USB foi utilizado como interface de comunicação para a configuração de parâmetros dos módulos XBee por meio do *software* X-CTU versão 6.2.0 fabricado pela *DIGI International Inc.*



Figura 15: XBee Explorer USB.

Fonte: <http://www.filipeflop.com/pd-c4f29-xbee-explorer-usb-adapter.html>

O módulo XBee, apresentado na Figura 16, é uma placa que se comunica via radiofrequência utilizando o padrão ZigBee de comunicação de rede sem fio permitindo a interação dos nós.

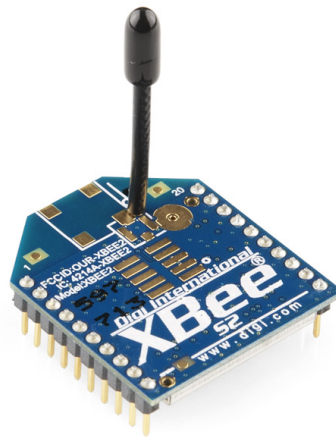


Figura 16: Módulo XBee.

Fonte: <https://www.sparkfun.com/products/10414>

Os módulos foram configurados em modo de comando 'API' onde os dados são transmitidos com base em quadros (*frames*) usando a biblioteca XBee.h. Todos os módulos possuem os mesmos PAN ID que é um parâmetro de 4 bytes representando o identificador da rede, razão pela qual todos os módulos, devem obrigatoriamente ter o mesmo valor de PAN ID (ESCHNER, 2011).

As características do módulo XBee são apresentadas no Anexo A.3.

4.3 Nó sensor

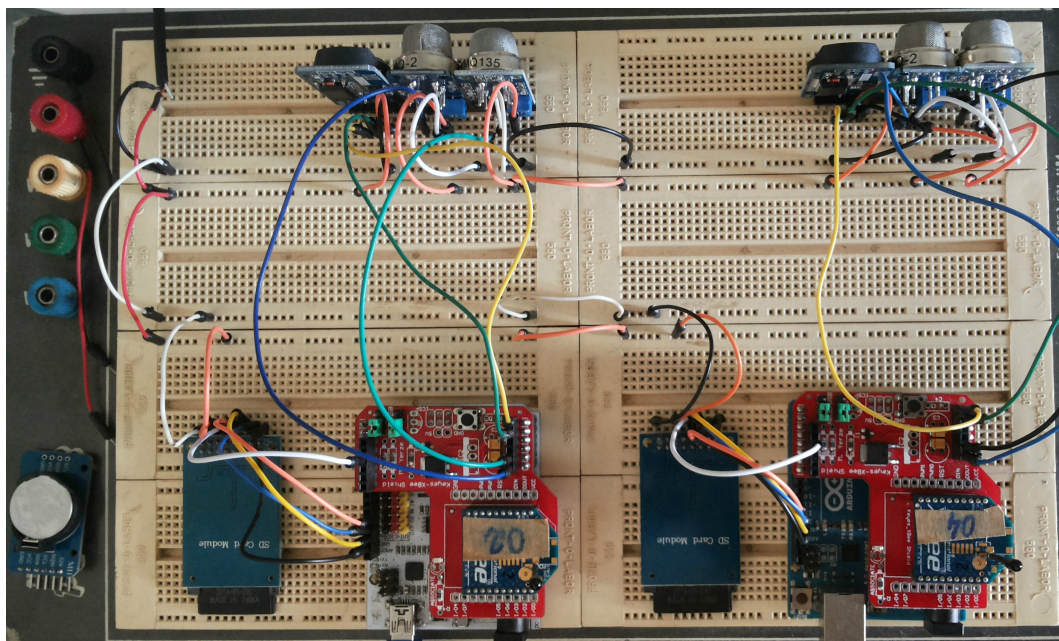


Figura 17: Protótipo dos Nós Sensores em *protoboard*.

Fonte: O autor

Na Figura 17, pode-se visualizar dois dos quatro protótipo dos nós sensores construídos onde o XBee é o agente responsável pela transmissão de dados sem fio.

Devido o fato de cada nó sensor poder ser colocado no ambiente exterior, sujeito a condições atmosféricas diversas, foram utilizadas caixas de pvc para acomodá-los. O dimensionamento da caixa torna-se adequado para a alocação dos módulos referentes a cada nó sensor, conforme Figura 18.



Figura 18: Protótipo dos Nós Sensores em caixas de pvc.

Fonte: O autor

A Figura 19 traz detalhes da arquitetura do nó sensor apresentado nas Figuras 15 e 16, onde os sensores de gases MQ-2 e MQ-135 conectam-se com o arduino pelos pinos analógicos A0 e A1 do arduino, respectivamente, O módulo RTC DS3231 que contem um sensor de temperatura digital incluso está conectado por via dos pinos SDA e SCL (I2C), aos pinos A4 e A5 do Arduino. Os dados dos sensores e RTC são armazenados em Cartão de memória por meio de comunicação SPI, e enviados para o nó coordenador por intermédio do XBee.

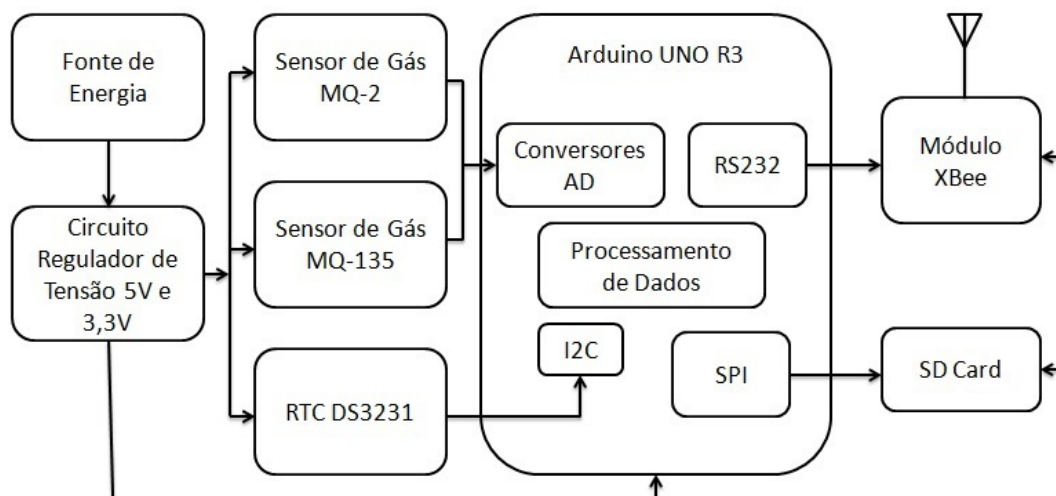


Figura 19: Arquitetura do *Hardware*.

Fonte: O autor

4.4 Software

4.4.1 XCTU

Software desenvolvido pela DIGI com a finalidade de configurar os parâmetros de trabalho do XBee, permitindo a interação com arquivos de firmware dos módulos de RF através de uma interface gráfica.

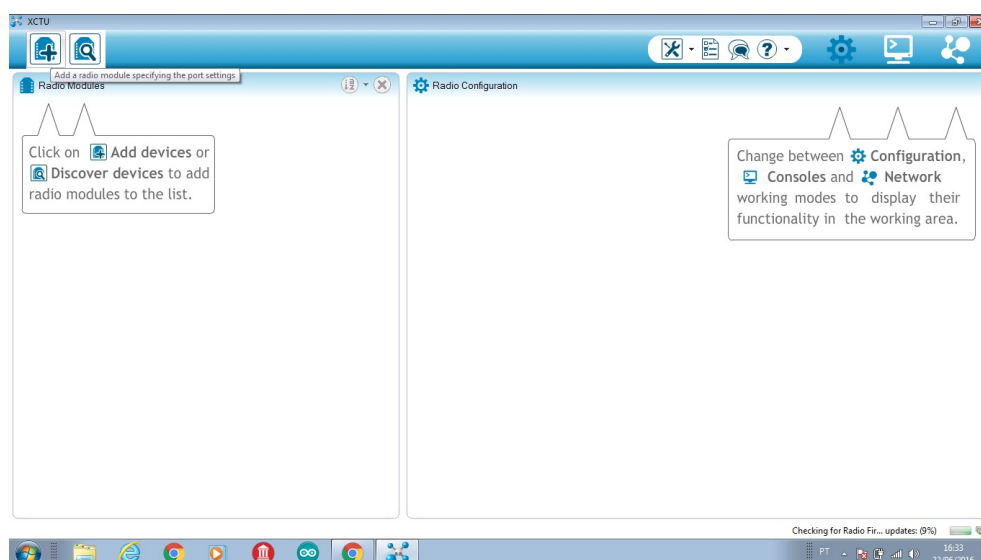


Figura 20: XCTU tela inicial.

Fonte: O autor

Ao clicar no botão *Add Devices*, no canto superior esquerdo da tela ,abrirá a aba que estabelece a conexão da placa de configuração do XBee com o computador. Ao conectar a placa ao computador, é mostrado em qual porta de comunicação o XBee está conectado.

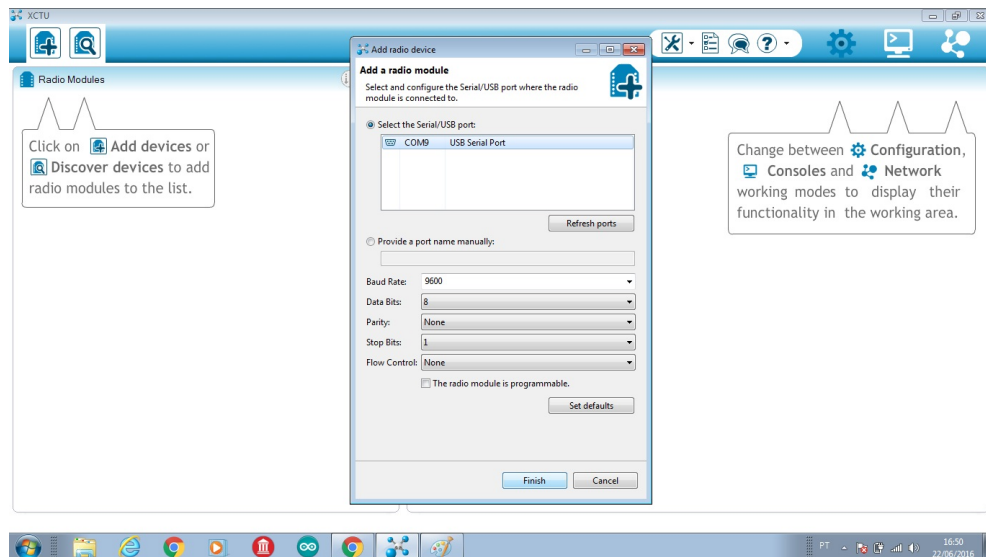


Figura 21: XCTU Configuração da porta de comunicação.

Fonte: O autor

Após selecionada a porta e configurados os parâmetros de comunicação, deve-se clicar no botão *finish* para estabelecer a conexão. O módulo aparecerá do lado esquerdo da tela inicial.

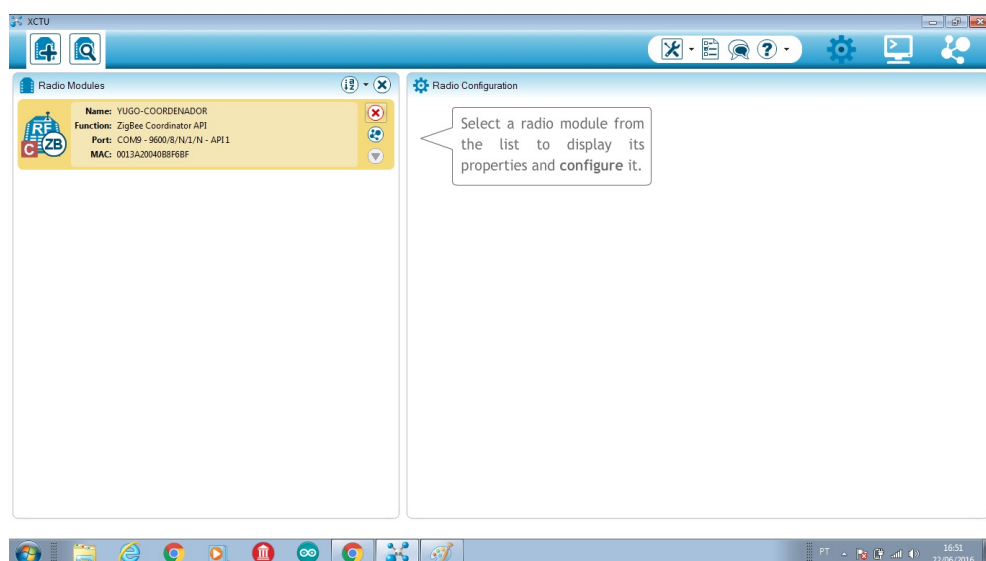


Figura 22: XCTU Lista de Dispositivos.

Fonte: O autor

Escolhido o dispositivo listado no lado esquerdo da tela, aparecerão os parâmetros previamente gravados no módulo XBee, no lado direito da tela, como versão do *firmware*, configuração de portas, função do módulo, entre outros.

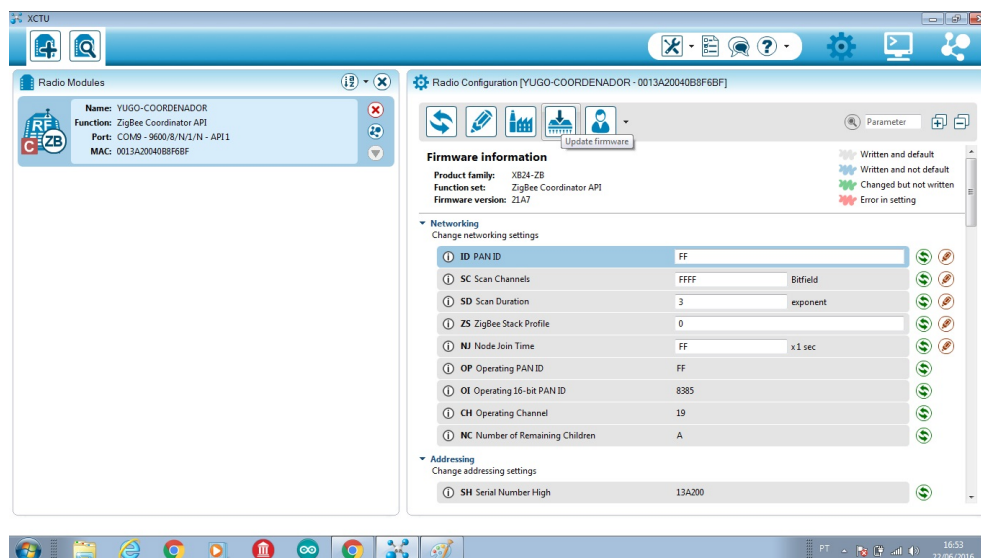


Figura 23: XCTU Módulo a configurar.

Fonte: O autor

Na opção *Update firmware* devem ser selecionados em *Product Family*, o módulo usado, em *function set*, levando em consideração o projeto, pode ser configurado como *Coordinator*, *Router* ou *End Device*, e em *Firmware version*, utiliza-se a mais recente.

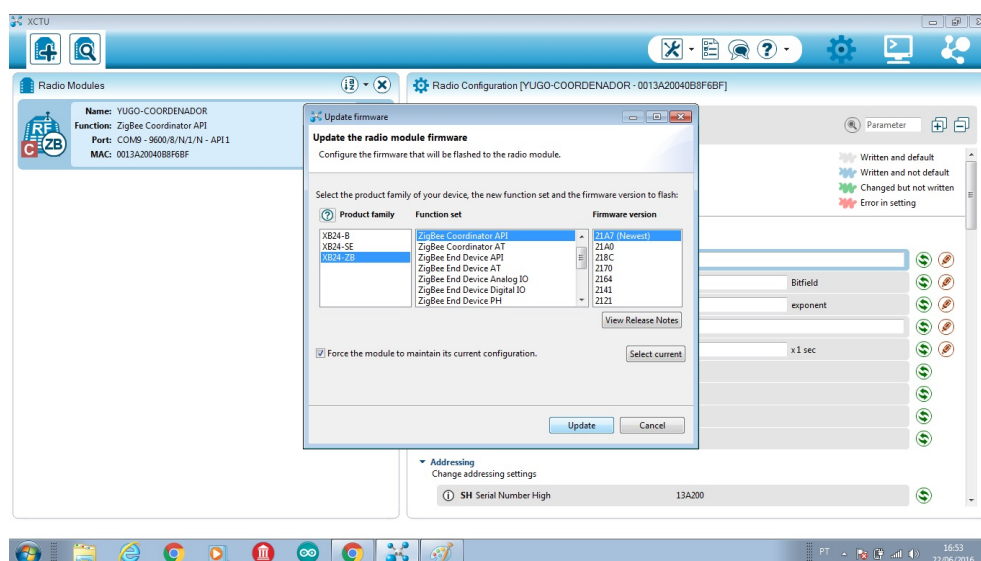


Figura 24: XCTU Função do módulo.

