

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

THOBIAS TOSE

**REDE DE SENSORES SEM FIO ZIGBEE APLICADA EM UMA
ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO**

VITÓRIA
2012

THOBIAS TOSE

**REDE DE SENSORES SEM FIO ZIGBEE APLICADA EM UMA
ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica.
Orientador: Prof. Dr. Anilton Salles Garcia.
Co-orientador: Prof. Dr. Antonio M. F. Frasson.

VITÓRIA
2012

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)
(Biblioteca Central da Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

T714r Tose, Thobias, 1981-
Redes de sensores sem fio zigbee aplicada em uma estação de tratamento de esgoto / Thobias Tose. - 2012.
88 f. : il.

Orientador: Anilton Salles Garcia.

Coorientador: Antonio Manoel Frasson.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Redes de sensores sem fio. 2. Equipamentos industriais. 3. Sensoriamento remoto. 4. Esgotos. 5. Radiofrequência. I. Garcia, Anilton Salles. II. Frasson, Antônio Manoel Ferreira. III. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. IV. Título.

CDU: 621.3

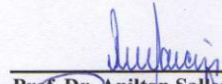
THOBIAS TOSE

**REDE DE SENSORES SEM FIO ZIGBEE APLICADA EM UMA
ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO**

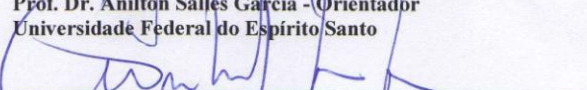
Dissertação submetida ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 06 de novembro de 2012.

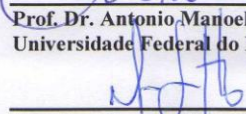
COMISSÃO EXAMINADORA



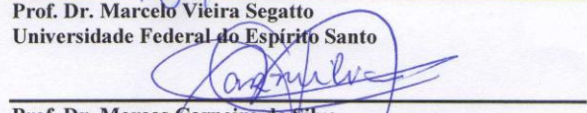
Prof. Dr. Anilton Salles Garcia - Orientador
Universidade Federal do Espírito Santo



Prof. Dr. Antonio Manoel Ferreira Frasson – Co-orientador
Universidade Federal do Espírito Santo



Prof. Dr. Marcelo Vieira Segatto
Universidade Federal do Espírito Santo



Prof. Dr. Marcos Carneiro da Silva
Faculdade de Engenharia de Sorocaba

“No meio da dificuldade encontra-se a oportunidade.”

Albert Einstein

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, amigos e família, por todo apoio no desenvolvimento desse projeto.

Agradecimentos

Agradeço a Deus por iluminar meu caminho e aos meus pais por serem os maiores incentivadores para conseguir alcançar meus ideais.

Ao professor Anilton, pela orientação e apoio, durante anos de trabalho, que foram fundamentais para o êxito desta dissertação.

A CESAN, pela liberação para assistir as aulas e por disponibilizar uma de suas plantas para testes deste projeto.

Aos colegas de trabalho, Filipe e Arlindo, por terem ajudado no desenvolvimento e instalação dos protótipos.

Ao Jorge Nader e Walter, da Instrumentação da CESAN, pelo apoio disponibilizado. E também aos operadores Eduardo e Reginaldo da Sanevix, pelas idas e vindas à lagoa para instalação dos protótipos nos aeradores.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, pela oportunidade para a concretização desse curso.

E a todos os familiares e amigos pelo carinho e pensamento positivo.

Resumo

A boa eficiência em uma estação de tratamento de esgoto (ETE) é de grande importância para o meio ambiente. O gerenciamento de equipamentos eletromecânicos instalados nessas estações constitui um grande desafio devido ao fato de que os mesmos são instalados em locais de difícil acesso e insalubres, dificultando a manutenção e fazendo com que o tempo destinado à correção de eventuais falhas seja dilatado. Esta dissertação propõe o desenvolvimento de uma Rede de Sensores Sem Fio (RSSF), com o objetivo de monitorar equipamentos eletromecânicos instalados em uma Estação de Tratamento de Esgoto (ETE), permitindo a Concessionária um controle preditivo em tempo real. O projeto de uma rede de sensores sem fio para monitoramento de equipamentos exige não somente o desenvolvimento e montagem dos módulos sensores, mas também precisa contemplar o desenvolvimento do software para gerenciamento dos dados coletados. Dessa forma, esta dissertação contempla uma RSSF *Zigbee*, de pequeno porte, adaptada para monitoramento de equipamentos eletromecânicos e condições ambientais de uma ETE, tipo lagoa de estabilização, em uma área instalada de aproximadamente 0,15 km² e vazão média de tratamento de 320 l/s. Os resultados experimentais mostram que este sistema de monitoramento pode realizar de forma satisfatória a coleta dos parâmetros de desempenho e avaliação de qualidade na estação.

Abstract

The good efficiency in a wastewater treatment plant (WWTP) is of great importance for the environment. The management of electromechanical equipment installed in these stations is a major challenge due to the fact that they are installed in hard to reach places and unhealthy, hindering maintenance and making time for the correction of any flaws is dilated. This dissertation proposes the development of a Wireless Sensor Network (WSN), in order to monitor electromechanical equipment installed in a Sewage Treatment Station, allowing the Concessionaire predictive control in real time. The design of a wireless sensor network for monitoring equipment requires not only the development and installation of the sensor modules, but also include the development of software for managing data collected. Thus, this dissertation includes a smallsize Zigbee WSN, adapted for monitoring of electromechanical equipment and environmental conditions of a WWTP, type stabilization lagoon, installed in an area of approximately 0.15 km² and average flow of 320 liters of per second. The experimental results show that this monitoring system can perform satisfactorily collection of performance parameters and quality assessment in the season.

Sumário

Capítulo 1: Introdução.....	16
1.1 Contextualização e Motivação.....	16
1.2 Justificativa.....	17
1.3 Objetivos e Resultados Esperados.....	18
1.4 Metodologia.....	19
1.5 Trabalhos Relacionados.....	19
1.6 Principais Contribuições.....	22
1.7 Organizações do texto.....	22
Capítulo 2: Base Conceitual Utilizada.....	23
2.1 Redes de Sensores sem Fio.....	23
2.2 IEEE 802.15.4 e ZigBee.....	25
2.2.1 Roteamento ZigBee.....	28
2.3 Rádio XBee.....	29
2.3.1 Envio e Recepção dos Dados.....	30
2.3.2 Configuração do XBee.....	31
2.3.3 Portas E/S e Modos de Operação.....	32
2.4 Microcontrolador Arduino.....	34
Capítulo 3: Fundamentação Teórica.....	37
3.1 Sistema de Esgotamento Sanitário no Brasil.....	37
3.2 Tipos de Tratamento.....	38
3.3 ETE Camburi.....	40
3.4 Automação de ETE.....	40
Capítulo 4: Monitoramento de Equipamentos.....	42
4.1 Implantação da RSSF.....	42
4.1.1 Planta de Testes Utilizada.....	42
4.1.2 Desenvolvimento dos kits de monitoramento.....	43
4.1.3 Microcontroladores e Sensores.....	44
4.1.4 Configuração do Rádio de Comunicação.....	46
4.1.5 Integração Microcontrolador e Rádio Comunicador.....	48

4.1.6 Montagem dos kits de monitoramento	50
4.1.7 Fontes de Energia	53
4.2 Aplicação de Monitoramento	54
4.2.1 Monitoramento de Equipamentos Eletromecânicos	54
4.2.2 Instalação dos nós sensores	56
4.2.3 Aplicação <i>CESAN_Esgoto</i>	57
4.2.4 Aplicação <i>CESAN_Esgoto</i> Ethernet.....	58
Capítulo 5: Resultados Obtidos	61
5.1 Autonomia da Rede	61
5.2 Tráfego	63
5.3 Tempo de Resposta.....	64
5.4 Dados Recebidos	65
5.5 Testes de Interferência.....	68
5.6 Custos Envolvidos	69
5.7 Desafios para implementação do sistema.....	70
Capítulo 6: Conclusão	72
Referências Bibliográficas.....	74
Apêndice A: Rotinas de programação para leitura dos sensores no Microcontrolador Arduino.....	77
Apêndice B: Rotina de programação para disponibilização dos dados recebidos pelos nós sensores na Intranet/Internet	80
Anexo A: Diagrama Esquemático do Arduino.....	86
Anexo B: Diagrama Esquemático do Shield.....	87

Lista de Figuras

Figura 1	Aeradores superficiais instalados na lagoa de tratamento de esgoto.	17
Figura 2	Nó sensor utilizado para medição de grandezas elétricas.	20
Figura 3	Componentes de um nó sensor.	24
Figura 4	RSSF organizada em clusters.	24
Figura 5	Interação entre as camadas.	26
Figura 6	Topologia ZigBee.	28
Figura 7	Auto-configuração ZigBee.	29
Figura 8	Tipos de antenas nos rádios XBee.	30
Figura 9	Composição de um pacote de dados API.	30
Figura 10	Tela inicial do software X-CTU.	31
Figura 11	Configuração dos parâmetros do rádio utilizando o X-CTU.	32
Figura 12	Pinagem do módulo XBee.	33
Figura 13	Modos de operação do rádio XBee.	34
Figura 14	Arduino Stalker V2.	35
Figura 15	Arduino Duemilanove, Shield e XBee.	36
Figura 16	Tela de programação do Arduino IDE.	36
Figura 17	Percentual de cobertura de domicílios com acesso a rede de esgotamento sanitário.	38
Figura 18	Aerador superficial.	39
Figura 19	ETE Camburi (vista aérea).	40
Figura 20	Disposição dos nós sensores nas lagoas de tratamento.	43
Figura 21	Remoção dos aeradores na lagoa com a utilização de barco.	44
Figura 22	Sensores utilizados.	44
Figura 23	Placa de resistores para conexão dos sensores.	45
Figura 24	Esquema elétrico utilizado para funcionamento dos sensores.	45
Figura 25	Testes com XBee.	46

Figura 26	Disposição da rede formada vista no X-CTU.	47
Figura 27	Dados recebidos do módulo em teste configurado como dispositivo final.....	49
Figura 28	Sobreposição dos dados recebidos de vários kits.....	49
Figura 29	Kit de monitoramento montado sobre a base do motor do aerador	51
Figura 30	Contaminação por água de chuva.	51
Figura 31	Suporte de acrílico para proteção contra chuvas.....	52
Figura 32	Unidade responsável pelo acionamento dos motores.	52
Figura 33	Unidade responsável pelo monitoramento de temperatura ambiente, umidade relativa do ar e corrente elétrica das bombas de recirculação interna.....	53
Figura 34	Painel solar e fontes ATX utilizadas para alimentar os módulos sensores.....	54
Figura 35	Sensores instalados nos motores	55
Figura 36	Arquitetura da rede instalada na ETE Camburi.	56
Figura 37	Rede ZigBee estabelecida.	56
Figura 38	Aplicação <i>Cesan_Esgoto</i>	57
Figura 39	RCOM-MeshBee para mapeamento do endereçamento hexadecimal de comandos enviados.	58
Figura 40	Arduino Duemilanove utilizado para disponibilizar os dados Ethernet.	59
Figura 41	Interligação da RSSF com Banda Larga.....	59
Figura 42	Página HTML para disponibilização dos dados da RSSF.	60
Figura 43	Comparação entre os experimentos com e sem modo <i>sleep</i> habilitado.....	62
Figura 44	Quantidade de transmissão e tráfego gerado por minuto.....	64
Figura 45	Temperatura dos motores instalados na lagoa.	65
Figura 46	Corrente elétrica do motor do aerador 8	66
Figura 47	Temperatura ambiente do kit do monitoramento instalado na elevatória de recirculação	67
Figura 48	Corrente elétrica do conjunto motor-bomba da elevatória de recirculação	67
Figura 49	Umidade relativa do ar do kit de monitoramento instalado na elevatória de recirculação	68
Figura 50	Foto do espectro analisado dos transceptores <i>ZigBee</i>	69
Figura 51	Kit de monitoramento retirado da lagoa após 6 meses em funcionamento.	71

Figura 52 Pontos de corrosão no interior do módulo sensor	71
Figura 53 Diagrama Esquemático do Microcontrolador Arduino.....	86
Figura 54 Diagrama Esquemático do <i>XBee</i> Shield.....	87

Lista de Tabelas

Tabela 1 Comparação entre as redes tradicionais e as RSSF.	25
Tabela 2 Faixas de frequência do protocolo IEEE 802.15.4.	26
Tabela 3 Comparação técnica entre os dispositivos de curto alcance de transmissão sem fio.	27
Tabela 4 Função de cada pino no rádio XBee.....	33
Tabela 5 Configurações do modo <i>sleep</i>	34
Tabela 6 Configurações dos rádios XBee.....	47
Tabela 7 Lista das variáveis de leitura de cada kit de monitoramento.	48
Tabela 8 Classe de isolamento dos motores elétricos.....	55
Tabela 9 Consumo dos componentes.	63
Tabela 10 Custos envolvidos no desenvolvimento do projeto.	70

Nomenclatura

Siglas

ADC - *Analog Digital Converter*

AES - *Advanced Encryption System*

ANATEL - Agência Nacional de Telecomunicações

API - *Application Programming Interface*

AODV - *Ad Hoc On Demand Distance Vector*

CSMA/CA - *Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*

E/S - Entrada e Saída

ETE – Estação de Tratamento de Esgoto

FTDI - *Future Technology Devices International*

GHz - *Gigahertz*

GPS – *Global Positioning System*

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IEEE - *Institute of Electrical and Electronics Engineers*

kbps - *Kilobits por segundo*

LED - *Light Emission Diode*

LR-WPAN - *Low Rate Wireless Personal Area Network*

LLC – *Logical Link Control*

MAC - *Medium Access Control*

MEMS – *Micro Electro Mechanical Systems*

MHz - *Megahertz*

OSI – *Open System Interconnection*

OLSR - *Optimized Link State Routing*

PWM - *Pulse Width Modulation*

RF - Rádio Frequência

RSSF - Redes de Sensores Sem Fio

WPAN – *Wireless Personal Area Network*

Capítulo 1: Introdução

Este capítulo apresenta a introdução sobre o trabalho, contendo: contextualização e motivação, justificativa, objetivos e resultados esperados, metodologia de desenvolvimento, trabalhos relacionados e as principais contribuições. A estrutura da dissertação também é mostrada.

1.1 Contextualização e Motivação

O desenvolvimento das tecnologias na área de microprocessadores e comunicação sem fio, assim como a miniaturização dos sistemas eletromecânicos, possibilitou o surgimento das Redes de Sensores Sem Fio (RSSF) (Loureiro et al., 2002). Uma RSSF pode ser definida como um sistema distribuído composto por nós sensores autônomos. Eles cooperam entre si em uma estrutura *ad-hoc* com o objetivo de realizar o sensoriamento de determinada região ou processo (Quintão et al., 2004). As RSSFs podem ser utilizadas tanto no monitoramento quanto no controle de ambientes e processos (Ruiz et al., 2004).

A utilização das Redes de Sensores Sem Fio torna possível a aplicação de sensores em áreas de difícil acesso, tais como máquinas rotativas, locais com atmosferas tóxicas ou inóspitas, ambientes de condições hostis e até mesmo reservas do ponto de vista ambiental, oceanos e rios, sem que seja necessária a intervenção humana *in loco* para a manutenção e configuração da rede. As Redes de Sensores Sem Fio têm maior aplicabilidade em locais onde não se pode, ou não se deseja, por motivos técnicos ou econômicos, ter uma instalação com fios e onde seja necessário o acesso imediato à informação (Ruiz et al., 2004).

Um problema enfrentado por empresas de saneamento é realizar manutenção em equipamentos que ficam localizados em ambientes contaminados, como é o caso das estações de tratamento de esgoto. As ETE's possuem dimensões extensas e o acesso aos equipamentos presentes nas lagoas de tratamento é realizado através de operadores utilizando embarcações. Além disso, os riscos inerentes às atividades de retirada e inserção desses equipamentos são altos, considerando ainda as dificuldades de se ter um sistema de supervisão por fios, onde o ambiente e as distâncias até o painel elétrico, por exemplo, impedem que determinado equipamento de supervisão funcione adequadamente, ocasionando o deslocamento de pessoas até o local de instalação para manutenção em caso de falhas. A Figura 1 a seguir ilustra os aeradores superficiais instalados em uma lagoa de tratamento de esgoto doméstico.



Figura 1 – Aeradores superficiais instalados na lagoa de tratamento de esgoto.

1.2 Justificativa

Estação de tratamento de esgoto doméstico do tipo lagoa, como a ETE Camburi, planta de testes desta dissertação, ocupa uma área aproximada de 1,2 km² e está instalada em um bairro residencial. Além de serem incômodas para população do entorno, estão sujeitas às mais diversas fontes de interferências. Devido às grandes áreas, o cabeamento de sensores se torna oneroso e com grandes fontes de atenuação e interferências (cabos elétricos em contato com o esgoto, por exemplo). Normalmente esses locais são cercados por barreiras vegetais com intuito de minimizar os impactos gerados, principalmente impactos visuais e odor desagradável. Contudo, a vegetação torna-se mais uma fonte de atenuação do sinal sem fio e obstáculo para a passagem de eletrodutos para cabeamento.

Entretanto, mesmo com as condições citadas e o ambiente insalubre, associado aos gases provenientes da decomposição do esgoto bruto, bem como as intempéries (sol, chuva, maresia, ventos fortes, etc), faz-se necessário o monitoramento das condições eletromecânicas dos principais equipamentos utilizados (aeradores superficiais e conjuntos motor-bombas), a fim de realizar manutenções preditivas e evitar danos futuros (paradas indesejáveis de equipamentos). Apesar de que nesses ambientes as condições de propagação eletromagnética sejam adversas, pois as lagoas provocam reflexões da onda, prejudicando a comunicação sem fio, a utilização de uma rede de supervisão com essa tecnologia apresenta-se mais viável técnica e economicamente.

Nesse contexto, devido à importância e à localização da ETE Camburi, no município de Vitória-ES, o monitoramento dos aeradores superficiais da primeira lagoa de estabilização torna-se essencial. Caso esses equipamentos sejam desabilitados por falta de manutenção, a eficiência dos processos de tratamento da lagoa fica comprometida, inclusive a qualidade do efluente tratado pode ser alterada. Além disso, o odor desagradável gerado pode causar transtornos para comunidade.

1.3 Objetivos e Resultados Esperados

Esta dissertação tem como objetivo geral estudar e desenvolver uma solução de monitoramento sem fio de equipamentos eletromecânicos de uma estação de tratamento de esgoto, utilizando para isso o conceito de Redes de Sensores Sem Fio, adotando a tecnologia *ZigBee*, provendo as informações necessárias para outros processos, alimentando, por exemplo, dados de manutenção preditiva de equipamentos de aeração e as bombas de recirculação interna da estação. Adicionalmente, parâmetros climáticos também são supervisionados, pois influenciam diretamente no odor gerado pela estação.

Para alcançar este objetivo geral, os seguintes objetivos específicos são estabelecidos:

- 1) Desenvolver uma proposta de monitoramento baseada em rede sem fio, de baixo custo, de baixo consumo de energia, associado a um sistema de supervisão remota onde existe também possibilidade de acionar equipamentos (telecomando);
- 2) Aprimorar e integrar o trabalho desenvolvido aos processos de manutenção eletromecânica do sistema de esgotamento sanitário;
- 3) Possibilitar, com o êxito do trabalho, a aplicabilidade do sistema desenvolvido em outros segmentos ligados a empresas de saneamento;
- 4) Contribuir para o meio científico, através de publicação de artigos em congressos e periódicos.

Como resultado, é estruturado um sistema de comunicação com a utilização de uma rede *ZigBee* em uma estação de tratamento de esgoto, esperando-se, deste modo, obter dados de monitoramento dos diversos equipamentos instalados na planta. Através dessa rede, considerando suas características de auto-roteamento sob demanda e autonomia energética, é possível manter a disponibilidade dos dados recebidos, tendo como base os principais parâmetros de funcionamento dos motores existentes na estação, garantindo assim a continuidade operacional dos equipamentos e a eficiência no tratamento.

1.4 Metodologia

Para chegar ao objetivo da dissertação, utilizou-se a seguinte metodologia:

- Estudo das recomendações do padrão IEEE 802.15.4 e *ZigBee*;
- Estudo de microcontroladores *ATMega328 (Arduino)*;
- Estudo dos sensores a serem utilizados;
- Estudo de trabalhos relacionados na aplicação de Redes de Sensores Sem Fio em monitoramento de ambientes e equipamentos;
- Desenvolvimento de uma proposta de arquitetura de rede, com redundâncias, utilizando para isso uma “nuvem” *ZigBee*;
- Aquisição e configuração (programação) dos equipamentos necessários para montagem dos kits de monitoramento;
- Implementação dos kits em caixas herméticas com grau de proteção IP-68 ou superior, considerando que as características do ambiente são extremamente hostis;
- Validar a arquitetura e os métodos implementados através dos resultados obtidos, dos dados recebidos, da formação e estabilidade da rede estabelecida.

1.5 Trabalhos Relacionados

Esta dissertação está inserida no contexto de um conjunto de trabalhos desenvolvidos na área de Redes de Sensores sem Fio, com a utilização da tecnologia *ZigBee*. Os principais trabalhos relacionados são na área de monitoramento de ambientes, aplicações em segurança de equipamentos e área industrial.

As aplicações no campo de sensoriamento sem fio possuem grande diversidade. (Akyildiz et al., 2002) exemplifica: aplicações no meio ambiente: detecção de incêndios, inundações; na área de saúde: monitoramento de funções vitais de pacientes, localização de médicos e pacientes; militar: patrulhamento e vigilância, monitoramento e detecção de armas químicas e biológicas. Um nó sensor pode ser construído de várias formas e tamanhos diferentes, dependendo de cada aplicação. A Figura 2 apresenta um nó sensor utilizado no controle de medição de grandezas elétricas.



Figura 2 – Nó sensor utilizado para medição de grandezas elétricas.

Fonte: ZigBee Alliance, Develco Products.

A substituição de cabeamento físico dos sensores de uma estação de tratamento de esgoto já foi discutida (Cao, 2009). Nesse contexto, o trabalho é baseado em uma rede *mesh* sem fio para resolver os problemas de monitoramento dos sensores por fios de uma estação de tratamento de esgoto. Basicamente o projeto é composto de nós sensores, coletor de dados e comunicação de redes sem fio, utilizando tecnologia *ZigBee*. Os dados transmitidos do coletor de dados até o centro de controle utilizam padrão Ethernet e esse coletor funciona como *gateway* para todo o sistema. Os resultados experimentais mostraram que esse sistema de monitoramento pode realizar com êxito a coleta de dados dos sensores tendo um bom desempenho em relação ao sensoriamento por fios.

