



Universidade Federal  
de Campina Grande

CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

REDES DE SENSORES SEM FIO APLICADAS À  
AQUISIÇÃO DE DADOS DE SOLOS

ÉRICO CASTRO DE ALBUQUERQUE MÉLO

Campina Grande, Paraíba

Abril de 2019

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

REDES DE SENSORES SEM FIO APLICADAS À  
AQUISIÇÃO DE DADOS DE SOLOS

*Dissertação apresentada à Coordenação do  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia  
Elétrica da Universidade Federal de Campina  
Grande como parte dos requisitos necessários  
para obtenção do grau de Mestre em  
Engenharia Elétrica.*

ORIENTADORES:

RAIMUNDO CARLOS SILVÉRIO FREIRE, DR.  
EWALDO EDER CARVALHO SANTANA, DR.

Campina Grande, Paraíba

Abril de 2019

M528r    Melo, Érico Castro de Albuquerque.  
Redes de sensores sem fio aplicadas à aquisição de dados de solos / Érico Castro de Albuquerque Melo. – Campina Grande, 2019.

58 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática, 2019.

"Orientação: Prof. Dr. Raimundo Carlos Silvério Freire, Prof. Dr. Ewaldo Éder Carvalho Santana".

Referências.

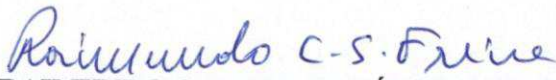
1. Redes de Sensores sem Fio. 2. Aterro Sanitário. 3. Monitoramento Ambiental. I. Freire, Raimundo Carlos Silvério. II. Santana, Ewaldo Éder Carvalho. III. Título.

CDU 628.472.3(043)


**"REDES DE SENSORES SEM FIO APLICADAS À AQUISIÇÃO DE DADOS DE SOLOS"**

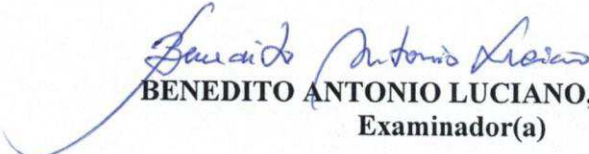
**ÉRICO CASTRO DE ALBUQUERQUE MELO**

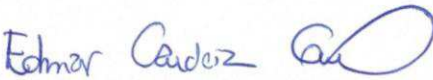
**DISSERTAÇÃO APROVADA EM 24/04/2019**

  
**RAIMUNDO CARLOS SILVÉRIO FREIRE, Dr., UFCG**  
Orientador(a)

**EWALDO EDER CARVALHO SANTANA, D.Sc., UEMA**  
Orientador(a)

  
**ALEXANDRE JEAN RENÉ SERRES, Dr., UFCG**  
Examinador(a)

  
**BENEDITO ANTONIO LUCIANO, D.Sc., UFCG**  
Examinador(a)

  
**EDMAR CANDEIA GURJAO, D.Sc., UFCG**  
Examinador(a)

**CAMPINA GRANDE - PB**

*Dedicado à minha mãe Maria  
Neide e ao meu pai José Nilson.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelo dom da vida e por todas as bênçãos que recebo diariamente.

Agradeço à minha mãe, Maria Neide, e ao meu pai, José Nilson, por terem se esforçado tanto para me proporcionar a educação, a saúde e a inspiração que foram essenciais para superar de todas as adversidades ao longo de minha caminhada acadêmica.

Agradeço também ao restante de minha família, pessoas que com todo carinho e apoio, jamais mediram esforços para me ajudar nos momentos de necessidade.

Agradeço aos meus orientadores, Raimundo Freire e Ewaldo Santana, pela paciência e tempo dedicados a sugestões.

Agradeço ao professor Edmar por sempre estar disposto a contribuir para meu desenvolvimento acadêmico e profissional, desde a graduação.

Aos meus colegas do LIMC, em especial a Ivana pela força e incentivo nos momentos decisivos.

Agradeço a todos os meus amigos que sempre estiveram ao meu lado. De modo especial a Lucas e Luciana, pela companhia diária durante tantos anos, e que já está fazendo falta.

Agradeço também a Justine por todo o apoio e incentivo que me prestou no tempo em que estive escrevendo esta dissertação.

Enfim, agradeço a todos que de alguma forma, passaram pela minha vida e contribuíram para a construção de quem sou hoje.

## RESUMO

Os aterros sanitários são locais de descarte controlado de resíduos sólidos urbanos. Estes locais contam com estruturas projetadas para minimizar os impactos ambientais causados pelos líquidos e gases resultantes da decomposição da matéria orgânica, presente nos resíduos. Um desses gases é o metano, cuja presença na atmosfera contribui para o efeito estufa. Neste trabalho, propõe-se um sistema de aquisição de dados baseado em redes de sensores sem fio para monitorar os níveis de metano em um aterro sanitário. Os nós sensores da rede medem temperatura, umidade relativa e concentração de metano. A comunicação entre os nós da rede é baseada no padrão IEEE 802.15.4. O sistema proposto permite um monitoramento contínuo das emissões de metano e reduz a exposição dos trabalhadores às condições ambientais perigosas de um aterro sanitário. Um protótipo de nó de sensor foi desenvolvido e testado em laboratório como uma prova de conceito. Com base nos resultados obtidos concluiu-se que o sistema é capaz de realizar o monitoramento de variáveis ambientais via rede sem fio, contribuindo assim para modernizar os métodos de monitoramento ambiental empregados em aterros sanitários.

**PALAVRAS-CHAVE:** Redes de sensores sem fio. Aterro sanitário. Monitoramento ambiental.

## ABSTRACT

Sanitary landfills are sites of controlled disposal of municipal solid waste, designed to minimize the environmental impacts caused by the liquids and gases resulting from the decomposition of organic matter present in the waste. One of these gases is methane, which is a greenhouse gas. In this work, a data acquisition system based on wireless sensor networks is proposed to monitor the levels of methane in a landfill. The sensor node is designed to measure temperature, relative humidity and methane concentration. Communication between the network nodes is based on the IEEE 802.15.4 standard. The proposed system allows for continuous monitoring of methane emissions and reduces the exposure of workers to the hazardous environmental conditions of a landfill. A prototype sensor node was developed and tested in the laboratory as a demonstration of the feasibility of the system. Based on the obtained results, it was verified that the system is capable of monitoring environmental variables via wireless network, thus contributing to the modernization of environmental monitoring methods employed in landfills.

**KEYWORDS:** Wireless sensor networks. Sanitary landfill. Environmental monitoring.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Estruturas necessárias em um aterro sanitário .....	15
Figura 2: Detalhes drenos de gás .....	16
Figura 3: Representação dos subsistemas de um nó sensor .....	19
Figura 4: Visão geral da organização de uma RSSF .....	22
Figura 5: Modelo genérico da pilha de protocolos para RSSF.....	24
Figura 6: Topologias em estrela e ponto a ponto .....	29
Figura 7: Diagrama das unidades que constituem o nó sensor desenvolvido .....	33
Figura 8: Disposição dos pinos do sensor AM2302.....	34
Figura 9: Topologias possíveis com dispositivos XBee 802.15.4.....	36
Figura 10: Esquemático do circuito regulador de tensão para 3.3 V .....	37
Figura 11: Esquemático do projeto da placa de circuito impresso do nó sensor.....	38
Figura 12: Protótipo de nó sensor .....	39
Figura 13: Diagrama de blocos do algoritmo implementado pelo nó sensor.....	40
Figura 14: Nó coordenador da rede.....	42
Figura 15: Diagrama de blocos do algoritmo implementado pelo coordenador .....	43
Figura 16: Nó sensor utilizado em teste .....	44
Figura 17: Diagrama de ilustração do arranjo experimental .....	45
Figura 18: Gráfico representando concentração de metano .....	46
Figura 19: Gráfico representando as leituras de temperatura .....	46
Figura 20: Gráfico representando as leituras de umidade relativa do ar.....	47
Figura 21: Gráfico de comparação dos valores das leituras de tempera com os dados do INMET .....	48
Figura 22: Gráfico de comparação dos valores das leituras de umidade com os dados do INMET .....	48
Figura 23: Visualização de em tempo real pela ferramenta serial plotter.....	50

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Descrição dos pinos do sensor AM2302 .....	34
--	----

# Sumário

1	Introdução .....	11
1.1	Objetivos .....	12
1.1.1	Objetivo Geral.....	12
1.1.2	Objetivos específicos .....	12
1.2	Organização do Trabalho.....	13
2	Fundamentação Teórica.....	14
2.1	Aterros sanitários .....	14
2.1.1	Conceito de Aterro Sanitário .....	14
2.1.2	Projeto de um aterro sanitário.....	15
2.1.3	Monitoramento de aterros sanitários .....	17
2.2	Redes de Sensores sem Fio.....	17
2.2.1	Subsistemas de um nós sensor.....	18
2.2.2	Arquitetura de uma RSSF .....	21
2.2.3	Pilha de Protocolos para RSSF.....	22
2.2.4	Fatores que influenciam o projeto de uma RSSF .....	25
2.3	Padrão IEEE 802.15.4.....	28
3	Revisão Bibliográfica .....	30
3.1	Monitoramento ambiental .....	30
4	Material e Métodos .....	32
4.1	Nó Sensor .....	32
4.1.1	Unidade de Sensoriamento (US) .....	33
4.1.2	Unidade de processamento (UP) .....	35
4.1.3	Unidade de Comunicação (UC) .....	35
4.1.4	Unidade de Energia (UE).....	37
4.1.5	Descrição do algoritmo utilizado no Nó Sensor .....	39

4.2	Coordenador da Rede .....	41
4.2.1	Hardware .....	41
4.2.2	Descrição do algoritmo utilizado no Coordenador .....	42
5	Resultados .....	44
5.1	Nó Sensor .....	44
6	Conclusões .....	51
	Referências .....	53

# 1 INTRODUÇÃO

O solo é um recurso de importância fundamental no ecossistema e está no centro de diversas questões globais, particularmente: a segurança alimentar, mudanças climáticas, disponibilidade de água e biodiversidade (GUYAMAZON, 2014). Devido a todos esses fatores, a área do desenvolvimento de instrumentação remota para o monitoramento de solos atrai forte interesse científico. Dentro desta área, o estudo de parâmetros do solo utilizado como cobertura de aterros sanitários é um tema de especial relevância.

Os aterros sanitários são estruturas de engenharia nas quais resíduos sólidos urbanos (RSU) são cobertos por uma camada de solo compactado. Tais estruturas possuem instalações projetadas para minimizar os impactos ambientais causados por líquidos e gases resultantes da decomposição da matéria orgânica presente nos RSU (BOGNER, 1995). O metano, que é um desses subprodutos, é um gás causador de efeito estufa, que mantém o calor na atmosfera de forma mais eficiente que o CO<sub>2</sub>, portanto, suas emissões contribuem de forma intensa com o avanço do aquecimento global (MACIEL, JUCÁ e NETO, 2011). Nas células de RSU, a maior parte do metano é escoada por drenos verticais, porém, problemas na compactação do solo da camada de cobertura podem permitir a presença de emissões fugitivas, de modo a liberar o metano diretamente à atmosfera.