Fonte: O autor

O módulo XBee conectado junto à central de controle é do tipo *Coordinator*

sendo ele o responsável por criar a rede ZigBee. Já os módulos de sensores foram configurados como sendo *Routers* e *End Devices* para permitir a ampliação da rede ZigBee.

4.4.2 Arduino (IDE)

Para a programação do Arduino foi utilizado uma IDE que permite a criação de *sketches*. A linguagem de programação é modelada a partir da linguagem *Wiring*. A IDE do Arduino possui uma linguagem própria baseada na linguagem C e C++ que realiza a tradução dos comandos para uma linguagem que pode ser compreendida pelo microcontrolador.

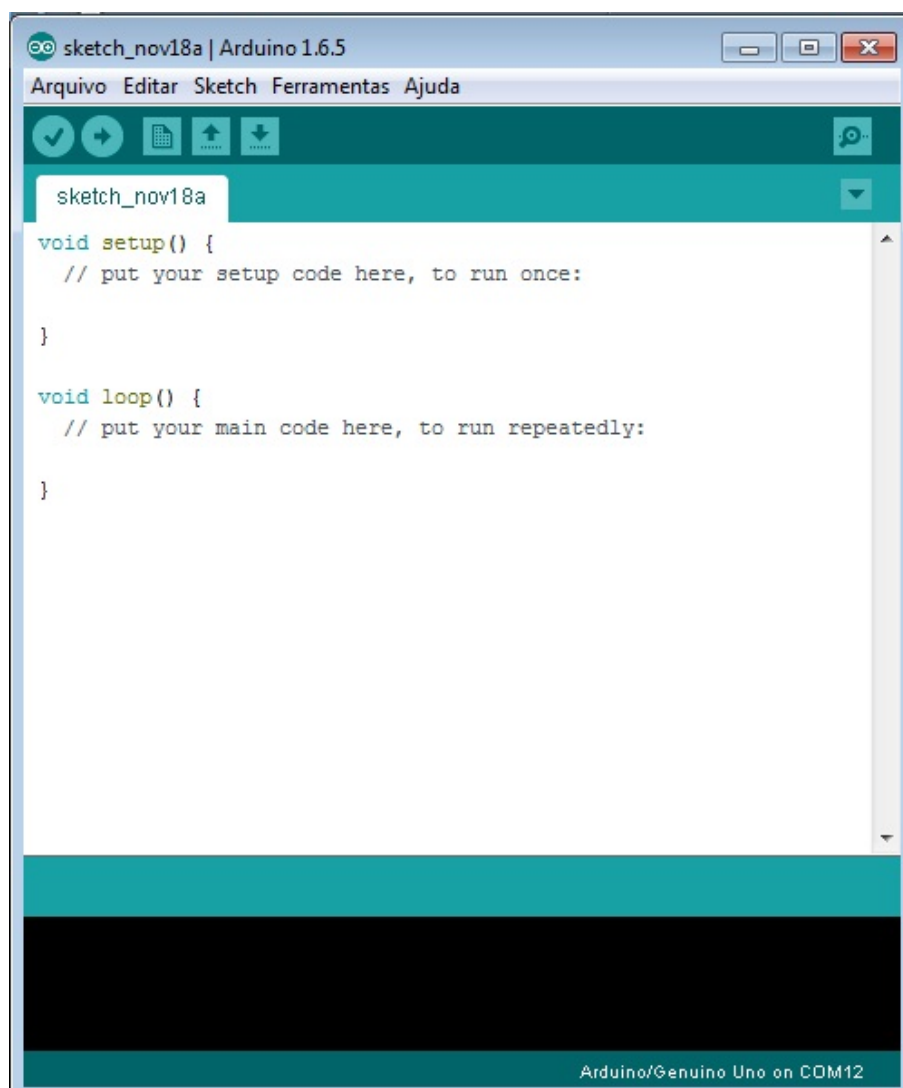


Figura 25: Arduino IDE.

Fonte: O autor

O Arduino IDE possui duas funções obrigatórias para todos os programas feitos para arduino, *setup()* e *loop()*.

Função *Setup*

É executada na inicialização do programa e é responsável pelas configurações iniciais do microcontrolador, tal como definição dos pinos de I/O, inicialização da comunicação serial, entre outras.

Função *Loop*

É onde ocorre o laço infinito da programação, ou seja, onde será inserido o código que será executado continuamente pelo microcontrolador.

4.4.3 Leitura dos dados

Cada nó sensor foi configurado de tal modo que sejam armazenados os dados dos sensores com data e hora e enviados para o coordenador com o identificador de cada nó para que os mesmos sejam reconhecidos na rede facilitando o tratamento posterior dos dados dos respectivos nós.

```
3,16,9,21,11,23,54,85,0,158
2,16,9,21,11,23,54,79,0,183
4,16,9,21,11,23,56,144,13,167
5,16,9,21,11,23,56,95,42,128
3,16,9,21,11,23,59,77,0,158
2,16,9,21,11,23,59,71,0,183
4,16,9,21,11,24,1,115,12,167
5,16,9,21,11,24,1,116,45,128
3,16,9,21,11,24,4,89,0,158
2,16,9,21,11,24,4,50,0,183
4,16,9,21,11,24,6,129,18,167
5,16,9,21,11,24,6,138,43,128
3,16,9,21,11,24,8,102,0,158
2,16,9,21,11,24,8,36,0,184
4,16,9,21,11,24,10,146,13,167
5,16,9,21,11,24,10,125,41,128
3,16,9,21,11,24,13,99,0,158
2,16,9,21,11,24,13,23,0,184
4,16,9,21,11,24,15,138,0,167
5,16,9,21,11,24,15,102,39,128
```

Figura 26: Dados lidos pelo Coordenador oriundos dos nós sensores.

Fonte: O autor

Todos os nós utilizam uma programação padrão na qual foram concatenados os seguintes parâmetros separados por vírgula: Nó,AA,MM,DD,hh,mm,ss,MQ2,MQ135,Temperatura. A Tabela 10 apresenta os parâmetros de forma que facilite o entendimento.

Tabela 10: Configuração da String de dados.

Nº do nó	Ano	Mês	Dia	Hora	Minutos	Segundos	Sensor MQ-2	Sensor MQ-135	Temperatura
3	16	9	21	11	23	54	85	0	158
2	16	9	21	11	23	54	79	0	183
4	16	9	21	11	23	56	144	13	167
5	16	9	21	11	23	56	95	42	128

Fonte: O autor

4.5 Conclusão

Neste capítulo apresentou-se a metodologia aplicada para o desenvolvimento do projeto, permitindo avaliar o desempenho da RSSF. Foram descritos o hardware e software utilizados e a infraestrutura desenvolvida para conduzir os experimentos para os diferentes aspectos estudados (alcance de conectividade, qualidade do enlace, desempenho da rede, exatidão dos dados).

RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Este capítulo tem como objetivo detalhar quatro experimentos que foram realizados a fim de atingir os objetivos deste trabalho.

5.1 Experimento 1: Avaliar a correlação entre o gás injetado e os pontos de detecção

De forma a avaliar os sensores de gases, foi utilizado um recipiente fechado de vidro com volume conhecido.



Figura 27: Teste com GLP.

Após a vaporização de um fluxo gasoso de GLP em injeções de 100, 200, 300, 400 e 500 microlitros, conforme Tabela 11, foram obtidos os pontos de detecção pelo sensor MQ-2.

Tabela 11: Pontos de Detecção de GLP para o MQ-2.

GLP INJETADO (μ l)	GÁS DETECTADO (ppm)
100	23
200	38
300	725
400	1611
500	3232

Fonte: O autor

Realizando a regressão linear para os dados obtidos para o sensor, percebe-se, na Figura 28, que os pontos claramente não seguem esta tendência.

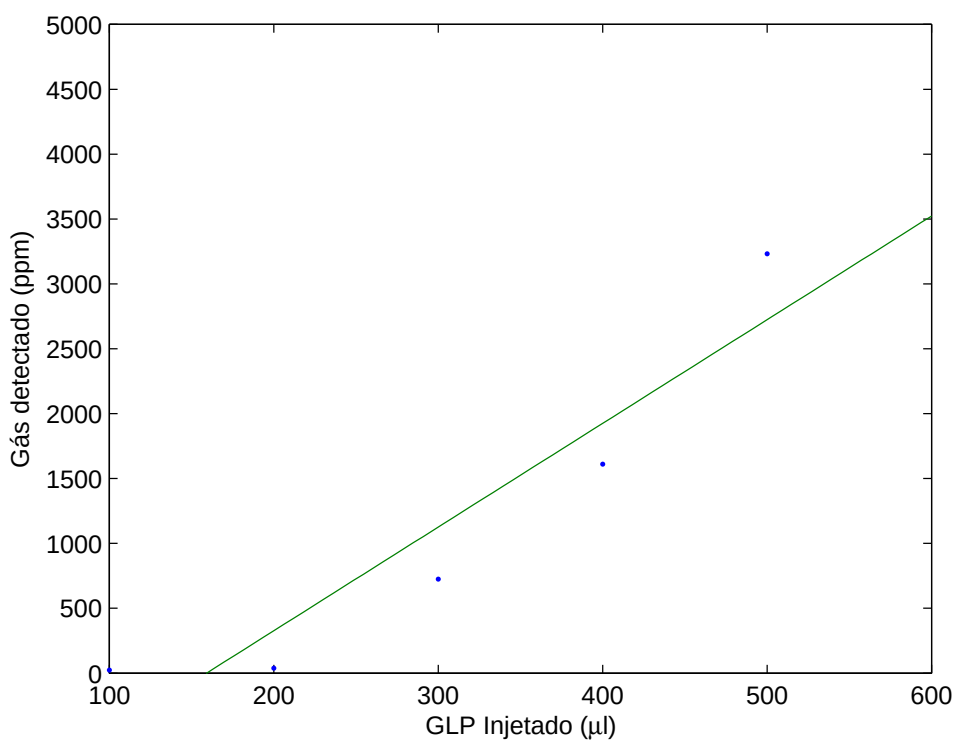


Figura 28: Regressão Linear aplicada aos dados obtidos pelo sensor MQ2.

Para os mesmos pontos realizando a regressão polinomial de 2ª ordem obtém-se o gráfico apresentado na Figura 29, indicando que o perfil de detecção para este gás obedece a uma equação polinomial de 2ª ordem.

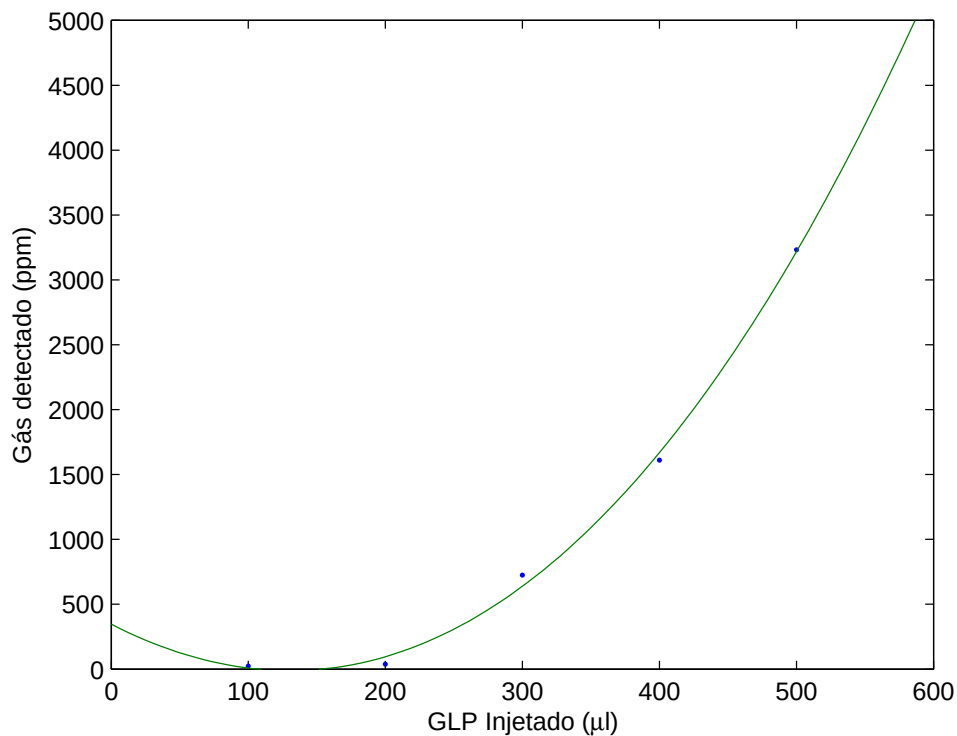


Figura 29: Regressão Polinomial.

5.2 Experimento 2: Avaliar a eficiência no envio e recebimento de pacotes de dados

Foram feitos testes de envio e recebimento de pacotes de dados por meio da rede ZigBee com o propósito de verificar sua eficiência. O *radio range test*, simulador de envio de pacotes do XCTU, foi utilizado para esse experimento. Pode-se visualizar os dados obtidos para os nó 2, 3, 4 e 5 nas Figuras 30, 31, 32 e 33, respectivamente.

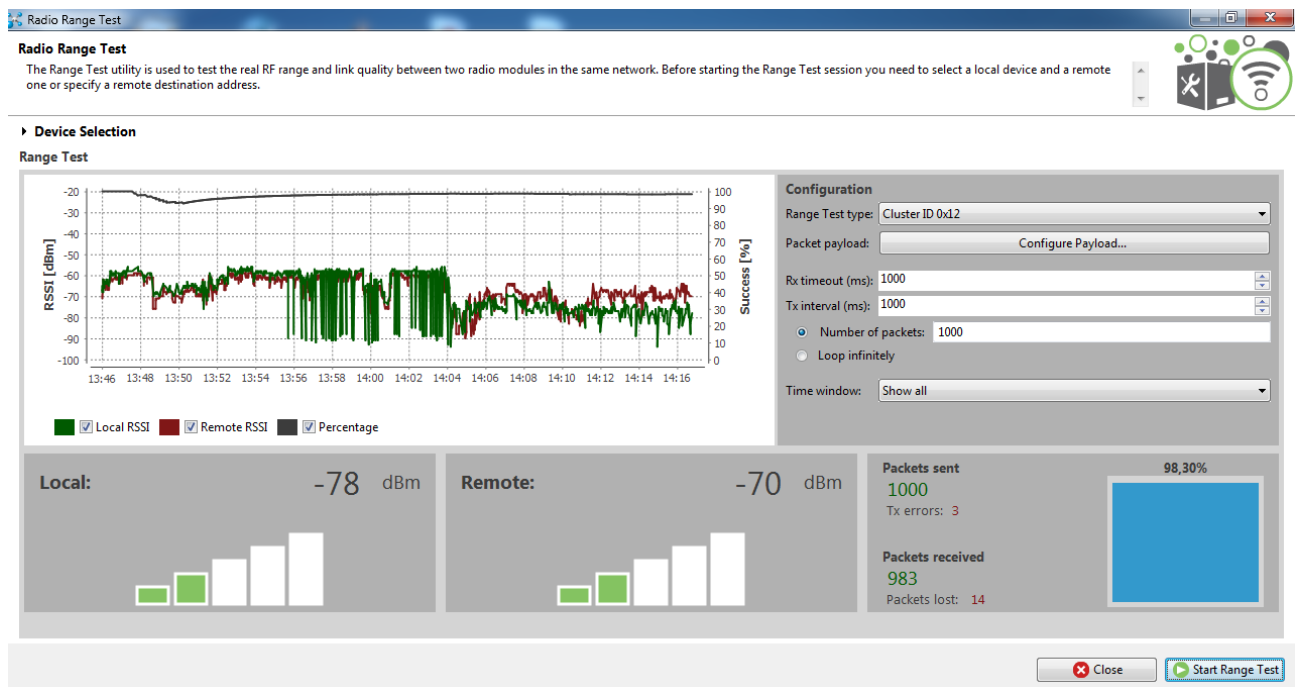


Figura 30: Teste de envio de pacotes, nó 2.