O uso de RSSF no campo de saúde, descrito por (Kioumars, 2011), propõe a utilização dessa rede para monitorar remotamente a frequência cardíaca e a temperatura do corpo humano. A base de microcontroladores utilizado foi o *Arduino* que estava configurado para transmitir os dados de forma segura a uma estação remota, usando um rádio *XBee*. O consumo de energia foi minimizado pela ativação dos sensores através de comandos provenientes do PC remotamente ligado a rede.

Já no monitoramento de ambientes, (Silva, 2010), apresenta um trabalho envolvendo RSSF para monitoramento de temperatura, umidade relativa e pressão atmosférica na Floresta Amazônica. Foi utilizado um microcontrolador de 32 bits e um módulo *XBee* para compor os nós da rede, proporcionando otimização de energia, enquanto os sensores são usados para realizar as medições. Uma das principais vantagens desse projeto é a eficiência energética, usando para isso microcontroladores de 32 bits, onde foi possível combinar um processamento considerável a uma autonomia de energia, tendo vários sensores remotos como aplicações. Assim, o tempo de uso da bateria para o processamento dos sinais vindos do sensor torna-se menor, que por sua vez eleva a autonomia de leitura do sensor, fator crítico para o bom desempenho da rede.

No âmbito da medição de energia elétrica, (Lousada, 2009), foca principalmente estudar o consumo de energia elétrica dos módulos *XBee* na utilização de uma RSSF em equipamentos de medição do consumo de energia elétrica. Como solução para maximizar o tempo de vida da rede, é proposta uma técnica para cálculo do ciclo de trabalho da rede de forma dinâmica, considerando o processo de formação da rede e as alterações na topologia que podem acontecer durante seu funcionamento (roteamento *ZigBee*).

No que diz respeito ao desenvolvimento de projetos de baixo custo, (Bergmman, Wallace, Calia, 2010) cita que modernos sistemas de sensores sem fio são caracterizados por dimensões físicas reduzidas e disponibilidade de energia limitada, que por sua vez resulta em projetos de sistemas baseados em microprocessadores de baixa capacidade e rádios de alcance limitado. Apesar do fato de que nós sensores são baseados em componentes de baixo custo, os kits de desenvolvimento de RSSF são relativamente caros. O projeto visa desenvolver então uma plataforma de prototipagem de baixo custo baseada em ambientes com código aberto e tecnologia *ZigBee* na utilização de sensoriamento marinho, como parte de projeto de monitoramento ambiental.

No trabalho de (Buttyan et al., 2010) são abordados os desafios para se construir uma infraestrutura de proteção contra ameaças, como ataques terroristas, de criminosos ou mesmo catástrofes e discute os aspectos que tornam as redes de sensores sem fio confiáveis para o monitoramento da segurança de um ambiente. Esses aspectos envolvem a própria segurança do módulo e segurança da comunicação da rede, para tornar todo o tráfego de dados seguro.

Por fim, (Rivero, 2011), demonstra a aplicabilidade das redes de sensores sem fio na segurança de equipamentos eletrônicos, focando o consumo de energia dos nós sensores, controlando a atividade do rádio de comunicação que é o componente que mais consome energia. Apresenta ainda algoritmos para maximizar o tempo de vida da rede e o desenvolvimento de um novo módulo RSSF, com menor consumo de energia e menor custo em relação ao microcontrolador *Arduino*.

Na literatura utilizada como embasamento desta dissertação, não foram encontrados trabalhos científicos que abordassem as dificuldades de implementação de uma RSSF de monitoramento em um ambiente com condições tão hostis, especialmente em estações de tratamento de esgoto para monitoramento de equipamentos instalados.

1.6 Principais Contribuições

As principais contribuições trazidas por esta dissertação são:

- Ter uma solução baseada em rede sem fio, de baixo custo, para monitoramento de equipamentos eletromecânicos;
- Conhecer os parâmetros de funcionamento dos equipamentos e prever possíveis falhas;
- Auxiliar na eficiência do tratamento da estação, efetuando o reparo ou substituição dos equipamentos de aeração;
- Publicação de artigos a nível nacional e internacional, demonstrando a aplicabilidade da tecnologia *ZigBee* em ambientes com manutenção deficitária e perigosa.

1.7 Organizações do texto

A dissertação apresenta em seu Capítulo 2 a base conceitual utilizada no que se refere aos equipamentos e tecnologia utilizada. O Capítulo 3, a Fundamentação Teórica para o monitoramento de equipamentos em estações de tratamento de esgoto. No Capítulo 4, parte central da dissertação, são mostrados o desenvolvimento dos equipamentos, sua instalação na planta e as telas sinópticas desenvolvidas. No Capítulo 5 são apresentados os resultados obtidos e, por fim, no Capítulo 6, as conclusões e trabalhos futuros.

Capítulo 2: Base Conceitual Utilizada

Neste capítulo, são abordados os referenciais teóricos utilizados na dissertação em seções. A seção 2.1 apresenta os principais conceitos das Redes de Sensores Sem Fio e suas aplicabilidades. O padrão de comunicação utilizado *ZigBee* e sua base sobre o padrão IEEE 802.15.4 é apresentado na seção 2.2. Os rádios *XBee*, suas características e configurações, é apresentado na seção 2.3. Na seção 2.4 é apresentado o microcontrolador Arduino Stalker, utilizado em conjunto com o rádio *XBee*.

2.1 Redes de Sensores sem Fio

Os avanços que vêm ocorrendo nas tecnologias de processadores, novos materiais de sensoriamento, microssistemas eletromecânicos (MEMS – *Micro Electro Mechanical Systems*) e comunicação sem fio têm estimulado o desenvolvimento e uso de sensores inteligentes, principalmente nas áreas ligadas a processos físicos, químicos e biológicos, entre outros. É usual ter num único *chip* vários sensores, que são controlados pela lógica do circuito integrado, com uma interface de comunicação sem fio. Normalmente, o termo sensor inteligente é aplicado ao *chip* que contém um ou mais sensores com capacidade de processamento de sinais e comunicação de dados. A tendência é produzir esses sensores em larga escala, reduzindo seu custo e investir ainda mais no desenvolvimento tecnológico desses dispositivos, para obter novas melhorias e capacidades (Loureiro et al., 2002).

Nós sensores são dispositivos autônomos equipados com capacidades de sensoriamento, processamento e comunicação. Quando esses nós são dispositivos em rede sem fio, formam as redes de sensores sem fio. O nó sensor é composto por um rádio de comunicação para envio e recepção dos dados e efetua o processamento dos sinais recebidos através de conversores analógico-digitais (ADC). Adicionalmente os nós sensores podem ter também dispositivos de acionamento, como relés ou LEDs, podendo ativá-los e desativá-los de acordo com os dados recebidos pelo rádio. Por fim, a alimentação, por bateria, que fornece a energia necessária para o funcionamento de todo o nó sensor. A Figura 3 mostra a composição desse nó.

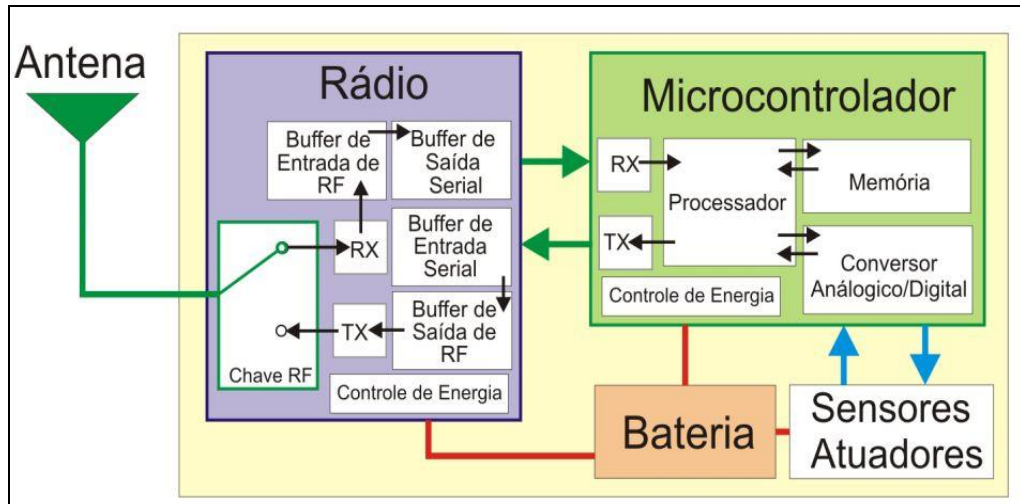


Figura 3 – Componentes de um nó sensor.

Fonte: Dissertação de Mestrado (Rivero, 2011)

Os nós de uma rede de sensores sem fio (RSSF) podem ser equipados com uma variedade de sensores, tais como sensores de temperatura ou pressão, acústicos, grandezas elétricas, entre outros. Esses nós podem ser organizados em grupos, constituindo-se os *clusters*, ilustrados na Figura 4 a seguir, onde pelo menos um dos sensores deve ser capaz de detectar um evento na região, processá-lo e decidir se ocorrerá ou não uma difusão (*broadcast*) do resultado para outros nós (Loureiro et al, 2002).

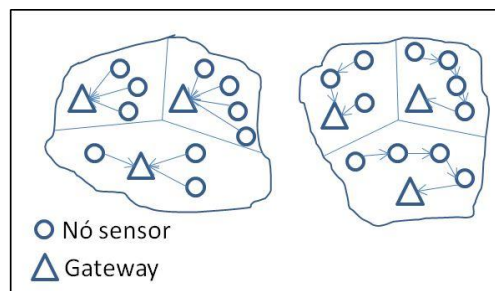


Figura 4 – RSSF organizada em clusters.

Fonte: Adaptado (Aboelaze e Aloul, 2005)

Quando um dado é coletado pelo sensor, ele passa pelo conversor analógico/digital e é preparado para o envio para o rádio (TX). Esses rádios possuem *buffers* tanto para o envio quanto para a recepção de dados, permitindo controlar o fluxo de transmissão e recepção (TX/RX). O rádio converte os sinais recebidos pela antena para serem transmitidos de forma serial. Tanto o envio quanto a recepção dos dados não ocorre simultaneamente e por esse motivo é utilizado um chaveador RF para alternar os modos de operação. Além disso, o

rádio e o microcontrolador possuem sistemas para o controle e gerenciamento de energia (Rivero, 2011).

As RSSFs diferem de redes de computadores tradicionais em vários aspectos (Tabela 1). As RSSFs possuem, em geral, um grande número de elementos distribuídos, operam sem intervenção humana direta, têm severas restrições de energia e devem possuir mecanismos para autogerenciamento (auto-configuração, auto-manutenção, auto-organização e autoproteção, entre outros). Os mecanismos de autogerenciamento são necessários devido a pouca capacidade individual dos nós e à topologia dinâmica, entre outros fatores. Os nós de uma RSSF podem ser descartados, perdidos ou saírem de serviço por diferentes razões como: falta de energia, problemas na deposição, ameaças e ataques à segurança, falhas nos componentes e falhas de comunicação (Ruiz, 2003). Portanto, protocolos e algoritmos projetados para RSSFs podem ser capazes de reorganizar a rede automaticamente. Outra característica importante das RSSFs é o esforço de cooperação entre os nós sensores para executar as tarefas definidas para a rede. Como possuem capacidade de processamento, ao invés de enviar dados brutos, os nós realizam processamentos simples e enviam apenas os dados requisitados parcialmente processados (Akyldiz, Sankarasubramaniam e Cayirci, 2002).

Tabela 1: Comparação entre as redes tradicionais e as RSSF

Redes Tradicionais	RSSF
Número de elementos limitado	Grande número de elementos distribuídos
Necessitam de intervenção humana para configuração	Operam sem intervenção humana direta
Sem restrições de energia	Restrições de energia severas
Não necessitam ser autogerenciadas	Devem ser capazes de se autogerenciar
Nós com grande capacidade de processamento	Nós com capacidade de processamento limitada
Topologia estática	Topologia dinâmica
Tarefas realizadas isoladamente por cada nó	Tarefas realizadas cooperativamente entre os nós
Possuem elementos que provêem infraestrutura de comunicação entre nós da rede	Não possuem infraestrutura de comunicação definida

Fonte: Adaptado (Caetano et al, 2007)

2.2 IEEE 802.15.4 e ZigBee

O protocolo IEEE 802.15.4 foi ratificado pelo *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) (IEEE, 2012) como padrão para redes de baixa velocidade e baixo consumo de energia, sendo por essa razão utilizada em RSSF. As redes IEEE 802.15.4 operam na faixa de frequência de 2,4 GHz – 2400 a 2483,5 MHz e com taxa de transmissão máxima de 250

kbps. Entretanto, outras faixas de frequência são permitidas pelo protocolo, com variação do número de canais de comunicação e da velocidade de transmissão, como pode ser observado na Tabela 2.

Tabela 2: Faixas de frequência do protocolo IEEE 802.15.4.

Frequência	868,3Mhz	902-928Mhz	2400 a 2483,5Mhz
Número de Canais	1	10	16
Data Rate (kbps)	20	40	250
Local	Europa	América	Mundial

Fonte: Adaptado (Kohvakka et al, 2006).

O IEEE 802.15.4 é o padrão que especifica as camadas física e de enlace (camadas 1 e 2 do modelo OSI – *Open System Interconnection*) para redes pessoais sem fio em baixas taxas (LR-WPAN, ou *Low Rate Wireless Personal Area Network*). É a base de especificações tal como *ZigBee*, a qual se preocupa em desenvolver soluções para as camadas superiores. Essa interação entre camadas é possível com a subcamada controle lógico de enlace (LLC – *Logical Link Control*) acessando a subcamada MAC – *Medium Access Control* - por meio de uma terceira subcamada, como mostrado na Figura 5 a seguir:

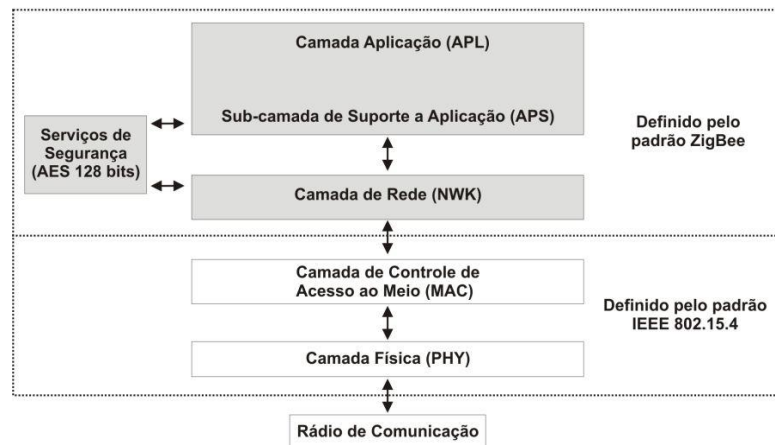


Figura 5 - Interação entre as camadas.

Fonte: (Rivero, 2011).

Em geral, as WPANs (*Wireless Personal Area Network*) são desenvolvidas para comunicações com baixo custo e baixas taxas entre dispositivos simples e próximos, focando sempre o que constitui, talvez, a questão primordial nesse tipo de tecnologia: baixo consumo de energia. A vida útil das baterias é um quesito importantíssimo quando se trata de rede de

sensores sem fio, e, por essa razão, as outras características de funcionamento como distância de comunicação e taxa de transmissão estão limitadas por esse fator.

O padrão *ZigBee* (ZigBee Alliance, 2012) foi especificado pela *ZigBee Alliance* em 2006 e utiliza as camadas física e MAC do protocolo IEEE 802.15.4, adicionando as camadas de rede e aplicação, além de criptografia AES (*Advanced Encryption Standard*) de 128 bits e pode endereçar até 65535 nós por sub-rede. A Tabela 3 mostra a comparação técnica do *ZigBee* e outras tecnologias de transmissão sem fio.

Tabela 3: Comparação Técnica entre Dispositivos de Curto Alcance de Transmissão sem Fio.

Características técnicas	<i>ZigBee</i>	<i>WiFi</i>	<i>Bluetooth</i>
Frequência de trabalho (MHz)	2400/868/915	2400	2400
Alcance de transmissão (m)	10~100	100	10
Velocidade de transmissão (kbps)	20/250	11000	1000
Número máximo de nós	65000	32	8
Autonomia da bateria	Muito alta	Média	Baixa
Consumo	Baixo	Alto	Muito Alta
Custo (\$)	30	100	60

A camada de rede do protocolo *ZigBee* define a relação pai-filhos dos dispositivos desse protocolo. Essas redes são formadas por 3 (três) tipos de dispositivos:

Coordenador: Responsável pela formação da rede *ZigBee*. O Coordenador escolhe e estabelece um canal de frequência na faixa 2,4 GHz para permitir associação de dispositivos roteadores e dispositivos finais.

Roteador: Dispositivo que cria e/ou mantém as informações da rede e as utiliza para determinar a melhor rota para um pacote de dados. Os roteadores e coordenador podem participar no redirecionamento de pacotes de dados para os seus dispositivos vizinhos.

Dispositivo Final (*End Device*): Dispositivo que sempre interage com o seu nó pai (ou um roteador ou um coordenador) na rede para receber ou transmitir pacotes, podendo funcionar como uma fonte ou destino de dados, porém não possui capacidade de redirecionamento de informações. Apesar de ter funções reduzidas dentro da camada de rede, desempenham um papel importante na rede através de sua autonomia energética. Os dispositivos finais são os únicos na rede *ZigBee* capazes de entrar em modo de dormência (*sleep*), diminuindo significativamente o consumo de energia da rede.

Coordenadores e roteadores podem ser pais de um ou mais dispositivos, ou seja, um dispositivo pai é responsável pelo ingresso de um dispositivo filho na rede. Completando, as

estruturas suportadas por essa tecnologia são Estrela, Mesh (malha) e Árvore, conforme mostra a Figura 6.

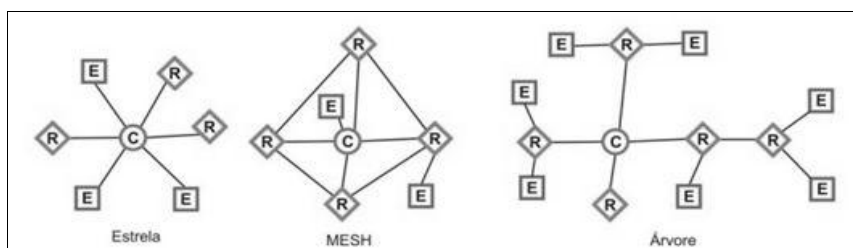


Figura 6 - Topologia ZigBee.

Fonte: Adaptado (Ramalho, 2011)

Para ingressar em alguma rede, os roteadores e os dispositivos finais realizam um *PAN Scan* para descobrir redes *ZigBee* ativas. Assim que descobrem, eles enviam um pedido de associação para aquela rede. O primeiro dispositivo que responder positivamente se torna pai e promove o ingresso ao novo dispositivo, que se torna filho dele.

Os pais dos dispositivos finais coordenam a transmissão e recepção de dados dos filhos. Na hipótese de um filho perder a conexão com o pai, esse tenta reingressar à rede, repetindo o processo.

2.2.1 Roteamento ZigBee

As características de roteamento das redes *ZigBee* aumentam sua autonomia energética, pois cada rota é mantida independente da sua qualidade, evitando assim o uso excessivo de *broadcasts* e atualizações de rotas desnecessariamente.

O responsável pelo roteamento no protocolo *ZigBee* é o protocolo *Ad Hoc On Demand Distance Vector* (AODV). Esse é um protocolo reativo, onde os dispositivos da rede não atualizam as tabelas de rotas constantemente. Isso só acontece quando a rota necessária para uma transmissão de dados não existe ou foi perdida. Então se inicia o processo de descoberta da rota, onde o nó transmissor envia um pacote *route request* em *broadcast* na rede.

Sendo assim, a utilização de um protocolo reativo tem consumo de energia menor que um protocolo pró-ativo, como *Optimized Link State Routing* (OLSR), por exemplo. Esse último prevê atualização constante das rotas através de pacotes *broadcast*. Nesse tipo de aplicação, onde os nós são fixos na topologia, o controle sob demanda das rotas se torna necessário devido ao tempo de vida prolongado da rede, sem que a qualidade do encaminhamento de mensagens seja perdida.

Além da economia de energia, o sistema de roteamento *ZigBee* configura automaticamente sua rota quando um enlace é perdido. Quando um determinado nó filho perde sua conexão com seu pai, esse reinicia o processo de ingresso à rede. Esse recurso é de suma importância para a diminuição da intervenção humana, pois o coordenador e os roteadores da rede mantêm a mesma em funcionamento mesmo com a falha de alguns nós. A Figura 7 mostra como esse processo acontece.

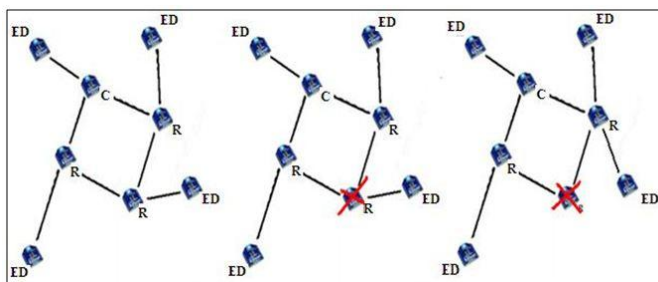


Figura 7 - Auto-Configuração *ZigBee*.

Fonte: (Ramalho, 2011)

A rede *ZigBee* possui uma topologia hierárquica ilimitada. Ou seja, a medida que novos roteadores são acrescentados à rede, essa tem sua área de cobertura expandida. Apesar do número de enlaces pai-filhos estarem limitados às capacidades de bufferização dos pais, o número de enlaces entre coordenador e roteadores, ou roteador e roteadores é ilimitado, exceto pelo fato de que o endereçamento 16 bits do protocolo trazer uma limitação de 65.535 endereços.

2.3 Rádio *XBee*

Esta seção apresenta o rádio de comunicação RSSF utilizado nos protótipos – rádio *XBee*. Os módulos são escolhidos por serem homologados pela Agência Nacional de Telecomunicações – ANATEL, sob os nº 0591101209 (*XBee-Pro*) e 0974101209 (*XBee*) e por terem representante no Brasil.