No aterro sanitário de Campina Grande a aquisição de dados relativos à emissão de metano na camada de solo de cobertura é realizada apenas uma vez por semana, de modo manual, por estudantes do Grupo de Geotecnia Ambiental (GGA), utilizando um analisador de gases. No entanto, medições manuais em aterros sanitários submetem seus operadores a condições insalubres e não viabilizam um monitoramento contínuo do ambiente. É interessante buscar então, por meio de interação entre áreas de conhecimento, métodos de medição mais seguros e que forneçam dados mais completos a respeito do ambiente estudado.

Os avanços tecnológicos nos sistemas micro-eleto-mecânicos (*Micro-Electro-Mechanical-Systems*, MEMS), na eletrônica digital e nas comunicações sem fio têm possibilitado a fabricação de sensores multifuncionais de baixos custo e consumo energético (AKYILDIZ, 2002; RUIZ, 2003). A combinação de sensores, processadores e módulos de comunicação sem fio deu origem às redes de sensores sem fio (RSSF), um tipo especial de rede constituída de grande quantidade de nós, que devem possuir mecanismos de adaptação em caso de falhas de comunicação e perda de nós.

Diante do exposto, esta dissertação se destina a explorar soluções de RSSF que possibilitem acompanhar, em tempo real, as condições do solo da camada de cobertura de um aterro sanitário. Para tanto, foram desenvolvidos e testados protótipos de nós sensores capazes de se comunicar, sem fio, por meio do protocolo IEEE 802.15.4 e foram realizados testes de validação para avaliar o funcionamento da arquitetura de rede proposta.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho é propor um sistema de medição baseado em redes de sensores sem fio para o monitoramento de parâmetros do solo. Para tanto propõe-se desenvolver um protótipo de nó sensor com baixo custo a ser utilizado em testes e ensaios sobre emissão de metano em células de resíduos sólidos urbanos.

### 1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

São objetivos específicos deste trabalho:

- Projetar nós sensores de baixo custo e baixo consumo energético para serem utilizados no monitoramento de parâmetros de solos, a saber: temperatura, umidade e concentração de metano;

- Desenvolver as rotinas computacionais que definem o funcionamento dos nós sensores projetados.
- Realizar testes para validação do sistema desenvolvido.

## 1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este texto foi organizado em seis capítulos. O primeiro capítulo trata da parte introdutória, em que estão contidas considerações gerais sobre redes de sensores sem fio, a importância do monitoramento de parâmetros do solo em aterros e os objetivos do trabalho. No capítulo 2 trata-se da fundamentação teórica acerca dos conceitos básicos acerca de aterros sanitários e seu monitoramento, redes de sensores sem fio e o padrão IEEE 802.15.4. No capítulo 3 descrevem-se os principais trabalhos relacionados ao tema desta dissertação. No capítulo 4 são descritos os materiais e os métodos empregados para a realização do trabalho. No capítulo 5 são discutidos os resultados obtidos no âmbito desta dissertação. Finalmente no capítulo 6 trata-se das considerações finais, assim como dos trabalhos futuros a serem desenvolvidos a partir deste trabalho.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, inicialmente é apresentado o conceito de aterro sanitário e algumas informações a respeito de seu projeto e monitoramento. Em seguida é apresentada uma introdução a respeito das redes de sensores sem fio e sua importância no monitoramento ambiental. A arquitetura de uma rede de sensores sem fio é discutida e também os módulos básicos que compõe um nó sensor. Este capítulo também aborda os principais protocolos de redes de sensores sem fio, assim como as métricas para avaliação do desempenho dos mesmos. Por fim neste capítulo há uma seção do padrão IEEE 802.15.4.

### 2.1 ATERROS SANITÁRIOS

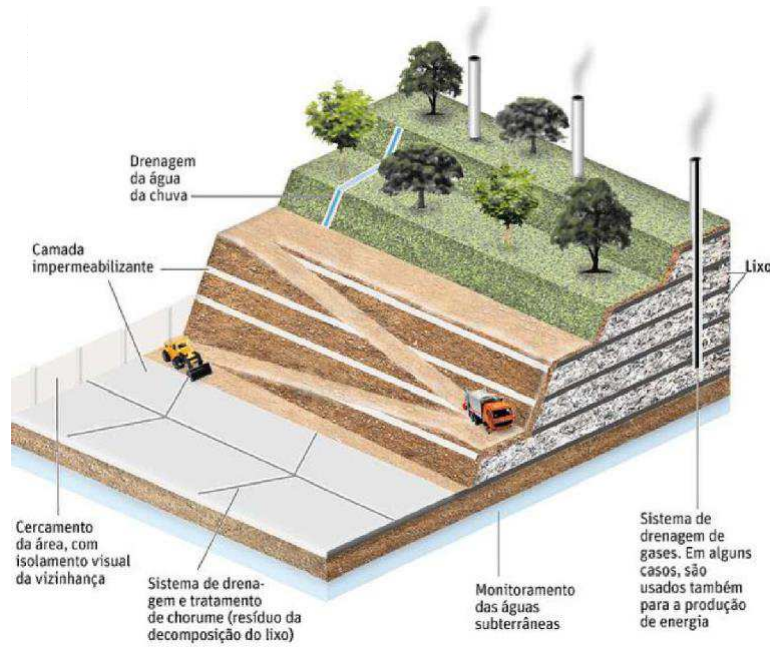
O descarte adequado dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) é uma questão importante para a preservação do meio ambiente. Um dos possíveis destinos finais para o RSU são os aterros sanitários. Nesta sessão são abordados os aspectos mais relevantes deste tipo de empreendimento.

#### 2.1.1 CONCEITO DE ATERRO SANITÁRIO

Aterros sanitários são estruturas cujo propósito é garantir a disposição final de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) sem prejudicar o meio ambiente, sendo considerado uma das técnicas mais eficientes para este fim (outras técnicas incluem os aterros controlados, lixões e incineração). Tais estruturas comportam-se como reatores dinâmicos, devido ao fato de que, em seu interior, ocorrem reações químicas e biológicas que dão origem a diversos subprodutos, como o biogás, lixiviados e resíduos mineralizados (ELK, 2007). Na figura 1 são ilustradas as principais estruturas necessárias para tratar tais subprodutos.



Figura 1: Estruturas necessárias em um aterro sanitário.



Fonte: (PEREIRA, 2012).

### 2.1.2 PROJETO DE UM ATERRO SANITÁRIO

O projeto de um aterro sanitário é um processo complexo, composto por diversas etapas. Inicialmente realizaram-se estudos de caracterização do município, a fim de levantar informações sobre a geração per capita de resíduos e sua composição gravimétrica (percentual de cada componente em relação ao peso total dos resíduos). Em seguida, é realizada a escolha do local apropriado para a instalação baseada em critérios técnicos ambientais, operacionais e sociais.

As normas técnicas que regulamentam o projeto de aterros sanitários exigem, entre outros elementos, a impermeabilização da camada de cobertura, monitoramento ambiental e geotécnico, sistema de drenagem de gases e líquidos e definição de qual será o futuro da área após o encerramento das atividades do aterro (ABNT, 1992).

Dentre todos os sistemas presentes em aterros sanitários, os mais relevantes para esta dissertação são os que tem relação direta com o controle da liberação de biogás, sendo eles o sistema de cobertura e o sistema de drenagem de gases.

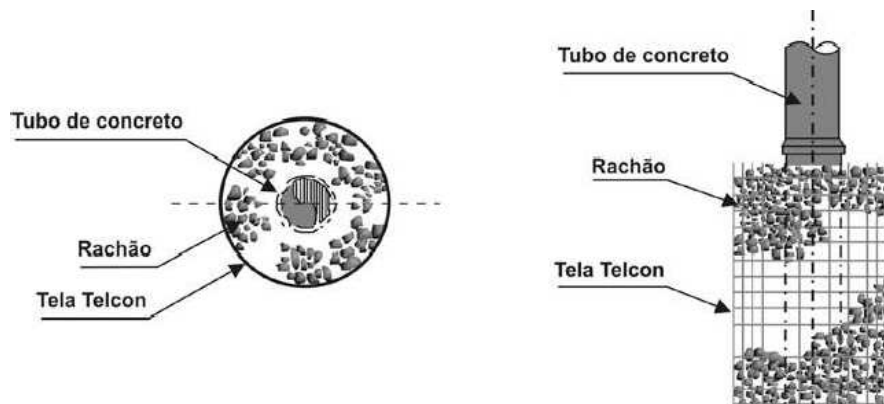
#### 2.1.2.1 SISTEMA DE COBERTURA

O Sistema de cobertura consiste em uma camada de solo compactada que é acomodada sobre os resíduos sólidos. A cobertura tem a função de eliminar a proliferação de vetores de doenças, diminuir a taxa de formação de lixiviados, reduzir a exalação de odores e impedir a saída descontrolada de biogás. A cobertura final também favorece a recuperação final da área e o crescimento da vegetação.

#### 2.1.2.2 SISTEMA DE DRENAGEM DE GASES

A drenagem de gases é realizada por meio de uma rede de drenos, evitando assim que os gases escapem por meios porosos, atingindo livremente a superfície. Na maioria dos casos, os drenos são compostos de tubos verticais perfurados de concreto, envoltos em uma camada de rachão, que é fixada à coluna de tubos por uma tela metálica, como exposto na figura 2.

Figura 2: Detalhes drenos de gás



Fonte: (ITURRI, 2006)

### 2.1.3 MONITORAMENTO DE ATERROS SANITÁRIOS

O monitoramento do aterro é muito importante e deve ser realizado para assegurar a salubridade da população no entorno, a preservação do meio ambiente e a estabilidade de todas as estruturas que o compõe.

A liberação de metano presente no biogás para a atmosfera é uma grande preocupação à sociedade, uma vez que é aproximadamente 21 vezes mais eficiente em aprisionar calor na atmosfera do que o dióxido de carbono (MACIEL, JUCÁ e NETO, 2011), tendo grande influência no avanço do aquecimento global. Diante disto, existe a possibilidade de obter compensações financeiras pelo tratamento destes gases na forma de venda de créditos de carbono. Em aterros nos quais se pretende viabilizar a venda de créditos de Carbono, devem ser monitorados periodicamente a pressão, a vazão, a temperatura e a composição de biogás, além de haver conhecimento das características físicas dos resíduos, como composição gravimétrica, teor de umidade e densidade (ELK, 2007).

Diante da importância do monitoramento ambiental no contexto dos aterros sanitários, surge a necessidade de buscar mecanismos eficientes de medição para serem utilizados neste contexto. As redes de sensores sem fio vêm se consolidando como uma das principais ferramentas para realização de monitoramento ambiental. Na próxima seção serão abordados os principais conceitos acerca de RSSF.

## 2.2 REDES DE SENSORES SEM FIO

A crescente demanda por sistemas de monitoramento e controle de ambientes e equipamentos tem gerado grande interesse na área de RSSF. O desenvolvimento de tais redes é um importante passo em direção aos conceitos de Ambientes Inteligentes e Internet das Coisas, que prometem revolucionar a maneira como o ser humano interage com o mundo a seu redor. Essas redes são projetadas para monitorar eventos ou variáveis relativas ao meio físico, e em alguns casos, realizar ações de controle sobre o

mesmo. Devido a suas dimensões reduzidas falta de acesso rede de alimentação do hardware utilizado em RSSF está submetido a severas restrições de energia e processamento. Logo, para possibilitar seu uso em aplicações complexas, os nós sensores de uma RSSF precisam colaborar (RUIZ, 2003).