Figura 31: Teste de envio de pacotes, nó 3.



Figura 32: Teste de envio de pacotes, nó 4.



Figura 33: Teste de envio de pacotes, nó 5.

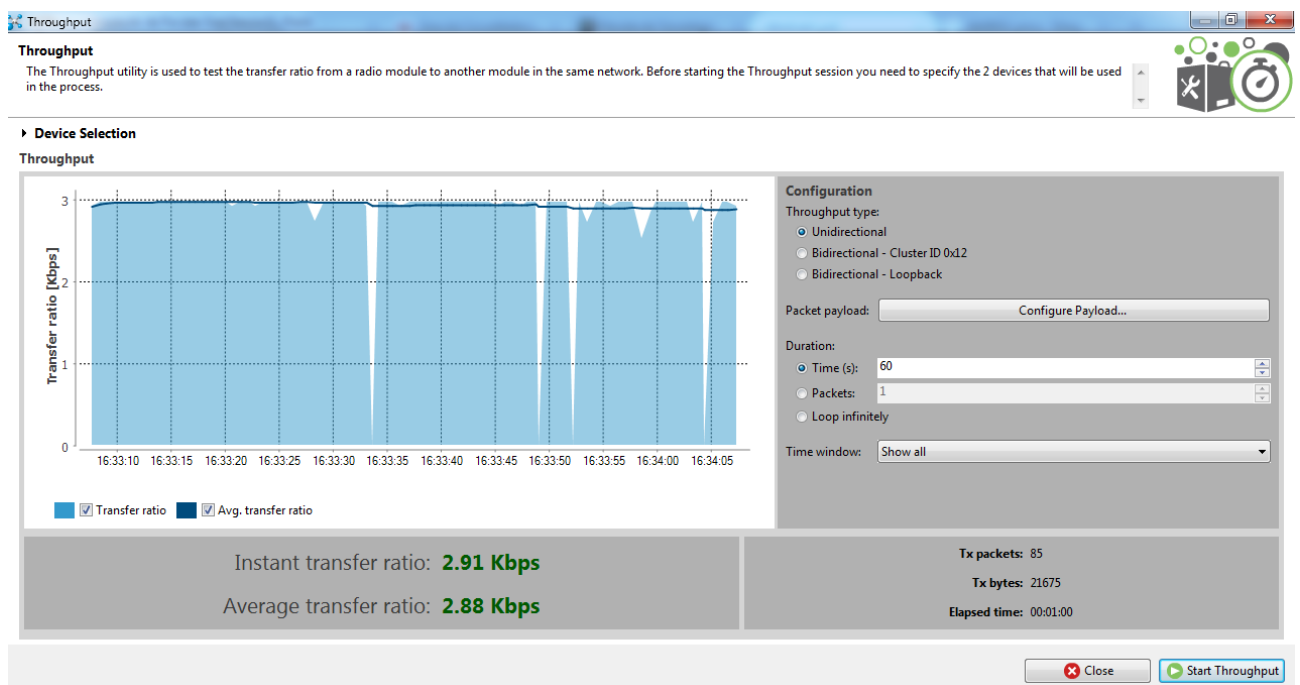
Tabela 12: Teste de Envio e recebimento dos pacotes para cada nó.

Nº do nó	Pacotes enviados	Tx Erros	Pacotes recebidos	Pacotes perdidos	Eficiência (%)
2	1000	3	983	14	98,30
3	1000	3	923	74	92,33
4	1009	32	916	61	90,78
5	1000	1	999	0	99,90

Fonte: O autor

5.3 Experimento 3: Avaliar a taxa de transferência no envio de dados

Para este experimento, foi utilizada a ferramenta *throughput* do software XCTU para averiguar a velocidade da transferência dos dados por cada nó sensor para o coordenador e obteve-se os resultados para os nós 2, 3, 4 e 5 mostrados nas Figuras 34, 35, 36 e 37, respectivamente.

**Figura 34:** Taxa de transferência de dados do nó 2.

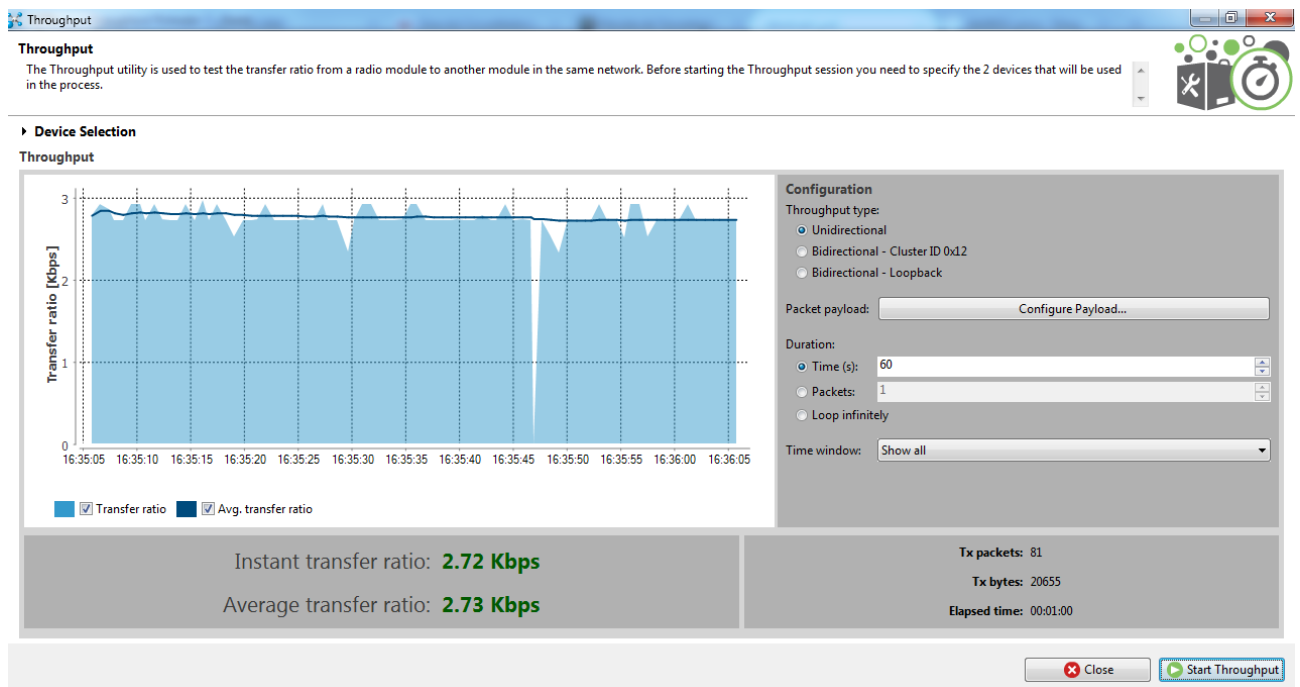


Figura 35: Taxa de transferência de dados do nó 3.

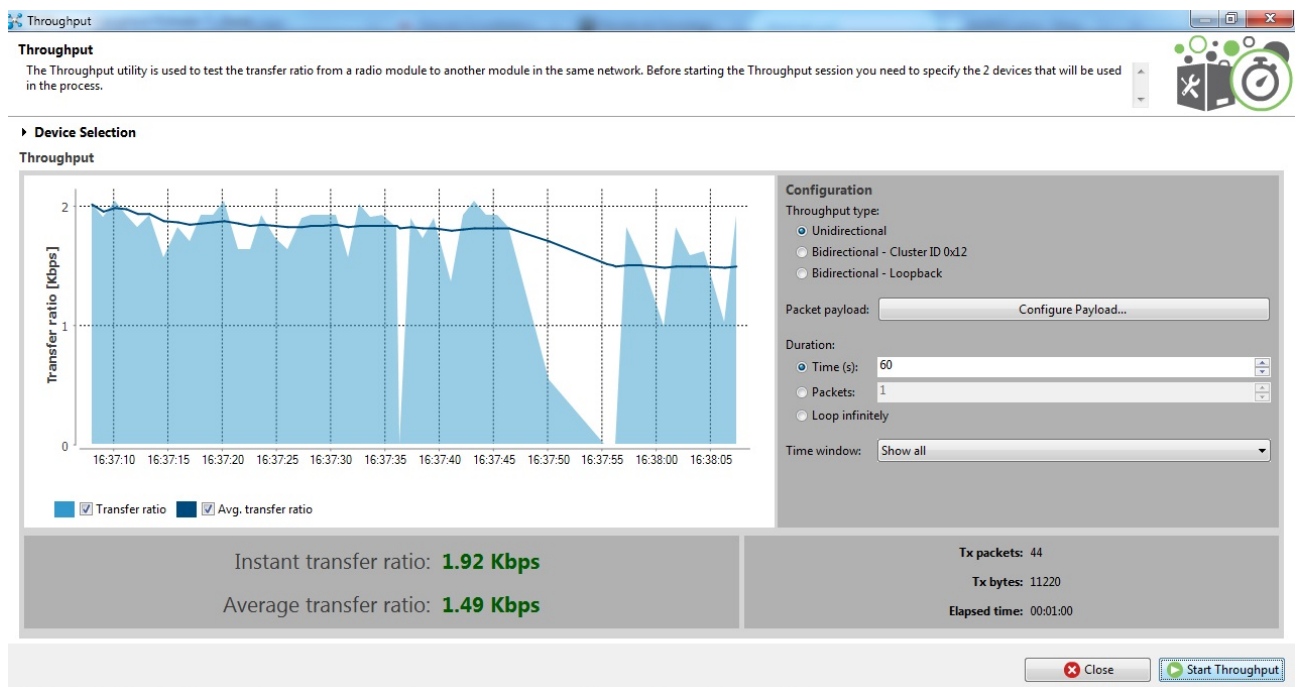


Figura 36: Taxa de transferência de dados do nó 4.

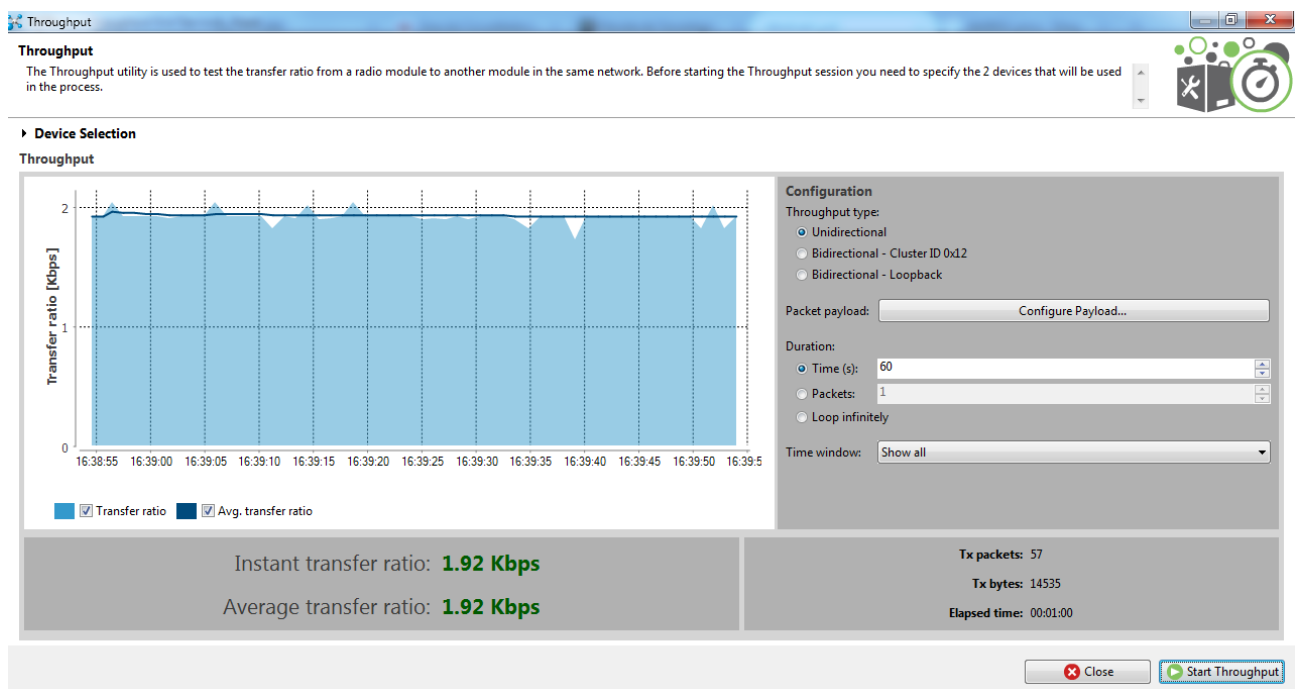


Figura 37: Taxa de transferência de dados do nó 5.

Para o período de um minuto, conforme Tabela 13, obteve-se os seguintes resultados para cada nó.

Tabela 13: Taxa de transferência de dados para cada nó.

Nº do nó	Média de Transferência (Kbps)	Tx Pacotes	Tx Bytes	Tempo (s)
2	2.88	85	21675	60
3	2.73	81	20655	60
4	1.49	44	11220	60
5	1.92	57	14535	60

Fonte: O autor

Percebe-se uma discrepância na quantidade de dados transmitidos para o coordenador, isso se dá ao fato de os nós 4 e 5 enviarem os pacotes de dados para os roteadores 2 e 3, respectivamente, para que sejam repassados para o coordenador.

5.4 Experimento 4: Avaliar o desempenho da RSSF em área aberta

A implantação da rede teve por principal objetivo realizar a monitoração da qualidade do ar. Os nós foram instalados no interior do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - IFCE, localizado na avenida 13 de Maio, 2081 - Fatima, Fortaleza - CE, no dia 21 de setembro de 2016 e ficaram dispostos conforme Figura 38 e a distância entre os nós é apresentada na Tabela 14.

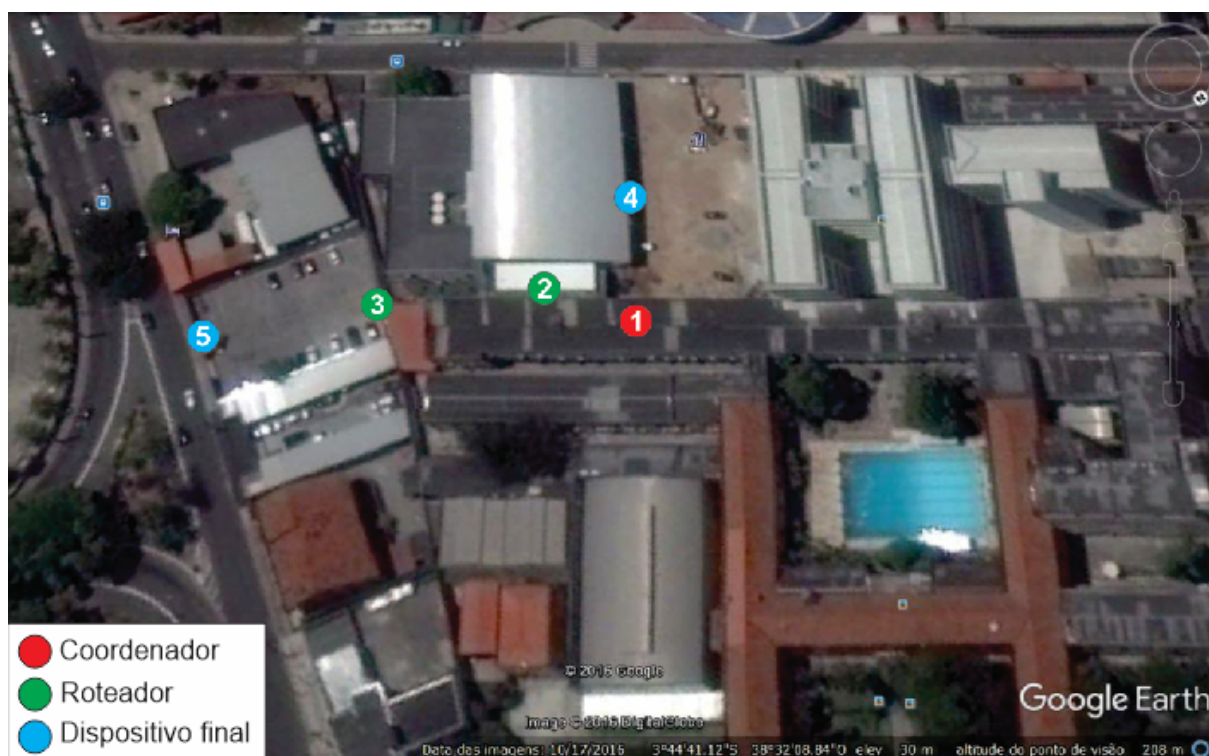


Figura 38: Disposição dos nós no IFCE.
(Fonte: Google Earth)

Tabela 14: Distância entre os nós.