Os módulos *XBee* (Digi, 2009) adotam protocolos IEEE 802.15.4 e *ZigBee*. A Digi *International*, fabricante desses módulos disponibiliza dois modelos de rádio *XBee*: *XBee Series 1* e *XBee Series 2*. O primeiro implementa o protocolo IEEE 802.15.4, já o segundo além do IEEE 802.15.4 adota também o padrão *ZigBee* onde permite a utilização de redes do tipo *Mesh*.

Esses módulos podem ser fornecidos com adaptações de antena do tipo fio, conector para antena externa, padrão U.FL (mini conector coaxial) e antena tipo chip utilizados de acordo com a aplicação. A Figura 8 ilustra os diferentes tipos de antena presentes no rádio *XBee*.

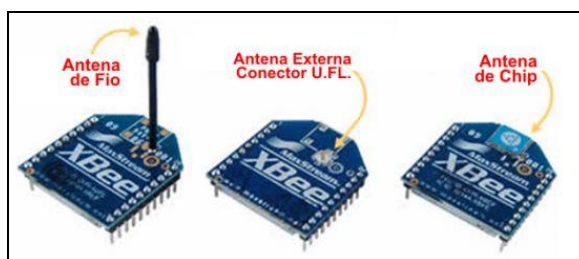


Figura 8 – Tipos de antena nos rádios *XBee*

Fonte: (Digi, 2009).

2.3.1 Envio e recepção de dados

O rádio *XBee* funciona com dois modos de operação para transmissão e recepção de dados:

Modo AT (*Transparent Operation*): os dados são enviados e recebidos diretamente pela porta serial, tendo uma interface simples e de fácil desenvolvimento. Resumidamente, tudo o que é colocado no buffer de transmissão é enviado, porém não é escalável para enviar dados para múltiplos destinatários e também não permite que os módulos sejam remotamente configurados.

Modo API (*Application Programming Interface*), baseado no envio e recepção de quadro de dados relativos a comandos, respostas de comandos e mensagens sobre o estado de funcionamento do módulo enviados e recebidos, aumentando a escalabilidade da rede. A estrutura do quadro de dados é mostrada na Figura 9 e as aplicações que utilizam esse modo devem estar de acordo com a estrutura apresentada.

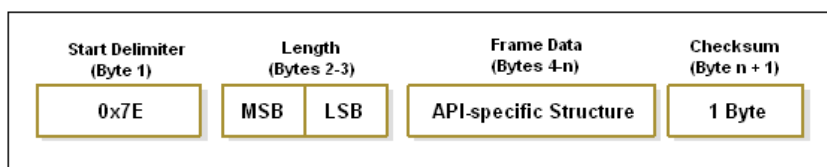


Figura 9 – Composição de um pacote de dados API.

Fonte: Adaptado (Digi, 2009).

Nesta dissertação é utilizado o modo API para transmissão de dados, visto que vários nós sensores poderiam estar enviando dados ao mesmo tempo. Caso fosse utilizado o modo AT, haveria sobreposição dos pacotes enviados, impossibilitando a leitura no supervisor.

2.3.2 Configuração do *XBee*

O software disponibilizado pelo fabricante dos rádios *XBee* para realizar a configuração dos mesmos é o programa X-CTU (Digi, 2010). Para comunicar com o módulo, inicialmente faz-se necessário selecionar a porta serial disponível, a taxa de transferência, controle de fluxo, bits de dados, paridade e bits de parada. A Figura 10 ilustra a tela de configuração inicial do software X-CTU.

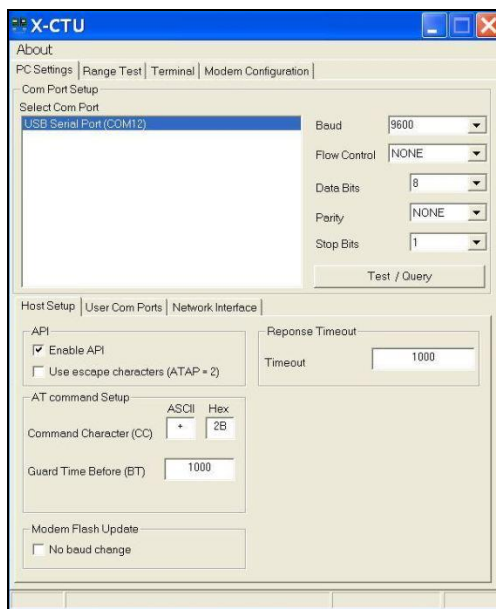


Figura 10 – Tela inicial do software X-CTU.

Fonte: (Digi, 2010).

Outras opções desse software incluem *Range Test*, para testar a conexão entre os módulos, *Terminal*, utilizado para verificar a recepção de dados da porta serial e interagir com módulos configurados no modo AT e o *Modem Configuration*, onde são realizadas as configurações dos parâmetros do modem, atualização de firmware, seleção da função do módulo (coordenador, roteador ou dispositivo final) dentre outros pertinentes ao módulo. Os principais parâmetros que devem ser considerados na configuração são apresentados na Figura 11 a seguir:

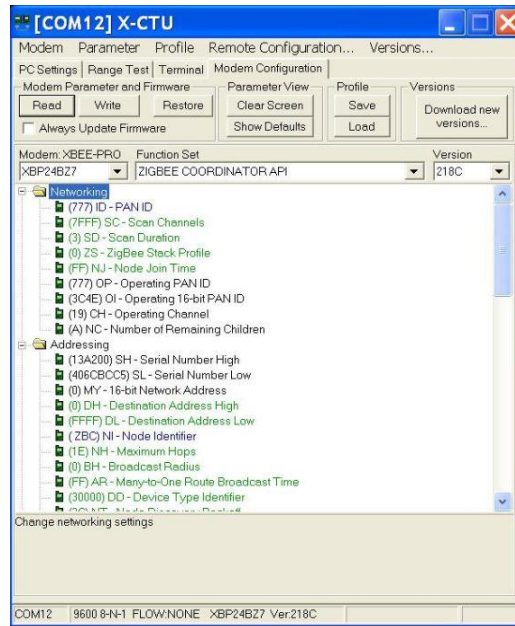


Figura 11 – Configuração dos parâmetros do rádio utilizando o X-CTU.

Fonte: (Digi, 2010).

Os parâmetros são divididos em grupos, tais como endereçamento, rede, segurança, interface serial, comandos de Entrada/Saída, modos de dormência, dentre outros. Os comandos de endereçamento são responsáveis por identificar o nó da rede.

Os comandos de interface serial são responsáveis pela comunicação entre o rádio *XBee* e o dispositivo serial conectado a ele (microcontrolador, por exemplo), onde são definidos o modo de operação e taxa de transmissão. Ainda podem-se citar comandos para configurar o modo de dormência (*sleep mode*), nome do módulo (*Node Identifier*), canal de comunicação, dentre outros.

2.3.3 Portas E/S e Modos de Operação

O módulo *XBee* possui 13 portas (pinos) de Entradas e Saídas (E/S) (DIO0 A DIO12), algumas possuindo mais de uma função, que podem ser configuradas através do programa X-CTU. O diagrama com a pinagem é mostrado na Figura 12 a seguir, sendo que a alimentação é realizada através do pino 1 (Vcc) devendo ser suprida com tensão de 3,3V e o terra (*ground*) através do pino 10 (DIO10).

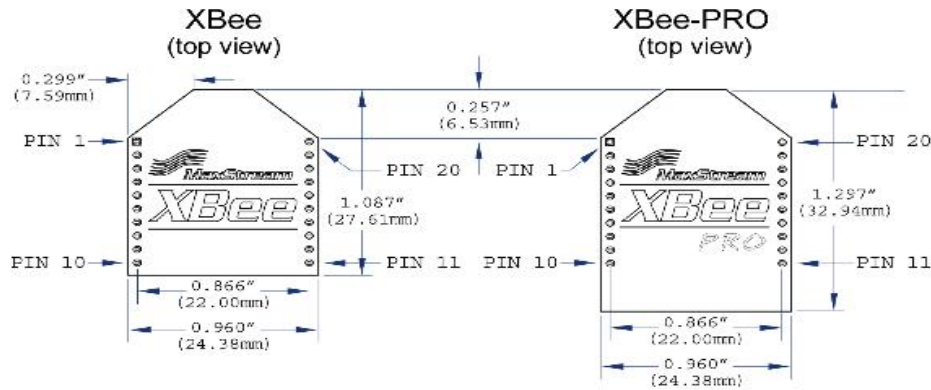


Figura 12 – Pinagem do módulo *XBee*.

Fonte: (Digi, 2009).

A entrada e saída de dados são realizadas através das portas DIN (pino 3) e DOUT (pino 2) respectivamente. Esses pinos são conectados ao microcontrolador para o envio e recepção de dados dos sensores. A Tabela 4 ilustra a função de todos os pinos do módulo *XBee*.

Tabela 4 – Função de cada pino no rádio *XBee*.

Pino	Nome	Função	Descrição
1	VCC		Alimentação
2	DOUT	Saída	UART Out
3	DIN/CONFIG	Entrada	Uart In
4	DIO12	E/S	Digital I/O
5	RESET	Entrada	Reset do módulo
6	PWM0/RSSI/DIO10	E/S	Saída PWM/Digital I/O
7	PWM/DIO11	E/S	Digital I/O
8	Reservado		Sem conexão
9	DTR/SLEEP_RQ/DIO8	E/S	Digital I/O ou pino <i>sleep</i>
10	GND		Terra
11	DIO4	E/S	Digital I/O
12	CTS/DIO7	E/S	Digital I/O - <i>Clear-to-Send</i>
13	ON/SLEEP/DIO9	Saída	Digital I/O
14	Reserved		Sem conexão
15	Associado/DIO5	E/S	Indicador de associação/Digital I/O
16	RTS/DIO6	E/S	<i>Request-to-Send</i> /Digital I/O
17	AD3/DIO3	E/S	Entrada Analógica ou Digital
18	AD2/DIO2	E/S	Entrada Analógica ou Digital
19	AD1/DIO1	E/S	Entrada Analógica ou Digital
20	AD0/DIO0 - Botão de Comissionamento	E/S	Entrada Analógica ou Digital/Botão de comissionamento

Fonte: (Digi, 2009)

Os Modos de Operação do rádio *XBee* são: *Idle*, *Transmit*, *Receive*, *Command* e *Sleep* mostrados na Figura 13 a seguir. Por padrão, ele permanece no modo *Idle* quando não está enviando ou recebendo dados. A partir desses eventos, ele pode passar para os modos

Transmit ou *Receive*, quando transmite ou recebe um pacote respectivamente. O modo *Command* é ativado quando recebe instruções de controle e configuração do rádio e *Sleep* quando o rádio fica em estado de dormência. O rádio possui o parâmetro de configuração SM (*Sleep Mode*), que especifica o modo de operação de economia de energia. A Tabela 6 mostra as principais configurações desse modo, realizados através do *software* X-CTU.

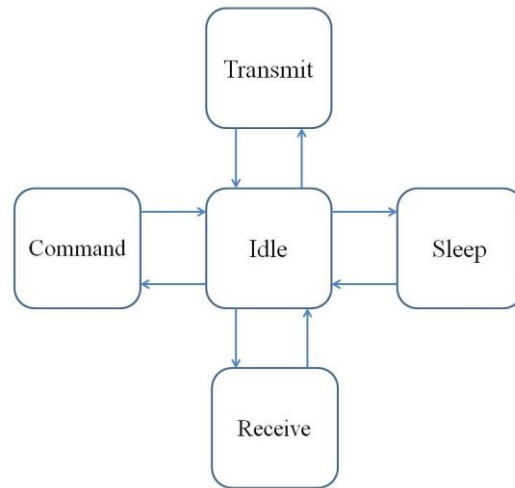


Figura 13: Modos de operação do rádio *XBee*.

Fonte: (Digi, 2009)

Tabela 5: Configurações do modo *sleep*.

Comando AT	Nome e Descrição	Parâmetros	Padrão de configuração
SM	<i>Sleep Mode</i> - Configura no modo <i>sleep</i>	0-desabilitado/1-habilitado pelo pino/4-habilitado no modo cíclico	0
SN	Número de períodos em modo <i>sleep</i> - Configura o número de períodos que o módulo ficará em modo de dormência, quando habilitado.	1-0xFFFF	1
SP	Determina quanto tempo o dispositivo final vai dormir, limitado até 28 segundos.	0x20-0xAF0 x 10ms	0x20
ST	Define o temporizador do modo <i>sleep</i> . É reiniciado cada vez que dados seriais são recebidos.	1-0xFFFFE (x 1ms)	0x1388 (5 segundos)
SO	Configura as opções para o modo <i>sleep</i> . Incluem: 0: Desabilitado /0x02 - Ativo entre ST <i>time</i> /0x04 - Sleep total SN * SP <i>time</i>	0-0xFF	0

Fonte: (Digi, 2009)

2.4 Microcontrolador Arduino

É uma plataforma de prototipagem eletrônica de hardware livre, projetada com um microcontrolador ATmega328, um chip de comunicação USB *Future Technology Devices International* (FTDI) – chip (FTDI, 2010) para interligação com um microcomputador e reguladores de tensão que permitem a utilização de fontes de energia

entre 5 e 12 Volts. As principais características desse microcontrolador são mostradas na Figura 14 a seguir. O diagrama esquemático do *Arduino Stalker V2*, objeto de uso desta dissertação, pode ser visto no Anexo A.

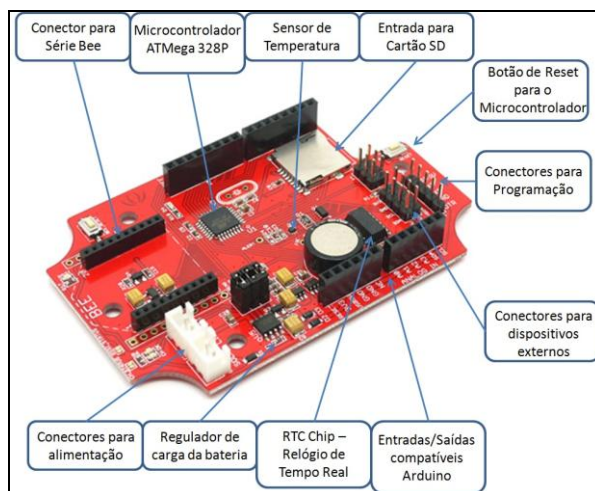


Figura 14 – *Arduino Stalker V2*

Fonte: (Arduino, 2009)

O microcontrolador Arduino possui 14 portas digitais, enumeradas de 0 a 13. As portas 0 e 1 são utilizadas para comunicação serial. As portas 2 e 3, além de serem função de Entrada e Saída, podem ser utilizadas para disparar eventos de interrupção no microcontrolador. As outras portas podem ser utilizadas para sensores que retornem valores booleanos ou ativar e desativar transistores para controlar dispositivos de maior potência. Já as portas 3, 5, 6, 9, 10 e 11 podem ser utilizadas como portas PWM (*Pulse Width Modulation*) – Modulação por largura de pulso.

Além dessas portas digitais, existem 6 portas analógicas, cada uma com um conversor analógico-digital de 10 bits. Podem ser acopladas a essas portas sensores como temperatura, umidade, corrente elétrica, luminosidade, etc. Outros componentes importantes são os pinos com tensão regulada em 3,3V e 5V, para utilização de alimentação de sensores, por exemplo.

O *Arduino Stalker* possui ainda um circuito carregador de baterias embarcado. Isso facilita a otimização dos kits de monitoramento, evitando que seja colocado um circuito carregador externo. Como são monitorados equipamentos onde não há supressão elétrica DC disponível, o uso de painéis solares é fundamental para garantir o carregamento das baterias, prolongando assim o tempo de vida do nó sensor.

Outra característica interessante do *Arduino Stalker* é que ele pode ser conectado a uma variedade de módulos intercambiáveis, tais como GPS (*Global Positioning System*), *Bluetooth*, *WiFi*, *ZigBee*, RF (Radiofrequência). Isso facilita a aplicação do dispositivo sem

precisar de *shield*, que são placas que podem ser adicionadas ao microcontrolador *Arduino* para aumentar sua funcionalidade. Entretanto, para disponibilizar os dados coletados via Internet, decidiu-se por utilizar um modelo do microcontrolador *Arduino* denominado *Arduino Duemilanove*, que possui uma porta RJ45, mas não possui entrada para o rádio *XBee*. Para isso, é necessário usar o *shield* para conectar o rádio ao microcontrolador, efetivando assim a funcionalidade prevista, como mostra a Figura 15 a seguir. O diagrama esquemático do *shield* é mostrado no Anexo B.

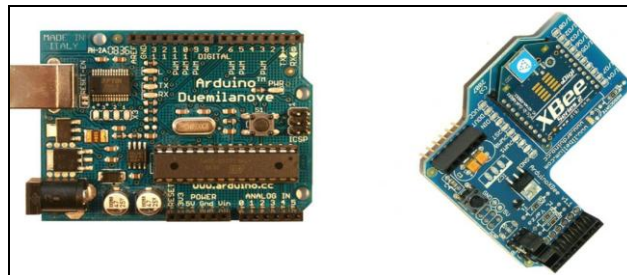


Figura 15 – *Arduino Duemilanove*, *Shield* e *XBee*.

Fonte: (Arduino, 2009)

O software utilizado para realizar o desenvolvimento das aplicações, baseada na linguagem C, é o *Arduino IDE*, desenvolvido para introduzir a programação a usuários não familiarizados com *software* de programação. Inclui um editor de código com recursos de realce de sintaxe, parênteses correspondentes e indentação automática. A Figura 16 mostra a tela de programação do *software* citado.

 The screenshot shows the Arduino IDE window titled 'sketch_mar04a | Arduino 0022'. The menu bar includes 'File', 'Edit', 'Sketch', 'Tools', and 'Help'. Below the menu is a toolbar with icons for running, stopping, saving, and other functions. The main area is a code editor showing the following C code:


```

/*
 * Blink
 * Turns on an LED on for one second, then off for one second, repe
 *
 * This example code is in the public domain.
 */

void setup() {
  // initialize the digital pin as an output.
  // Pin 8 has an LED connected on Sseeduino Stalker
  pinMode(8, OUTPUT);
}

void loop() {
  digitalWrite(8, HIGH); // set the LED on
  delay(1000);           // wait for a second
  digitalWrite(8, LOW); // set the LED off
  delay(1000);          // wait for a second
}
  
```

 At the bottom of the window, there is a status bar showing the number '10'.

Figura 16 – Tela de programação do *Arduino IDE*.

Capítulo 3: Fundamentação Teórica

Este capítulo apresenta o cenário para aplicação de monitoramento remoto dos equipamentos instalados em uma estação de tratamento de esgoto. O primeiro assunto tratado, na seção 3.1, é o sistema de esgotamento sanitário brasileiro, apresentando suas características. Em seguida, na seção 3.2, os principais tipos de tratamento utilizados e os equipamentos de aeração. Na seção 3.3, a planta de testes – ETE Camburi e por último, na seção 3.4 os benefícios da automação nessas estações e as diretrizes do monitoramento a ser utilizado.

3.1 Sistemas de Esgotamento Sanitário no Brasil

O tratamento de esgotos ainda é um grande desafio no Brasil. De acordo com pesquisa do IBGE, em 2008, apresentada na Pesquisa Nacional de Saneamento, 44,8% dos municípios brasileiros não coletam nem tratam os esgotos. Entre os 55,2% dos municípios que têm o serviço de coleta, apenas 22,2% tratam o esgoto coletado. Os municípios que não tratam o esgoto coletado, 33% possuem tubulações que o conduzem para despejo in natura, transformando rios e mares em focos para disseminação de doenças, afetando a qualidade da água e o ecossistema ambiental.

Os dados referentes ao esgotamento sanitário são bastante impressionantes. O volume de esgotos tratados é extremamente baixo, com apenas 8% dos municípios apresentando unidades de tratamento. Mesmo nesses, em geral, as estações de tratamento atendem a apenas uma parcela da população, as eficiências são reduzidas e problemas operacionais são freqüentes (Barros et al, 1995). A Figura 17 mostra o percentual de cobertura desses sistemas no Brasil.

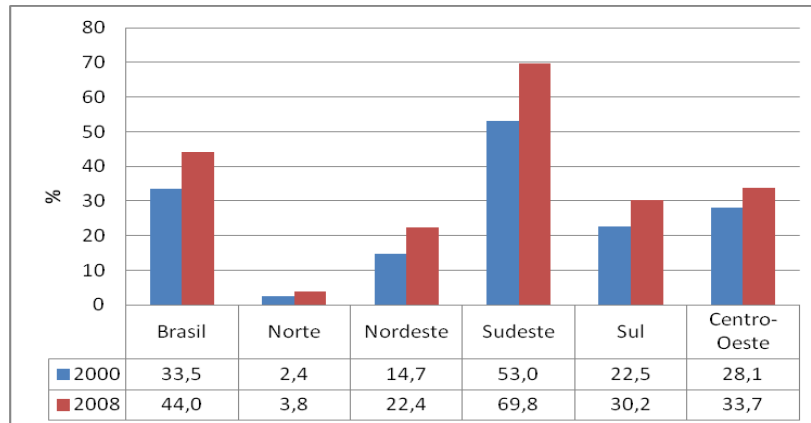


Figura 17 – Percentual de cobertura de domicílios com acesso a rede de esgotamento sanitário.

Fonte: (IBGE, 2012).

3.2 Tipos de Tratamento

De acordo com (Barros et al, 1995), de forma geral, os processos de tratamento de esgotos podem ser divididos entre:

Sistemas Simplificados:

Lagoas de estabilização: São construídas de forma simples, com diques de terra e os esgotos entram em uma extremidade e saem na extremidade oposta. Não possuem equipamentos instalados.

Disposição no solo: Os esgotos são aplicados no solo, fornecendo água e nutrientes necessários para o crescimento das plantas.

Reatores anaeróbios: Esse tipo de tratamento requer pouca área para sua implantação e o tratamento é efetuado por bactérias que não necessitam de oxigênio para sua respiração.

Sistemas mecanizados:

Lagoas de estabilização com aeração: Esse tipo de tratamento é similar ao de uma lagoa facultativa, porém é necessário fornecer oxigênio para auxiliar no tratamento. Esse oxigênio é fornecido por equipamentos mecânicos, denominados aeradores.