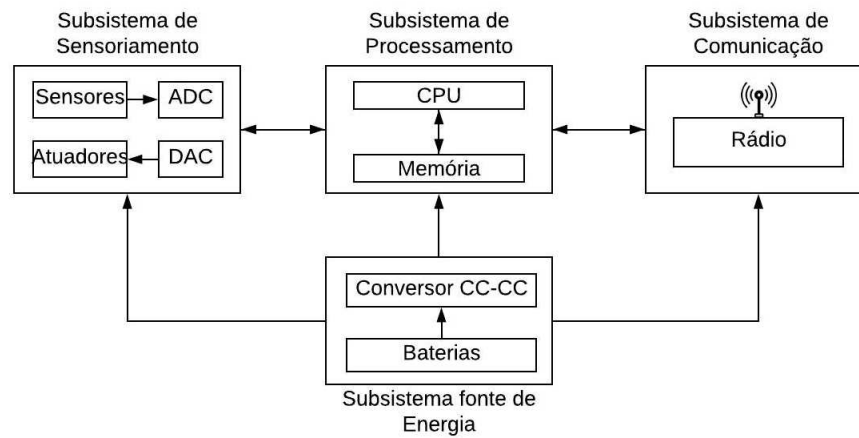
Apesar de suas limitações como quantidade de energia limitada e menor confiabilidade na comunicação, as redes de sensores sem fio apresentam diversas vantagens em relação às redes de sensores tradicionais, por não precisarem de cabos de comunicação que elevam os custos, geram mais problemas de manutenção e limitam a mobilidade dos sensores muitas vezes impedindo que os mesmos sejam colocados próximos ao fenômeno de interesse (KARL e WILLING, 2007).

### 2.2.1 SUBSISTEMAS DE UM NÓS SENSOR

Nó sensor é o nome dado aos dispositivos que compõe as redes de sensores. Uma RSSF é usualmente composta por uma grande quantidade de nós que devem coletar dados do meio onde estão localizados, processá-los e encaminha-los para um nó destino designado, via ondas de rádio (SOUSA, 2009).

Os nós sensores são formados por quatro subsistemas, sendo eles: um subsistema fonte de energia, um subsistema de sensoriamento e atuação, um subsistema computacional e um subsistema de comunicação (SAUSEN, 2008). Uma representação em diagrama de blocos destes subsistemas e suas correlações pode ser observada na Figura 3. Na literatura o subsistema de computação também pode ser dividido em dois subsistemas: controlador e memória (KARL e WILLING, 2007).

Figura 3: Representação dos subsistemas de um nó sensor.



Fonte: Adaptado de (SAUSEN, 2008).

- Subsistema fonte de energia:** Na maioria dos nós sensores este subsistema é formado por um conjunto de baterias (RUIZ, 2003). Como a quantidade de energia que pode ser armazenada em uma bateria é limitada, para que as redes de sensores sem fio possam funcionar durante um tempo prolongado é necessário que a energia seja utilizada de modo eficiente. Uma alternativa para prolongar o tempo de funcionamento dos nós sensores é a utilização de mecanismos de colheita de energia do ambiente (*Energy Harvesting*). A recuperação de energia consiste em aproveitar a energia do ambiente que pode ser encontrada em diversas formas. Uma das opções é o uso de células solares, cujo desempenho dependerá da localização dos sensores (ambientes internos ou externos), assim como do clima e dos horários do dia que os sensores deverão funcionar. Outras fontes de energia incluem gradientes de temperatura podem ser convertidos diretamente em energia elétrica devido ao efeito Seebeck, vibrações e variações de pressão que podem ser convertidas em energia utilizando o efeito piezoelétrico e o uso de fluxos de gases ou líquidos para movimentar pequenos conversores eletromecânicos similares a turbinas (KARL e WILLING, 2007).

- **Subsistema computacional:** é o núcleo de um nó sensor, sendo responsável por processar dados localmente e tomar decisões sobre para onde encaminhá-los e como fazê-lo. Nesse subsistema podem ser utilizados processadores de uso geral, DSP, FPGA e microcontroladores. No estado atual das RSSF, a flexibilidade e a simplicidade dos microcontroladores os tornam a solução preferencialmente utilizada. No caso de RSSF busca-se utilizar processadores que consumam pouca energia por ciclo de *clock* de modo a possibilitar um consumo energético reduzido. No que se refere ao armazenamento de informação, as memórias voláteis, também conhecidas como RAM (*Rapid Access Memory*), são utilizadas para armazenar leituras dos sensores, pacotes vindos de outros nós entre outros dados. Os códigos de programas podem ser armazenados em memórias não-voláteis ROM (*Read Only Memory*) (KARL e WILLING, 2007).
- **Subsistema de comunicação:** tem a função de converter uma sequência de dados, vinda de um microcontrolador, em ondas de rádio, que serão transmitidas para outro nó da rede, assim como realizar o processo contrário. Os dispositivos que são responsáveis por essa tarefa são chamados transceptores. Nas redes de sensores usualmente os transceptores são do tipo *half-duplex*, significando que eles são capazes de receber e transmitir informação, mas não simultaneamente. Além de transceptores de radiofrequência, também podem ser utilizados transceptores óticos, de infravermelho, de ultrassom e em alguns casos de indução magnética (KARL e WILLING, 2007).
- **Subsistema de sensoriamento e atuação:** pode ser formado por um único sensor ou um grupo de sensores. Os sensores baseiam-se em transdutores que produzem uma resposta elétrica a mudanças nas condições físicas de interesse. Exemplos de grandezas monitoradas por sensores são: pressão, luminosidade, umidade, aceleração, tensão mecânica, áudio, vídeo, temperatura, força, radiação ionizante, viscosidade, proximidade, altitude, pH, gases, químico, biológicos entre outros.

Em alguns casos os nós sensores podem estar equipados com atuadores que podem ativar alarmes ou realizar alguma ação de controle no meio físico (SOUSA, 2009).

Cada uma das unidades deve operar de modo equilibrado e consumindo o mínimo de energia necessário para a realização de suas tarefas. Por exemplo, as unidades de comunicação e de computação devem estar desligadas a maior parte do tempo de modo a economizar energia. Para ativar essas unidades pode-se, por exemplo, utilizar um *timer* programado para reativá-las periodicamente, intercalando períodos de atividade com períodos inativos e assim obtendo grande economia de energia. Outra maneira possível seria utilizar sensores para ativar interrupções caso a unidade de sensoriamento detecte uma variação na grandeza de interesse acima de um limiar ou caso a unidade de comunicação detecte a chegada de alguma transmissão (KARL e WILLING, 2007).

Em algumas aplicações pode ser necessário lançar os nós sensores em áreas remotas, portanto eles devem ser capazes de se auto organizar para coletar os dados do fenômeno de interesse sem a necessidade de intervenção humana direta (RUIZ, 2003).

### 2.2.2 ARQUITETURA DE UMA RSSF

Em RSSF definem-se os conceitos de fonte (*source*) e sorvedouro (*sink*). Uma fonte é qualquer entidade da rede que gere informações. Pode ser um nó sensor tradicional ou algum atuador que retorne informações sobre seu funcionamento.

O sorvedouro é o lugar que reúne a informação adquirida pela rede. Pode ser simplesmente um nó sensor da rede, um dispositivo dedicado, como um notebook, ou um gateway que encaminhe os dados a outra rede maior, como a Internet (KARL e WILLING, 2007).

A informação pode ir da fonte para o sorvedouro de diversas maneiras. A máxima distância entre transmissor e receptor em uma transmissão de rádio é limitada fisicamente, portanto, a comunicação direta entre fonte e sorvedouro não é sempre

possível em aplicações que devem cobrir grandes áreas (por exemplo a agricultura). Para superar esta limitação são utilizados esquemas de comunicação nos quais os nós sensores da rede atuam como roteadores, permitindo uma comunicação por múltiplos saltos (*multi-hop*), de modo que as informações dos nós sensores mais distantes possam chegar ao sorvedouro. Na figura 4 pode-se observar a visão geral de uma rede de sensores na qual se utiliza o mecanismo de múltiplos saltos.

Figura 4: Visão geral da organização de uma RSSF.



Fonte: (SOARES, 2012).

### 2.2.3 PILHA DE PROTOCOLOS PARA RSSF

Pode-se definir protocolo como um conjunto de regras que viabilizam a comunicação entre sistemas computacionais. O conjunto de todos os protocolos utilizados em um sistema de comunicação pode ser representado como uma pilha, dentro da qual cada camada tem por função prover serviços específicos. A pilha de protocolos utilizada em redes de sensores sem fio a pilha de protocolos é formada pelas camadas de aplicação, transporte, rede, enlace e física. Cada uma das camadas da pilha de protocolos é descrita resumidamente a seguir:

- **Camada de Aplicação:** É a camada de mais alto nível de abstração dentro da pilha de protocolos. Nesta camada são implementadas as aplicações para as quais



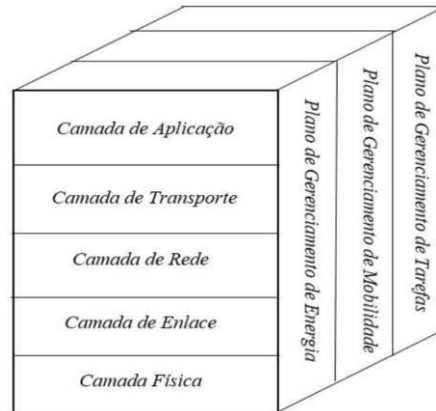
as redes de sensores forem projetadas. Diversas aplicações podem ser construídas a depender do sensoriamento desejado.

- **Camada de Transporte:** Nesta camada são utilizadas rotinas computacionais que ajudam a regular o fluxo de dados caso seja necessário para a rede. A necessidade de uma camada de transporte é apontada em referências bibliográficas (AKYILDIZ, 2002; RABAEY e ET AL, 2000; POTTIE e KAISER, 2000). As funções desempenhadas pela camada de transporte são especialmente importantes quando a RSSF é projetada para se comunicar com a internet ou outras redes externas.
- **Camada de Rede:** A camada de rede se encarrega de criar rotas para os dados recebidos das camadas superiores. Os nós sensores podem ser espalhados em um campo ou próximos a um fenômeno de modo que a comunicação direta entre cada nó sensor e o sorvedouro nem sempre é possível. Nestes casos, protocolos de múltiplos saltos são muitas vezes necessários para levar a informação da fonte ao sorvedouro.
- **Camada de Enlace:** A camada de enlace contém os mecanismos necessários à comunicação ponto a ponto. Nesta camada estão os protocolos de acesso ao meio (*Medium Acces control*, MAC) e de correção de erros. O mecanismo de acesso ao meio previne que informação seja perdida com colisões, que ocorrem caso mais de um dispositivo realize transmissões em um mesmo meio sem fio simultaneamente.
- **Camada Física:** É a camada de mais baixo nível de abstração dentro desta pilha de protocolos. A camada física tem a tarefa de implementar esquemas de modulação simples e robustos, permitindo transmissão e recepção de dados.