Nós	Distância (m)
1-2	18,41
1-3	47,67
2-4	20,45
3-5	32,81

Fonte: O autor

O coordenador foi instalado no interior do laboratório GDEST (Grupo de Desenvolvimento de Sistemas de Telecomunicações e Sistemas Embarcados) para receber os dados gerados por cada nó sensor, mostrado na Figura 39.

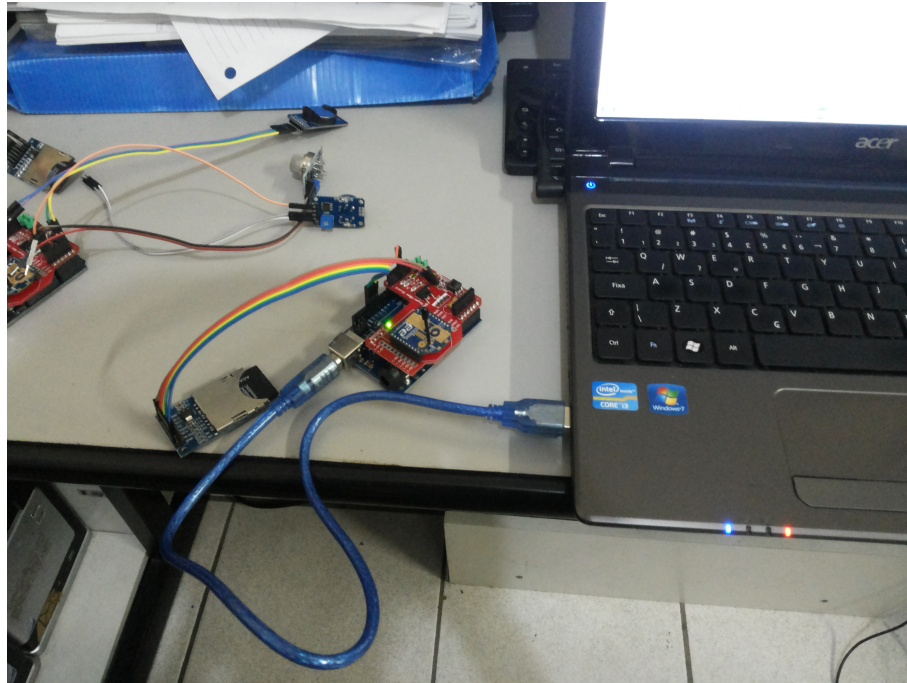


Figura 39: Posicionamento do Coordenador.

Os nós 2, 3, 4 e 5 ficaram posicionados, em pontos estratégicos, obedecendo os quesitos da estrutura da rede e estão apresentados nas Figuras 40, 41, 42 e 43, respectivamente.



Figura 40: Posicionamento do Nó 2.



Figura 41: Posicionamento do Nó 3.



Figura 42: Posicionamento do Nó 4.



Figura 43: Posicionamento do Nó 5.

A rede foi submetida a testes, de forma a averiguar o comportamento dos diferentes parâmetros, nomeadamente: álcool, hidrogênio, dióxido de carbono, propano, fumaça, metano, GLP, monóxido de carbono e temperatura. Os resultados obtidos nos nós, encontram-se apresentados nas Figuras abaixo.

Em todos os gráficos (Figura 44 à 59) pode-se observar um pico no momento da inicialização das leituras, isso se dá devido à calibração dos sensores. Também houveram picos nas leituras do nó 3 (Figuras 45, 49, 53, 57) entre 09:00 e 10:00 horas e do nó 4 (Figuras 46, 50, 54 e 58) entre 10 e 11 horas, devido à instabilidade dos RTCs.

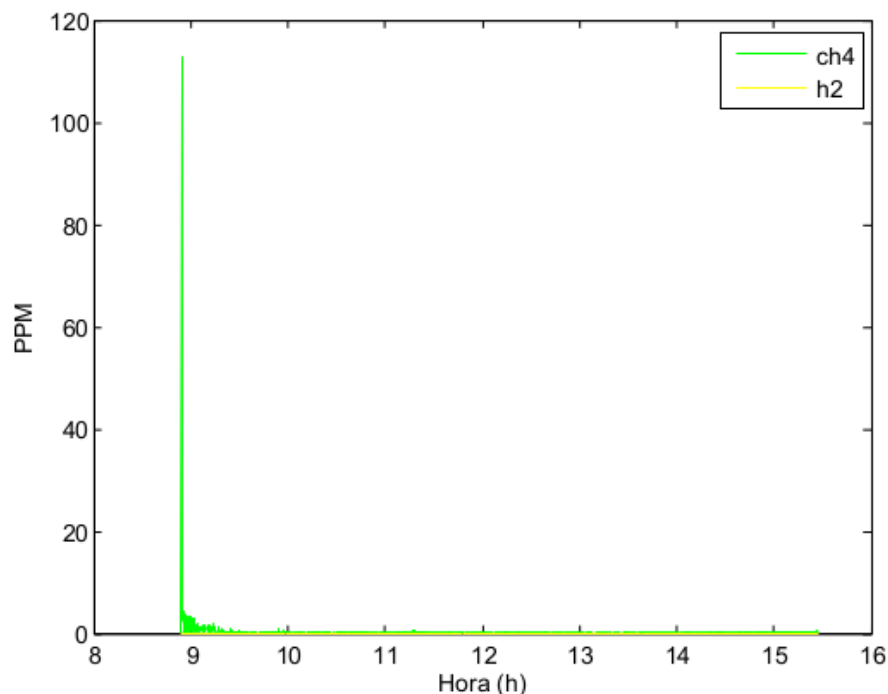


Figura 44: Medidas dos gases(ppm) H₂ e CH₄ em função do horário no nó 2.

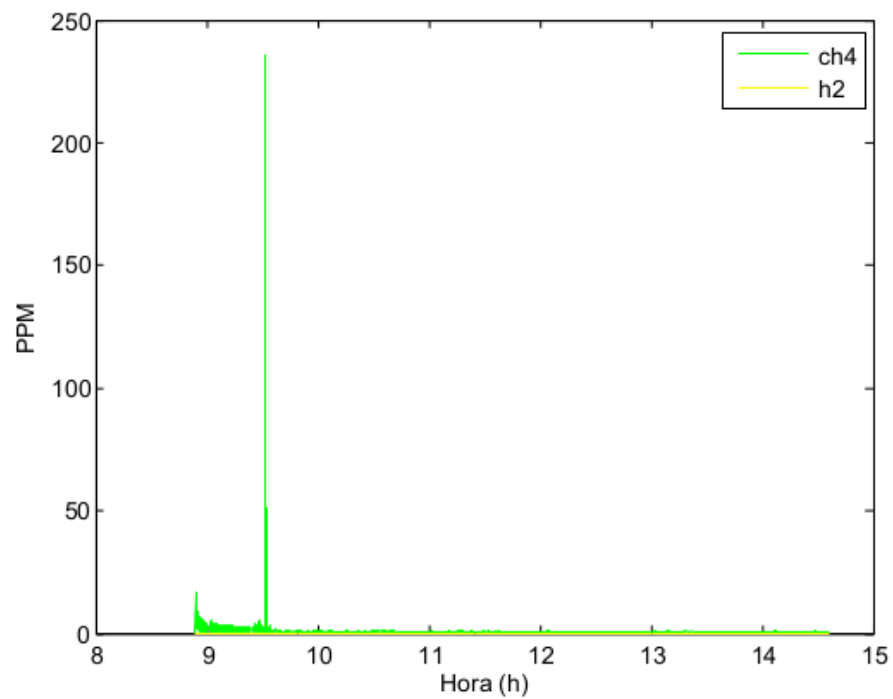


Figura 45: Medidas dos gases(ppm) H_2 e CH_4 em função do horário no nó 3.

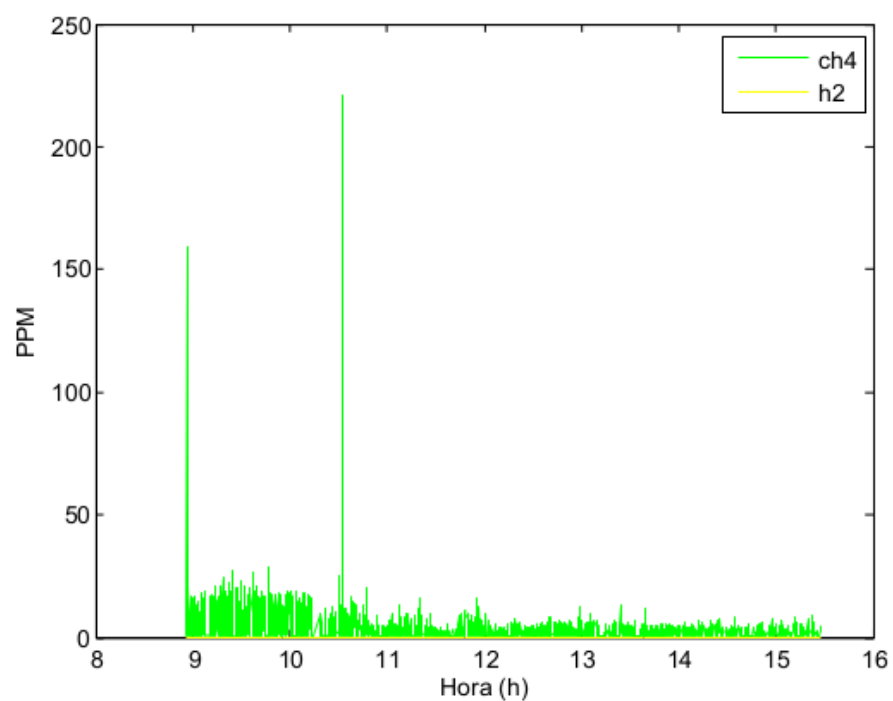


Figura 46: Medidas dos gases(ppm) H_2 e CH_4 em função do horário no nó 4.

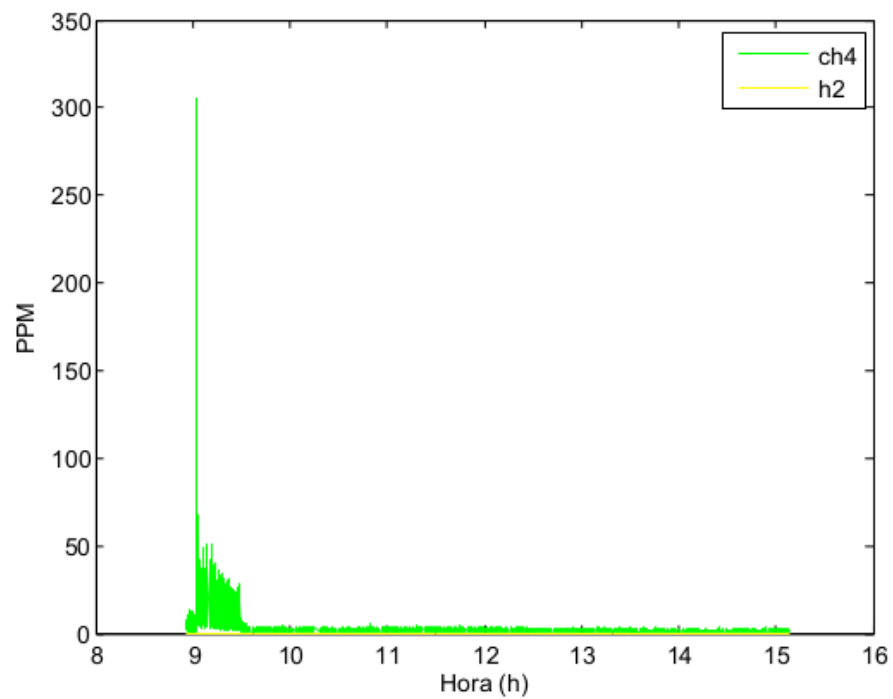


Figura 47: Medidas dos gases(ppm) H_2 e CH_4 em função do horário no nó 5.

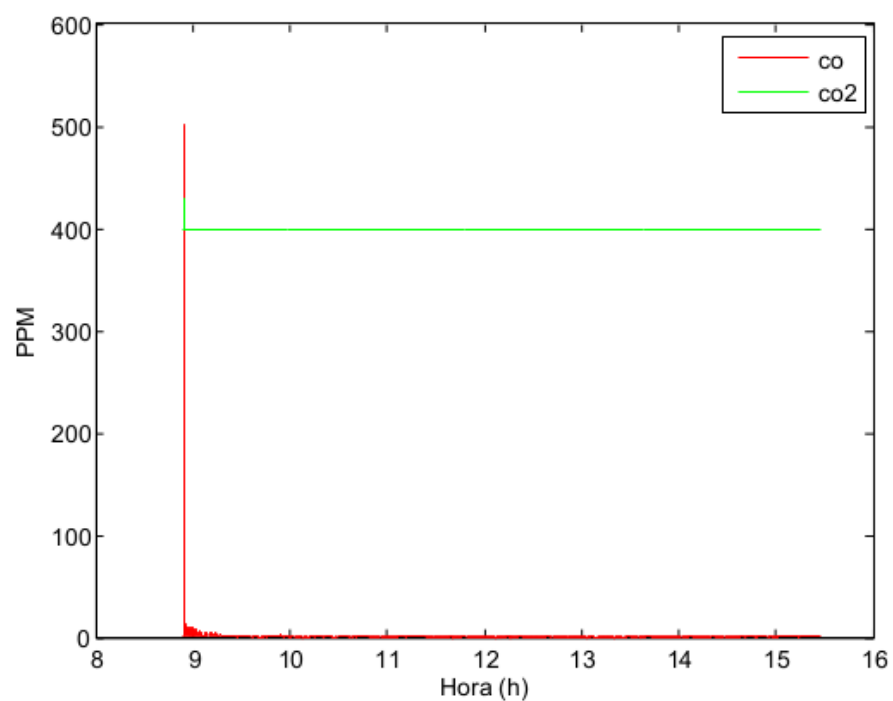


Figura 48: Medidas dos gases(ppm) CO_2 e CO em função do horário no nó 2.

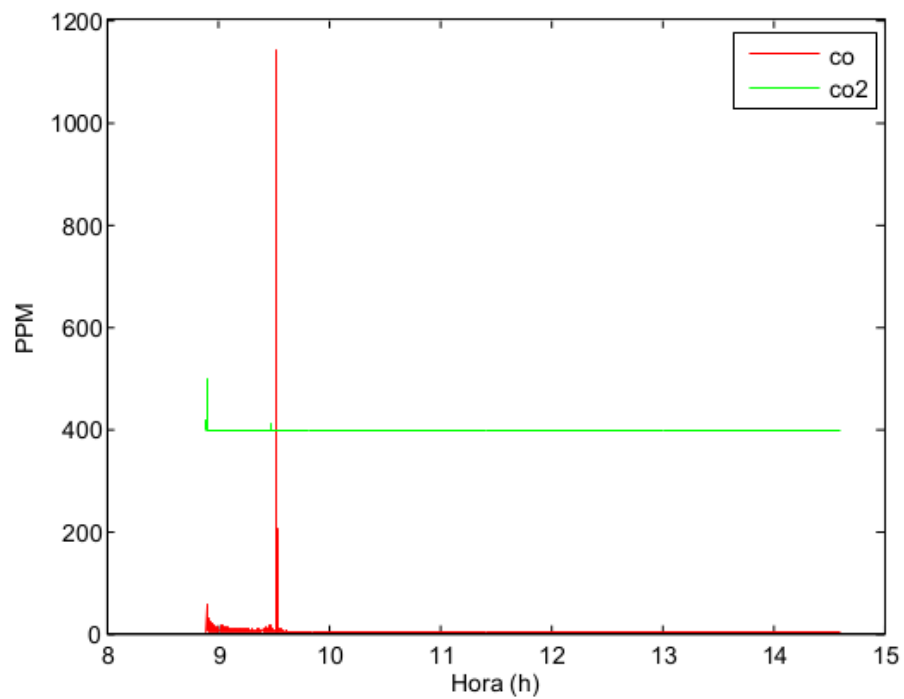


Figura 49: Medidas dos gases(ppm) CO₂ e CO em função do horário no nó 3.