Filtros biológicos: A matéria orgânica é estabilizada por bactérias que crescem aderidas em um meio suporte (comumente pedras). Esses filtros requerem uma área inferior a das lagoas mecanizadas.

Lodos ativados: A matéria orgânica é removida por bactérias que crescem dispersas em um tanque de aeração. A biomassa (bactérias) do tanque de aeração sedimenta em um decantador permitindo que o efluente saia clarificado para o corpo receptor. Esse tipo de

tratamento requer reduzidas áreas para sua implantação e o que possui melhor eficiência dos sistemas citados anteriormente.

Com relação aos equipamentos de aeração (Jordão, 2005) usualmente são utilizados aeradores mecânicos, tipo aerador superficial, os quais podem ter a seguinte classificação:

- a) Em função do eixo:
 - Vertical;
 - Horizontal;
 - Inclinado.
- b) Em função do tipo de instalação:
 - Fixo (em estrutura de concreto armado);
 - Flutuante (montado sobre uma estrutura de flutuação).
- c) Em função da velocidade de rotação do motor:
 - De baixa rotação (menor do que 150 rpm);
 - De alta rotação (em torno de 1700 rpm)

Nos sistemas de aeração mecânica superficial, o oxigênio é introduzido no tanque de aeração graças à ação de agitadores mecânicos que promovem a exposição à atmosfera de pequenas partículas que são levantadas em grande quantidade, e sob forte agitação até uma altura acima do nível da água do tanque, permitindo assim a transferência de oxigênio e a dispersão e incorporação do ar no meio líquido. Logo, o funcionamento desses equipamentos é importante para o tratamento, uma vez que fornecem oxigênio dissolvido para os microorganismos que realizam o tratamento do esgoto.

A Figura 18 mostra o aerador superficial de eixo vertical, flutuante e de alta rotação utilizado na planta de testes desta dissertação.

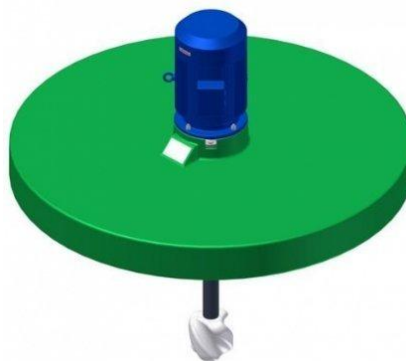


Figura 18 – Aerador superficial.

Fonte: (Ecosan, 2012)

3.3 ETE Camburi

A Estação de Tratamento de Esgoto Camburi – ETE Camburi, pertencente à Companhia Espírito Santense de Saneamento (CESAN), está localizada no município de Vitória-ES e possui área de, aproximadamente, 1,2km² (Figura 19). A referida estação é do tipo lagoa de estabilização (três lagoas, sendo uma aerada e duas facultativas), possuindo uma estação elevatória de recirculação interna que contém duas bombas de 3kW, utilizadas para bombear o sobrenadante da terceira lagoa para o início do processo. Na lagoa aerada existem 18 aeradores superficiais, sendo treze de 12kW e cinco de 15kW.



Figura 19 – ETE Camburi (vista aérea).

Fonte: (GoogleMaps, 2012)

A ETE Camburi possui uma vazão média de tratamento de 300 L/s e está situada próxima de um bairro residencial. A implantação dos aeradores na primeira lagoa garante a qualidade do efluente tratado, propicia a redução de odor desagradável e, conseqüentemente, minimiza as reclamações da comunidade.

Apesar de a estação possuir sistema de aeração, a mesma não possui nenhum nível de automação em seu processo.

3.4 Automação de ETE

A automação constitui hoje uma ferramenta fundamental ao desenvolvimento operacional das estações de tratamento. Não apenas facilita o controle operacional, como pode tornar-se fator de economia para a própria operação. Exemplos típicos são:

- Coletores de amostra automatizados;

- Os sensores de qualidade interligados ao sistema de comando, como os sensores de oxigênio dissolvido, interligados ao sistema de aeração;
- Dispositivos temporizadores, comandando, por exemplo, a abertura ou fechamento de válvulas;
- Medidores, transmissores, registradores oferecendo maior confiabilidade e segurança operacional;
- Monitoramento remoto dos equipamentos instalados na planta, garantindo a operacionalidade dos equipamentos da estação e conseqüentemente sua eficiência.

Um dos grandes desafios para automatizar uma planta de tratamento de esgoto são as condições precárias de instalação dos equipamentos. Muitos deles são instalados em locais contaminados e de difícil acesso, impossibilitando a manutenção preventiva ou o monitoramento através de cabos, devido às dificuldades apresentadas para a remoção ou instalação dos mesmos.

Logo, a proposta desta dissertação é implementar um monitoramento remoto dos equipamentos presentes na ETE Camburi, especificamente em 3 (três) aeradores superficiais, utilizando redes de sensores sem fio com tecnologia *ZigBee* para a aplicação. A escolha desses equipamentos se deve, principalmente, ao local de instalação, onde o acesso é realizado através de barcos nas lagoas e que não há qualquer manutenção preventiva, impossibilitando, por exemplo, prever qualquer anomalia no funcionamento. Adicionalmente ao monitoramento remoto desses equipamentos, enfatizando os parâmetros de temperatura do estator do motor e corrente elétrica, é proposta também o acionamento remoto desses motores de forma a modular a quantidade de motores instalados, ratificando a confiabilidade e disponibilidade da tecnologia adotada.

Além do monitoramento das condições dos aeradores, a temperatura ambiente e a umidade relativa do ar da estação são parâmetros que são obtidos através da rede de sensores instalada.

Capítulo 4: Monitoramento de Equipamentos

Eletromecânicos

Neste capítulo é apresentada a RSSF proposta para monitoramento de equipamentos eletromecânicos. Na seção 4.1 é descrita a implantação da rede, com a análise do ambiente a ser monitorado, o desenvolvimento e a configuração dos nós sensores e na seção 4.2 é apresentada a aplicação de monitoramento, com os algoritmos dos nós sensores e a aplicação que recebe as informações enviadas por esses nós.

4.1 Implantação da RSSF

Nesta seção é apresentado o desenvolvimento da infraestrutura da RSSF utilizada para o monitoramento de equipamentos eletrônicos. Na seção 4.1.1 é mostrada a análise do cenário utilizado para os experimentos da solução proposta, na seção 4.1.2 é apresentado o desenvolvimento dos kits de monitoramento, na seção 4.1.3 a configuração e instalação dos microcontroladores e sensores. Já a seção 4.1.4 mostra a configuração do rádio XBee e na seção 4.1.5 sua integração com o microcontrolador. A montagem dos nós sensores nos equipamentos da planta e as fontes de energia utilizadas são apresentadas nas seções 4.1.6 e 4.1.7 respectivamente.

4.1.1 – Planta de testes utilizada

Como já citado na seção 3.3, a planta de testes desta dissertação é a ETE Camburi. Inicialmente os testes de campo realizados para medir o alcance de sinal *ZigBee* contemplavam um nó coordenador e outro nó roteador, móveis, utilizados em pontos espalhados em uma área que corresponde aproximadamente 1,2 km².

Com o sucesso dos testes realizados, é apresentada uma proposta de como seria a rede na estação. Foram escolhidos (três) aeradores superficiais para monitoramento (nós 2,3 e 4), a sala elétrica para acionamento desses 3 conjuntos (nó 5), a elevatória de recirculação interna (nó 7) e um kit móvel para dispor em qualquer lugar da estação (nó 6). O nó coordenador (1) e o nó roteador (8), responsáveis por concentrar e disponibilizar os dados via Internet, estão dispostos no prédio administrativo da estação. A Figura 20 mostra as dimensões da lagoa, assim como a disposição e configuração escolhida para instalação dos kits de monitoramento.

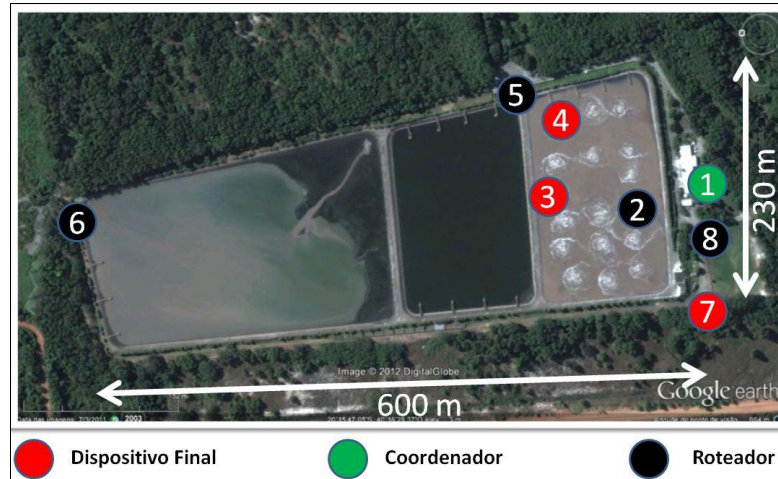


Figura 20 – Disposição dos nós sensores nas lagoas de tratamento.

Com os pontos previamente escolhidos, optou-se em utilizar nós roteadores e dispositivos finais a fim de que, caso um desses dispositivos ficasse inoperante, o roteamento automático fosse realizado, mantendo assim a disponibilidade da rede integralmente. Após a fase de estudos dos pontos estratégicos de monitoramento, foram adquiridos os componentes necessários para a montagem de todos os protótipos, que é mostrado a seguir.

4.1.2 – Desenvolvimento dos kits de monitoramento

Para o projeto, foram adquiridos 5 (cinco) microcontroladores *Arduino Stalker*, 8 rádios *XBee*, 1 *Arduino Duemilanove*, 1 *Uart-Bee*, que é utilizado para configurar os microcontroladores *Arduino* e onde fica conectado o nó coordenador, 1 *Shield*, para inserção do *XBee* no *Duemilanove*, antenas, baterias, sensores de temperatura, corrente elétrica e umidade, painéis solares, caixas herméticas com grau de proteção IP 68, bases de acrílico projetados especialmente para acomodação dos painéis solares e componentes eletrônicos para prover a parte de acionamento de potência na sala elétrica.

Inicialmente é necessário realizar a programação dos microcontroladores e rádios em bancada a fim de simular todo o funcionamento da rede *ZigBee* que seria disponibilizada. A instalação e manutenção nos aeradores superficiais demandam muito tempo e geram riscos pertinentes no manuseio desses equipamentos. Logo, todos os testes deveriam ser feitos com total segurança para que as intervenções no local fossem as mínimas possíveis. A Figura 21 ilustra como é feito a remoção/inserção dos aeradores na lagoa, através de operadores utilizando barcos.



Figura 21 – Remoção dos aeradores na lagoa com a utilização de barco.

Adicionalmente às condições citadas anteriormente, especialmente no que diz respeito aos equipamentos de aeração, esses estão sujeitos a intempéries tais como: sol, chuva, ventos, maresia e ainda a gases provenientes da decomposição do esgoto bruto, especialmente H_2S – Gás Sulfídrico, que são altamente corrosivos em equipamentos eletrônicos.

Logo, diversos fatores para o êxito desta proposta deveriam ser analisados, pois as condições externas são as piores possíveis, conseqüentemente as intervenções humanas deveriam ser as mínimas, considerando os riscos inerentes a atividade o que levou a escolha de utilização das Redes de Sensores Sem Fio para essa aplicação.

4.1.3 Microcontroladores e sensores

Um dos fatores que mais dilatou o tempo de conclusão da proposta foi a programação dos microcontroladores juntamente com os dados recebidos dos sensores.

A programação no microcontrolador *Arduino* requereu estudo da linguagem de programação utilizada, assim como a integração dessa programação à leitura dos sensores. A partir disso, é necessário realizar a calibração de todos eles, para garantir que os parâmetros lidos estejam corretos. A Figura 22 ilustra os sensores utilizados no projeto.



Figura 22 – Sensores utilizados.

Entretanto, para inserir os sensores nas portas analógicas do microcontrolador *Arduino* houve a necessidade de se desenvolver pequenas placas com ponte de resistores, para ajustar o nível de tensão nos conversores analógico-digitais do microcontrolador. Essas placas foram projetadas já prevendo a alimentação de 3,3V provenientes do pino 3V3 e terra do pino GND do microcontrolador. Foram desenvolvidas várias placas iguais, no intuito de que qualquer kit pudesse utilizar 3 tipos de sensores diferentes (temperatura, umidade e corrente elétrica). A Figura 23 ilustra a placa desenvolvida conectada ao microcontrolador *Arduino*. Já a Figura 24 mostra o esquema elétrico presente na placa para os sensores utilizados.

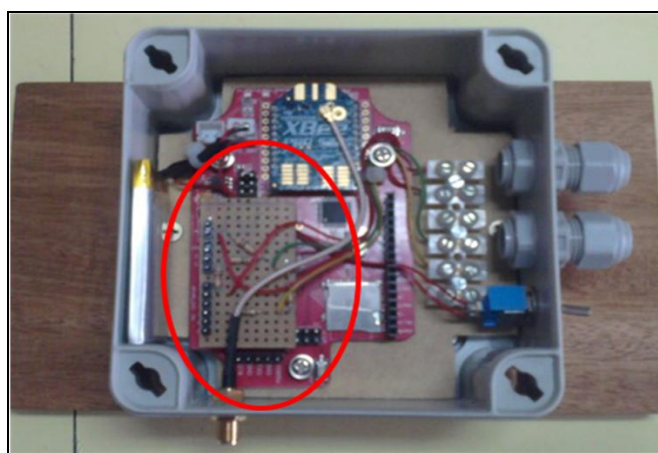


Figura 23 - Placa de resistores para conexão dos sensores.

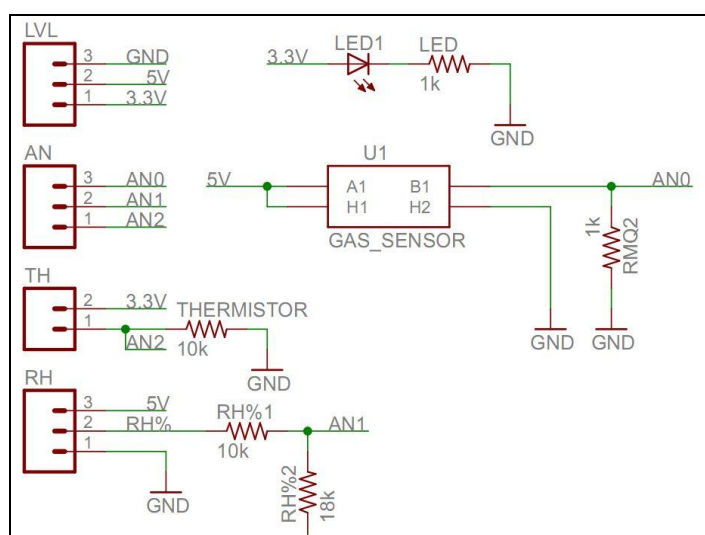


Figura 24 – Esquema elétrico utilizado para o funcionamento dos sensores.

Para que a leitura seja realizada de forma correta, são utilizados outros sensores para medir umidade, temperatura e corrente elétrica, adicional aos sensores adquiridos. A partir de então os valores são comparados de acordo com a aplicabilidade de cada um. Resumidamente

são utilizados conversores analógico-digitais na programação do microcontrolador *Arduino*, sendo que esses dados são disponibilizados na tela *Terminal* do *software* de programação (*Arduino IDE*), através do dispositivo de conexão USB denominado *Uart-Bee*. No Apêndice A são mostradas as rotinas utilizadas para leitura de cada sensor.

4.1.4 Configuração do Rádio de Comunicação

Antes de inserir e realizar a comunicação dos microcontroladores, é preciso conhecer as características do rádio *XBee* e suas funcionalidades para a aplicação. Para a execução dos experimentos, os rádios são configurados sem criptografia de dados, identificação da rede (PAN ID): 777, canal 19, modo AT, nível de potência de rádio em 4 (máximo) e velocidade de comunicação serial em 9600 bps, sem paridade, 1 bit de parada e sem controle de fluxo. Inicialmente os testes foram realizados somente com o *XBee*, através do adaptador *Uart-Bee* (Figura 25). Foram testados todos os módulos e configurados para a aplicação, sendo escolhidos o nó coordenador, roteadores e dispositivos finais.

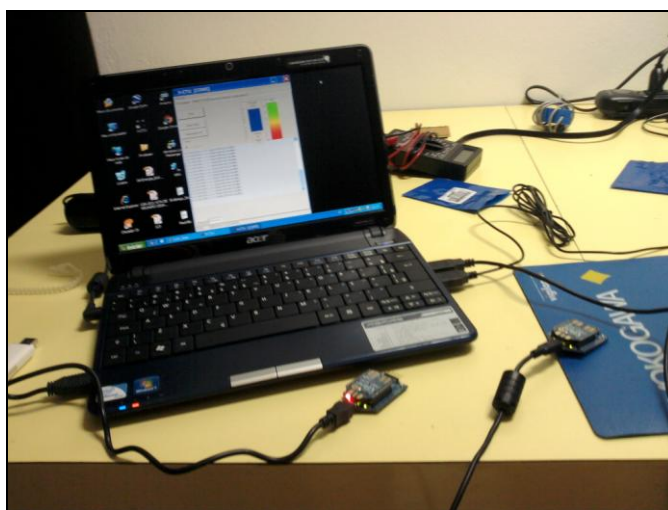


Figura 25 – Testes com *XBee*.

Na Tabela 6 são apresentados os endereços de 16 bits dos rádios utilizados, bem como a função exercida por cada nó e o nome dado a cada um deles no projeto.

Tabela 6 – Configuração dos rádios *XBee*.

Nome do Nó	Função	End. 16 bits
ZBC	Coordenador	0013A200406CBCC5
ZBED-#8-CTEMP	Dispositivo Final – Aerador	0013A200406EE3CC
ZBRL-#1-TEMP	Roteador - Aerador	0013A200406EE3CB
ZBED-#3-TEMP	Dispositivo Final - Aerador	0013A200406EE2CD
ZBED-EEEB	Dispositivo Final – Elevatória Interna	0013A200406EE3CC
ZBR-MOVEL-TEMP	Roteador – Kit de monitoramento móvel	0013A200406F2203
ZBR-P	Roteador – Kit de acionamento dos motores	0013A200406EE294
ZBR-ETHERNET	Roteador - Ethernet	0013A200406F2168

Para verificar o funcionamento da rede, são realizados os testes no *software* X-CTU e posicionados os rádios de forma que quando um dispositivo final, por exemplo, perdesse a conexão com o coordenador e próximo houvesse um roteador ligado, automaticamente o *XBee* configurado como dispositivo final deveria se associar ao roteador mais próximo, evento esse executado de acordo com as funcionalidades da tecnologia *ZigBee*. Através do *software*, utilizando a aba *Modem Configuration* e clicando em *Discover*, é possível visualizar a estrutura da rede formada, conforme Figura 26.

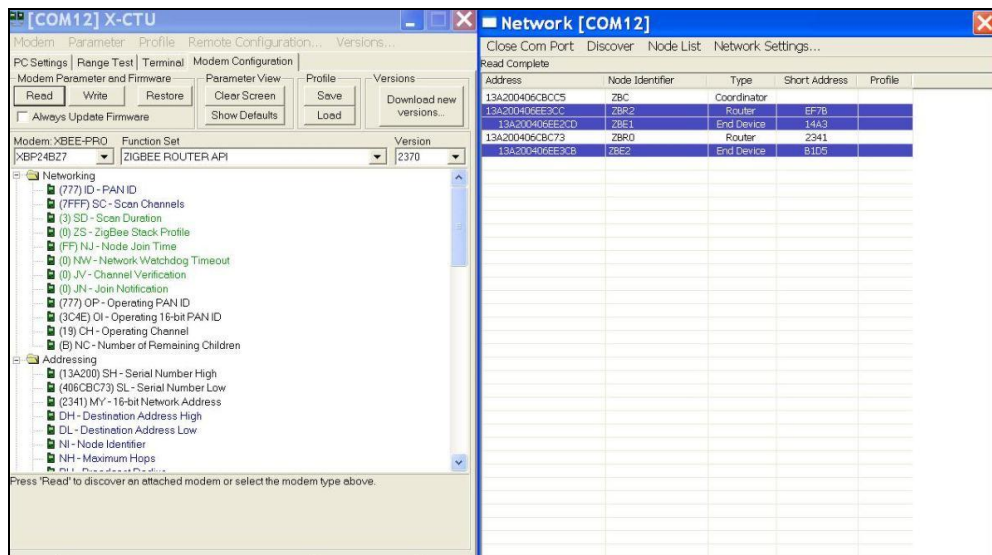


Figura 26 – Disposição da rede formada vista no X-CTU.

Com todos os rádios configurados de acordo com o *layout* proposto na estação, a próxima etapa se refere a transmitir os dados capturados pelos sensores, conectando os módulos *XBee* nos microcontroladores *Arduino Stalker* e recebê-los no nó coordenador,

através de um PC conectado a porta serial, utilizando inicialmente a tela *Terminal* do X-CTU. Na próxima seção é apresentada essa integração, assim como os problemas ocorridos nessa fase.

4.1.5 Integração Microcontrolador e Rádio Comunicador

O microcontrolador *Arduino Stalker* possui um *socket* para instalação do *XBee*. Isso facilita a aplicação, pois nesse caso não é necessária a utilização de *Shield* para conectar o rádio ao microcontrolador. Entretanto, é preciso habilitar a porta de comunicação serial do microcontrolador para que os dados recebidos pelos sensores sejam enviados pelo rádio. Essa função é realizada na própria programação do mesmo.

Para identificar os dados recebidos de cada kit de monitoramento, as leituras provenientes dos sensores de temperatura, umidade e corrente elétrica são concatenadas dentro de colchetes, onde cada letra representava a variável correspondente de um determinado kit. Isso facilita principalmente o desenvolvimento da aplicação das telas sinópticas (supervisório). A Tabela 7 mostra as variáveis escolhidas e sua correspondência ao kit de monitoramento instalado.

Tabela 7 – Lista das variáveis de leitura de cada kit de monitoramento.

