



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA**  
**ESCOLA POLITÉCNICA e INSTITUTO DE MATEMÁTICA**  
**PPGM - PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MECATRÔNICA**

**ÂNGELO OLIVEIRA DOS SANTOS**

**SOLUÇÃO DE INSTRUMENTAÇÃO PARA DETECÇÃO DA  
QUALIDADE DO REVESTIMENTO DE DUTOS, COM TRAÇABILIDADE  
ÓTICA COM REDE DE SENSORES SEM FIO BASEADA NO XBEE**

Salvador

2012

**ÂNGELO OLIVEIRA DOS SANTOS**

**SOLUÇÃO DE INSTRUMENTAÇÃO PARA DETECÇÃO DA  
QUALIDADE DO REVESTIMENTO DE DUTOS, COM TRAÇABILIDADE  
ÓTICA COM REDE DE SENSORES SEM FIO BASEADA NO XBEE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Mecatrônica, programa conjunto com o Departamento de Engenharia Mecânica e o Departamento de Ciência da Computação, da Universidade Federal da Bahia como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Mecatrônica.

Orientador: Prof. Dr. IURI MUNIZ PEPE

Salvador

2012

Sistema de Bibliotecas da UFBA

Santos, Ângelo Oliveira dos.

Solução de instrumentação para detecção da qualidade do revestimento de dutos, com traçabilidade ótica em rede de sensores sem fio baseada no XBee / Ângelo Oliveira dos Santos. - 2012.

125 f. : il.

Inclui apêndices.

Orientador: Prof. Dr. Iuri Muniz Pepe.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal da Bahia, Escola Politécnica, Instituto de Matemática, Salvador, 2012.

1. Petróleo. 2. Dutos. 3. Corrosão e anticorrosivos. 4. Ótica. 5. Monitoramento. I. Muniz Pepe, Iuri. II. Universidade Federal da Bahia. Escola Politécnica. III. Universidade Federal da Bahia. Instituto de Matemática. IV. Título.

CDD - 553.282  
CDU - 553.061.3

# **ÂNGELO OLIVEIRA DOS SANTOS**

## **SOLUÇÃO DE INSTRUMENTAÇÃO PARA DETECÇÃO DA QUALIDADE DO REVESTIMENTO DE DUTOS, COM TRAÇABILIDADE ÓTICA EM REDE DE SENSORES SEM FIO BASEADA NO XBEE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Mecatrônica, programa conjunto com o Departamento de Engenharia Mecânica e o Departamento de Ciência da Computação, da Universidade Federal da Bahia como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre.

Aprovada em 28 de fevereiro 2012

### **BANCA EXAMINADORA**

Iuri Muniz Pepe – Orientador \_\_\_\_\_  
Doutor em Física Nuclear, Universite Catholique de Louvian, U.C.L, Bélgica.  
Universidade Federal da Bahia

Flávio Morais de Assis Silva \_\_\_\_\_  
Doutor em Informática, Technische Universität Berlin, TUB, Alemanha.  
Universidade Federal da Bahia

Paulo César Machado de Abreu Farias \_\_\_\_\_  
Doutor em Engenharia Nuclear, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e  
Pesquisa de Engenharia – COPPE UFRJ.  
Universidade Federal da Bahia

A

Claudionor, meu pai, por ter me inspirado na escolha da profissão.

Urânia, minha mãe, por sua proteção e amor.

Denise, minha filha, pela oportunidade de aprender.

Fabiane, minha mulher, pela poesia.

## AGRADECIMENTOS

Especial agradecimento ao Prof. Dr. Iuri Muniz Pepe, uma pessoa com muita grandeza no seu ser, com grande capacidade de apoiar e apostar nas pessoas. Muito obrigado por todo o apoio, sem o qual este trabalho não seria possível.

Aos colegas do LAPO – Laboratório de Propriedades Óticas do Instituto de Física, que sempre se colocaram dispostos a auxiliar em minhas pesquisas.

Ao doutorando Rodrigo Rocha, meu genro, que me ajudou a compreender algumas das técnicas em OOP.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia (FAPESB), pelo apoio financeiro concedido no Edital 01/2011 Auxílio-Dissertação.

A Fabiane, minha mulher, que soube compreender o momento que vivia e sabia da importância deste mestrado para mim e se colocava de forma compreensiva e incentivadora.

E, finalmente a todos os meus amigos, colegas e conhecidos que torceram para que eu conseguisse chegar até aqui,

Meus sinceros agradecimentos a todos.