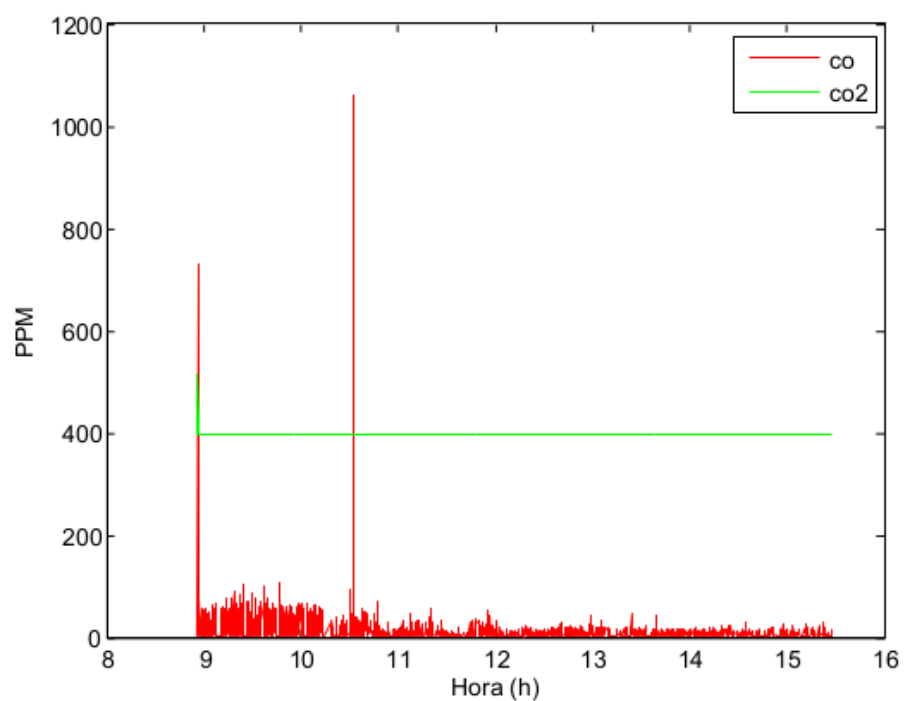


Figura 50: Medidas dos gases(ppm) CO₂ e CO em função do horário no nó 4.

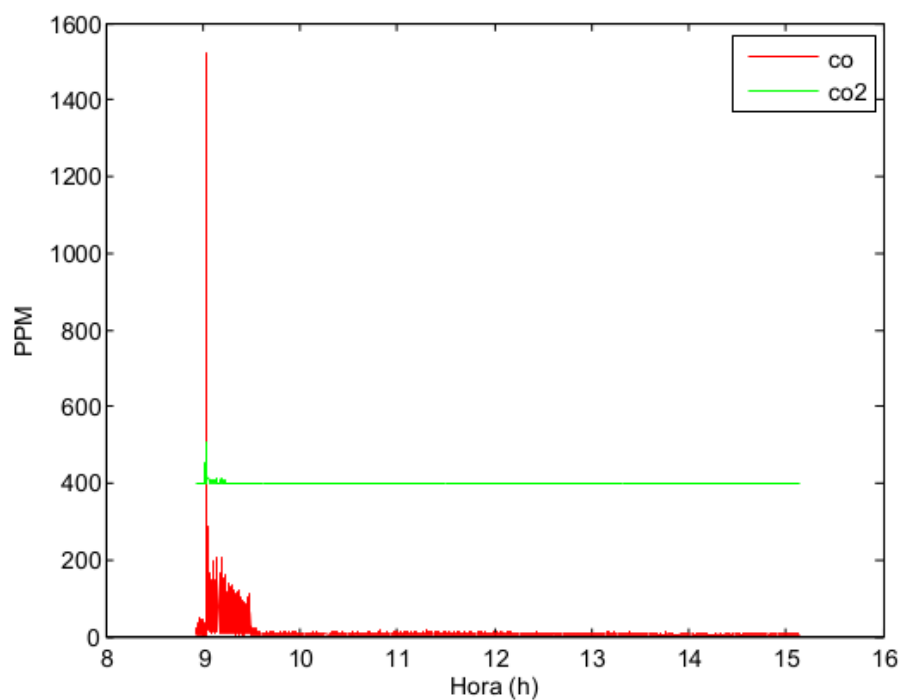


Figura 51: Medidas dos gases(ppm) CO₂ e CO em função do horário no nó 5.

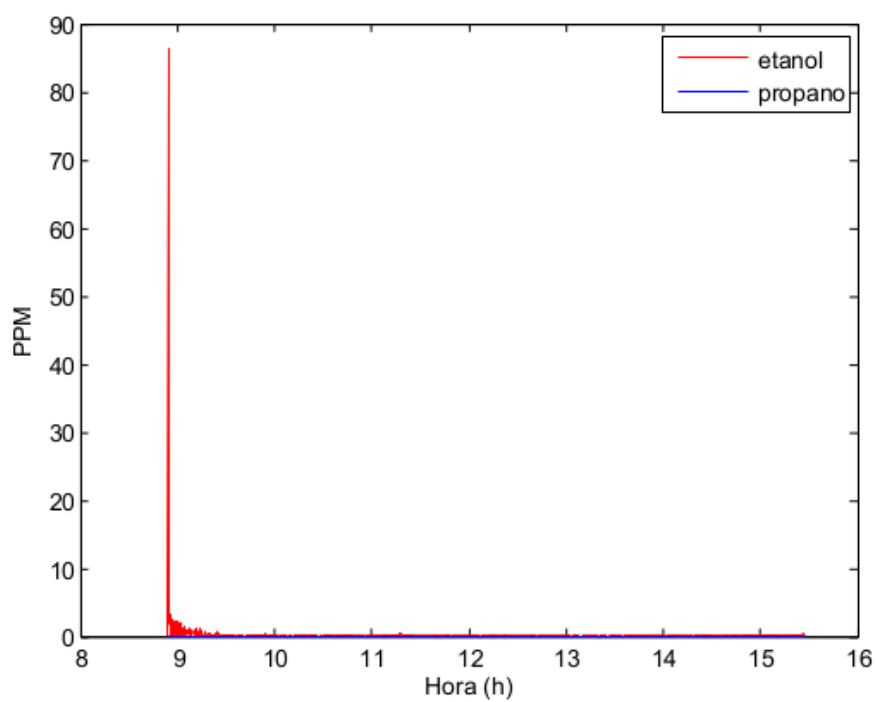


Figura 52: Medidas dos gases(ppm) etanol e propano em função do horário no nó 2.

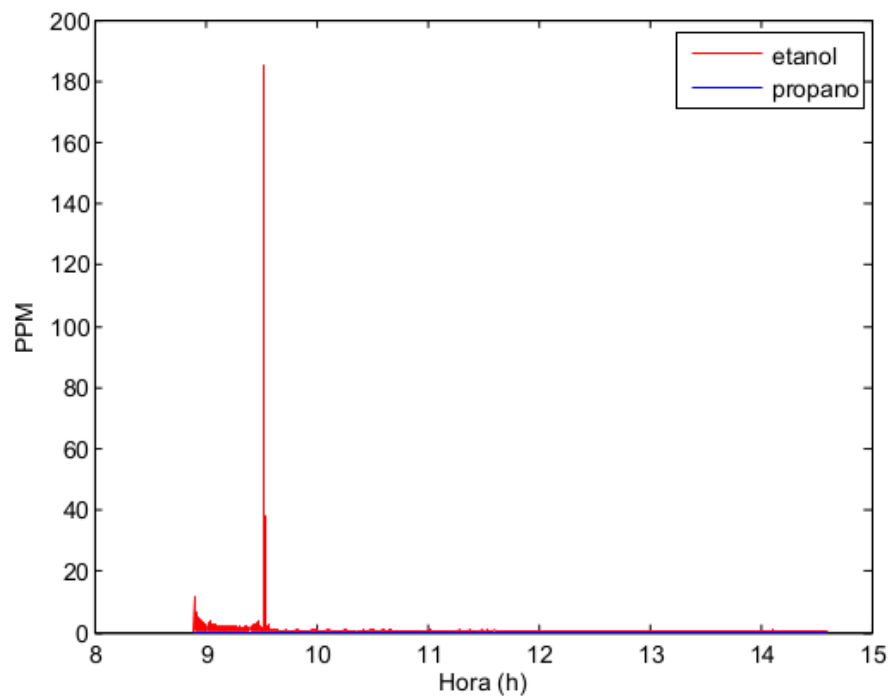


Figura 53: Medidas dos gases(ppm) etanol e propano em função do horário no nó 3.

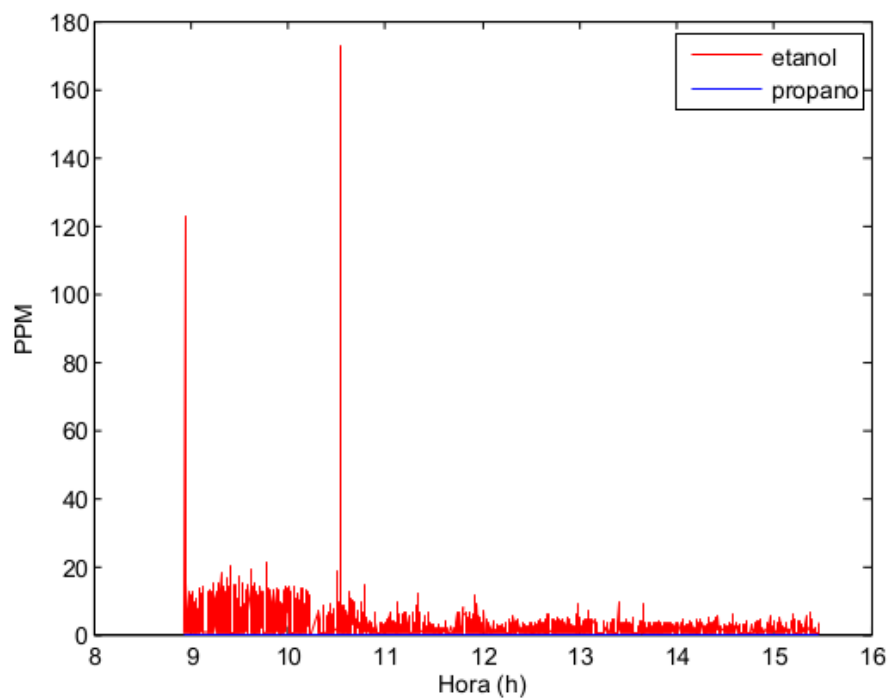


Figura 54: Medidas dos gases(ppm) etanol e propano em função do horário no nó 4.

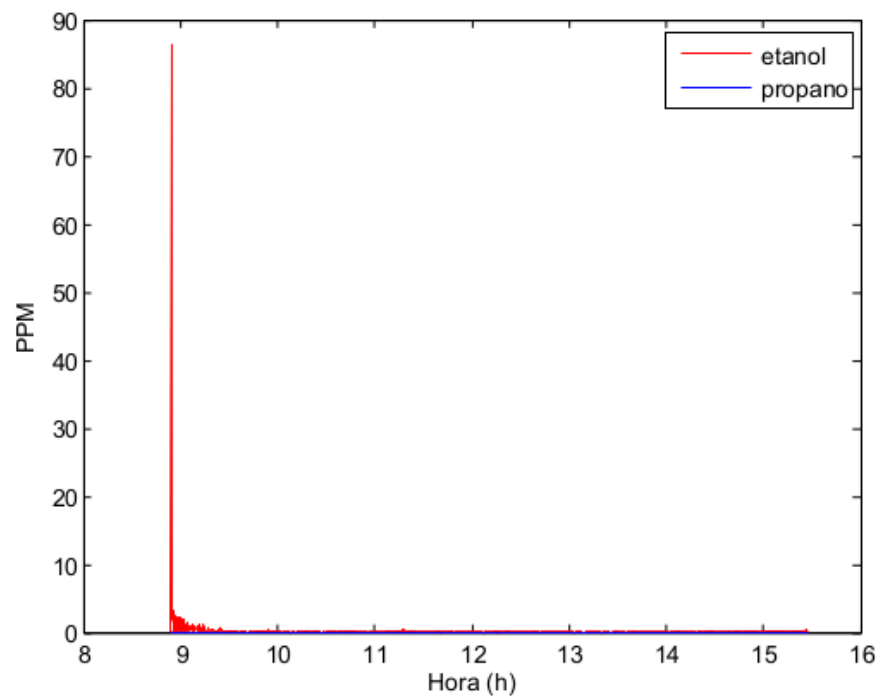


Figura 55: Medidas dos gases(ppm) etanol e propano em função do horário no nó 5.

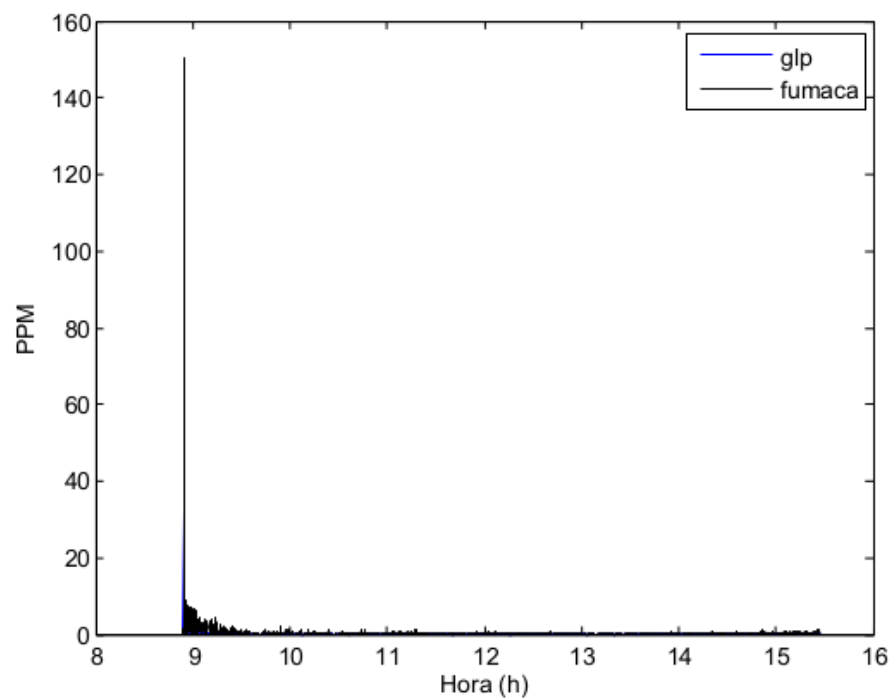


Figura 56: Medidas dos gases(ppm) glp e fumaça em função do horário no nó 2.