Identificador	Variável	Kit	Instalação
Temperatura	T	ZBED-#8- CTEMP	Aerador #8
Corrente	C		
Bateria	B		
Temperatura	M	ZBRL-#1- TEMP	Aerador #1
Bateria	Q		
Temperatura	K	ZBED-#3- TEMP	Aerador #3
Bateria	P		
Temperatura	D	ZBED-EEEEB	Elevatória de Recirculação
Corrente	N		
Umidade	U		
Temperatura	L	ZBR-MOVEL- TEMP	Kit de monitoramento móvel
Bateria	J		

Concluída a parte de concatenação dos dados, é preciso realizar os testes de comunicação. Inicialmente é utilizado apenas um dispositivo final e o coordenador, onde os dados eram recebidos a cada 50ms. A Figura 27 ilustra o recebimento dessas informações na tela *Terminal* do X-CTU.

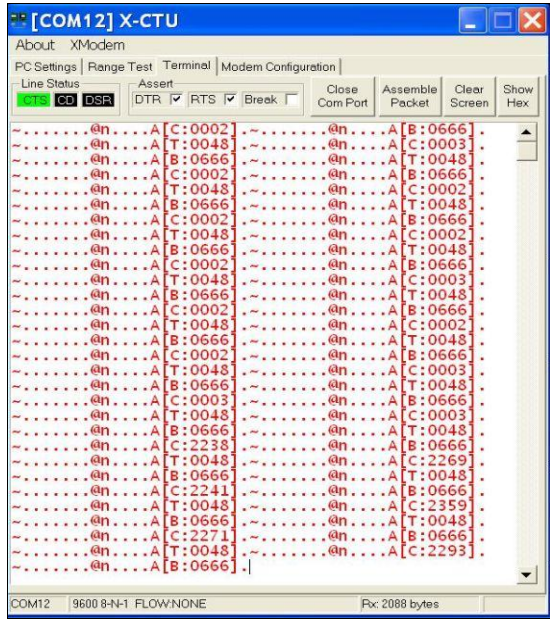


Figura 27 – Dados recebidos do módulo em teste configurado como dispositivo final.

Inicialmente, a configuração dos rádios estava no modo AT e todos os dados recebidos pelo *XBee* eram colocados no *buffer* para transmissão via RF. Quando apenas um kit comunicava a recepção dos dados era correta, entretando quando eram colocados 2 (dois) ou mais kits esses dados se sobrescreviam, inclusive dentro dos colchetes, impossibilitando a leitura correta e disponibilidade futura para as telas do supervisor. A Figura 28 mostra como era a sobreposição dessas informações.

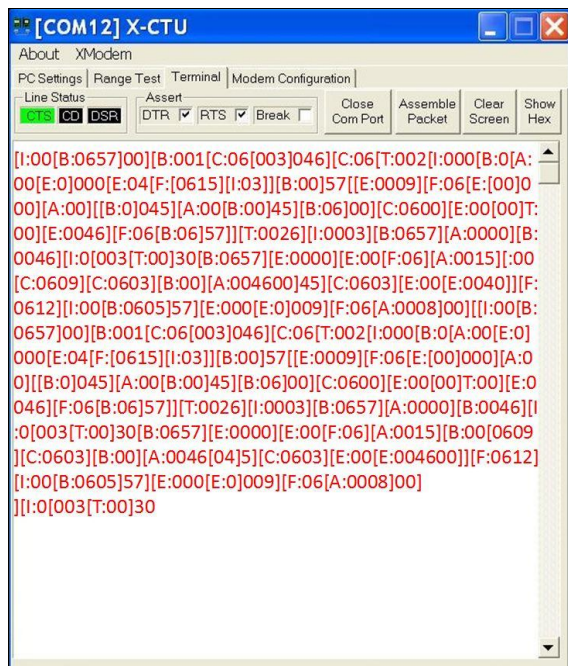


Figura 28 – Sobreposição dos dados recebidos de vários kits.

Após estudos e verificações do que poderia estar acontecendo, é proposta a mudança da programação do microcontrolador *Arduino* para o formato de envio por pacotes, bem como a configuração dos rádios para o modo API. A partir dessa modificação, é possível realizar a comunicação de vários módulos sem que haja a sobreposição de dados, facilitando assim a leitura e a possibilidade de usar essas informações no desenvolvimento das telas sinópticas.

Para validar o funcionamento da rede, são realizados testes, onde os nós sensores enviam informações para o nó coordenador. Ocorreu o roteamento de dados de cada módulo sensor, fornecendo as informações de temperatura, umidade, corrente elétrica e tensão na bateria. Pode-se notar que muitos dados são enviados de forma muito rápida (50ms) e que para a aplicação não seria necessário esse curto espaço de tempo de envio, associado ainda ao consumo exagerado que esses módulos poderiam ter em decorrência desse tempo de transmissão. Optou-se então escolher esse envio a cada 5s, efetuando testes de recebimento e autonomia da bateria a partir dessa mudança.

Os sensores convertem os valores medidos no ambiente em níveis de tensão, como já descrito na seção 4.1.3, que por sua vez são tratados pelos conversores analógico-digitais do microcontrolador. Os conversores analógicos do *Arduino Stalker* possuem resolução de 10 bits, transformando os níveis de tensão fornecidos pelos sensores em valores decimais, com variação desses entre 0 a 1023, podendo, então, converter esses valores no formato em graus *Celsius*, por exemplo.

4.1.6 Montagem dos kits de monitoramento

Concluída a parte de configuração e testes em bancada de todos os módulos sensores (kits de monitoramento) previamente configurados, é preciso escolher o melhor local onde esses equipamentos eletrônicos seriam instalados juntos aos aeradores superficiais e painéis existentes na estação.

Inicialmente foram adquiridas caixas herméticas com grau de proteção IP 68 para acomodação do microcontrolador, rádio, ponte de resistores para conexão dos sensores, antena e painel solar. Para a fixação desses painéis, foram confeccionadas bases em acrílico para acomodação, facilitando assim a instalação e posicionamento desses painéis junto aos aeradores. A Figura 29 mostra os módulos montados.



Figura 29 – Kit de monitoramento montados sob a base do motor do aerador.

Para a passagem dos cabos, evitando assim contaminação por umidade ou líquidos, são utilizados prensa-cabos. Adicionalmente um interruptor é utilizado para realizar *reset* no módulo caso fosse necessário, sem necessidade de abrir a caixa. Durante os primeiros dias, o funcionamento foi ininterrupto e preciso, sem problema de qualquer natureza. Entretanto, após chuvas, houve contaminação e foi preciso retirar os 2 (dois) módulos instalados inicialmente. A Figura 30 mostra a contaminação de líquido proveniente do chicote elétrico do painel solar.

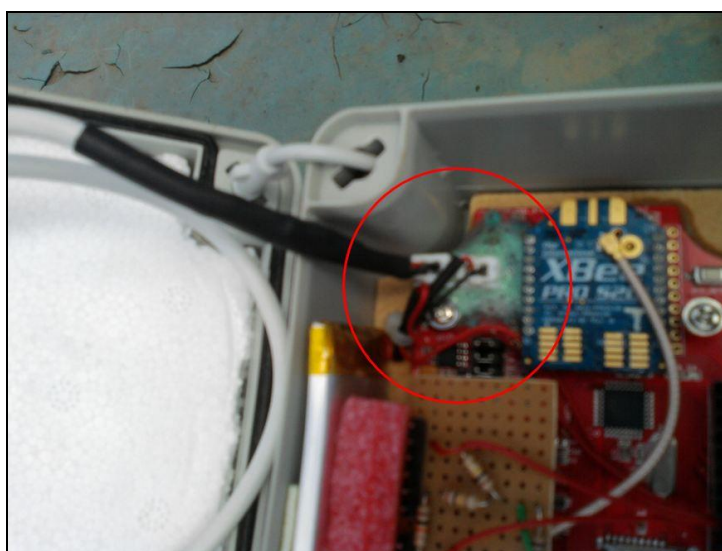


Figura 30 – Contaminação por água de chuva.

As adversidades a que os módulos estavam submetidos eram críticas. Foi necessário refazer todas as conexões, especialmente no que diz respeito aos prensa-cabos e chicotes, mas

mesmo assim, após outra chuva houve novamente a contaminação. Para corrigir essa anomalia, foram desenvolvidos invólucros de acrílico nesses dispositivos para que pudessem ser melhores protegidos de chuvas. A partir desse desenvolvimento, o problema foi sanado, como mostra a Figura 31.



Figura 31 – Suporte de acrílico para proteção contra chuvas.

Quanto a montagem no painel elétrico para acionamento dos motores e na elevatória de recirculação interna, não houve a necessidade de proteção contra intempéries, pois os mesmos estavam instalados em locais abrigados e protegidos contra sol e chuva. As Figuras 32 e 33 ilustram a instalação desses dois kits de monitoramento.

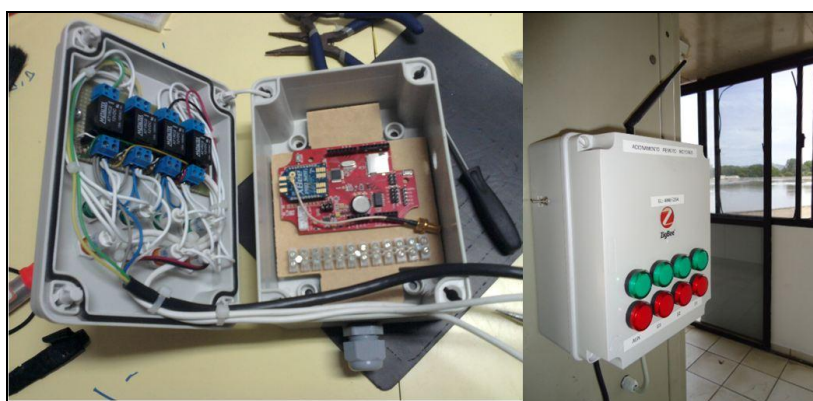


Figura 32 – Unidade responsável pelo acionamento dos motores.



Figura 33 – Unidade responsável pelo monitoramento de temperatura ambiente, umidade relativa do ar e corrente elétrica da bomba de recirculação interna.

A instalação dos sensores de temperatura era realizada junto aos estatores dos motores elétricos e o de corrente elétrica nas caixas de ligações dos mesmos, através de *clamps*. O sensor de umidade está instalado na parte externa do invólucro do painel.

O kit móvel é composto por sensor de temperatura e idêntico ao instalado no aerador.

4.1.7 Fontes de Energia

Para suprir energeticamente os kits de monitoramento, são utilizados painéis solares de 1W cada para os kits instalados nos aeradores superficiais, juntamente com baterias LiPo (Polímero de Lítio) de 980maH. Isso justifica a não utilização de transformadores de tensão (os motores são alimentados em 440Vac) e isola eletricamente o módulo do conjunto de aeração. Já no kit responsável pelo acionamento dos motores e pelo monitoramento da temperatura e umidade ambiente, são utilizadas fontes ATX (utilizadas em microcomputadores), pois é necessário 12Vcc para acionamento dos relés, 3,3Vcc para alimentação do *Arduino/XBee* e 5Vcc para alimentar o sensor de umidade. A Figura 34 mostra os painéis e fontes utilizados para prover alimentação elétrica a esses componentes.



Figura 34 – Pannel solar e fontes ATX utilizados para alimentar os módulos sensores.

4.2 Aplicação de Monitoramento

Esta seção apresenta o desenvolvimento da aplicação de monitoramento e dos algoritmos para tratamento e envio dos dados dos nós sensores para o nó coordenador. A seção 4.2.1 apresenta uma visão geral sobre os requisitos de uma aplicação de monitoramento de equipamentos eletromecânicos. Na seção 4.2.2 é apresentada a instalação dos nós sensores. Na seção 4.2.3 e 4.2.4 são mostradas as aplicações desenvolvidas para disponibilidade dos dados coletados na RSSF, em supervisorio (telas sinópticas) e na Internet respectivamente.

4.2.1 Monitoramento de Equipamentos eletromecânicos

Como não existia nenhum monitoramento dos equipamentos instalados na lagoa (motores elétricos) e o sensoriamento por fios seria oneroso, considerando as distâncias dos equipamentos até a sala elétrica, assim como as condições por onde esse cabeamento passaria (submerso nas lagoas), a proposta de utilização de um sensoriamento sem fio é considerada como melhor solução, principalmente considerando a tecnologia *ZigBee* devido as características já citadas na seção 2.2.

Se não se considerar o desgaste das peças com o uso, como escovas e enrolamentos, a vida útil de um motor elétrico é determinada pelo material isolante. Um aumento de 8 a 10 graus na temperatura desse isolante reduz sua vida útil pela metade. A vida útil da isolação em termos de temperatura de trabalho, bem abaixo daquela em que o material se queima, refere-se ao envelhecimento gradual ou isolante, que vai se tornando ressecado, perdendo o poder de isolação, até que não suporte mais a tensão aplicada e produz o curto-circuito.

A definição das classes de isolamento depende do material empregado na isolação e limite de temperatura do mesmo. Para fins de normatização, os materiais isolantes e os sistemas de isolamento são agrupados em classes de isolamento, cada qual definida pelo respectivo limite de temperatura, ou seja, pela maior temperatura que o material pode suportar continuamente sem que seja afetada a sua vida útil.

As classes de isolamento utilizadas em máquinas elétricas, assim como os respectivos limites de temperatura, conforme a norma ABNT NBR 7094 são mostrados na Tabela 8.

Tabela 8: Classe de isolamento dos motores elétricos

Classe	Temperatura
A	105°C
E	120°C
B	130°C
F	155°C
H	180°C

A fim de evitar danos de maiores proporções nos equipamentos instalados e manter a eficiência da estação, o monitoramento da temperatura nos estatores dos motores e corrente elétrica é fundamental para prever falhas nesses dispositivos. A classe de isolamento dos equipamentos instalados na planta é “A” e o aumento gradual da temperatura de trabalho ou da corrente elétrica (acima da nominal) implica que é necessário intervir na manutenção do mesmo.

Para obter esses parâmetros, o sensor de temperatura é inserido através de um orifício construído na caixa de ligação. O *clamp* de corrente é inserido em uma das fases dentro dessa mesma caixa. A Figura 35 ilustra os pontos desses sensores.

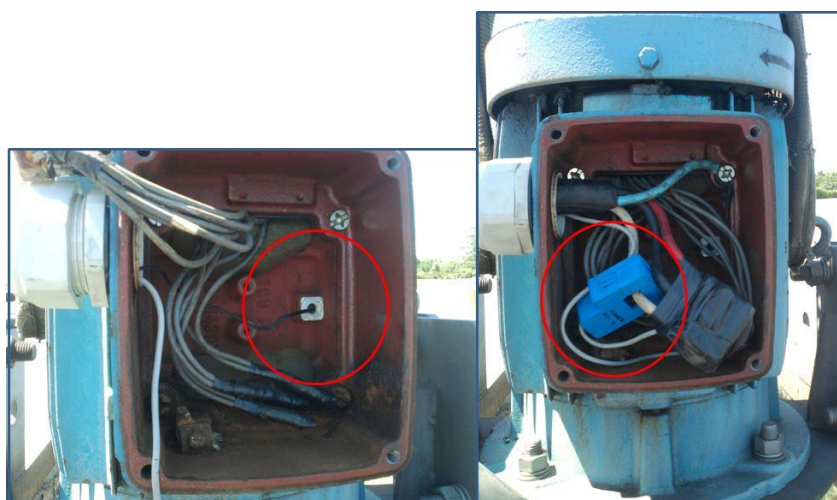


Figura 35 – Sensores instalados nos motores.

4.2.2 Instalação dos nós sensores

Concluída a parte de montagem dos kits de monitoramento e após testes com dois kits na lagoa é realizada a instalação dos demais kits na planta e iniciada a rede, como mostra a Figura 36, em detalhes.

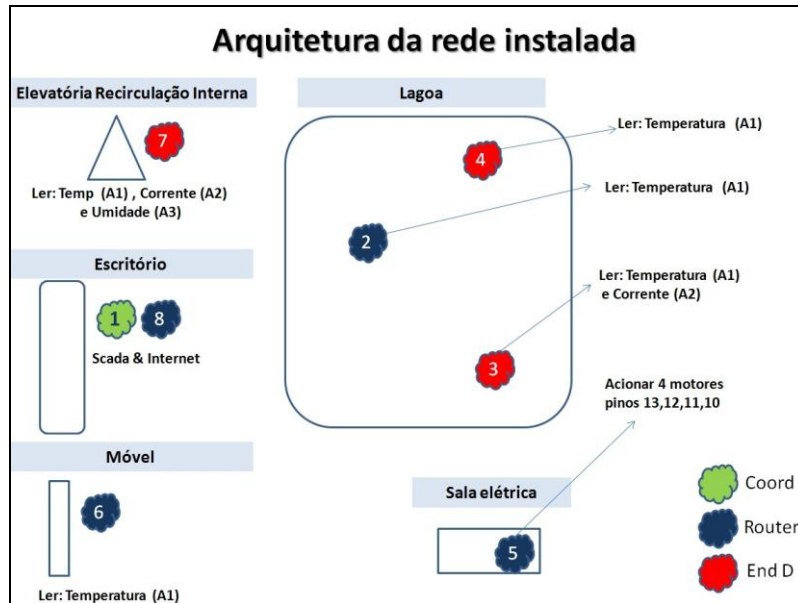


Figura 36 – Arquitetura da rede instalada na ETE Camburi.

Como as simulações já haviam sido realizadas em bancada e os pontos na estação escolhidos, sejam eles roteadores ou dispositivos finais (*end devices*), restou concluir de que forma a rede seria estabelecida, considerando as dimensões e posicionamento de todos esses nós. A Figura 37 ilustra como a rede está estabelecida, usando a ferramenta *Remote Configuration* do software X-CTU.



Figura 37 – Rede ZigBee estabelecida.

Quanto à topologia, uma rede estrela tem sua área de cobertura limitada ao alcance do nó central (seu alcance limitado a disponibilidade do nó central), além de não funcionar necessariamente com roteamento de quadros. Já uma rede árvore pode aumentar sua área de cobertura com a adição de roteadores. Uma rede em malha (mesh) tem sua topologia dinâmica e auto-configurável, ou seja, com redundância de rotas entre os nós. Neste caso, caso o roteador 2 fique indisponível, por exemplo, o novo roteador na rede será o nó 5 presente na sala elétrica, justificando assim a rede estabelecida nessa configuração.

4.2.3 Aplicação *CESAN_Esgoto*

Para monitorar os dados recebidos da RSSF instalada, é desenvolvida uma aplicação para tratar esses dados, obtidos através do nó coordenador. A aplicação *CESAN_Esgoto* recebe informações do nó coordenador através da porta USB do laptop. Esses dados são tratados pela aplicação, onde cada letra corresponde a medição de um parâmetro de um determinado nó sensor, como informado na seção 4.1.5. A tela da aplicação desenvolvida no programa Visual C# pode ser vista na Figura 38.

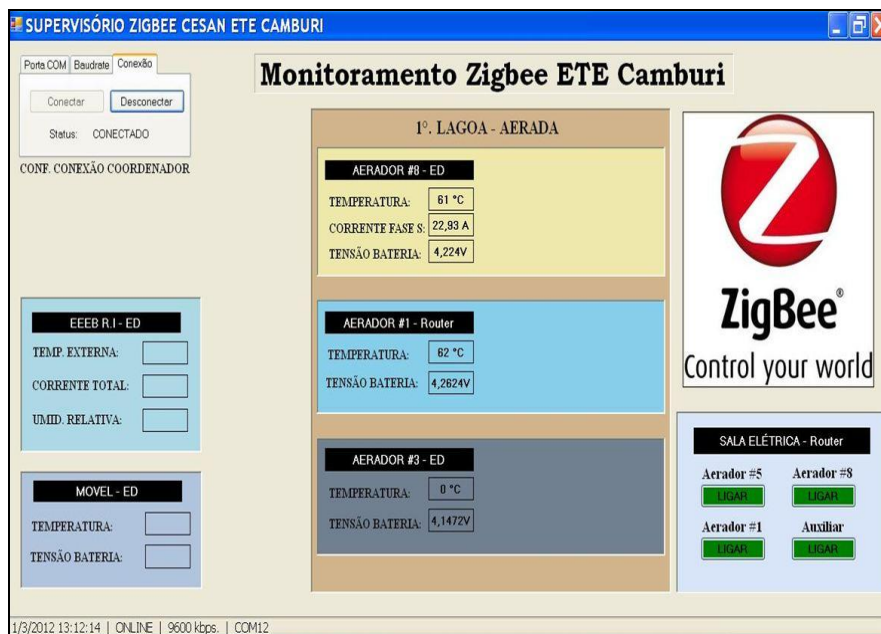


Figura 38 – Aplicação *CESAN_Esgoto*.

Quando a aplicação é executada, os dados recebidos dos vários nós instalados na planta são tratados de acordo com as variáveis que representam. Dessa forma, o algoritmo decodifica essas informações inserindo na tela os valores obtidos para temperatura, corrente elétrica, tensão da bateria e umidade relativa do ar. Já para os botões de acionamento dos

motores, visto que os mesmos são acionados somente pelo rádio *XBee*, o acionamento das portas é realizado através de endereçamento hexadecimal, ou seja, para cada pino de saída acionado remotamente, faz-se necessário que seja enviado um comando de outro rádio (nesse caso o coordenador). Para obter a tabela de endereçamento de acionamento desses pinos, foi utilizado o software RCOM-MeshBee, Figura 39.

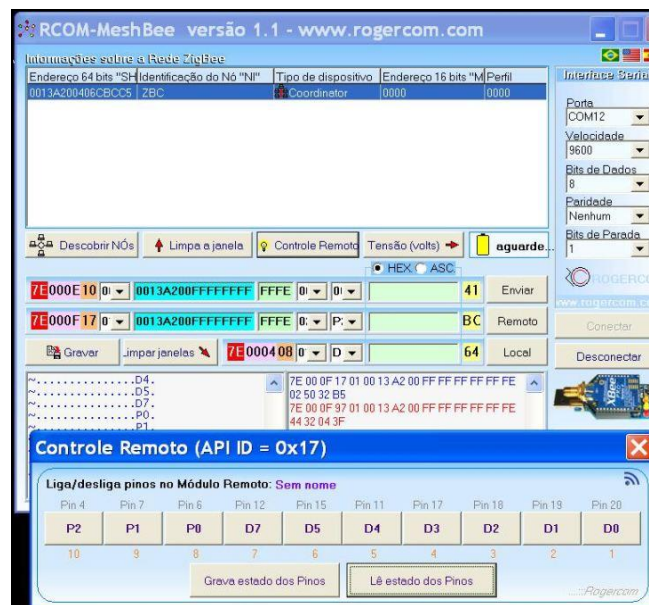


Figura 39 – RCOM-MeshBee para mapeamento do endereçamento hexadecimal de comandos enviados.