As camadas são perpassadas pelos planos de gerenciamento de tarefas, mobilidade e energia. Isso significa que as medidas referentes a mobilidade, tarefas e energia devem

ser levadas em consideração na elaboração dos protocolos de todas as camadas. Uma ilustração do modelo da pilha de protocolos utilizados em RSSF perpassada pelos planos de gerenciamento de tarefas pode ser observada na figura 5.

Figura 5: Modelo genérico da pilha de protocolos para RSSF.



Fonte: (AKYILDIZ, 2002).

As funções de cada um dos planos de gerenciamento de tarefas são descritas resumidamente a seguir:

- **Plano de Gerenciamento de Energia:** Gerencia o uso de sua energia pelo nó sensor. Um exemplo disso poderia ser a utilização de algoritmos que permitam desligar o receptor durante intervalos de tempo nos quais o mesmo não deve ser utilizado.
- **Plano de Gerenciamento de Mobilidade:** Pode ser necessário quando as aplicações preveem mobilidade de membros da rede. Este plano de gerenciamento tem função de detectar e registrar o movimento dos nós sensores para que sempre seja possível traçar rotas para que a informação chegue a seu destino.

- **Plano de Gerenciamento de Tarefas:** Gerencia o sensoriamento em uma região. Nem todos os nós sensores precisam realizar medidas ao mesmo tempo. Sensores em uma mesma região podem ser utilizados de modo alternado, uniformizando e economizando a energia da rede como um todo.

#### 2.2.4 FATORES QUE INFLUENCIAM O PROJETO DE UMA RSSF

As redes de sensores sem fio possuem diversas diferenças em relação às redes de computadores tradicionais devido ao fato de suas características variarem bastante dependendo da aplicação para a qual são projetadas. Portanto não há um conjunto de características que pode ser utilizado para classificar o desempenho de todas as RSSF. Também não há uma solução técnica única que cubra todas as possibilidades de projeto (KARL e WILLING, 2007). Todavia existem vários fatores que podem influenciar no projeto de redes de sensores. A importância de cada um desses fatores dependerá da aplicação específica para a qual a RSSF é projetada. Esses fatores são importantes por que servem para orientar o esboço de protocolos e algoritmos para redes de sensores (AKYILDIZ, 2002). A importância de cada um desses fatores dependerá da aplicação específica para a qual a RSSF é projetada.

##### 2.2.4.1 QUALIDADE DO SERVIÇO

As redes de sensores sem fio oferecem serviços diferentes dos que são oferecidos pelas redes convencionais. Seu propósito não é o simples transporte de dados de um ponto a outro. O propósito da RSSF varia de acordo com aplicação para a qual a mesma for projetada. As RSSF podem ser utilizadas para detectar eventos, rastrear objetos, monitorar ambientes e muitas outras possíveis aplicações (KARL e WILLING, 2007). Algumas maneiras de avaliar a qualidade do serviço das RSSF são:

- **Probabilidade de detecção/notificação de evento:** A probabilidade de uma RSSF detectar um evento corretamente e notificar o sorvedouro.

- Probabilidade de erro de classificação de evento: Quando há necessidade de classificação de eventos. A probabilidade de erro de classificação deve ser pequena.
- Atraso em detecção de evento: Se refere intervalo de tempo entre a detecção do evento e a notificação do sorvedouro de interesse.
- Notificações perdidas: Se uma rede tem a função de mandar mensagens periódicas ao sorvedouro, a quantidade de mensagens perdidas deve ser pequena.
- Acurácia da aproximação: Se refere ao erro em aplicações relativas a aproximações de funções, como por exemplo a temperatura em uma área.
- Acurácia do rastreamento: A precisão com que a rede pode identificar a posição do objeto de interesse.

#### 2.2.4.2 TOLERÂNCIA A FALHAS

Tolerância a falhas, confiabilidade ou robustez são conceitos que se relacionam com a habilidade de manter o funcionamento da rede de sensores sem interrupções devido a falhas em sensores. As redes de sensores devem ser projetadas para atuar mesmo em situações adversas nas quais alguns sensores podem ficar sem energia, ser danificados ou sofrer interferência do ambiente (AKYILDIZ, 2002). Falhas em alguns nós sensores não devem afetar o funcionamento da rede como um todo. Para tanto os protocolos de RSSF devem, a depender da aplicação, possuir técnicas de reconfiguração que permitam a rede encontrar outros caminhos para a passagem dos dados (KARL e WILLING, 2007).

#### 2.2.4.3 TEMPO DE VIDA

Energia é um recurso escasso em RSSF. Essa restrição atinge vários parâmetros de qualidade de serviço. Dentro da área de eficiência energética podem ser avaliados diversos parâmetros, como: energia por bit corretamente recebido, energia por evento

notificado, relações entre atraso e energia e tempo de vida da rede. Existem diferentes definições para o tempo de vida da rede a depender da aplicação (KARL e WILLING, 2007). Algumas delas são:

- Tempo para a morte do primeiro sensor.
- Meia vida da rede (tempo no qual apenas a metade da rede está operacional).  
Tempo para partição (tempo no qual a rede se divide em duas redes que não se comunicam).
- Tempo para perder cobertura.
- Tempo para falhar na primeira notificação de evento.

#### 2.2.4.4 ESCALABILIDADE

Escalabilidade é um parâmetro que mede quão bem um protocolo se adapta a uma grande quantidade de sensores (NETO, 2010). Redes de sensores podem chegar a possuir milhares de nós sensores, logo os protocolos das RSSF devem funcionar para redes de grande escala. Os principais problemas com escalabilidade surgem quando há necessidade de consistência entre todos os membros da rede. Por exemplo, caso todos os membros da rede devam receber um endereço único, torna-se difícil garantir que não haverá endereços duplicados a medida que o tamanho da rede cresce (KARL e WILLING, 2007).

#### 2.2.4.5 CUSTO DOS NÓS SENSORES

Devido grande quantidade de nós sensores que compõe uma RSSF, o custo do sensor tem impacto direto no custo total da rede. Se o custo da RSSF exceder o custo de uma rede convencional, a rede de sensores não se justifica. Logo, o custo do sensor deve ser mantido baixo. Na literatura, assume-se que para que as RSSF sejam economicamente viáveis, o custo do nó sensor deve estar abaixo de um dólar americano (AKYILDIZ, 2002; SOUSA, 2009).

#### 2.2.4.6 AMBIENTE

O ambiente ao qual o nó sensor estará submetido é diretamente relacionado sua aplicação. Os nós sensores podem ter de trabalhar em ambientes adversos. Alguns exemplos são (AKYILDIZ, 2002): dentro de uma máquina, no fundo do oceano, dentro de um tornado, em uma área quimicamente ou biologicamente contaminada, em um campo de batalha em território inimigo, em residências e prédios, presos a animais e em veículos se movendo rapidamente.

### 2.3 PADRÃO IEEE 802.15.4

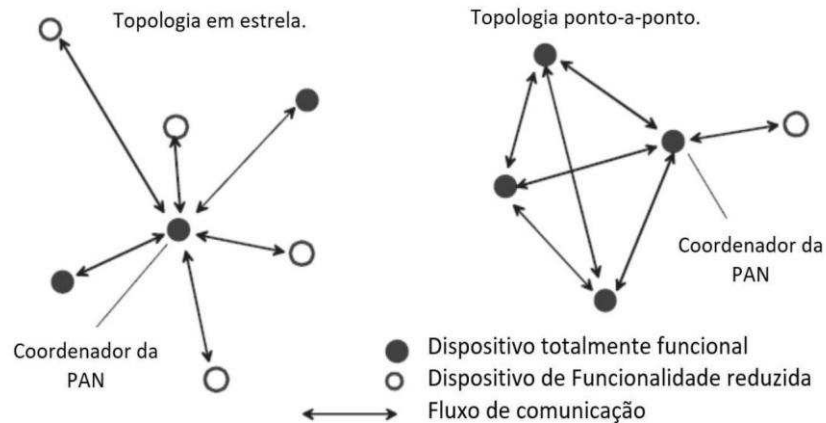
IEEE 802.15.4 é o nome de um padrão que define os protocolos das camadas física e de enlace para redes de sensores sem fio de baixo custo, baixa taxa de transmissão e baixo consumo energético (VALLE, 2012). Este padrão foi criado pelo IEEE para ser aplicado em redes de área pessoal (PAN - *Personal Area Networks*). As redes PAN são controladas por um nó coordenador, que tem autoridade para decidir quais nós sensores devem transmitir com prioridade.

Os dispositivos do padrão IEEE 802.15.4 operam nas frequências de ISM (*Industrial, Scientific and Medical*) que no Brasil corresponde a 2,4 GHz. As taxas de transmissão variam de em função da frequência. Para 2,4 GHz há um total de 16 canais disponíveis com uma taxa máxima de transmissão de 250 kbps. As técnicas de modulação variam em função da faixa de frequência em uso. *Direct sequence spread spectrum* (DSSS) é usada em todos os casos. Para a faixa de 2,4 GHz O-QPSK (*offset quadratura fase shift keying*) é utilizada.

O padrão 802.15.4 permite a utilização das topologias ponto-a-ponto e estrela. Na topologia ponto a ponto os nós sensores podem ser ao mesmo tempo fonte e sorvedouro, trocando informações diretamente. Já na topologia estrela um nó central é responsável por receber pacotes de todos os outros nós e encaminhá-los a seus destinos finais (IEEE

802 WORKING GROUP, 2011). Na figura 6 estão ilustradas as topologias estrela e ponto a ponto.

Figura 6: Topologias em estrela e ponto a ponto.



Fonte: (IEEE 802 WORKING GROUP, 2011).

No que se refere camada de enlace os mecanismos de controle de acesso ao meio (*Medium Access Control, MAC*) é baseado em CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*), método no qual os membros da rede avisam aos seus pares antes de transmitir pacotes de informação, de modo a evitar colisões e perda de dados. O padrão prevê para correção de erros esquemas de retransmissão opcionais.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo tem como propósito apresentar os principais trabalhos de pesquisa relacionados ao projeto proposto. São abordados os trabalhos que tratam de uso de redes de sensores sem fio no monitoramento de parâmetros de ambientais utilizando diversas abordagens.

#### 3.1 MONITORAMENTO AMBIENTAL

O uso de redes de sensores sem fio para monitorar parâmetros do solo tem sido explorado majoritariamente como uma das ferramentas empregadas para viabilizar a Agricultura de Precisão (AP), que compreende um conjunto de técnicas e metodologias que visam otimizar o manejo de cultivos e a utilização dos insumos agrícolas, proporcionando máxima eficiência econômica (MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, 2009).

Sistemas de irrigação baseados em redes de sensores para medir umidade do solo são estudados em diversos trabalhos (KIM, EVANS e IVERSEN, 2008; BOGENA, 2007; NAVARRO-HELLÍN, 2015). Em Navarro-Hellín (2015) os nós sensores operam a base de energia solar. Em Brito (2003) é proposto um sistema de baseado em redes de sensores para múltiplos parâmetros capaz de produzir informações sobre o comportamento dinâmico do solo, fornecendo previsões de riscos de deslizamentos de encostas antes de sua ocorrência.