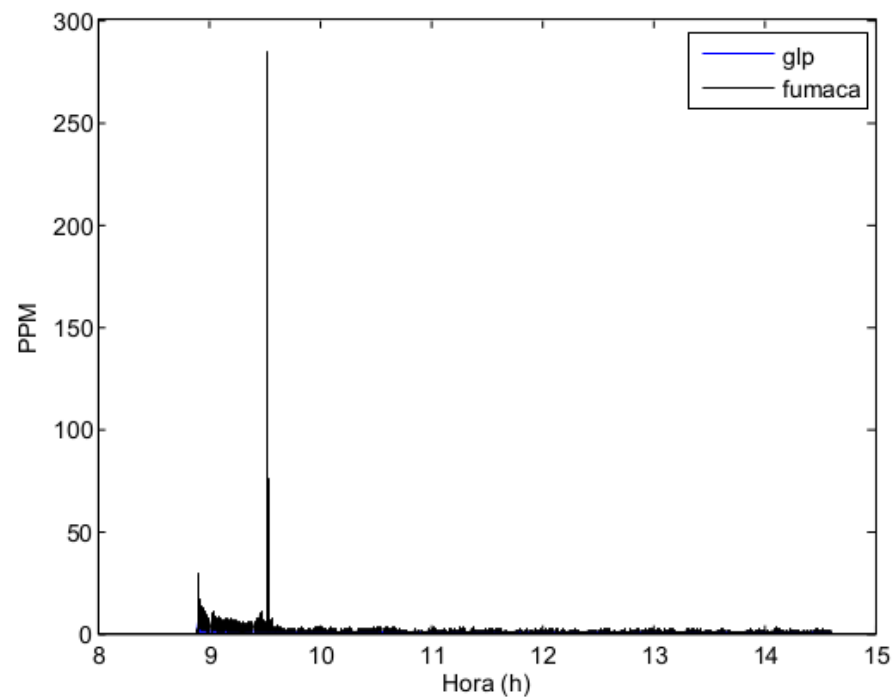


Figura 57: Medidas dos gases(ppm) glp e fumaça em função do horário no nó 3.

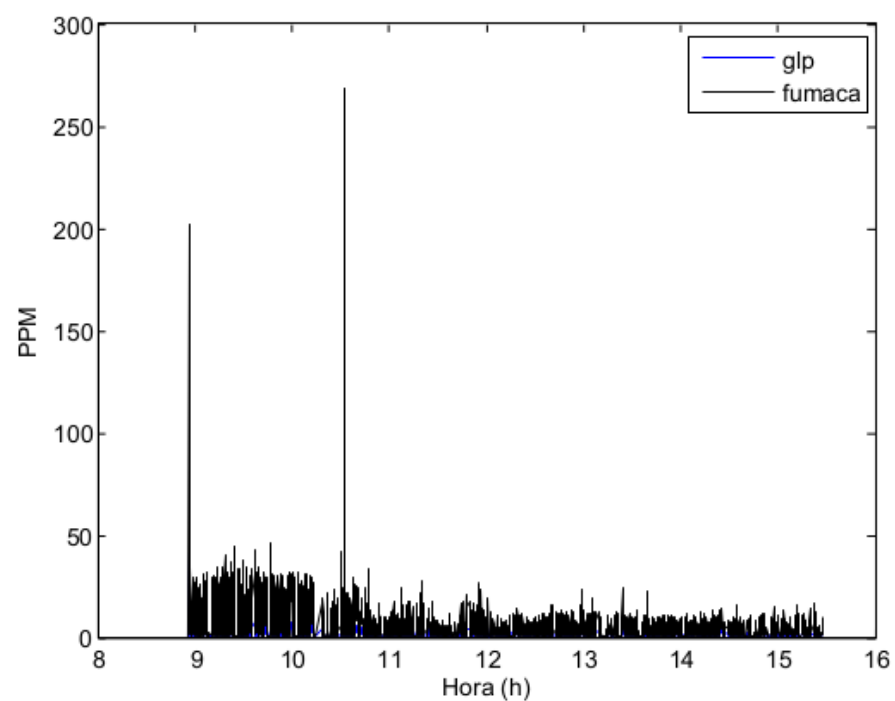


Figura 58: Medidas dos gases(ppm) glp e fumaça em função do horário no nó 4.

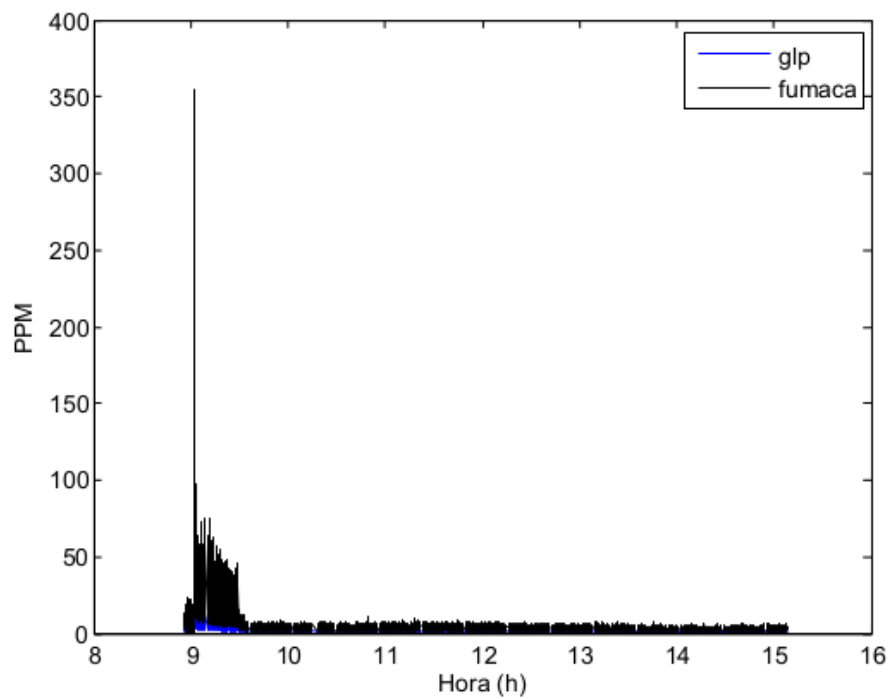


Figura 59: Medidas dos gases(ppm) glp e fumaça em função do horário no nó 5.

As Figuras 60, 61, 62 e 63 mostram os dados de temperatura para os nós 2, 3, 4 e 5, respectivamente.

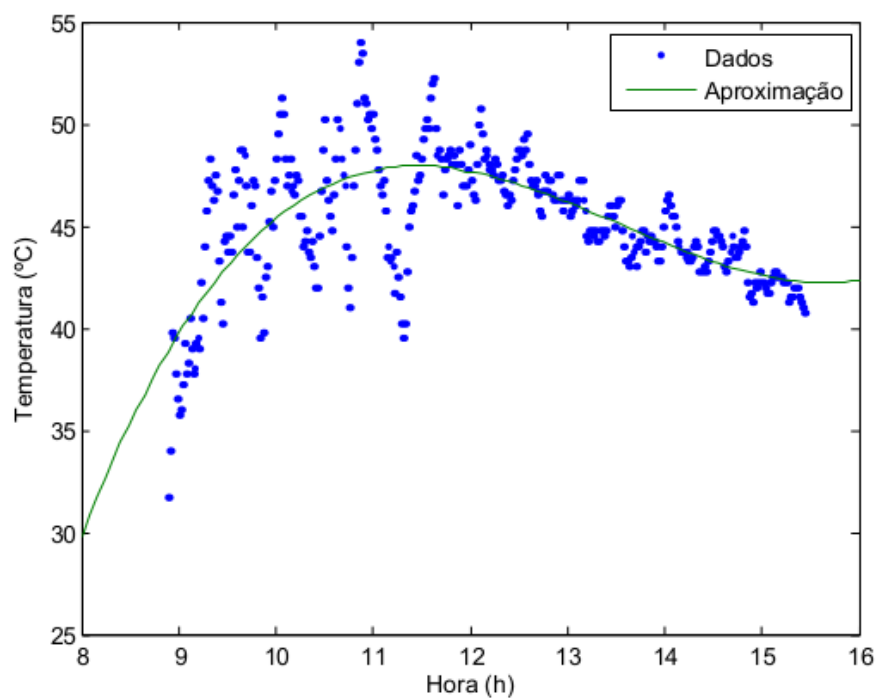


Figura 60: Medidas da temperatura(°C) em função do horário no nó 2.

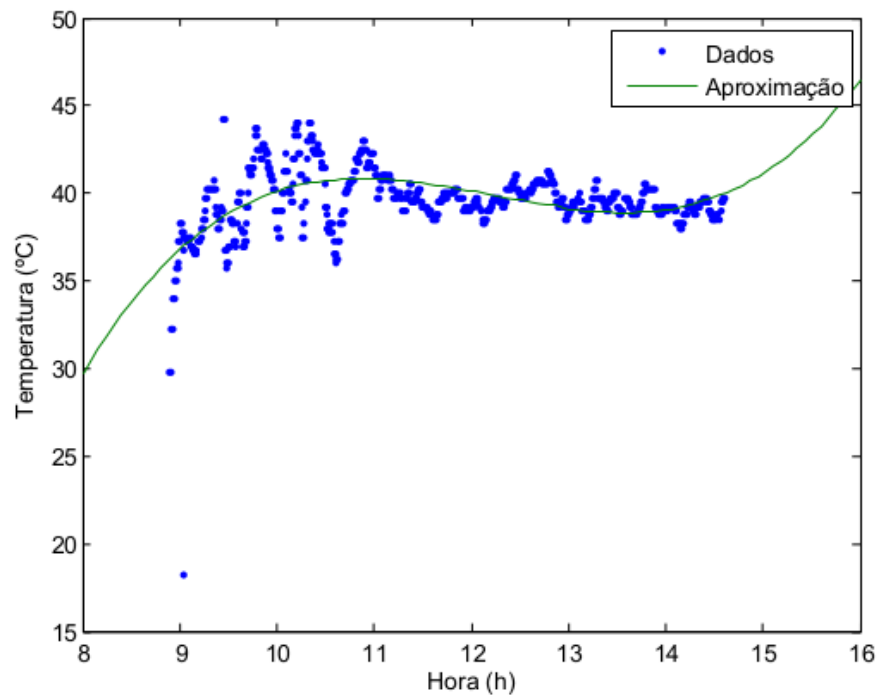


Figura 61: Medidas da temperatura($^{\circ}\text{C}$) em função do horário no nó 3.

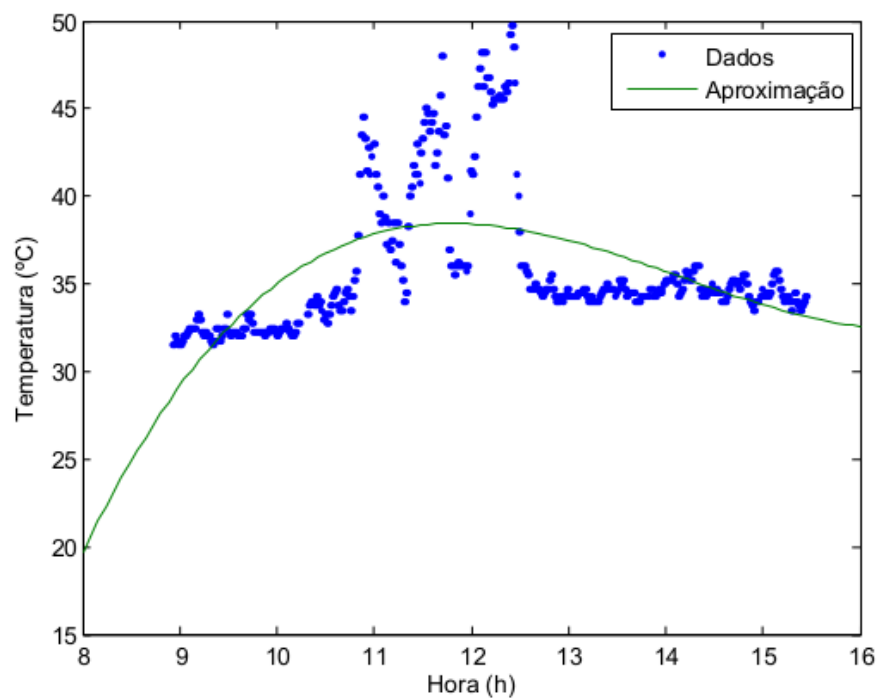


Figura 62: Medidas da temperatura($^{\circ}\text{C}$) em função do horário no nó 4.

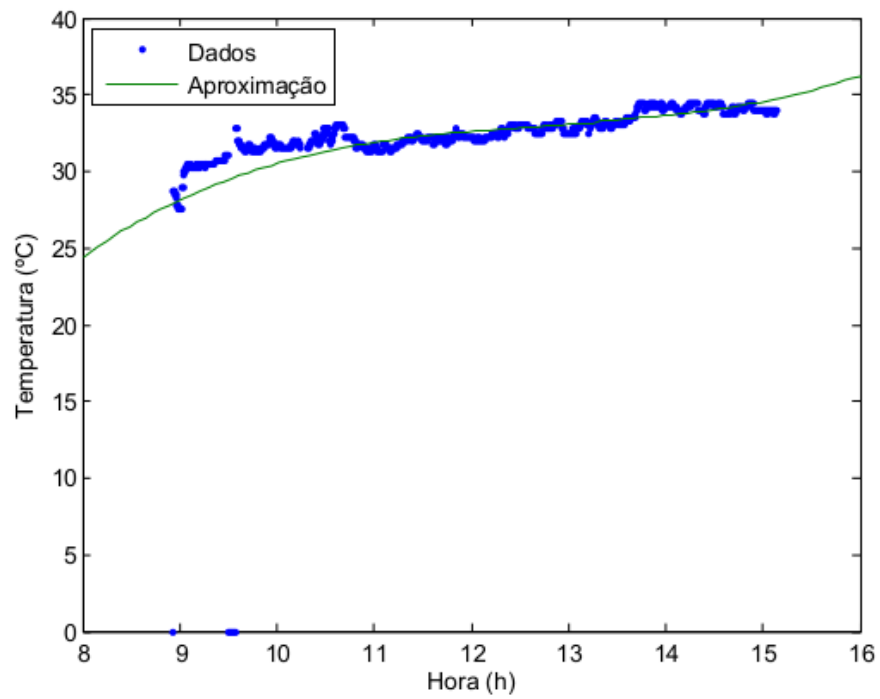


Figura 63: Medidas da temperatura(°C) em função do horário no nó 5.

Observando a Figura 61, em comparação com as anteriores (58, 59 e 60), percebe-se uma certa regularidade em seus dados. Isso se dá ao fato de o nó (5) não está exposto diretamente à luz do sol, diferente dos demais que sofrem influência também de nuvens.

5.5 Conclusão

Neste capítulo foram apresentados os resultados dos experimentos realizados com a RSSF no IFCE. Para tal finalidade, foram considerados os seguintes aspectos: alcance de conectividade, qualidade do enlace entre os nós e o coordenador, desempenho da RSSF no IFCE e exatidão dos dados;

CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

6.1 Conclusão

Dentre os objetivos do projeto, procurou-se avaliar o desempenho do padrão sem fio *ZigBee* para sensoriamento da variabilidade dos gases presentes na atmosfera terrestre. Para tal foi implementada uma aplicação contendo sensores, baseados numa rede *ZigBee*. Com este sistema verificou-se que é possível monitorar ambientes abertos ou fechados, de uma forma econômica e com grande facilidade de instalação. Bem como, é possível medir uma grande variedade de grandezas e em número bastante extenso.

6.2 Trabalhos Futuros

Como trabalhos futuros, pode-se:

- Aumentar a quantidade de nós para uma maior área de monitoramento, sabendo-se que uma rede configurada em malha pode conter mais de 65.000 nós.
- A utilização de outras fontes de energia nos nós sensores como painéis solares e baterias recarregáveis.
- A inclusão de alarmes caso os níveis de concentração dos gases estejam fora dos padrões conhecidos.
- O desenvolvimento de aplicações para *smartphones* para leitura dos nós em tempo real, utilizando Bluetooth ou GSM como meio de transmissão de dados.

Referências Bibliográficas

AMBIENTE, Ministério do Meio. **Efeito Estufa e Aquecimento Global**. nov 2016. [Http://www.mma.gov.br/informma/item/195-efeito-estufa-e-aquecimento-global](http://www.mma.gov.br/informma/item/195-efeito-estufa-e-aquecimento-global). Acesso em: 27 nov. 2016.

ARDUINO. **ARDUINO e GENUINO PRODUTOS Arduino / UNO Genuino**. aug 2016. [Https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno](https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno). Acesso em: 14 ago. 2016.

BAIRD, Colin. **Química ambiental**. [S.l.]: Reverté, 2001.

BAIRD, Colin; CANN, Michael. **Química Ambiental; Tradução: Marco Tadeu Grassi...[et al.]; revisão técnica: Marco Tadeu Grassi. 4ª edição**. [S.l.]: Porto Alegre: Bookman, 2011.

BARONTI, Paolo; PILLAI, Prashant; CHOOK, Vince WC; CHESSA, Stefano; GOTTA, Alberto; HU, Y Fun. Wireless sensor networks: A survey on the state of the art and the 802.15. 4 and zigbee standards. **Computer communications**, Elsevier, v. 30, n. 7, p. 1655–1695, 2007.