Fonte: (Rogercom, 2012)

Logo, quando uma informação de um determinado nó sensor é enviada ao nó coordenador, os dados são automaticamente atualizados na aplicação, assim como quando é efetuado um acionamento remoto, onde o pacote é imediatamente enviado a seu destino final.

4.2.4 Aplicação *CESAN_Esgoto Ethernet*

Da mesma forma que os dados são recebidos no nó coordenador e disponibilizados através de telas sinópticas, o algoritmo utilizado nos microcontroladores também é responsável por enviar uma cópia desses dados a um *XBee* configurado no modo roteador conectado a um microcontrolador *Arduino Duemilanove*. O tratamento dos dados efetuado por esse microcontrolador é similar ao desenvolvido no *Visual C#*, entretanto esse é responsável por disponibilizar as informações através de uma página HTML. Todas as configurações de endereçamento IP e outros pertinentes a disponibilidade dessa página está desenvolvida dentro da programação, juntamente com a decodificação dos dados, utilizando o

Arduino IDE. A Figura 40 mostra o equipamento utilizado. Observa-se que nesse caso é necessário a utilização de um *shield* para acoplar o rádio *XBee* ao microcontrolador.

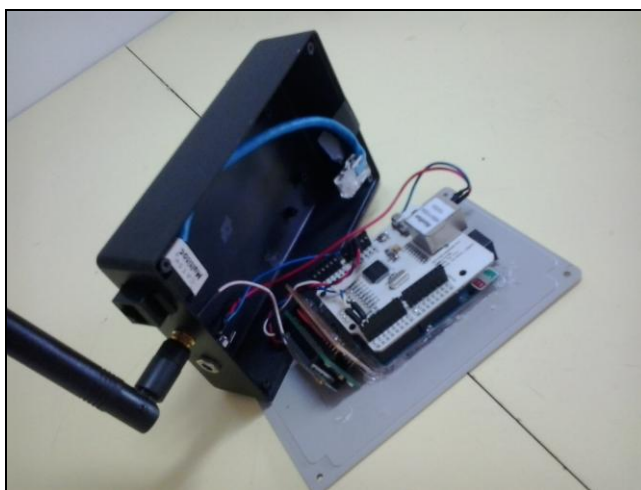


Figura 40 – *Arduino Duemilanove* utilizado para disponibilizar os dados via Ethernet.

Considerando a possibilidade de disponibilizar esses dados através da Internet, esse kit é conectado a um roteador 3G TP-LINK, onde o acesso é realizado através do endereço IP válido da conexão do modem com a Operadora, Figura 41.

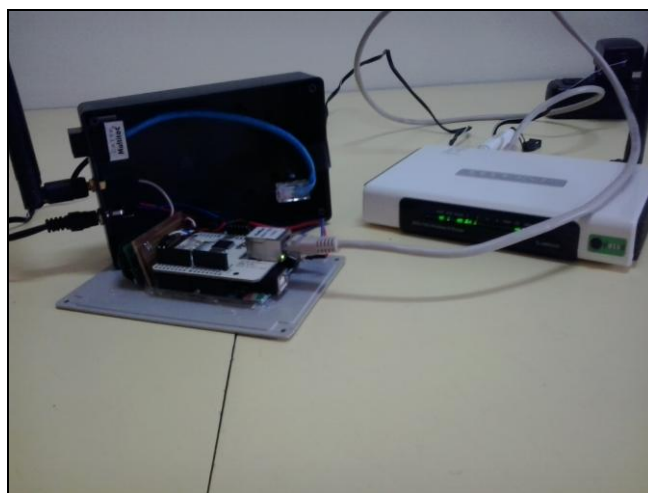


Figura 41 – Interligação da RSSF com Banda Larga.

A programação utilizada para realizar as configurações anteriormente descritas pode ser encontrada no Apêndice B. A página HTML desenvolvida para a aplicação pode ser visualizada na Figura 42. Para o acesso em rede local, o acesso era realizado através do IP 192.168.1.45:75. Externamente o acesso é realizado pelo IP válido da conexão, adicionando a porta 75 no endereçamento.

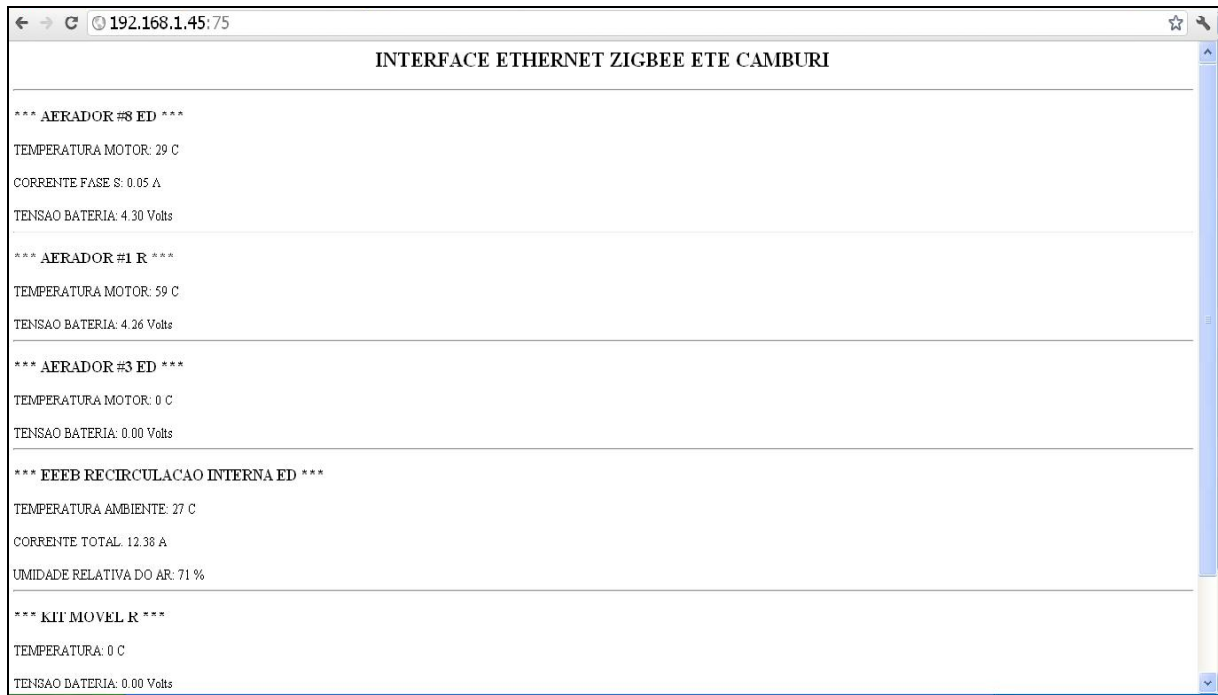


Figura 42 – Página HTML para disponibilização dos dados da RSSF.

5. Resultados Obtidos

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos. Na seção 5.1 é mostrada a autonomia da rede quando se utiliza baterias e painéis solares. Já o tráfego transmitido e o tempo de resposta da rede *ZigBee* instalada são apresentadas nas seções 5.2 e 5.3 respectivamente. Os dados coletados dos kits de monitoramento são mostrados na seção 5.4. Os testes de interferência realizados na seção 5.5. Os custos envolvidos no desenvolvimento e os desafios para implementação do sistema nas seções 5.6 e 5.7 respectivamente.

5.1 Autonomia da rede

São avaliados os kits de monitoramento alimentados por bateria e painéis solares presentes nos aeradores superficiais. Esses módulos são alimentados por 1 (uma) bateria LiPo de 980mAh e dois painéis solares, sendo que cada possui 1W de potência. No total, estão instalados 3 (três) kits, sendo 2 (dois) deles configurados no modo dispositivo final e o outro como roteador.

O primeiro experimento utiliza os módulos configurados como dispositivo final sem o modo de dormência do rádio *XBee*. O resultado desse experimento retrata a queda de tensão das baterias, principalmente no período noturno, onde não há carga pelos painéis solares. Percebe-se também que o consumo do módulo roteador é superior e caso não se tenha incidência solar por 2 (dois) dias, por exemplo, a comunicação desse módulo pode ser prejudicada. Para os testes realizados, o algoritmo dos microcontroladores previa uma transmissão a cada 5s, sendo que o rádio *XBee* ficava ligado durante todo o tempo (modo *sleep* desligado).

Já com o modo *sleep* habilitado no modo cíclico (*cyclic sleep*), a única alteração em relação ao experimento anterior é que os rádios configurados como dispositivos finais ficavam desligados enquanto o microcontrolador não transmitia. Isso permitiu um aumento da autonomia desses kits, em média 30%. Na Figura 43 é apresentada a comparação dos experimentos realizados. O rádio configurado como roteador não pode ser parametrizado em modo *sleep*, pois é um elemento de constituição da rede. Para que fosse garantida sua autonomia com dias de pouca incidência solar, foram instalados 2 (duas) baterias, totalizando 1960mAh e 4 painéis solares, pois o consumo em relação aos módulos configurados como dispositivos finais é exatamente o dobro, quando esses não estão no modo *sleep*. Níveis de tensão inferior a 3,2V já comprometem o funcionamento dos módulos.

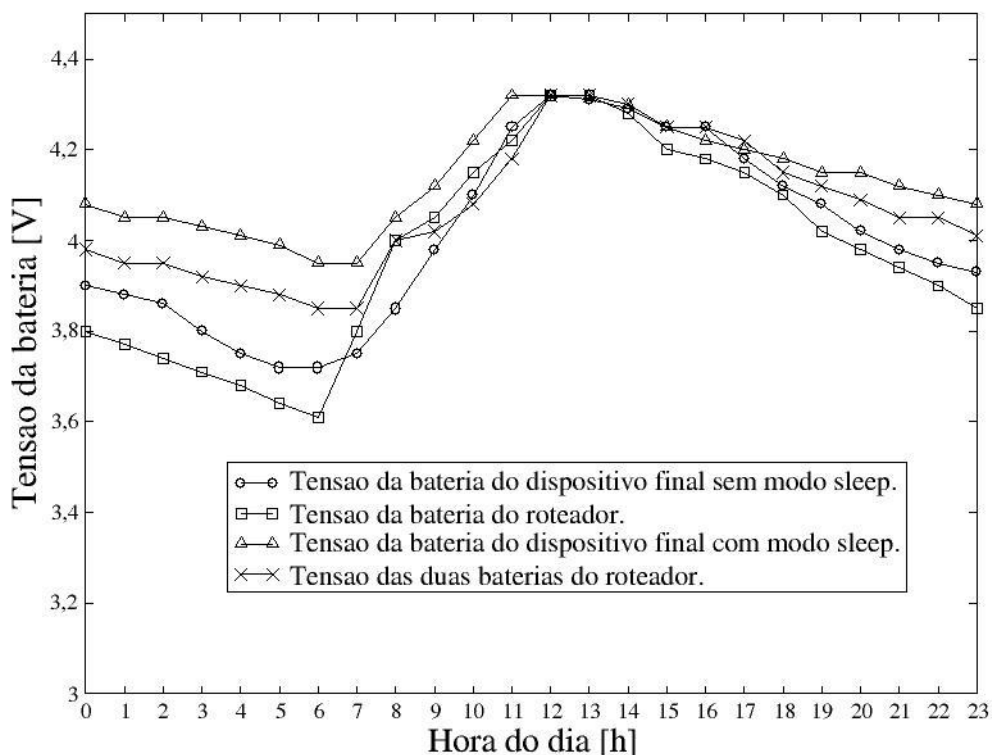


Figura 43 – Comparação entre os experimentos com e sem modo *sleep* habilitado.

Para os demais kits, alimentados por fontes externas, não são avaliados o consumo, pois os equipamentos presentes são exatamente os mesmos. No módulo de potência (sala elétrica), onde existe somente o rádio para efetuar o acionamento, o consumo é 5mA menor, justamente o consumo do microcontrolador *Arduino*. Como esse módulo também está configurado como roteador e devido a importância dele na rede, o modo *sleep* não pode ser configurado.

A medição de consumo dos componentes utilizados nesta dissertação é exemplificada na tabela 9 a seguir:

Tabela 9: Consumo dos componentes

Componente	Consumo Medido (mA)	Autonomia com bateria 980 mAh (h)
Arduino	5	196
Arduino + Xbee Roteador	55	18
Arduino + Xbee Dispositivo final	25	39
Arduino + Xbee Dispositivo Final – <i>Sleep</i> (media)	17,5	56
Sensor de Umidade	1,5	N/A
Sensor de Temperatura	< 1,0	N/A
Sensor de Corrente	< 1,0	N/A

5.2 Tráfego

Nos primeiros testes realizados, a transmissão de dados realizada pelo microcontrolador era efetuada a cada 50ms. Esse tempo foi devido aos testes realizados em bancada para sinalizar se as informações enviadas pelos sensores estavam corretas. Entretanto, a redução na quantidade de dados transmitidos pelos nós sensores possibilita diminuição no congestionamento do canal de comunicação. Quando o *XBee*, por exemplo, tenta enviar uma informação ao coordenador, caso o canal de comunicação não esteja disponível, o rádio tentará a transmissão posteriormente acarretando um maior consumo de energia. Com a redução do tempo de envio, passado posteriormente para cada 5s, uma quantidade menor de informação trafega pela rede, permitindo assim que o coordenador receba informações de uma quantidade maior de nós sensores.

Para transmitir os dados de monitoramento na RSSF implantada (temperatura, umidade relativa do ar, tensão da bateria, corrente elétrica), o tamanho do pacote com as informações foi de 45 bytes, inicialmente configurados no modo AT.

Adotando a transmissão de dados no modo API e utilizando o algoritmo para concatenar os dados lidos pelos sensores, o tamanho do pacote transmitido aumentou cerca de 60% (72 bytes) em relação ao pacote transmitido inicialmente pelo *Arduino*. Isso se deve principalmente a quantidade de informação transmitida no pacote, já citado na seção 2.3.1. O envio realizado nesse modo possibilita que os dados sejam tratados pelo supervisor, pois inicialmente no modo AT ocorre sobreposição das *tags* recebidas.

Nessa configuração, não importa se o rádio está em modo *sleep*, pois a coleta das informações e envio fica sob a responsabilidade do microcontrolador.

A análise quantitativa das transmissões realizadas por minuto e o tráfego gerado (em bytes) é apresentada na Figura 44.

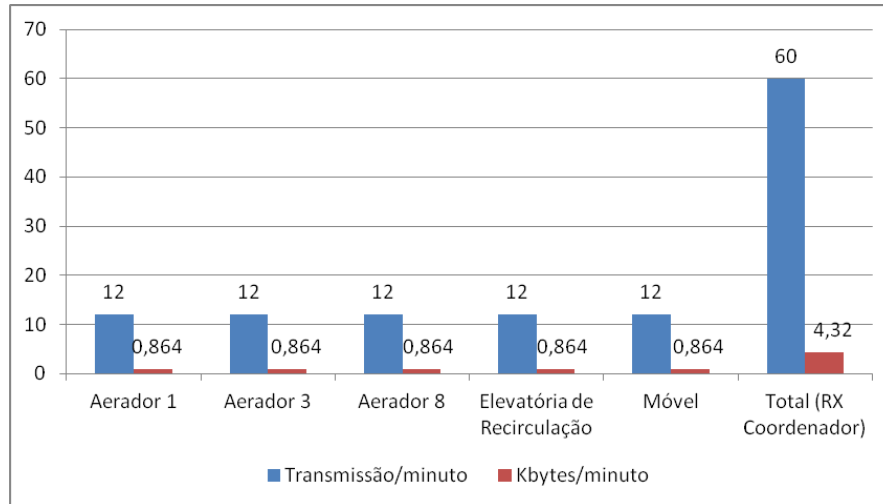


Figura 44 – Quantidade de transmissão e tráfego gerado por minuto.

Considerando que a transmissão é realizada a cada 5s por módulo, sendo que cada transmissão possui 72 bytes e que todos os pacotes enviados são recebidos pelo nó coordenador, a quantidade de dados gerados e transmitidos é linear, totalizando 4,32 kbytes e 60 eventos de transmissão por minuto.

5.3 Tempo de resposta

Segundo o datasheet do *XBee*, a vazão de dados entre um nó sensor e um nó roteador/coordenador é de 21 kbps e entre dois roteadores ou roteador e coordenador é de 25 kbps (Digi, 2009). Como o clock dos rádios não são sincronizados, não é possível calcular com precisão o tempo de envio e recebimento dos pacotes e, dessa forma, é utilizada a opção pelo cálculo do tempo de resposta.

Visto que o tamanho do pacote de dados transmitido na rede é de 72 bytes e considerando a taxa de transmissão de 21 kbps, o tempo (t) para cada transmissão realizada entre um dispositivo final e um roteador é calculado pela expressão [1], resultando 27,42 ms.

Entre nós roteadores ou roteador e coordenador, o cálculo é mostrado pela expressão [2], resultando 24,00 ms.

$$t = 72 \text{ bytes} \times 8 \text{ bits} / 21 \text{ kbps} = 27,42\text{ms} \quad [1]$$

$$t = 72 \text{ bytes} \times 8 \text{ bits} / 25 \text{ kbps} = 23,04\text{ms} \quad [2]$$

O tempo total entre a transmissão e a recepção dos dados pelo coordenador é definido pela soma do tempo que o módulo sensor demora em capturar os dados e transmiti-los, além da distancia de saltos e latência entre o emissor e o receptor de dados. Sendo assim, com o aumento do número de nós da rede, a tendência é que a utilização do espectro fique saturada e consequentemente o tempo de resposta deverá ser mais lento. Isso acontece devido ao meio de transmissão de RF ser compartilhado, implicando que quanto maior o número de nós solicitando envio de quadros, maior é o tempo de espera para transmitir.

5.4 Dados recebidos

Parâmetros dos motores instalados nos aeradores superficiais (temperatura e corrente elétrica), até então desconhecidos, foram recebidos sem que não houvesse qualquer falha de comunicação no período de testes. Através desses dados, é possível auxiliar a gestão da manutenção da Companhia, principalmente no que diz respeito a manutenção preventiva. Corrente elétrica acima da nominal ou temperaturas dos estatores próximas da classe de isolamento dos motores já indica que é necessário retirá-lo da lagoa para efetuar a manutenção ou troca, mantendo assim a continuidade da aeração e a eficiência do tratamento. As Figuras 45 e 46 exemplificam os dados recebidos pelos kits de monitoramento, auxiliando o processo de manutenção.

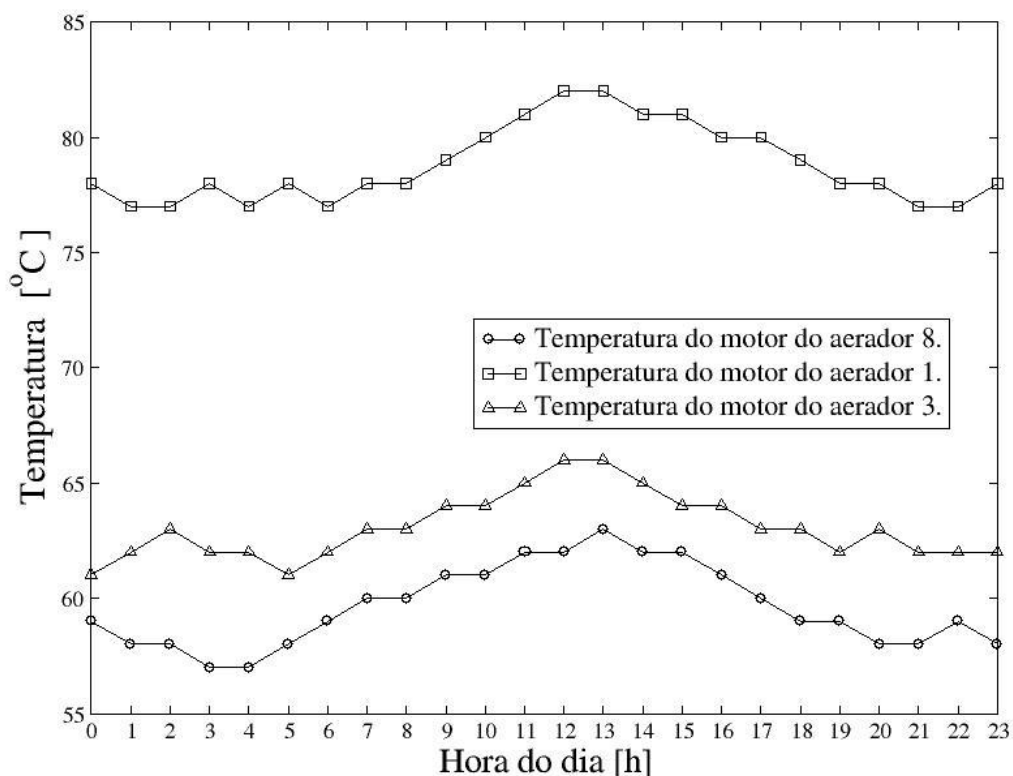


Figura 45 – Temperatura dos motores instalados nos aeradores.

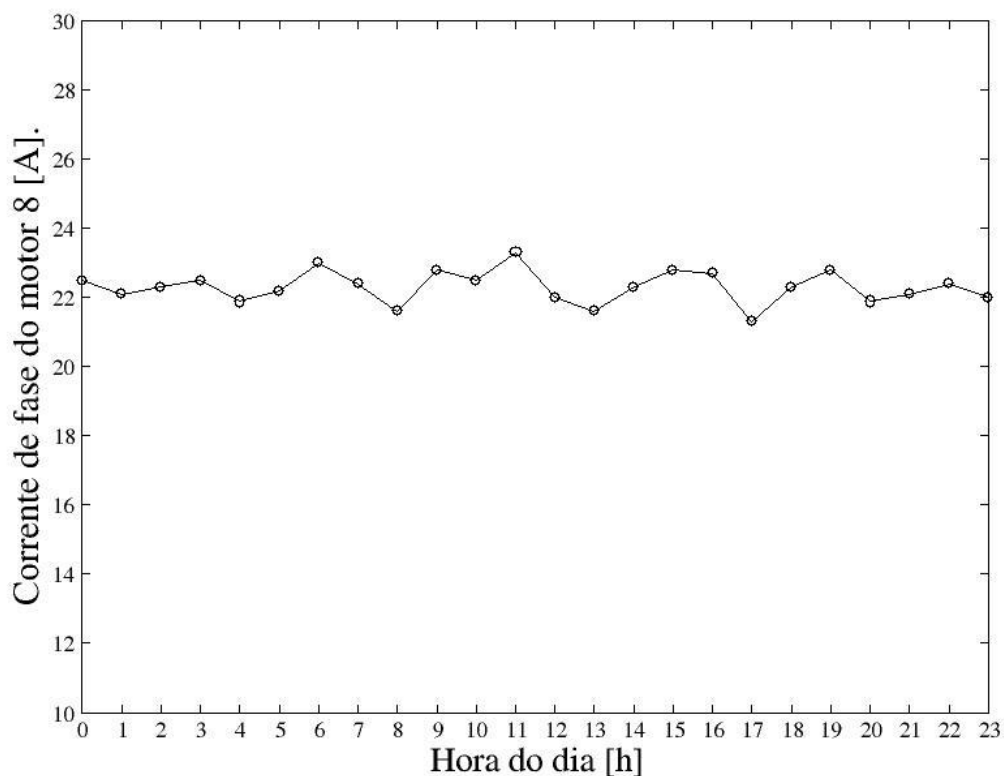


Figura 46 – Corrente elétrica do motor do aerador 8.