Há também diversas aplicações voltadas a monitorar emissões de gases poluentes. Em Somov (2011) é proposta uma rede de sensores sem fio para monitorar vazamentos de gases combustíveis utilizando o padrão *ZigBee* para comunicação. Mitra (2012) utiliza simulações para testar um modelo de rede de sensores sem fio capaz de localizar fontes de emissão de gases perigosos em aterros sanitários. Collins



(2013) desenvolveu uma rede de sensores sem fio para monitoramento de aterros sanitários utilizando tecnologia GSM para comunicação entre os nós. Em Lobo ( 2016) é proposto um protótipo de baixo custo para automatização dos ensaios de monitoramento da geração de biogás em uma célula de aterro sanitário.

Este capítulo apresentou um resumo das principais pesquisas relacionadas ao uso de redes de sensores sem fio para o monitoramento de solos assim como as principais aplicações de redes de sensores sem fio para monitoramento ambiental. O próximo capítulo será dedicado à descrição dos materiais utilizados e métodos aplicados no desenvolvimento desse trabalho.

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

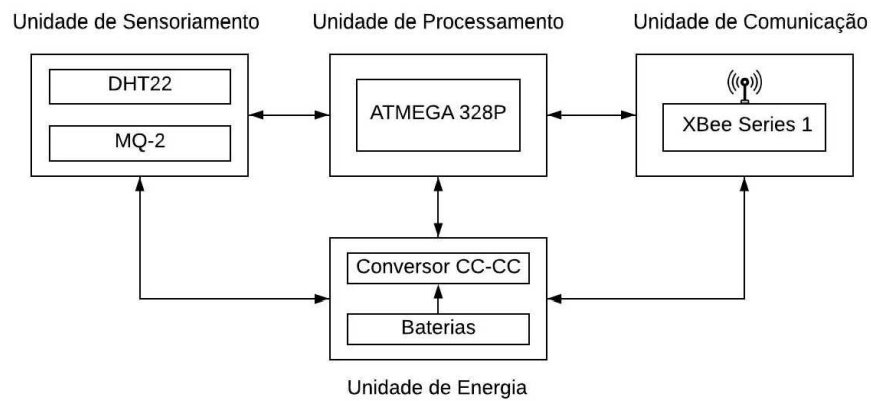
O propósito deste capítulo é apresentar o material e os métodos utilizados no desenvolvimento dos nós sensores e na validação da arquitetura de rede de sensores aqui proposta. Primeiramente serão descritas as partes constituintes de um protótipo de nó sensor desenvolvido e os algoritmos desenvolvidos para possibilitar seu funcionamento. Em seguida, são descritas as partes que compõe o nó coordenador da rede e o seu funcionamento.

No âmbito dos protocolos de RSSF, este trabalho atua na camada de aplicação, propondo algoritmos, *hardware* e topologia específicos para o monitoramento desejado.

### 4.1 NÓ SENSOR

Os nós sensores são compostos de quatro unidades: unidade sensoriamento (US), unidade de processamento (UP), unidade de comunicação (UC) e unidade de energia (UE). De modo integrado, estas unidades são capazes de medir, processar e transmitir dados relativos a valores de temperatura e concentração de metano por meio de ondas de radiofrequência para um nó coordenador. Na figura 7 está ilustrada a organização das unidades que constituem o nó sensor desenvolvido.

Figura 7: Diagrama das unidades que constituem o nó sensor desenvolvido.



Fonte: autoria própria.

#### 4.1.1 UNIDADE DE SENSORIAMENTO (US)

Com o objetivo de monitorar as emissões carbono em aterros sanitários, a unidade de sensoriamento foi pensada para ser capaz de obter valores de temperatura, umidade relativa do ar e concentração de carbono.

##### 4.1.1.1 SENSOR DE GÁS MQ-4

O sensor semicondutor MQ-4 para gases combustíveis pode ser utilizado para medir concentrações de metano. Este sensor apresenta duas saídas, sendo uma analógica e outra digital. Neste trabalho, optou-se por utilizar a saída analógica que é conectada a uma entrada analógica do microcontrolador ATMEGA328p, que internamente é conectada à entrada de um conversor analógico-digital (ADC).

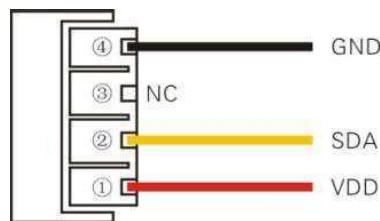
O sensor é capaz de detectar concentrações de combustíveis entre 200 e 10.000 ppm (algumas versões do datasheet citam 300 ppm como mínimo). A tensão de operação desse sensor é de 5 V e sua sensibilidade pode ser ajustada via potenciômetro. A corrente consumida por este sensor tem o valor de 150 mA (SPARKFUN).

#### 4.1.1.2 SENSOR DE UMIDADE RELATIVA DO AR E TEMPERATURA AM2302

O sensor AM2302 é um sensor digital de temperatura e umidade relativa do ar. A faixa de operação do sensor vai de 0 a 99,9 % de umidade relativa e vai de -40 a 80 °C. A precisão do sensor é de  $\pm 2$  a  $\pm 5$  % em umidade relativa e  $\pm 0,5$  ° C em temperatura. A umidade relativa é obtida por meio de um sensor capacitivo e a temperatura por meio de um termistor.

O sensor conta com quatro pinos. O pino SDA é utilizado para o envio serial de dados para a unidade de processamento. O AM2302 tem consumo médio de corrente de 300  $\mu$ A. A alimentação é realizada por meio dos pinos VDD e GND. O dispositivo funciona com tensão de alimentação entre 3,3 V e 5,5 V. A disposição dos pinos pode ser observada na Figura 8 e sua descrição é resumida na Tabela 1 (AOSONG).

Figura 8: Disposição dos pinos do sensor AM2302.



Fonte: (AOSONG)

Tabela 1: Descrição dos pinos do sensor AM2302

<b>Pino</b>	<b>Nome</b>	<b>Descrição</b>
①	VDD	3,3 V - 5,5 V
②	SDA	Porta Serial
③	NC	-
④	GND	0 V

#### 4.1.2 UNIDADE DE PROCESSAMENTO (UP)

A UP é composta essencialmente por um microcontrolador. O microcontrolador é responsável por receber a informação fornecida pela US, processá-la e encaminhá-la para a UC. Para tanto esses dispositivos contam com conversores analógico-digitais (ADC), os quais se conectam sensores analógicos, e pinos de comunicação serial pelos quais se conectam a sensores digitais e ao transceptor.

##### 4.1.2.1 ATMEGA328P

O microcontrolador ATMEGA328P conta com 32 pinos. Há quatro entradas analógicas, internamente conectadas a um ADC. O microcontrolador conta ainda com 8 pinos digitais, sendo dois deles reservados para recepção e transmissão de dados via protocolo UART. Além disso possui baixo custo de aquisição, grande disponibilidade no mercado, memória de programação de 32 KB, interrupções e *timers*.

Sua tensão de alimentação pode variar entre 1,8 V e 5,5 V. Possui baixo consumo de energia, podendo ainda ser reduzido a depender do modo de operação:

- Ativo: 0,3 mA.
- *Power-down*: 0,1  $\mu$ A.
- *Power-save*: 0,8  $\mu$ A.

Diante estas características, considera-se ATMEGA328P uma escolha viável para o projeto, visto supre as necessidades de comunicação UART, para estabelecer comunicação com o módulo XBee Series 1, e é capaz de receber as informações tanto de sensores analógicos quanto de sensores digitais por meio de seu conversor analógico-digital e suas portas digitais, respectivamente.

#### 4.1.3 UNIDADE DE COMUNICAÇÃO (UC)

A unidade de comunicação tem o propósito de receber os dados encaminhados pela unidade de processamento e transmiti-los via rede sem fio para um nó

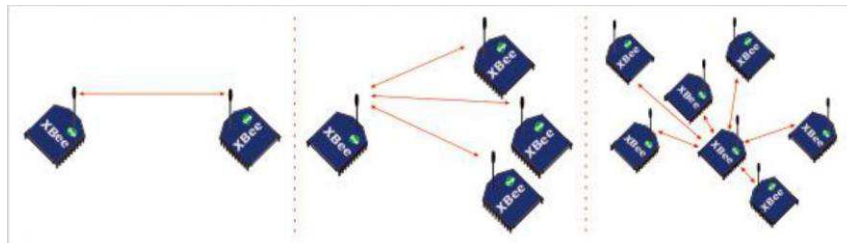
coordenador. Para tanto, deve ser composta por dispositivos capazes de comunicação de baixo consumo.

#### 4.1.3.1 MÓDULOS XBEE-PRO 802.15.4

Módulos XBee são constituídos de um microcontrolador e um transceptor utilizado para comunicação remota entre nós sensores de redes de sensores sem fio. Os módulos XBee, que anteriormente eram produzidos pela *MaxStream*, são atualmente fabricados pela *Digi International*.

Dispositivos XBee são comercializados nas seguintes versões *XBee Series 802.15.4* (ou *Series 1*), *XBee ZigBee* (ou *Series 2*), *XBee DigiMesh* e *XBee WiFi*. Neste trabalho optou-se por utilizar os módulos na versão *XBee Series 1*. Este modelo permite a construção de redes ponto-a-ponto e ponto-multiponto (estrela), não possuindo funções de roteamento. Qualquer nó da rede pode operar em modo de baixo consumo (*sleep mode*). Na figura 9 são ilustradas as topologias podem ser formadas com os módulos XBee 802.15.4.

Figura 9: Topologias possíveis com dispositivos XBee 802.15.4.



Fonte: (VIKA CONTROLS, 2019)

Os módulos XBee 802.15.4 têm potência de transmissão de 1 mW (0 dBm), alcance de até 30 m em ambiente fechado e de até 100 m em ambientes abertos com visada direta. O XBee-PRO tem potência de transmissão de 60 mW (18 dBm), com alcance de até 100 m em ambientes fechados e 1,5 km em ambientes abertos com

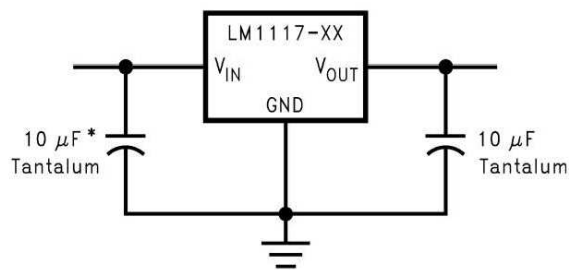
visada direta. O receptor do módulo XBee tem -92 dBm de sensibilidade. Na versão XBee-PRO a sensibilidade do receptor chega a -100 dBm. Optou-se por utilizar módulos do tipo XBee-PRO devido a suas características superiores de desempenho.

Há dois tipos de endereçamento possíveis para estes dispositivos. Um com tamanho de 16 bits e outro de 64 bits. O endereço de 64 bits é o número de série do módulo e não pode ser alterado. O outro endereço de 16 bits é definido através da alteração do parâmetro MY. Neste trabalho o endereçamento utilizado é o de 16 bits, devido a possibilidade de edição do parâmetro.