BASCOM, Rebecca; BROMBERG, Philip A; COSTA, Daniel L; DEVLIN, Robert; DOCKERY, Douglas W; FRAMPTON, Mark W; LAMBERT, William; SAMET, Jonathan M; SPEIZER, Frank E; UTELL, Mark. Health effects of outdoor air pollution. **American journal of respiratory and critical care medicine**, American Thoracic Society, v. 153, n. 2, p. 477–498, 1996.

BRAGA, Alfésio Luiz F; SALDIVA, PH do N. Poluição e saúde. **J. Pneumol**, p. S10–S16, 2001.

BRANCO, Samuel Murgel. **Poluição do Ar (Em Português do Brasil)**. [S.l.]: Moderna, 2005. ISBN 8516041247.

BRASIL, Ministério do Meio Ambiente. **Resolução CONAMA nº 3, de 28 de junho de 1990**. 1990. [Http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=100](http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=100). Acesso em: 09 jun. 2016.

CETESB, Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental do Estado de São Paulo. **Qualidade do ar no estado de São Paulo 2011**. 2012.

CETESB, Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental do Estado de São Paulo. **Qualidade do ar no estado de São Paulo 2012**. 2013. [Http://www.cetesb.sp.gov.br/ar/qualidade-do-ar/31-publicacoes-e-relatorios](http://www.cetesb.sp.gov.br/ar/qualidade-do-ar/31-publicacoes-e-relatorios). Acesso em: 22 set. 2016.

- CETESB, Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental do Estado de São Paulo. **Qualidade do Ar - QUALAR**. 2014. [Http://qualar.cetesb.sp.gov.br/qualar/home.do](http://qualar.cetesb.sp.gov.br/qualar/home.do). Acesso em: 22 set. 2016.
- CLIMATECHANGE, IPCC. **The Physical Science Basis. Summary for Policymakers**. 2007.
- CRUZ, MATHEUS MEDEIROS DA. **CLIMADUINO: SISTEMA EMBARCADO DE CLIMATIZAÇÃO PARA EDIFÍCIOS INTELIGENTES**. 2013. [Http://www.repositoriobib.ufc.br/000012/000012fc.pdf](http://www.repositoriobib.ufc.br/000012/000012fc.pdf).
- DIGI. **XBee Wi-Fi RF Module**. [S.l.], 2011.
- ESCHNER, Rodrigo Hommerding. Sistema de automação residencial baseado em sensores zigbee. 2011.
- GARCIA, Fernando Parente. **EPMOST: um sistema de monitoramento passivo energeticamente eficiente para redes de sensores sem fio**. Tese (Doutorado), 2014.
- GASPARETTI, A. C. Sensores de gás de dióxido de estanho. *Revista Integração*, São Paulo, p. 61, 01 jan. 2007. jan 2007.
- GIDDENS, Anthony. **A política da mudança climática**. [S.l.]: Zahar, 2010.
- GOUVEIA, N; MENDONÇA, GAS; LEON, AP; CORREIA, JEM; JUNGER, WL; FREITAS, CU; DAUMAS, RP; MARTINS, LC; GIUSSEPE, L; CONCEIÇÃO, GMS *et al*. Air pollution and health effects in two brazilian metropolis. **Epidemiologia e Serviços de Saúde**, v. 12, n. 1, p. 29–40, 2003.
- GUSTAFSSON, Bengt. The health and safety of workers in a confined animal system. **Livestock Production Science**, Elsevier, v. 49, n. 2, p. 191–202, 1997.
- III, C Arden Pope; BURNETT, Richard T; THUN, Michael J; CALLE, Eugenia E; KREWSKI, Daniel; ITO, Kazuhiko; THURSTON, George D. Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution. **Jama**, American Medical Association, v. 287, n. 9, p. 1132–1141, 2002.
- IPCC. **Guidelines for national greenhouse gas inventories**. 2006. [://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.htm](http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.htm)>. Acesso em: 11 out. 2016.
- LICZNERSKI, B. **Thick-film gas microsensors based on tin dioxide**. [http://bulletin.pan.pl/\(52-1\)37.pdf](http://bulletin.pan.pl/(52-1)37.pdf), mar 2004.
- LIMA, Yara da Luz; FARIAS, Fabiano Fontenele; LIMA, Antônia de Maria da Luz. Poluição atmosférica e clima: Refletindo sobre os padrões de qualidade do ar no Brasil. **REVISTA GEONORTE**, v. 3, n. 9, p. 555–564, 2016.
- LOUREIRO, Antonio AF; NOGUEIRA, José Marcos S; RUIZ, Linnyer Beatrys; MINI, Raquel Aparecida de Freitas; NAKAMURA, Eduardo Freire; FIGUEIREDO, Carlos Mauricio Seródio. Redes de sensores sem fio. In: SN. **Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores (SBRC)**. [S.l.], 2003. p. 179–226.

- MANAHAN, Stanley E. **Fundamentals of environmental chemistry**. [S.l.]: CRC press, 2011.
- MCROBERTS, Michael; LEVY, Brad; WOOTTON, Cliff. **Beginning Arduino**. [S.l.]: Springer, 2010.
- MONSIGNORE, Ferdinando. **Sensoriamento de ambiente utilizando o padrao ZigBee**. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2007.
- MOUVIER, Gérard. **La pollution atmosphérique: un exposé pour comprendre, un essai pour réfléchir**. [S.l.]: Flammarion, 1994.
- NOAA. **Atmospheric carbon dioxide record at Mauna Loa named National Historic Chemical Landmark**. apr 2015. Goo.gl/hCTnEP. Acesso em: 22 jun. 2016.
- OLMO, Neide Regina Simoes; SALDIVA, Paulo Hilário do Nascimento; BRAGA, Alfésio Luís Ferreira; LIN, Chin An; SANTOS, Ubiratan de Paula; PEREIRA, Luiz Alberto Amador. A review of low-level air pollution and adverse effects on human health: implications for epidemiological studies and public policy. **Clinics**, SciELO Brasil, v. 66, n. 4, p. 681–690, 2011.
- PEREIRA, Fernanda Alves Cangerana; LEMOS, Miriam; MAUAD, Thais; ASSUNÇÃO, João Vicente de; SALDIVA, Paulo Hilário Nascimento. Urban, traffic-related particles and lung tumors in urethane treated mice. **Clinics**, SciELO Brasil, v. 66, n. 6, p. 1051–1054, 2011.
- RUIZ, Linnyer Beatrys. **Maná: uma arquitetura para gerenciamento de redes de sensores sem fio**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Minas Gerais, 2003.
- RUIZ, Linnyer Beatrys; CORREIA, Luiz Henrique A; VIEIRA, Luiz Filipe M; MACEDO, Daniel F; NAKAMURA, Eduardo F; FIGUEIREDO, Carlos MS; VIEIRA, Marcos Augusto M; BECHELANE, Eduardo Habib; CAMARA, Daniel; LOUREIRO, Antonio AF *et al*. Arquiteturas para redes de sensores sem fio1. 2004.
- SCHLESINGER, William H.; BERNHARDT, Emily S. **Biogeochemistry: An Analysis of Global Change**. third. [S.l.]: Academic Press, 2013.
- SEINFELD, John H; PANDIS, Spyros N. **Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2016.
- SOARES, Sérgio Aurélio Ferreira. Rede de sensores sem fio para localização e monitoramento de pequenos ruminantes. **Bahia:[sn]**, 2012.
- SPIRO, Thomas G; STIGLIANI, William M; YAMAMOTO, Sonia Midori. **Química ambiental**. [S.l.]: Pearson Prentice-Hall, 2009.
- TEIXEIRA, Wilson; TOLEDO, M Cristina Mutta de; FAIRCHILD, Thomas Rich; TAIOLI, F.(Org.). **Decifrando a terra**. [S.l.]: Oficina Textos, 2001.
- USP. **Efeito Estufa**. 2006. [Http://www.usp.br/qambiental/tefeitoestufa.htm](http://www.usp.br/qambiental/tefeitoestufa.htm). Acesso em: 03 out. 2016.

WHO, World Health Organization *et al.* **WHO air quality guidelines global update: Report on a working group meeting, Bonn Germany, 18–20 October, 2005.** 2006.

ZHANG, Bin; LI, Guohui. Survey of network management protocols in wireless sensor network. In: IEEE. **E-Business and Information System Security, 2009. EBISS'09. International Conference on.** [S.l.], 2009. p. 1–5.

ANEXO A – Datasheets

A.1 Datasheet Sensor MQ-2

TECHNICAL DATA

MQ-2 GAS SENSOR

FEATURES

Wide detecting scope
Stable and long life

Fast response and High sensitivity
Simple drive circuit

APPLICATION

They are used in gas leakage detecting equipments in family and industry, are suitable for detecting of LPG, i-butane, propane, methane ,alcohol, Hydrogen, smoke.

SPECIFICATIONS

A. Standard work condition

Symbol	Parameter name	Technical condition	Remarks
V _c	Circuit voltage	5V±0.1	AC OR DC
V _H	Heating voltage	5V±0.1	AC OR DC
R _L	Load resistance	can adjust	
R _H	Heater resistance	33 Ω ± 5%	Room Tem
P _H	Heating consumption	less than 800mw	

B. Environment condition

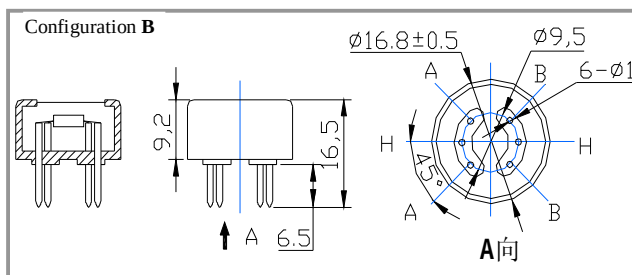
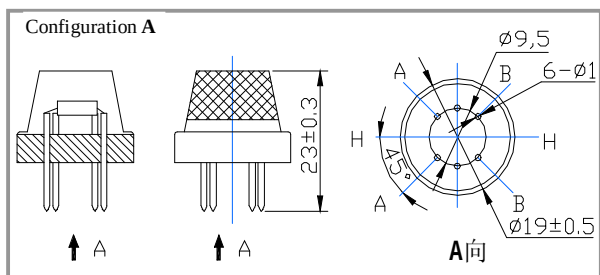
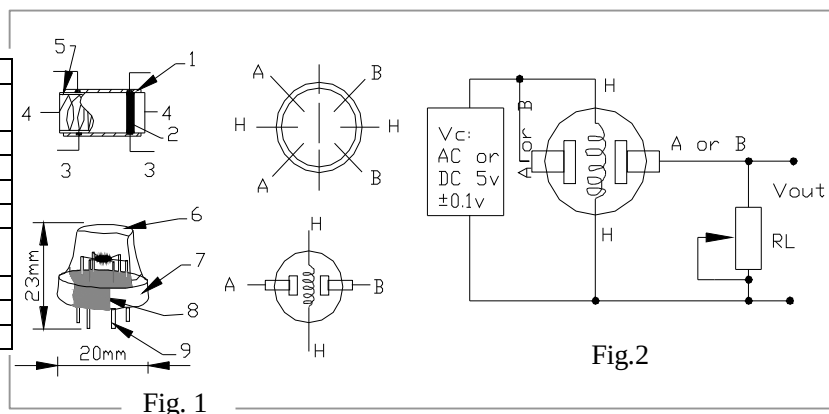
Symbol	Parameter name	Technical condition	Remarks
Tao	Using Tem	-20℃-50℃	
Tas	Storage Tem	-20℃-70℃	
R _H	Related humidity	less than 95%Rh	
O ₂	Oxygen concentration	21%(standard condition)Oxygen concentration can affect sensitivity	minimum value is over 2%

C. Sensitivity characteristic

Symbol	Parameter name	Technical parameter	Remarks
R _s	Sensing Resistance	3K Ω -30K Ω (1000ppm iso-butane)	Detecting concentration scope: 200ppm-5000ppm
α (3000/1000) isobutane	Concentration Slope rate	≤0.6	LPG and propane 300ppm-5000ppm butane
Standard Detecting Condition	Temp: 20℃ ± 2℃ Humidity: 65%±5%	V _c :5V±0.1 V _H : 5V±0.1	5000ppm-20000ppm methane 300ppm-5000ppm H ₂
Preheat time	Over 24 hour		100ppm-2000ppm Alcohol

D. Structure and configuration, basic measuring circuit

Parts	Materials
1 Gas sensing layer	SnO ₂
2 Electrode	Au
3 Electrode line	Pt
4 Heater coil	Ni-Cr alloy
5 Tubular ceramic	Al ₂ O ₃
6 Anti-explosion network	Stainless steel gauze (SUS316 100-mesh)
7 Clamp ring	Copper plating Ni
8 Resin base	Bakelite
9 Tube Pin	Copper plating Ni



Structure and configuration of MQ-2 gas sensor is shown as Fig. 1 (Configuration A or B), sensor composed by micro Al₂O₃ ceramic tube, Tin Dioxide (SnO₂) sensitive layer, measuring electrode and heater are fixed into a

crust made by plastic and stainless steel net. The heater provides necessary work conditions for work of sensitive components. The enveloped MQ-2 have 6 pin ,4 of them are used to fetch signals, and other 2 are used for providing heating current.

Electric parameter measurement circuit is shown as Fig.2

E. Sensitivity characteristic curve

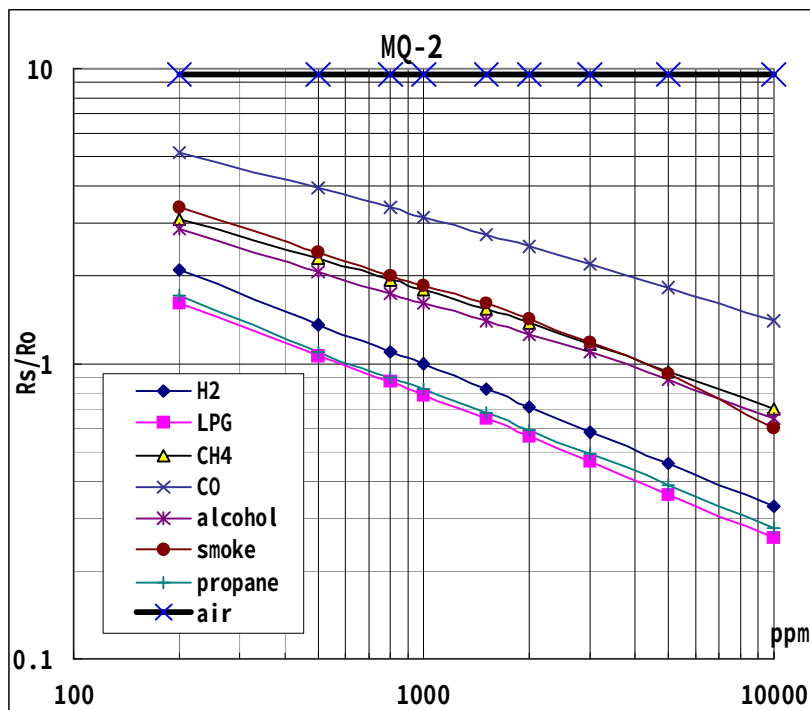


Fig.2 sensitivity characteristics of the MQ-2

Fig.3 is shows the typical sensitivity characteristics of the MQ-2 for several gases.

in their: Temp: 20°C、
Humidity: 65%、
O₂ concentration 21%
RL=5k Ω

Ro: sensor resistance at 1000ppm of H₂ in the clean air.

Rs:sensor resistance at various concentrations of gases.

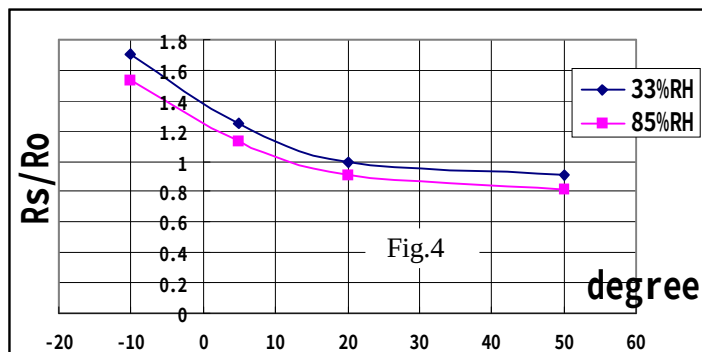


Fig.4 is shows the typical dependence of the MQ-2 on temperature and humidity.