A Figura 45 mostra os dados recebidos das temperaturas dos estatores dos motores 1, 3, 8. Percebe-se que a temperatura do motor #1 está aproximadamente 20°C acima da temperatura dos motores 3 e 8, indicando a necessidade de manutenção preventiva nesse equipamento. Já a corrente do motor, Figura 46, em torno de 22A, é considerada normal para a aplicação, sem necessidade de inspeção. As Figuras 47, 48 e 49 ilustram os dados recebidos pelo kit instalado na elevatória de recirculação interna. Nesse ponto de monitoramento, verificam-se a temperatura ambiente, a corrente dos motores das bombas de recirculação e a umidade relativa do ar respectivamente.

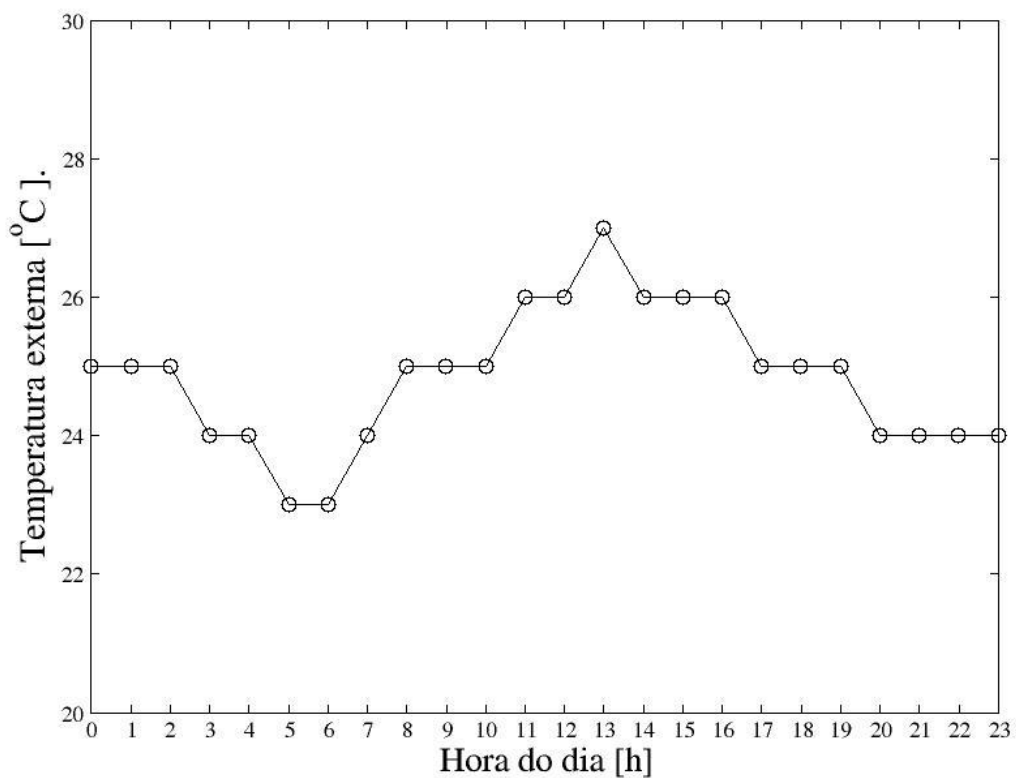


Figura 47 – Temperatura ambiente do kit de monitoramento instalado na elevatória de recirculação interna.

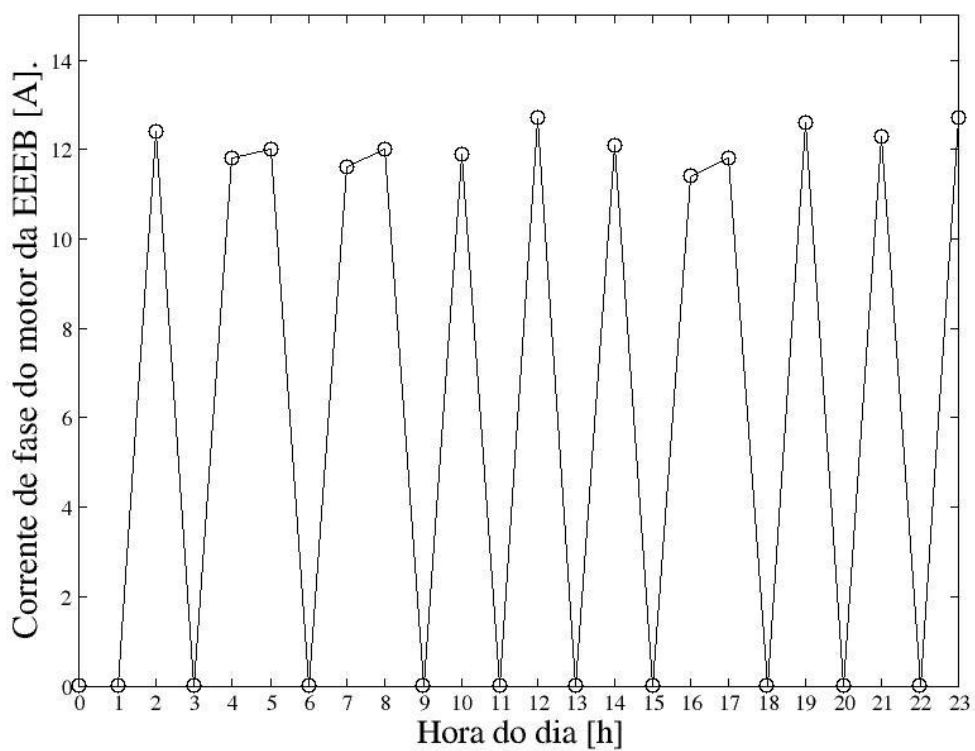


Figura 48 – Corrente elétrica do conjunto motor-bomba da elevatória de recirculação.

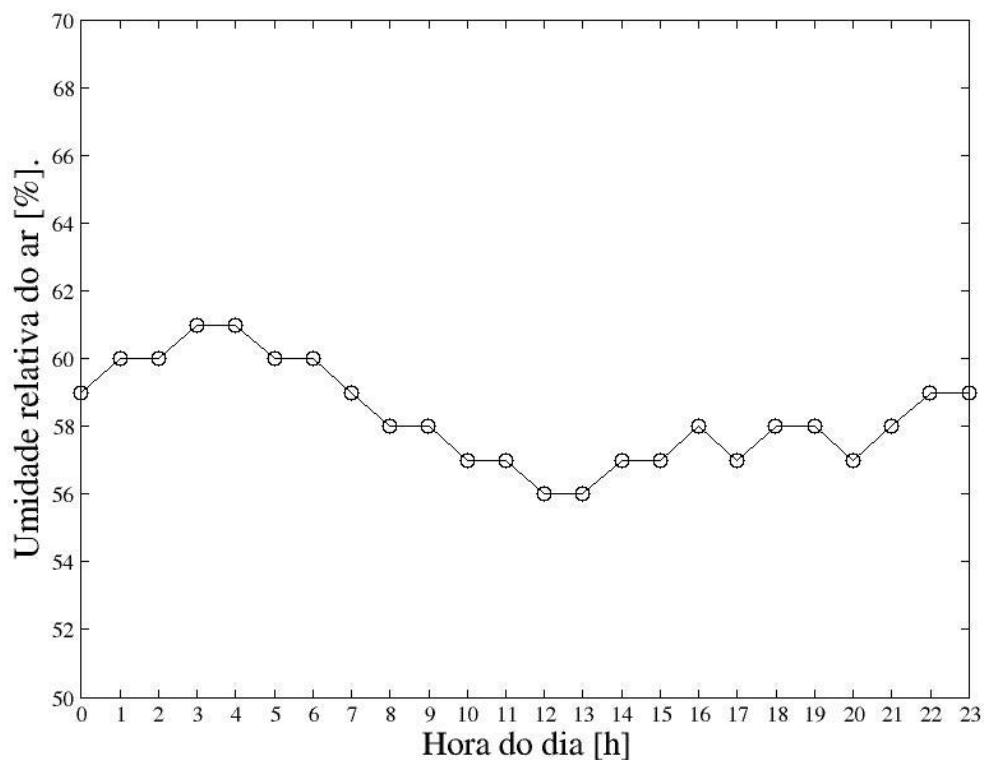


Figura 49 – Umidade relativa do ar do kit de monitoramento instalado na elevatória de recirculação interna.

5.5 Testes de interferência

Como já citado, a planta de testes fica localizada dentro de área urbana e próxima ao aeroporto de Vitória-ES, estando sujeita a interferências. Considera-se ainda o *fading* do sinal emitido pelos rádios, devido as condições das instalações onde os equipamentos estão instalados. Entretanto, para comprovar que não há problemas de interferências com o rádio *XBee*, justamente devido a faixa de frequência de funcionamento (2,4 GHz) foram realizados testes em um ambiente muito ruidoso, com diversos equipamentos *WiFi* ligados próximos (a menos de 1m) e o resultado obtido no analisador de espectro é apresentado na Figura 50. A faixa de teste foi de 2,454 GHz a 2,4835 GHz. O pico máximo foi de 2,47531 GHz e o filtro de integração foi de 100 KHz. O espectro utilizado foi de 2,47082 GHz a 2,4804 GHz, que resulta em uma banda de 9,73 MHz.

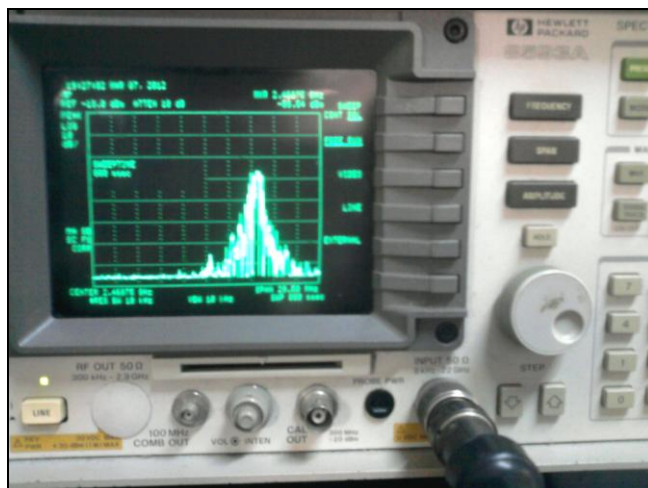


Figura 50 - Foto do espectro analisado dos transceptores *ZigBee*.

Dessa forma, o funcionamento dos dispositivos *ZigBee* não interferem ou não são interferidos com os sinais emitidos do 802.11 a/b/g/n.

5.6 Custos envolvidos

Todos os dispositivos utilizados no projeto (microcontrolador *Arduino*, rádio *XBee*, sensores de temperatura, corrente e umidade, painéis solares, baterias e conversores) são importados. No Brasil, além de serem poucos os fornecedores, a entrega estava limitada pela quantidade do estoque e os custos eram superiores. As caixas de proteção para instalação nos aeradores, as bases de acrílico e os componentes eletrônicos (resistores, capacitores, transistores, relés, etc) foram adquiridos no mercado local. Não estão incluídos no orçamento custos com mão de obra para montagem e soldagem da placa de circuito impresso (placa de potência).

A Tabela 10 relaciona os custos envolvidos na aquisição dos principais componentes do projeto, considerando os 8 (oito) kits de monitoramento confeccionados e instalados.

Tabela 10 – Custos envolvidos no desenvolvimento do projeto.

Descrição	Quantidade	Valor Unitário R\$	Total R\$
Xbee S2 Pro	8	72,00	576,00
Arduino	7	78,00	546,00
Bateria	4	10,00	40,00
Cabo U.FL	8	8,90	71,20
Antena	8	18,00	144,00
Sensor Temperatura	5	3,00	15,00
Sensor Corrente	2	20,70	41,40
Sensor de Umidade	1	32,40	32,40
Painel Solar 1W	10	6,30	63,00
Caixas Herméticas	6	10,00	60,00
Componentes eletrônicos diversos			70,00
TOTAL			1.659,00

5.7 Desafios para implementação do sistema

O desenvolvimento de hardware e software do projeto foi realizado na maior parte do tempo em bancada. Um dos entraves que gerou tempo de correções e aprimorizações foi a correta leitura dos sensores. Muitas vezes, foi preciso simular diversas condições, tendo outros equipamentos para realizar calibrações e testes desses sensores. Entretanto, as sobreposições das *tags* recebidas, quando mais de um módulo estava comunicando, foi o que demandou mais tempo para sua correção.

Após testes e simulações em bancada, iniciou-se a segunda etapa do projeto, que é instalação na planta. Os kits de monitoramento da sala elétrica, da elevatória de recirculação interna e do roteador Ethernet não apresentaram dificuldades e defeitos na sua instalação e operação. Já os kits instalados nos aeradores apresentaram infiltração de água de chuva por duas vezes, acarretando o desenvolvimento de melhores técnicas de proteção contra essas intempéries. Isso só foi conseguido após serem desenvolvidas placas de acrílico com maior área de proteção.

Como já citado na seção 4.1.2, as condições de instalação desses equipamentos são as piores possíveis. Entretanto, após 6 (seis) meses de operação na estação, não foi detectada nenhuma anomalia na comunicação dos módulos, assim como na deficiência elétrica suprida

ora pelas baterias, ora pelo painel solar. Contudo, percebe-se que os gases provenientes da decomposição do esgoto, especialmente o H_2S – Gás Sulfídrico atacou componentes ferrosos, tais como o interruptor e o conector da antena, como é mostrado nas Figuras 51 e 52.

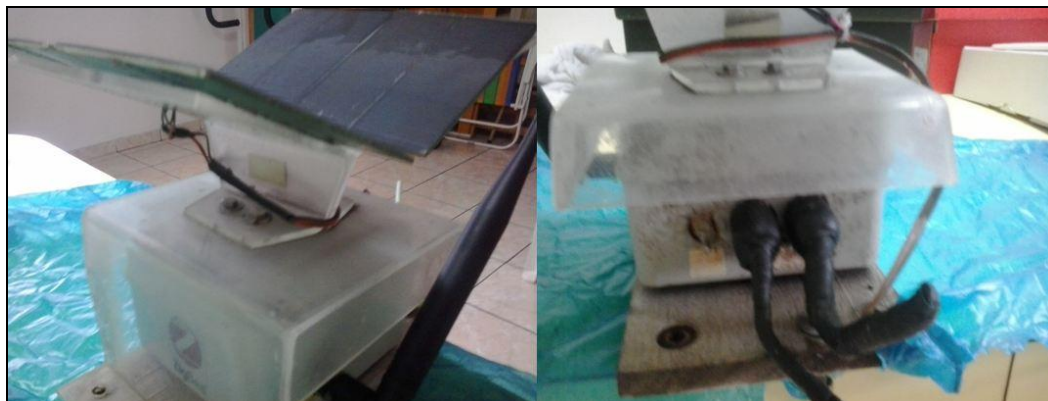


Figura 51 – Kit de monitoramento retirado da lagoa após 6 meses em funcionamento.

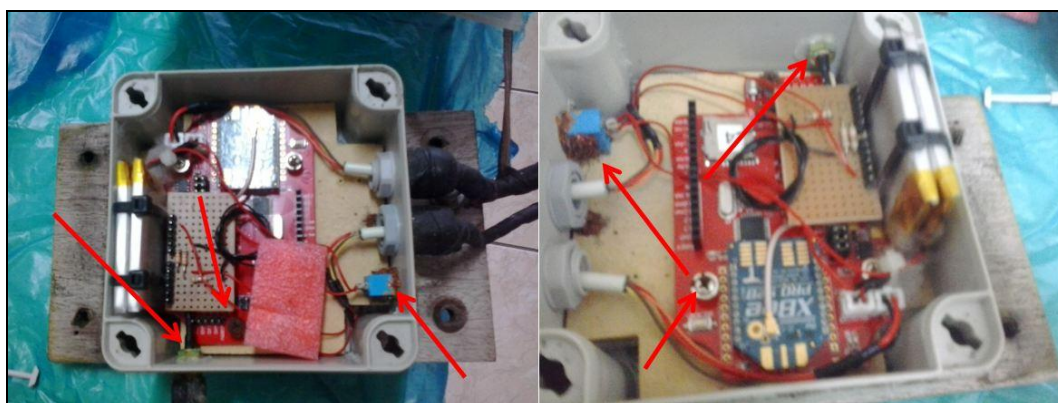


Figura 52 – Pontos de corrosão no interior do módulo sensor.

Embora seja clara a contaminação de gás e umidade no interior do módulo sensor, nenhum componente foi danificado e o mesmo foi reinstalado na base do motor do aerador para função de monitoramento ao qual estava aplicado.

Tanto o microcontrolador quanto o rádio apresentaram-se robustos para a aplicação desejada, comportando desde a contaminação de gases e umidade associado ainda a altas temperaturas, considerando que a incidência solar é direta.

6. Conclusão

Esta dissertação apresentou uma proposta de implementação de monitoramento de equipamentos de uma estação de tratamento de esgoto através de Redes de Sensores sem Fio. A infraestrutura do projeto demonstrou robustez para trabalhar em ambientes com locais de difícil acesso, além de validar sua economia energética e continuidade através das características de roteamento do protocolo *ZigBee*.

Os dados recebidos dos vários nós espalhados pela planta são confiáveis, assim como a estabilidade de comunicação. Simulações na topologia da rede foram executadas sem que houvesse qualquer perda de informação.

A previsão inicial de autossuficiência elétrica, com auxílio de painéis solares foi atendida, justificando o baixíssimo consumo associado a uma transmissão de 5 (cinco) segundos de intervalo para todos os módulos sensores.

A disponibilidade das informações, principalmente através da Internet, foi confiável usando um nó da rede que também recebia as informações de todos os sensores. Em contrapartida o supervisorio desempenhou satisfatoriamente o tratamento e visualização dos dados.

Os equipamentos utilizados atenderam bem a expectativa da aplicação, suportando desde altas temperaturas até condições como a alta umidade e elevada concentração de gases corrosivos.

Os dados coletados serviram de base para realizar manutenções periódicas nos motores dos aeradores. Como esse tipo de manutenção requer mão de obra especializada e cuidados especiais, as manutenções preventivas são feitas de acordo com as alterações da temperatura ou corrente elétrica, prevendo assim uma programação específica para a retirada do equipamento para manutenção e a sua substituição, a fim de que a aeração não seja prejudicada e conseqüentemente o processo de tratamento.

Como trabalhos futuros, é proposta a aplicação em outros segmentos ligados às empresas de saneamento, tais como em monitoramento de hidrômetros para área comercial, sensoriamento de pontos de pressão de uma determinada região, turbidez dos rios que abastecem as estações de tratamento de água, controle de iluminação ou ainda a substituição de cabeamento de sensores das estações da empresa. Pode-se ainda integrar uma RSSF distribuída em todos os equipamentos, desde motores, bombas e iluminação assim como o controle e identificação de funcionários que adentram a estação com a adição de sensores RFID por exemplo. A segurança da comunicação de dados da rede *ZigBee* é um fator

importante a ser abordado futuramente. Esse padrão permite a utilização de criptografia (AES de 128 bits), porém a efetividade da segurança e a sobrecarga causada na rede pela adoção do AES não são abordados nesta dissertação.

O assunto desta dissertação também contribuiu para o meio científico com a publicação de dois artigos. O primeiro deles relaciona-se ao congresso *Wireless Sensor Systems*, promovido pelo IET (*The Institution of Engineering and Technology*), ocorrido em Londres, Inglaterra, nos dias 18 e 19 de junho de 2012, sob o título “*Wireless Sensor Network ZigBee applied on sewage treatment station*”. O segundo refere-se ao XIX Congresso Brasileiro de Automática, promovido pelo SBA (Sociedade Brasileira de Automática) em conjunto com a UFCG (Universidade Federal de Campina Grande-PB), nos dias 02 a 06 de setembro de 2012, sob o título “Redes de Sensores sem Fio Aplicados em uma Estação de Tratamento de Esgoto”. Completando, o tema foi apresentado na 11ª edição do ISA SHOW ES, realizado em Vitória-ES, obtendo o 1º lugar na classificação geral dentre todos os trabalhos apresentados.

Referências Bibliográficas

- Aboelaze, M. Aloul, F. (2005). Current and Future Trends in Sensor Networks: A Survey. *IFIP: Second IFIP International Conference on Wireless and Optical Communications Networks - WOCN 2005*, Dubai, p. 551-555, Emirados Árabes Unidos.
- Akyildiz, I. F. (2002). Wireless sensor networks: a survey. *Computer Networks*, v. 38, n. 4, p. 393–422, 2002. ISSN 1389-1286.
- Akyildiz, I. F.; Sankarasubramaniam, Y.; Cayirci, E. (2002). A Survey on Sensor Networks. *Communications Magazine*, v. 44, n. 8, p.102-114.
- Arduino. (2009) Arduino Similar Boards. Disponível em <<http://www.arduino.cc>>.
- Barros, R. T. de V., Chernicharo, C. A. de L., Heller, L., Sperling, M. V. (1995). Manual de Saneamento e proteção ambiental para os municípios, *Escola de Engenharia da UFMG*.
- Bergmann, N.W.; Wallace, M.; Calia, E. (2010). Low cost prototyping system for sensor networks. Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing International Conference, 6, 2010, Melbourne. *Proceedings of Sixth Int Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing. Melbourne: (ISSNIP)*, pp. 19-24.
- Buttayan, L. (2010). Application of Wireless Sensor Networks in Critical Infrastructure Protection: Challenges and design options. *IEEE Wireless Communication*, v. 17, n. 5, p. 44-49.
- Caetano, C. D. C., Côrrea, I. D., Santiago, R. A., Leye, R. (2007). Rede de Sensores sem fio: Estudo de Aplicabilidade em Sistemas Industriais. *Curso de Especialização em Automação Industrial, Universidade do Estado do Rio de Janeiro*.
- Cao, L. (2009). Wireless Mesh Monitoring System for Sewage Treatment Plant. *International Colloquium on Computing, Communication, Control and Management. IEEE*, pp. 351- 353, 2009.
- Digi. (2009) Xbee / Xbee Pro ZB RF Modules. Disponível em: <http://ftp1.digi.com/support/documentation/90000976_G.pdf>.
- Digi. (2010) X-CTU Configuration & Test Utility Software. Disponível em: <http://ftp1.digi.com/support/documentation/90001003_A.pdf>.
- Ecosan (2012). Aeradores superficiais de alta rotação. Disponível em <<http://www.ecosan.com.br/>>.