#### 4.1.4 UNIDADE DE ENERGIA (UE)

O protótipo de nó sensor é alimentado por quatro pilhas AA (1,5 V), conectadas em série. O projeto do nó sensor é composto de componentes com diversos valores nominais de tensão de alimentação. Para resolver este problema, foi introduzido um circuito regulador de tensão LM1117T. A montagem conta com dois capacitores de 10  $\mu$ F, sendo um conectado à entrada e o outro à saída do circuito. O esquemático do regulador de tensão é detalhado na figura 10.

Figura 10: Esquemático do circuito regulador de tensão para 3.3 V.



Fonte: (TEXAS INSTRUMENTS).

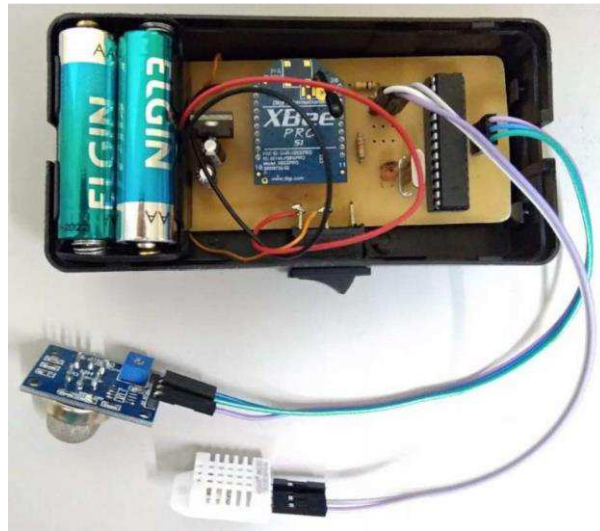
A tensão na saída do regulador é de 3,3 V e é utilizada para alimentar o módulo XBee. Os sensores DHT22 e MQ4 e o microcontrolador ATMEGA328P são alimentados diretamente com a tensão fornecida das baterias. Para evitar que tensões





ambiente. Além disso foi conectado um interruptor para que o nó sensor possa ser ligado e desligado manualmente. Uma fotografia do nó sensor aberto pode ser observada na figura 12.

*Figura 12: Protótipo de nó sensor.*



Fonte: autoria própria.

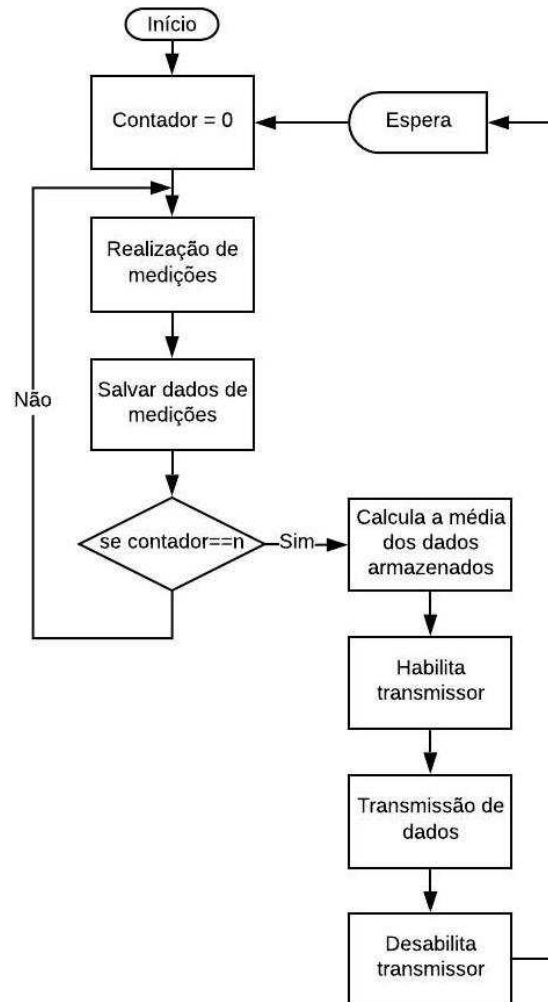
#### 4.1.5 DESCRIÇÃO DO ALGORITMO UTILIZADO NO NÓ SENSOR

Foi desenvolvido um código na linguagem C para programação do nó sensor. O algoritmo implementado pelo código tem função de coordenar a realização das leituras dos sensores, armazenar as informações obtidas e comunicar-se com o módulo XBee-Pro.

O algoritmo implementado no nó sensor está representado na forma de fluxograma na figura 13. O algoritmo foi elaborado para que o nó sensor realize uma quantidade de medições definida por uma variável  $n$ , para que em seguida calcule a média dos valores obtidos nas medições realizadas. Para reduzir o consumo energético do nó sensor, a UC permanece desabilitada a maior parte do tempo, sendo habilitada somente por tempo suficiente para que a transmissão seja realizada. Após o fim da transmissão

o nó sensor permanece ocioso por um intervalo de tempo definido para em seguida reiniciar as medições. O propósito deste tempo de espera é economizar energia, e o intervalo de tempo durante o qual o nó sensor pode permanecer ocioso depende da velocidade na qual varia a grandeza que se deseja monitorar.

Figura 13: Diagrama de blocos do algoritmo implementado pelo nó sensor.



Fonte: autoria própria.

As informações de umidade e temperatura são armazenadas em variáveis do tipo *float*, para possibilitar a representação de números não inteiros. Para enviar cada uma destas medições são utilizados então dois bytes, sendo um deles utilizado para a parte inteira e o outro para a parte decimal. Para as leituras de concentração de metano são necessários dois bytes para transmitir a parte inteira da informação, visto que o sensor pode aferir concentrações que vão até 10.000 ppm.

Uma configuração alternativa para o sistema é o modo de detecção de eventos. Neste modo de operação, os nós sensores permanecem realizando medições durante todo o tempo no qual estão ativados, porém só são enviadas mensagens em caso de detecção de evento. O modo de operação orientado a eventos permite que os nós sensores maior um tempo de funcionamento utilizando o mesmo tipo de fonte de energia, visto que é durante as transmissões que ocorre o maior consumo energético.

## 4.2 COORDENADOR DA REDE

O coordenador da rede tem a função de centralizar as informações transmitidas pelo nó sensor e disponibilizá-las para que o usuário possa ter acesso às informações obtidas pela rede. Dessa forma, o coordenador funciona como um intermediário entre a unidade de medição e o usuário.

### 4.2.1 HARDWARE

Para implementar o coordenador da rede foi utilizado um módulo XBee-Pro conectado a uma placa de desenvolvimento Arduino Uno e a um computador no qual as informações são exibidas. Uma imagem do nó coordenador pode ser observada na figura 14.

Figura 14: Nó coordenador da rede.

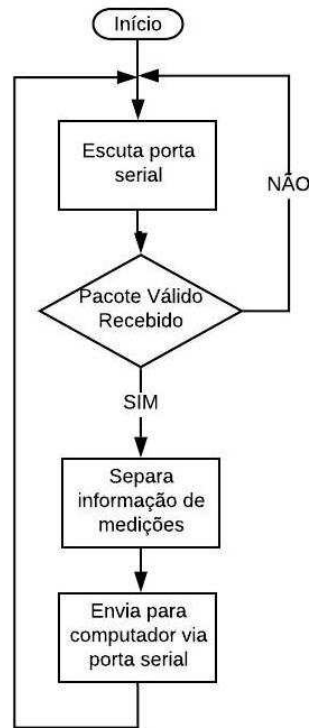


Fonte: autoria própria

#### 4.2.2 DESCRIÇÃO DO ALGORITMO UTILIZADO NÓ COORDENADOR

O microcontrolador da placa de desenvolvimento foi programado para interpretar os pacotes recebidos do módulo XBee-Pro, separando as informações relativas às medições e enviando-as via porta serial para o computador no qual as mesmas podem ser plotadas diretamente. No fluxograma presente na figura 15 é possível observar as operações realizadas pelo nó coordenador assim como a sequência na estas são executadas.

Figura 15: Diagrama de blocos do algoritmo implementado pelo coordenador.



Fonte: autoria própria.

Os resultados das medições que são recebidas pelo nó coordenador são enviadas para o computador via porta serial, onde podem ser armazenadas em um arquivo de texto ou acompanhadas em tempo real por meio da função serial plotter disponível na IDE da placa de desenvolvimento Arduino.

## 5 RESULTADOS

Este capítulo é dedicado a mostrar os resultados obtidos neste trabalho de dissertação. São abordados os resultados relativos desempenho da rede de sensores quando submetida a um teste de validação no qual foram monitoradas variáveis ambientais.

### 5.1 NÓ SENSOR

O protótipo de nó sensor desenvolvido neste trabalho tem por objetivo realizar medições automatizadas, processa-las localmente e transmiti-las para um nó coordenador que está conectado a uma infraestrutura capaz de disponibilizar os dados recebidos para o usuário.

Devido a problemas de logísticos, o protótipo não pode ser testado no aterro sanitário. Para validar o funcionamento do nó sensor desenvolvido, foram realizados testes de campo durante os quais o nó sensor foi instalado em um terreno localizado no Campus do Vale da UFRGS. Uma fotografia do nó sensor pode ser observada na figura 16

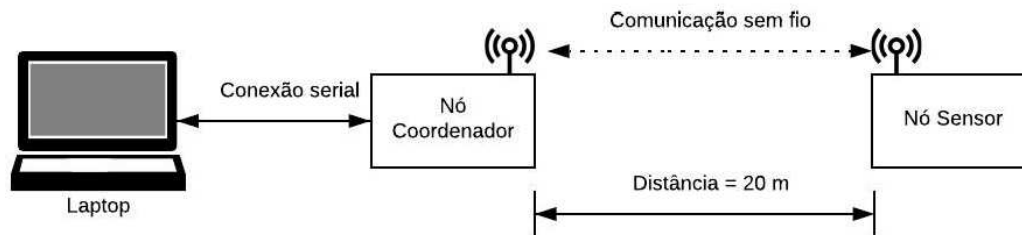
*Figura 16: Nó sensor utilizado em teste.*



Fonte: autoria própria

O protótipo de nó sensor foi instalado junto ao solo, ao ar livre a uma distância de 20 metros em relação ao nó coordenador, que foi posicionado de modo que houvesse visada direta entre os dispositivos. O nó coordenador estava conectado a um *laptop* no qual a informação recebida foi armazenada. Na figura 17 pode-se observar um diagrama que ilustra o arranjo utilizado.