Ro: sensor resistance at 1000ppm of H₂ in air at 33%RH and 20 degree.

Rs: sensor resistance at 1000ppm of H₂ at different temperatures and humidities.

SENSITIVITY ADJUSTMENT

Resistance value of MQ-2 is difference to various kinds and various concentration gases. So, When using this components, sensitivity adjustment is very necessary. we recommend that you calibrate the detector for 1000ppm liquified petroleum gas<LPG>, or 1000ppm iso-butane<i-C₄H₁₀> concentration in air and use value of Load resistance that(R_L) about 20 K Ω (5K Ω to 47 K Ω).

When accurately measuring, the proper alarm point for the gas detector should be determined after considering the temperature and humidity influence.

A.2 Datasheet Sensor MQ-135

TECHNICAL DATA

MQ-135 GAS SENSOR

FEATURES

Wide detecting scope
Stable and long life

Fast response and High sensitivity
Simple drive circuit

APPLICATION

They are used in air quality control equipments for buildings/offices, are suitable for detecting of NH₃, NO_x, alcohol, Benzene, smoke, CO₂, etc.

SPECIFICATIONS

A. Standard work condition

Symbol	Parameter name	Technical condition	Remarks
V _c	Circuit voltage	5V±0.1	AC OR DC
V _H	Heating voltage	5V±0.1	AC OR DC
R _L	Load resistance	can adjust	
R _H	Heater resistance	33Ω±5%	Room Tem
P _H	Heating consumption	less than 800mw	

B. Environment condition

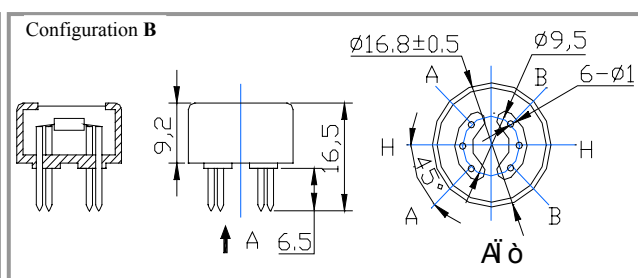
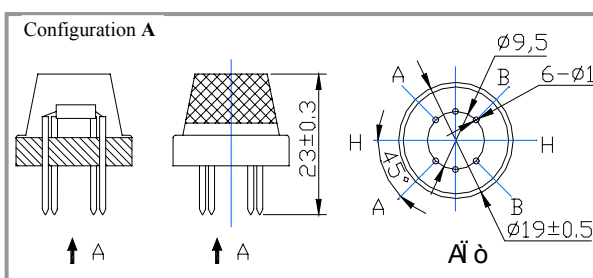
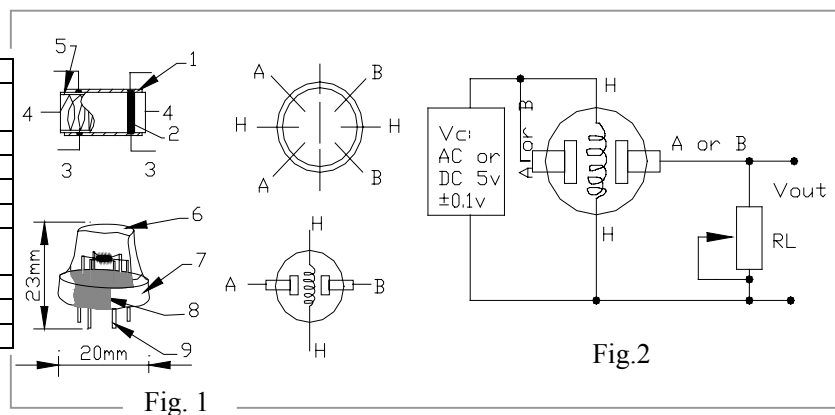
Symbol	Parameter name	Technical condition	Remarks
T _{ao}	Using Tem	-10℃-45℃	minimum value is over 2%
T _{as}	Storage Tem	-20℃-70℃	
R _H	Related humidity	less than 95%Rh	
O ₂	Oxygen concentration	21%(standard condition)Oxygen concentration can affect sensitivity	

C. Sensitivity characteristic

Symbol	Parameter name	Technical parameter	Ramark 2
Rs	Sensing Resistance	30KΩ-200KΩ (100ppm NH ₃)	Detecting concentration scope 10ppm-300ppm NH ₃ 10ppm-1000ppm Benzene 10ppm-300ppm Alcohol
α (200/50) NH ₃	Concentration Slope rate	≤0.65	
Standard Detecting Condition	Temp: 20±2℃ Vc:5V±0.1 Humidity: 65%±5% Vh: 5V±0.1		
Preheat time	Over 24 hour		

D. Structure and configuration, basic measuring circuit

Parts	Materials
1 Gas sensing layer	SnO ₂
2 Electrode	Au
3 Electrode line	Pt
4 Heater coil	Ni-Cr alloy
5 Tubular ceramic	Al ₂ O ₃
6 Anti-explosion network	Stainless steel gauze (SUS316 100-mesh)
7 Clamp ring	Copper plating Ni
8 Resin base	Bakelite
9 Tube Pin	Copper plating Ni



Structure and configuration of MQ-135 gas sensor is shown as Fig. 1 (Configuration A or B), sensor composed by micro AL₂O₃ ceramic tube, Tin Dioxide (SnO₂) sensitive layer, measuring electrode and heater are fixed into a crust made by plastic and stainless steel net. The heater provides necessary work conditions for work of sensitive

components. The enveloped MQ-135 have 6 pin ,4 of them are used to fetch signals, and other 2 are used for providing heating current.

Electric parameter measurement circuit is shown as Fig.2

E. Sensitivity characteristic curve

Fig.2 sensitivity characteristics of the MQ-135

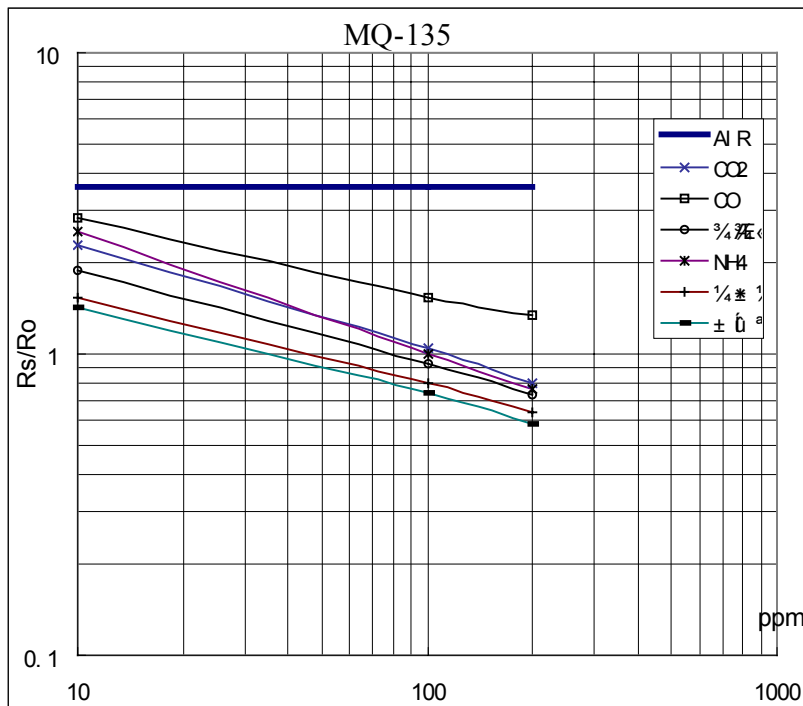


Fig.3 is shows the typical sensitivity characteristics of the MQ-135 for several gases.

in their: Temp: 20 °C

Humidity: 65%RH

O₂ concentration 21%

RL=20kΩ

Ro: sensor resistance at 100ppm of NH₃ in the clean air.

Rs: sensor resistance at various concentrations of gases.

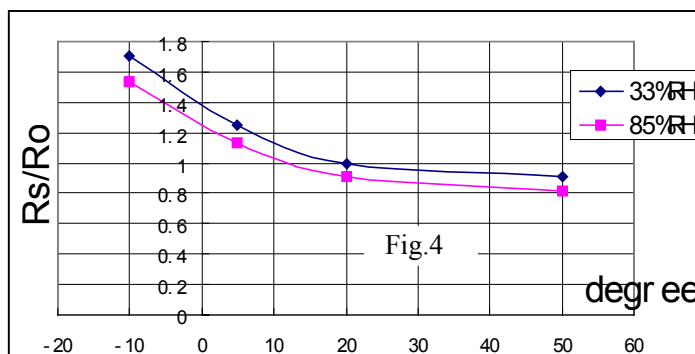


Fig.4 is shows the typical dependence of the MQ-135 on temperature and humidity.

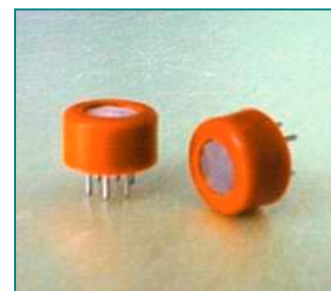
Ro: sensor resistance at 100ppm of NH₃ in air at 33%RH and 20 degree.

Rs: sensor resistance at 100ppm of NH₃ at different temperatures and humidities.

SENSITIVITY ADJUSTMENT

Resistance value of MQ-135 is difference to various kinds and various concentration gases. So, When using this components, sensitivity adjustment is very necessary. we recommend that you calibrate the detector for 100ppm NH₃ or 50ppm Alcohol concentration in air and use value of Load resistance that(R_L) about 20 KΩ(10KΩ to 47 KΩ).

When accurately measuring, the proper alarm point for the gas detector should be determined after considering the temperature and humidity influence.



A.3 Guia de Usuário ZigBee RF Modules

Worldwide acceptance

FCC Approval (USA) Refer to [Agency certifications](#) on page 186 for FCC Requirements. Systems that contain XBee/XBee-PRO ZB RF Modules inherit Digi Certifications.

ISM (Industrial, Scientific & Medical) 2.4 GHz frequency band

Manufactured under ISO 9001:2000 registered standards

XBee/XBee-PRO ZB RF Modules are optimized for use in US, Canada, Europe, Australia, and Japan; contact Digi for a complete list of agency approvals.



Specifications of the XBee/XBee-PRO ZB RF Module

Specification	XBee	XBee-PRO (S2)	XBee-PRO (S2B)
Performance			
Indoor/urban range	up to 133 ft. (40 m)	Up to 300 ft. (90 m), up to 200 ft (60 m) international variant	Up to 300 ft. (90 m), up to 200 ft (60 m) international variant
Outdoor RF line-of-sight range	up to 400 ft. (120 m)	Up to 2 miles (3200 m), up to 5000 ft (1500 m) international variant	Up to 2 miles (3200 m), up to 5000 ft (1500 m) international variant
Transmit power output	2 mW (+3dBm), boost mode enabled 1.25 mW (+1dBm), boost mode disabled	50 mW (+17 dBm) 10 mW (+10 dBm) for International variant	63mW (+18 dBm) 10mW (+10 dBm) for International variant
RF data rate	250,000 b/s	250,000 b/s	250,000 b/s
Data throughput	up to 35000 b/s (see XBee ZB transmission, addressing, and routing on page 61)	up to 35000 b/s (see XBee ZB transmission, addressing, and routing on page 61)	up to 35000 b/s (see XBee ZB transmission, addressing, and routing on page 61)
Serial interface data rate (software selectable)	1200 b/s - 1 Mb/s (non-standard baud rates also supported)	1200 b/s - 1 Mb/s (non-standard baud rates also supported)	1200 b/s - 1 Mb/s (non-standard baud rates also supported)
Receiver sensitivity	-96 dBm, boost mode enabled -95 dBm, boost mode disabled	-102 dBm	-102 dBm
Power Requirements			
Supply voltage	2.1 - 3.6 V	3.0 - 3.4 V	2.7 - 3.6 V
Operating current (transmit, max output power)	40 mA (@ 3.3 V, boost mode enabled) 35 mA (@ 3.3 V, boost mode disabled)	295 mA (@3.3 V) 170 mA (@3.3 V) international variant	205 mA, up to 220 mA with programmable variant (@3.3 V) 117 mA, up to 132 mA with programmable variant (@3.3 V), International variant

Specification	XBee	XBee-PRO (S2)	XBee-PRO (S2B)
Operating current (receive))	40mA (@ 3.3 V, boost mode enabled) 38mA (@ 3.3 V, boost mode disabled)	45 mA (@3.3 V)	47 mA, up to 62 mA with programmable variant (@3.3 V)
Idle current (receiver off)	15mA	15mA	15mA
Power-down current	< 1 μ A @ 25°C	3.5 μ A typical @ 25°C	3.5 μ A typical @ 25°C
General			
Operating frequency band	ISM 2.4 GHz	ISM 2.4 GHz	ISM 2.4 GHz
Dimensions	0.960" x 1.087" (2.438cm x 2.761cm)	0.960 x 1.297 (2.438 cm x 3.294 cm)	0.960 x 1.297 (2.438 cm x 3.294 cm)
Operating temperature	-40 to 85° C (industrial)	-40 to 85° C (industrial)	-40 to 85° C (industrial)
Antenna options	Integrated whip antenna, embedded PCB antenna chip, RPSMA, or U.FL connector	Integrated whip antenna, embedded PCB antenna, RPSMA or U.FL connector	Integrated whip antenna, embedded PCB antenna, RPSMA or U.FL connector
I/O interface	3.3 V CMOS UART (not 5 V tolerant), DIO, ADC	3.3 V CMOS UART (not 5 V tolerant), DIO, ADC	3.3 V CMOS UART (not 5 V tolerant), DIO, ADC
Networking and Security			
Supported network topologies	Point-to-point, point-to-multipoint, peer-to-peer, and mesh	Point-to-point, point-to-multipoint, peer-to-peer, and mesh	Point-to-point, point-to-multipoint, peer-to-peer, and mesh
Number of channels	16 direct Sequence channels	14 Direct sequence channels	15 Direct sequence channels
Channels	11 to 26	11 to 24	11 to 25
Addressing options	PAN ID and addresses, cluster IDs and endpoints (optional)	PAN ID and addresses, cluster IDs and endpoints (optional)	PAN ID and addresses, cluster IDs and endpoints (optional)
Agency Approvals			
United States (FCC Part 15.247)	FCC ID: OUR-XBEE2	FCC ID: MCQ-XBEEPRO2	FCC ID: MCQ-PROS2B
Industry Canada (IC)	IC: 4214A-XBEE2	IC: 1846A-XBEEPRO2	IC: 1846A-PROS2B
Europe (CE)	ETSI	ETSI (International variant)	ETSI (10 mW max)
Australia	C-Tick	C-Tick	C-Tick

Specification	XBee	XBee-PRO (S2)	XBee-PRO (S2B)
Japan	R201WW07215215 (Wire, chip, RPSMA, and U.FL versions) R210-101040 (PCB antenna version)	R201WW08215142 (international variant) Wire, chip, RPSMA, and U.FL versions are certified for Japan. PCB antenna version is not.	R201WW10215062 (international variant)
Brazil		ANATEL: 2256-14-1209	
RoHS	Compliant	Compliant	Compliant

Hardware specifications for programmable XBee/XBee-PRO ZB variant

The following specifications need to be added to the current measurement of the previous table if the module has the programmable secondary processor. For example, if the secondary processor is running and constantly collecting DIO samples at a rate while having the RF portion of the XBee sleeping the new current will be $I_{\text{total}} = I_{r2} + I_0$, where I_{r2} is the runtime current of the secondary processor and I_s is the sleep current of the RF portion of the module of the XBee-PRO (S2B) listed in the table below.

Optional Secondary Processor Specification	These numbers add to S2B specifications (Add to RX, TX, and sleep currents depending on mode of operation)
Runtime current for 32 k running at 20 MHz	+14 mA
Runtime current for 32 k running at 1MHz	+1 mA
Sleep current	+0.5 uA typical
For additional specifications see the Freescale datasheet and manual	MC9S08QE32
Minimum reset low pulse time for EM250	+50 nS (additional resistor increases minimum time)
VREF range	1.8 VDC to VCC