- FTDI (2010). Future Technology Devices International. FT232R USB UART. Disponível <http://www.ftdichip.com/Support/Documents/DataSheets/ICs/DS_FT232R.pdf>.
- GoogleMaps (2012). Disponível em: <<https://maps.google.com.br/>>.
- IBGE (2012). Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em <<http://www.ibge.gov.br/>>.
- IEEE (2012). 802.15.4 WPAN Task Group4. Disponível em: <<http://www.ieee802.org/15/pub/TG4.html>>.
- Jordão, E. P., Pessôa, C. A. (2005). Tratamento de Esgoto Doméstico, 4ª Edição. Rio de Janeiro.
- Kioumars, A. H; Tang, L. (2011). Wireless Network for Health Monitoring: Heart Rate and Temperature Sensor. *Fifth Internacional Conference on Sensing Technology. IEEE*, pp. 362- 369.
- Kohvakka, M. (2006). Performance analysis of IEEE 802.15.4 and Zigbee for large-scale wireless sensor network applications. *International Workshop on Performance Evaluation of Wireless ad Hoc, Sensor and Ubiquitous Networks. New York*. p. 48–57.
- Loureiro, A. A. F., Nogueira, J. M. S., Ruiz, L. B., Mini, R. A. (2002). Redes de Sensores Sem Fio, *Simpósio Brasileiro de Computação (SBC'02), Florianópolis, SC, Brasil*. n. XX, pp. 193-234.
- Lousada, E. E. de O. (2009). Ciclo de Trabalho Dinâmico em uma Rede de Medição de Energia Elétrica. *Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Minas*.
- Quintão, F. P.; Mateus, G. R.; Nakamura, F. G. (2004). Uma Abordagem Evolutiva para o Problema de Cobertura em Redes de Sensores Sem Fio. *Revista de Eletrônica de Iniciação Científica (REIC) da Sociedade Brasileira de Computação (SBC)*.
- Ramalho, L. A. (2011). Metodologia de experimentos didáticos de aplicações ZigBee. *Trabalho de Conclusão de Curso, Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Mato Grosso – Cuiabá*.
- Rivero, I. A. S. (2011). Redes de Sensores sem Fio para Monitoramento de Equipamentos Eletrônicos. *Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais – Belo Horizonte*.
- RogerCom (2012). O Maior Conteúdo Brasileiro Sobre Porta Paralela. Disponível em <<http://www.rogercom.com.br/>>.

- Ruiz, L. B., Correia, L. H. A., Vieira, L. F. M., Macedo, D. F., Nakamura, E. F., Figueiredo, C. M. S., Vieira, M. A. M., Maia, E. H. B., Câmara, D., Loureiro, A. A. F., Nogueira, J. M. S., Da Silva Jr., D. C., Fernandes, A. O. (2004). Arquiteturas para Redes de Sensores Sem Fio, *Simpósio Brasileiro de Computação (SBC'04)*, n. XXII, pp. 167-218, Gramado, RS, Brasil.
- Ruiz, L. B.; Braga, T. R. M.; Silva, F. A.; Nogueira, J. M. S.; Loureiro, A. A. F. (2003). Sobre o Impacto do Gerenciamento no Desempenho das Redes de Sensores Sem Fio, *Workshop de Comunicação Sem Fio e Computação Móvel, Curitiba, PR*.
- Silva, M. S., Fruett F. (2010). Rede de Sensores sem Fio de Baixo Custo para Monitoramento Ambiental, *Congresso Brasileiro de Automática* n. XVIII, pp. 2351-2356, Bonito, MS.
- ZigBee Alliance (2012). Zigbee Wireless Networks. Disponível em <<http://www.zigbee.org/>>.

Apêndice A:

Neste apêndice são mostradas as rotinas de leitura de cada sensor utilizadas no microcontrolador Arduino, adotado como referência nesta dissertação para o desenvolvimento da aplicação referente aos kits de monitoramento. O *software* utilizado para a compilação dos dados é o Arduino IDE, como citado na seção 2.4.

Sensor de corrente elétrica:

```
//Variáveis analógicas
double value;

//Constantes para o conversor analógico-digital
double ADCvoltsperdiv = 0.003222;
double VDOffset = 2.4476; //Initial value (corrected as program runs)

//Equação para calibração do sensor
double factorA = 15.2; //factorA = CT Constante / rsens
double Ioffset = -0.08;

//Constante da tensão = 440V.
double SetV = 440.0;

//Counter
int i=0;

int samplenumber = 4000;

//Opcional para calcular potência real e aparente, Irms.
double sumI=0.0;

int sumIi=0;
double sumVadc=0.0;

double Vadc,Vsens,Isens,Imains,sqI,Irms;
double apparentPower;

void setup()
{
  Serial.begin(9600);
}

void loop()
{
  value = analogRead(0);

  //contador
  i++;
```

```

Vadc = value * ADCvoltsperdiv;
Vsens = Vadc-VDoffset;
Imains = Vsens;

sumIi++; sumVadc = sumVadc + Vadc;
if (sumIi>=1000) {VDoffset = sumVadc/sumIi; sumIi = 0; sumVadc=0.0;}

//1) Valores correntes
sqI = Imains*Imains;
//2) soma
sumI=sumI+sqI;

if (i>=samplenum)
{
i=0;
Irms = factorA*sqrt(sumI/samplenum)+Ioffset;

apparentPower = Irms * SetV;

Serial.print(Irms);
Serial.println("");

sumI=0.0;

}
}

```

Sensor de Temperatura:

```

#include <math.h>

#define ThermistorPIN 1 //PINO ANALOGICO 1

float pad = 9805; //valor resistencia do divisor de tensao

float thermr = 10000; //valor termistor (seeed = 10k ohms)

float Thermistor(int RawADC) {
long Resistance;
float Temp;

Resistance=((1024 * pad / RawADC) - pad);
Temp = log(Resistance);
Temp = 1 / (0.001129148 + (0.000234125 * Temp) + (0.0000000876741 * Temp * Temp *
Temp));
Temp = Temp - 273.15;
return Temp;
}

void setup() {

```

```
Serial.begin(9600);
}

void loop() {
  float temp;
  temp=Thermistor(analogRead(ThermistorPIN));
  Serial.print("Celsius: ");
  Serial.print(temp-3,1);
  Serial.println("");
  delay(1000);
}
```

Sensor de umidade:

```
int rhsense = 0;
int rh = 0;

void setup() {
  Serial.begin(9600);
}

void loop() {

  rhsense = (analogRead(2));
  rh = ((30.855*(rhsense/204.6))-11.504);

  Serial.print("Umidade: ");
  Serial.print(rh);
  Serial.println(" %RH ");

  delay(1000);
}
```


Apêndice B:

Neste apêndice é mostrado a rotina de programação utilizada no microcontrolador Arduino *Duemilanove* para disponibilizar os dados recebidos pelos nós sensores através da Intranet/Internet, através do endereço local <<http://192.168.1.45:75>>. O acesso externo (Internet) era realizado através do endereço IP válido da conexão, adicionando a porta 75 ao endereço.

```
#include <SPI.h>
#include <Ethernet.h>

#define VERDADEIRO 1
#define FALSO 0

byte mac[] = { 0xDE, 0xAD, 0xBE, 0xEF, 0xFE, 0xED }; //MAC ARDUINO
byte ip[] = { 192, 168, 1, 45 }; //IP ARDUINO
byte gateway[] = { 192, 168, 1, 1 }; //IP ROTEADOR
byte subnet[] = { 255, 255, 255, 255 }; //MASCARA SUBREDE

int T, C, B, M, R, Q, K, G, P, D, N, U, A, L, O, J;
char Texto[50];
char *Ponteiro_Texto;
char ucInicial = 0;

Server server(75);

void decodificaSerial();

void setup()
{
  // Inicia o servidor Ethernet:
  Ethernet.begin(mac, ip, gateway, subnet);
  server.begin();

  Serial.begin(9600);
}

void loop()
{
  Client client = server.available();
  if (client) {
    boolean currentLineIsBlank = true;
    while (client.connected()) {
      if (client.available()) {
        char c = client.read();
        if (c == '\n' && currentLineIsBlank) {
          client.print("<title> REDE ZIGBEE ETE CAMBURI </title>");
        }
      }
    }
  }
}
```

```

while (Serial.available() > 0){
  unsigned char ucRecebe;
  ucRecebe = Serial.read();    // Lê dado
  if (ucRecebe == '['){      // Caractere inicializador
    ucInicial = VERDADEIRO;   // Indica inicialização do protocolo
    Ponteiro_Texto = Texto;   // Reinicializa ponteiro
  }else if (ucInicial == VERDADEIRO){ // Se chegou inicializador
    *Ponteiro_Texto = ucRecebe; // Recebe Dado
    Ponteiro_Texto++;        // Incrementa ponteiro
  }
  if (ucRecebe == 'I'){      // Recebeu finalizador

    switch (Texto[0])
    {
case 'T':
  T = atoi(Texto + 2);
break;

case 'C':
  C = atoi(Texto + 2);
break;

case 'B':
  B = atoi(Texto + 2);
break;

case 'M':
  M = atoi(Texto + 2);
break;

case 'R':
  R = atoi(Texto + 2);
break;

case 'Q':
  Q = atoi(Texto + 2);
break;

case 'K':
  K = atoi(Texto + 2);
break;

case 'G':
  G = atoi(Texto + 2);
break;

case 'P':
  P = atoi(Texto + 2);
break;

```

```

        case 'D':
            D = atoi(Texto + 2);
            break;

            case 'N':
                N = atoi(Texto + 2);
                break;

                case 'U':
                    U = atoi(Texto + 2);
                    break;

                    case 'A':
                        A = atoi(Texto + 2);
                        break;

                        case 'L':
                            L = atoi(Texto + 2);
                            break;

                            case 'O':
                                O = atoi(Texto + 2);
                                break;

                                case 'J':
                                    J = atoi(Texto + 2);
                                    break;

                    }
                ucInicial = FALSO;          // Aguarda novo inicializador
            }
        }//fim while

        client.print("<center><h2>INTERFACE  ETHERNET  ZIGBEE  ETE  CMBURI
</h2></center>");
        //client.print("<HR WIDTH=100%>");

        //AERADOR 8
        client.print("<HR WIDTH=100%>");
        client.print("<h3> *** AERADOR #8 ED *** </h3>");
        client.print("TEMPERATURA MOTOR: ");
        client.print(T);
        client.print(" C");
        client.print("</br>");

        client.print("<br>");client.print("CORRENTE FASE S: ");
        client.print(C/(100.00));
        client.print(" A");
        client.print("</br>");

```

```

client.print("<br>");client.print("TENSAO BATERIA: ");
client.print(B/(156.25));
client.print(" Volts");
client.print("</br>");
client.print("<HR WIDTH=100%>");

//AERADOR 1
client.print("<h3>*** AERADOR #1 R *** </h3>");
client.print("TEMPERATURA MOTOR: ");
client.print(M);
client.print(" C");
client.print("</br>");

//client.print("<br>");client.print("CORRENTE R: ");
//client.print(R);
//client.print(" mA");
//client.print("</br>");

client.print("<br>");client.print("TENSAO BATERIA: ");
client.print(Q/(156.25));
client.print(" Volts");
client.print("</br>");
client.print("<HR WIDTH=100%>");

//AERADOR 3
client.print("<h3>*** AERADOR #3 ED *** </h3>");
client.print("TEMPERATURA MOTOR: ");
client.print(K);
client.print(" C");
client.print("</br>");

//client.print("<br>");client.print("CORRENTE G: ");
//client.print(G);
//client.print(" mA");
//client.print("</br>");

client.print("<br>");client.print("TENSAO BATERIA: ");
client.print(P/(156.25));
client.print(" Volts");
client.print("</br>");
client.print("<HR WIDTH=100%>");

//EEEB RI
client.print("<h3> *** EEEB RECIRCULACAO INTERNA ED *** </h3>");
client.print("TEMPERATURA AMBIENTE: ");
client.print(D);
client.print(" C");
client.print("</br>");

client.print("<br>");client.print("CORRENTE TOTAL: ");

```

```

client.print(N/(100.00));
client.print(" A");
client.print("</br>");

client.print("<br>");client.print("UMIDADE RELATIVA DO AR: ");
client.print(U);
client.print(" %");
client.print("</br>");
client.print("<HR WIDTH=100%>");
//client.print("<br>");client.print("BATERIA A: ");
//client.print(A);
//client.print(" volts");
//client.print("</br>");

//MOVEL
client.print("<h3> *** KIT MOVEL R *** </h3>");
client.print("TEMPERATURA: ");
client.print(L);
client.print(" C");
client.print("</br>");

//client.print("<br>");client.print("CORRENTE O: ");
//client.print(O);
//client.print(" mA");
//client.print("</br>");

client.print("<br>");client.print("TENSAO BATERIA: ");
client.print(J/(156.25));
client.print(" Volts");
client.print("</br>");
client.print("<HR WIDTH=100%>");

client.print("<br>");
client.print("<HR WIDTH=100%>");
client.print("<center><h2>TT-Ver 1.0</h2></center>");
client.print("</br>");

/*
for (int analogChannel = 0; analogChannel < 6; analogChannel++) {
    client.print("analog input ");
    client.print(analogChannel);
    client.print(" is ");
    client.print(analogRead(analogChannel));
    client.println("<br />");
}
*/
break;
}
if (c == '\n') {
    currentLineIsBlank = true;

```

```
    }  
    else if (c != '\r') {  
        currentLineIsBlank = false;  
    }  
    }  
    }  
    delay(1);  
    client.stop();  
    }  
    }
```

Anexo A:

Diagrama esquemático do microcontrolador Arduino.

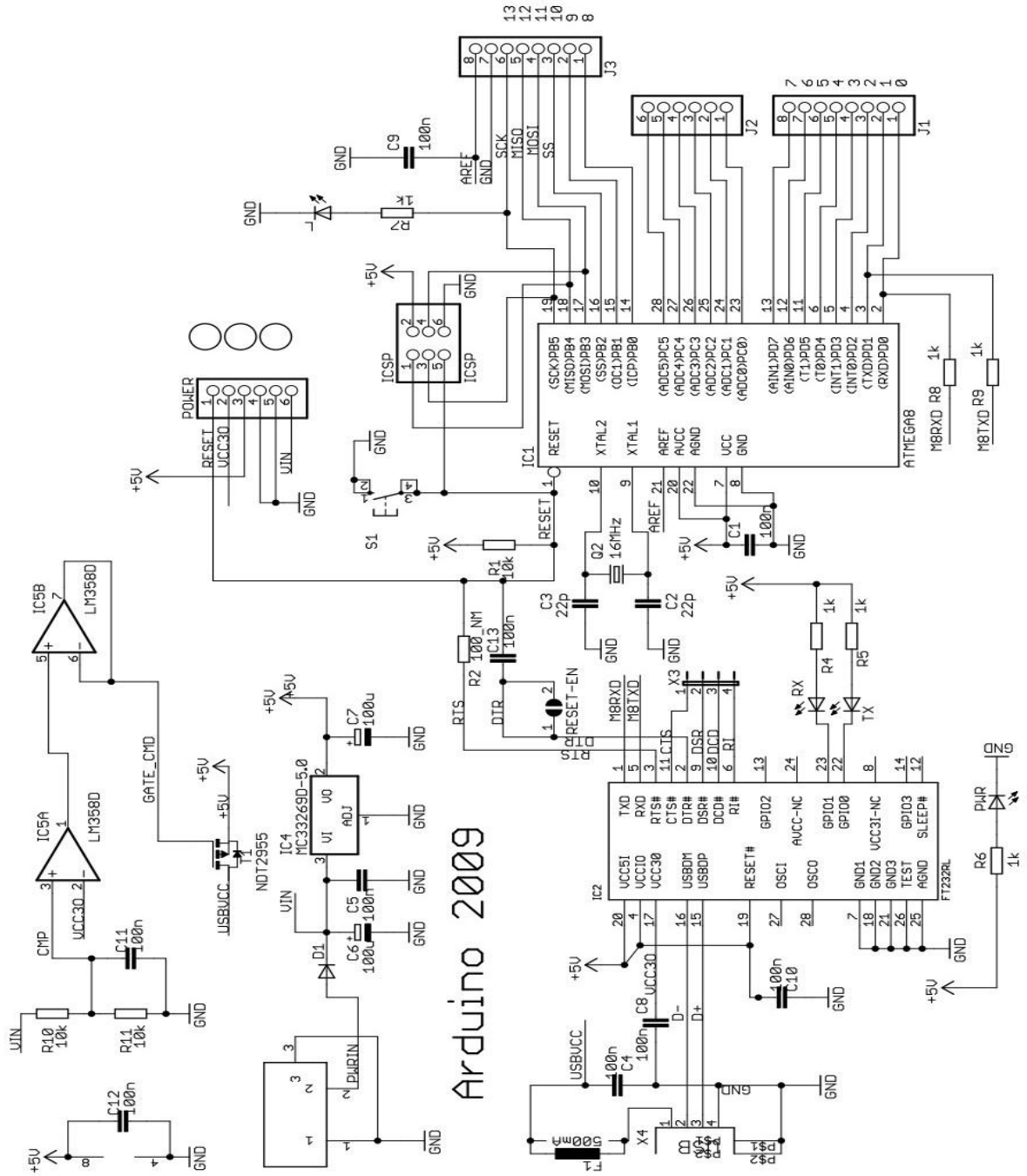


Figura 53 – Diagrama esquemático do Microcontrolador Arduino.

Fonte: Arduino (2009).

Anexo B:

Diagrama esquemático do *Shield*.

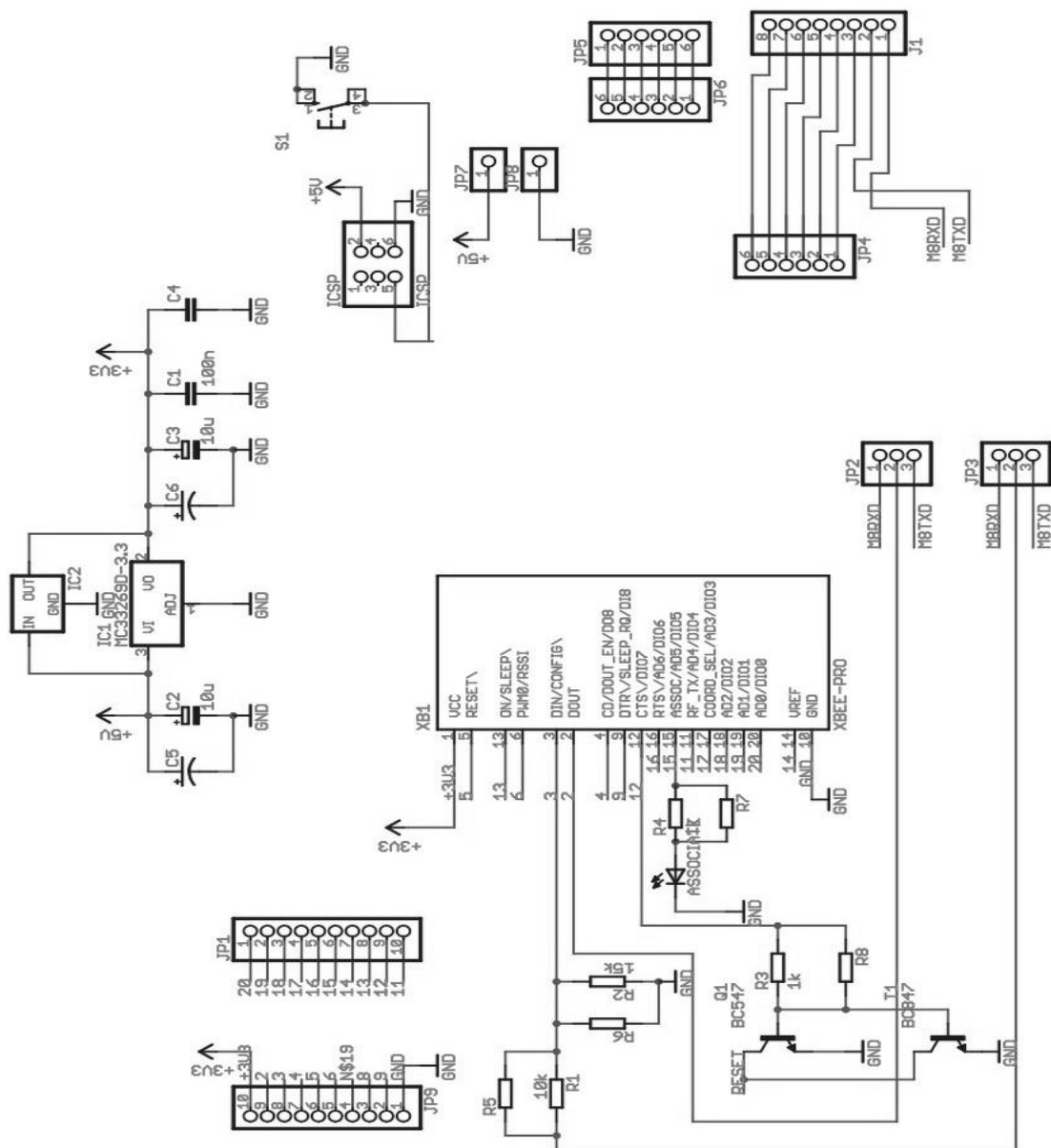


Figura 54 – Diagrama esquemático do Shield XBe.

Fonte: Arduino (2009).