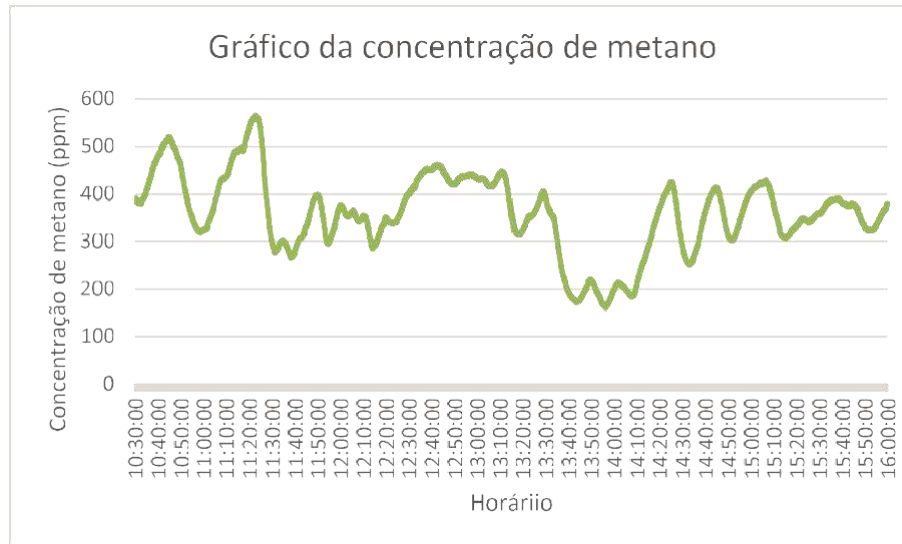
Figura 17: Diagrama de ilustração do arranjo experimental.



Fonte: autoria própria.

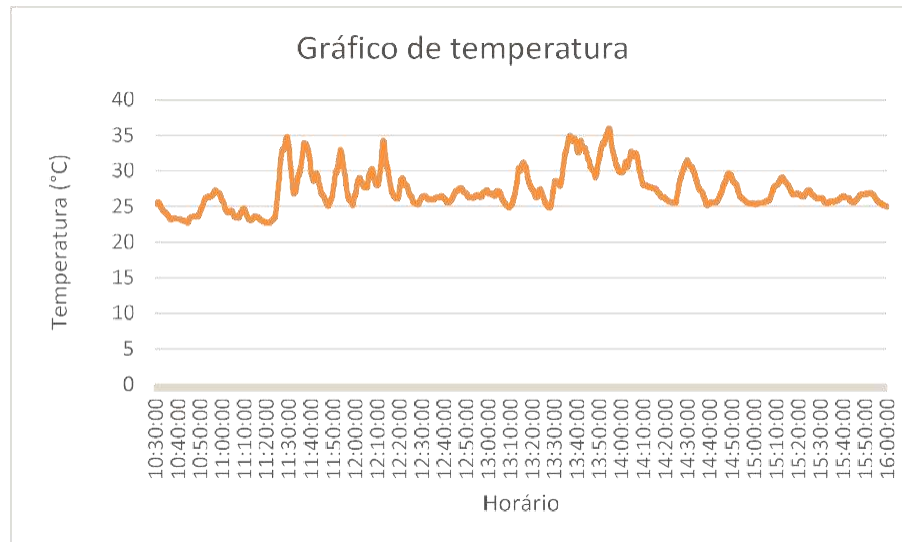
O período de monitoramento teve duração de 5 horas e 30 minutos. O nó sensor foi configurado para enviar informações periodicamente a cada 5 segundos. Três variáveis foram monitoradas, sendo elas temperatura, umidade relativa do ar e concentração de metano. As figuras de 17 a 19 contém o resultado das medições realizadas pelos nós sensores.

Figura 18: Gráfico representando concentração de metano.



Fonte: autoria própria.

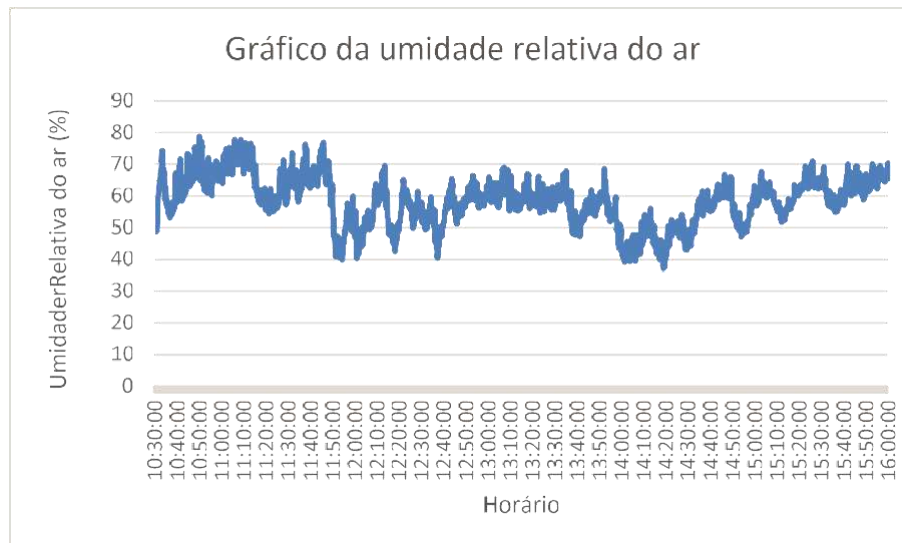
Figura 19: Gráfico representando as leituras de temperatura.



Fonte: autoria própria.



Figura 20: Gráfico representando as leituras de umidade relativa do ar.

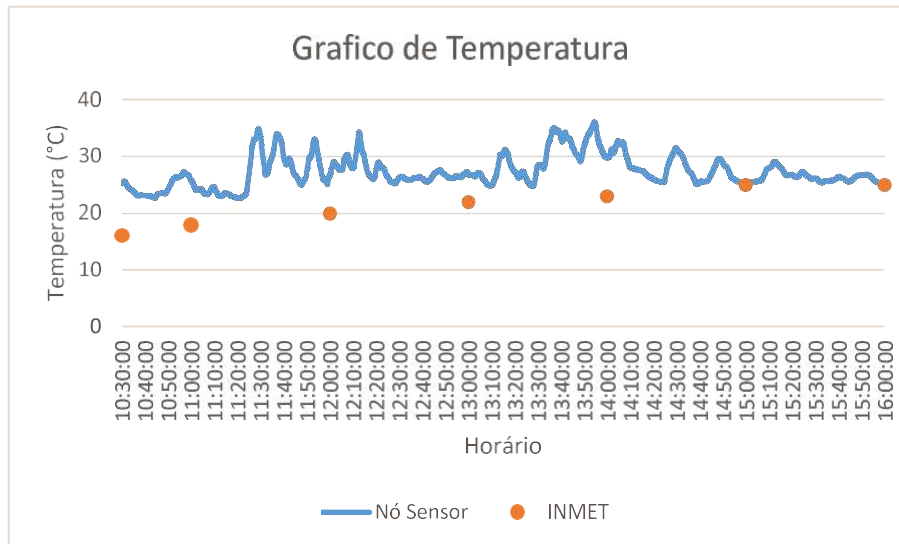


Fonte: autoria própria.

Devido à indisponibilidade um analisador de gases não foi possível avaliar a qualidade das medições de concentração de metano obtidas. Observando a curva de concentrações de metano, nota-se que há valores próximos à sensibilidade mínima do sensor. Nesse caso a confiabilidade nas medições é bastante reduzida, de modo que a presença de outros gases pode alterar os resultados das leituras.

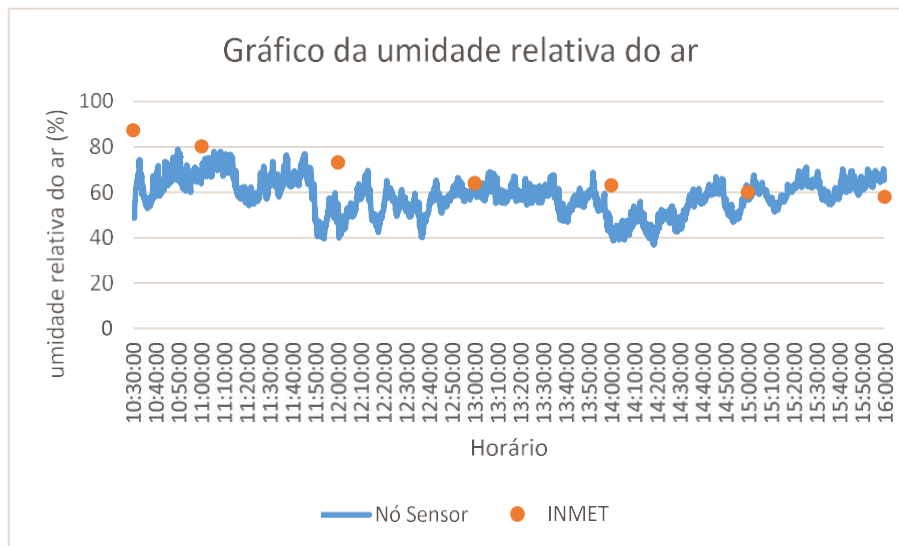
Como forma de avaliar a qualidade dos dados de temperatura e umidade relativa do ar obtidos por meio do sistema desenvolvido foram comparados com os dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) para a cidade de Porto Alegre para a mesma data na qual foram realizadas as medições. Os gráficos comparando as informações obtidas podem ser observados nas figuras 21 e 22. É importante ressaltar que os dados meteorológicos utilizados para a comparação não são específicos do local no qual a medição foi realizada, de modo seu uso neste são de caráter qualitativo.

Figura 21: Gráfico de comparação dos valores das leituras de tempera com os dados do INMET.



Fonte: autoria própria.

Figura 22: Gráfico de comparação dos valores das leituras de umidade com os dados do INMET



Fonte: autoria própria.

Pode-se observar que há consideráveis diferenças entre os resultados de obtidos e os dados registrados pelos INMET. Um dos fatores que podem causar essa discrepância é a diferença das condições nas quais as medições são realizadas. O padrão de medições meteorológicas prevê que os instrumentos utilizados estejam abrigados da radiação solar, ao contrário do que foi implementado nos testes de validação deste trabalho.

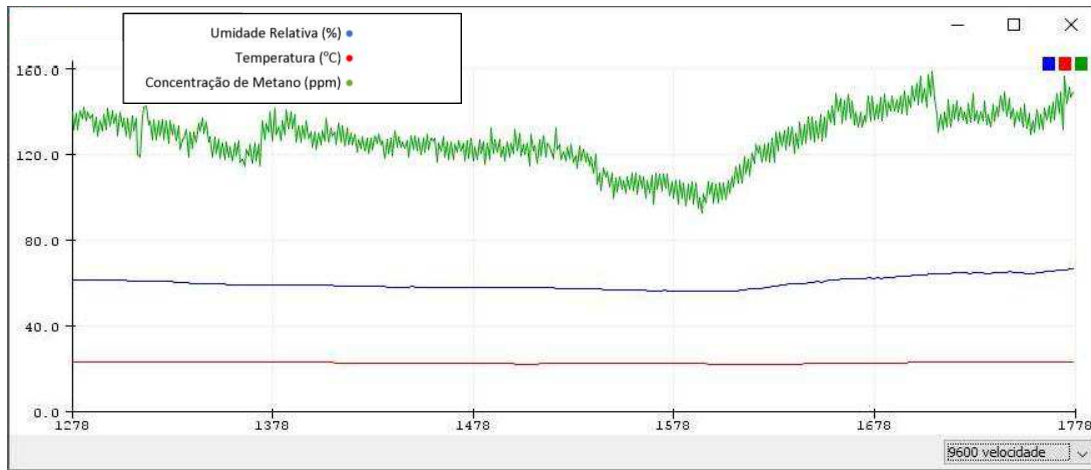
Embora haja diferenças entre os dados do INMET e os valores obtidos pelo nó sensor, é possível verificar que os dados obtidos pelo nó sensor seguem a mesma tendência dos dados meteorológicos.

O sistema desenvolvido foi capaz de monitorar as variáveis de interesse por um longo período de tempo, permitindo um monitoramento mais detalhado em comparação com o método de medição manual com o analisador de gases.

O mesmo sistema pode ser adaptado para realizar operar monitorando outras variáveis ambientais por meio de adição ou substituição dos sensores que compõe a unidade de sensoriamento.

Além de registrar os valores de temperatura para posterior análise, também é possível observá-los em tempo real utilizando a ferramenta *serial plotter* no computador conectado ao nó coordenador como pode ser visto na figura 20.

Figura 23: Visualização de em tempo real pela ferramenta serial plotter.



Fonte: autoria própria.

## 6 CONCLUSÕES

Nesta dissertação tratou-se do desenvolvimento de um sistema de monitoramento de parâmetros de solos baseado em redes de sensores sem fio. De modo mais específico, o sistema foi desenvolvido com o objetivo de medir temperatura, umidade relativa do ar e a concentração de metano junto ao solo da camada de cobertura de um aterro sanitário.

Como resultado, foi construído um protótipo de nó sensor capaz de realizar múltiplas leituras de sensores analógicos e digitais, processar as informações e enviá-las a um nó coordenador. Para tanto, foram desenvolvidos algoritmos, executados pelo microcontrolador, para realizar a leitura dos sensores, o processamento dos dados e a transmissão das mesmas para o nó coordenador por meio do protocolo IEEE 802.15.4. O coordenador por sua vez executa uma rotina computacional que lhe permite interpretar os pacotes recebidos, separar os dados relativos às medições realizadas e enviá-las para um computador conectado via comunicação serial.

Os testes de validação do sistema foram em laboratório com o nó sensor localizado no solo presente nas proximidades do laboratório de informática da UFRGS.

Os testes realizados evidenciam que o nó sensor desenvolvido é capaz de monitorar variáveis ambientais sem a necessidade de intervenção humana, viabilizando assim uma melhoria nos métodos de medição utilizados em ambientes que apresentam condições insalubres.

Estudos futuros realizados a partir do sistema desenvolvido podem melhorar a confiabilidade das medições, buscar sensores que melhor se adequem as condições do sistema a ser monitorado e além disso propor modificações na unidade de sensoriamento que permitam a utilização dos nós sensores no monitoramento de outros parâmetros ambientais.

A partir desta dissertação são propostos os seguintes trabalhos:

- A utilização de fontes alternativas de energia, principalmente de origem fotovoltaica, para garantir o funcionamento do sistema durante longos períodos de tempo, sem a necessidade de intervenção humana.
- Integrar ao nó coordenador uma interface de comunicação direta com a internet possibilitando a disponibilização das leituras por meio de uma página web em tempo real.
- Incluir sensores para monitoramento de outras variáveis de modo a viabilizar a utilização do nó sensor desenvolvido em outras aplicações.

## REFERÊNCIAS

ABNT. NBR 8419: Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos. ABNT. [S.l.]. 1992.

AKYILDIZ, I. F. Wireless sensor network: a survey. Atlanta: Elsevier, v. Computer networks 38.4, 2002.

AOSONG. Temperature and humidity module AM2302 Product Manual. [S.l.].

BOGENA, H. R. Evaluation of a low-cost soil water content sensor for wireless network applications. Journal of Hydrology, 2007. p. 32-42.

BOGNER, J. E. A. Landfills as atmospheric sources and sinks. Chemosphere, v. 31, p. 4119-4130, 1995.

BRITO, G. G. D. Modelo de monitoramento de deslizamento de encostas por meio de sensor multiparamétrico. Universidade Católica de Pernambuco. Recife. 2003.

COLLINS, F. E. A. Landfill gas monitoring network-development of. [S.l.]: [s.n.]. 2013.

ELK, A. G. H. P. V. Mecanismo de desenvolvimento limpo aplicado a resíduos sólidos | Redução de emissões na disposição final. Ministério das Cidades, Ministério do Meio Ambiente, IBAM. Brasília. 2007.

GUYAMAZON. PROXYSOL Aplicação de proxys à análise de manejo do solo, da mudança de uso da terra e interrelações com o clima. Cooperação Internacional Programa Guyamazon. São Luis. 2014.

IEEE 802 WORKING GROUP. IEEE standard for local and metropolitan area networks-Part 15.4: Low-rate wireless personal area networks (LR-WPANS). IEEE. [S.l.]. 2011.

INMET. : INMET - Instituto Nacional de Meteorologia . Disponivel em: <[http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=home/page&page=rede\\_estacoes\\_auto\\_graf](http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=home/page&page=rede_estacoes_auto_graf)>. Acesso em: 10 maio 2019.

ITURRI, E. A. Z. Uma proposta para a base de apoio dos drenos de gás. Trabalho apresentado no. Rio de Janeiro: [s.n.]. 2006.

KARL, H.; WILLING, A. Protocols and architectures for wireless sensor networks. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2007.

KHAN, M. A. E. A. Recent open source wireless sensor network supporting simulators: A performance comparison. 2014 International Conference on Computer, Communications, and Control Technology (I4CT). Langkawi: [s.n.]. 2014. p. 324-328.

KIM, Y.; EVANS, R. G.; IVERSEN, M. Remote sensing and control of an irrigation system using a distributed wireless sensor network. IEEE transactions on instrumentation and measurement. [S.l.]: [s.n.]. 2008. p. 1379-1387.

LOBO, P. C. Arquitetura alternativa para o monitoramento do Biogás em um aterro sanitário. Exame de qualificação para obtenção de Doutorado. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande. 2016.

MACIEL, F. J.; JUCÁ, F. T.; NETO, A. C. Avaliação do Projeto Piloto de Recuperação do Biogás no Aterro da Muribeca/PE. VI Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica. Fortaleza-CE: [s.n.]. 2011.



MELO, T. A. C. D. et al. WINSS: A simulation tool fo the IEEE 802.15.4 Standard for Network Simulator 2. 2016 1st International Symposium on Instrumentation Circuits and Transducers (INSCIT). Belo Horizonte-MG: IEEE. 2016. p. 43-48.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA. Agricultura de Precisão. Secretaria de Desenvolvimento Agropecuário e Cooperativismo. Brasília, p. 3. 2009.

MITRA, S. E. A. Wireless sensor network based localization and threat. 2012 IEEE International. [S.l.]: IEEE. 2012.

MUCHA, P. M. D. A. O Uso de Simulação de Redes de Sensores Sem Fio (RSSF) para Gestão de TI em Ambientes Agrícolas. Monografia de Pós-Graduação. Universidade Federal de Santa Maria. Frederico Westohalen-RS. 2013.

NANAVATI, A.; DESHPANDE, V. S. Performance analysis of wireless sensor network for propagation range. Conference on Pervasive Computing (ICPC). Pune: [s.n.]. 2015. p. 1-3.

NAVARRO-HELLÍN, H. A wireless sensors architecture for efficient irrigation water management. *Agricultural Water Management* , 2015. 64-74.

NAVARRO-HELLÍN, H. E. A. A wireless sensor architecture for effiecient water management. *Agricultural Water Management*, v. 151, p. 64-74, 2015.

NEEHAARIKA, V.; SINDHURA, S. Evaluation of routing protocols used in wireless sensor networks monitoring temperature in composting heaps. 2011 Annual IEEE India Conference. Hyderabad, p. 1-4. 2011.

NETO, J. M. R. Sistema de localização baseado em redes de sensores sem fio. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande-PB. 2010.

PATIL, A. V.; KAZI, A. Y. Performance analysis of IEEE 802.15.4 sensor networks. 2013 Fourth International Conference on Computing. Tiruchengode: IEEE. 2013. p. 1-6.

PEREIRA, Q. Como deve ser um aterro sanitário | Caderno Cotidiano, Folha... | Flickr, 2012. Disponível em: <[https://www.flickr.com/photos/gus\\_per/7161423524/](https://www.flickr.com/photos/gus_per/7161423524/)>. Acesso em: 01 Março 2019.

POTTIE, G. J.; KAISER, W. J. Wireless integrated network sensors. Communications of the ACM, v. 43, n. 5, p. 51-58, 2000.

RABAEY, J. M.; ET AL. PicoRadio supports ad hoc ultra-low power wireless networking. Computer, p. 42-48, 2000.

RUIZ, L. B. MANÁ: uma arquitetura para gerenciamento de redes de sensores sem fio. Universidade Federal de Campina Grande. Belo Horizonte. 2003.

SAUSEN, P. Gerenciamento integrado de energia e controle de topologia em redes de sensores sem fio. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande. 2008.

SILVA, I. M. D. D. Análise de Desempenho de Sistemas de Comunicação Sem-Fio para Monitoramento de Unidade de Produção de Poços Petrolíferos Terrestres. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal. 2008.

SIMÕES, G. F. Concepção de um programa de monitoramento geotécnico para a central de tratamento de resíduos sólidos urbanos da BR-040 em Belo Horizonte-MG. VI Simpósio Ítalo Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Belo Horizonte: [s.n.]. 2002. p. 1-8.

SOARES, S. A. F. Redes de sensores sem fio para localização de pequenos ruminantes. Universidade Federal do Vale do São Francisco. Juazeiro-BA. 2012.

SOMOV, A. E. A. Development of wireless sensor network for combustible gas monitoring. *Sensors and Actuators A: Physical*, Novembro 2011. 398-405.

SOUSA, M. P. Diversidade adaptativa aplicada a redes de sensores sem fio. *International Information and Telecommunication Technologies Symposium I2TS*. [S.l.]: [s.n.]. 2009.

SPARKFUN. MQ-4.doc. Disponível em: <<https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Biometric/MQ-4.pdf>>. Acesso em: 10 maio 2019.

SULIMAN, I. A.; ABDALLA, G. M. T. Comparative study of wireless LAN using OPNET and NS-2. *Conference of Basic Sciences and Engineering Studies (SGCAC)*. Khartoum: [s.n.]. 2016. p. 196-200.

TEXAS INSTRUMENTS. LM1117/LM1117I 800mA Low-Dropout Linear Regulator datasheet (Rev. N). Disponível em: <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm1117.pdf>>. Acesso em: 2019 maio 10.

VALLE, O. T. Expansion of the available use classes in IEEE 802.15.4 networks in the industrial environment. *International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS)*. [S.l.]: IEEE. 2012. p. 131-135.

VIKA CONTROLS. Módulos XBee – Serie 802.15.4 | Vika Controls – Soluções em Instrumentação. Vika Controls, 2019. Disponível em: <<https://www.vikacontrols.com.br/produtos/xbec-802154/>>. Acesso em: 03 mar. 2019.

ZHANG, J. et al. A Simulator for Flexible Sensor Nodes in Wireless Networks. Seventh International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Networks. Beijing: [s.n.]. 2011. p. 373-375.