OM SHANTI

## RESUMO

Os dutos de transporte de petróleo e seus derivados estão instalados por todo o mundo - na superfície da terra, enterrados ou submersos em rios e oceanos, estando sujeitos a desgastes externos e internos por ações físicas e reações químicas. No ano de 2008, a infraestrutura dutoviária do Brasil de petróleo, derivados, gás natural e outros produtos eram de 17.000 km de extensão. A ruptura dos dutos causa um grande impacto ambiental e prejuízos financeiros e de produção. Para evitar a corrosão direta e interna dos dutos, revestimentos são aplicados, isolando os líquidos e sólidos que passam pelos dutos. Monitorar o estado desses revestimentos representa o passo seguinte para garantia da eficiência dos mesmos. Este trabalho apresenta uma proposta de solução de instrumentação para detecção da qualidade de revestimento com traçabilidade ótica em dutos de transporte de água de produção e petróleo por uma rede de sensores sem fio utilizando módulos XBee, monitorada por uma aplicação desenvolvida em C#.

Palavras-chaves: dutos; petróleo; corrosão; ótica; monitoramento, XBee.

## **ABSTRACT**

The pipeline for the transport of petroleum and its products are installed worldwide - on the surface of the earth, buried or submerged in rivers and oceans and are subject to actions by physical and chemical reactions to wear external and internal . In 2008, the pipeline infrastructure for transport of petroleum, oil products, natural gas and other products in Brazil were from 17,000 km in length. The rupture of the pipeline has a big environmental impact and financial and production losses. To prevent the external and internal corrosion of the pipelines, coatings are applied insulating liquids and solids that pass through the ducts. Monitor the status of this coating represents the next step to ensure the efficiency of the coatings. This dissertation presents a proposed solution of instrumentation for detection of coating quality with optical tracking in pipeline transport of produced water and oil by a wireless sensor network using XBee modules, monitored by an application developed in C #.

Key words: pipeline; oil; corrosion; optical; instruments; monitoring, XBee.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Local das ocorrências (3).....	20
Figura 1.2 - Principais causas de vazamento (3). .....	20
Figura 1.3 - Etapa de aplicação do revestimento no duto.....	21
Figura 2.1 - Espectro de luz visível. (26).....	28
Figura 2.2 - Símbolo gráfico do LED .....	30
Figura 2.3 - LDR em (a)o componente e (b) símbolo gráfico.....	31
Figura 2.4 - Fotodiodos – representação gráfica e modelos.....	32
Figura 2.5 - Arquitetura em camadas da rede ZigBee (22). .....	36
Figura 2.6 - Protocolo de requisição dados dispositivo-final. ....	39
Figura 2.7 - Posição dos pinos SLEEP e gráfico de tempo dos eventos. ....	40
Figura 3.1 - Seção de Corte ao Longo do Eixo Paralelo ao Comprimento do Tubo. ....	44
Figura 3.2 - Modelo detecção pela luz transmitida .....	45
Figura 3.3 - Detecção da Qualidade da Camada de Epóxi por Reflexão. ....	45
Figura 3.4 - Detecção da qualidade da camada de epóxi por fluorescência.....	46
Figura 3.5 - Corte de um perfil de alumínio .....	48
Figura 3.6 - Estrutura de perfil de alumínio preenchida com epóxi.....	48
Figura 3.7 - Circuito elétrico medida variação resistência LDR.....	48
Figura 3.8 - Montagem do experimento com o LED ligado.....	50
Figura 3.9 - Fase de erosão do epóxi. ....	51
Figura 3.10 - Amostra com epóxi totalmente erodido. ....	51
Figura 3.11 - Amostras a base de epóxi, fora da forma.....	54
Figura 3.12 - Forma para as amostras.....	54
Figura 3.13 - Amostras fresadas e sulco preenchido com cola azul.....	54
Figura 3.14 - Circuito amplificador do sinal fotodiodo.....	56
Figura 3.15 - Sensor remoto ponto a ponto no <i>protoboard</i> .....	57
Figura 3.16 - No primeiro plano, um receptor RF e o Arduino Mega. ....	58
Figura 3.17 - Diagrama módulo Arduino-mini.....	59
Figura 3.18 - Foto sensor com dois casulos de detecção. ....	60
Figura 3.19 - Circuito eletrônico foto sensor. ....	61
Figura 3.20 - Conexão ponto a ponto XBee (23). ....	63
Figura 3.21 - Módulo XBee (23).....	63
Figura 3.22 - Placa de desenvolvimento XBee <i>Adapter</i> INT700.....	64
Figura 3.23 - Software de configuração para os módulos XBee.....	65
Figura 3.24 - Topologia de rede utilizada.....	66
Figura 3.25 - Topologia de rede ZigBee com um roteador. ....	67
Figura 3.26 - Troca de mensagem entre o coordenador e o dispositivo final. ....	67
Figura 3.27 - Conexão XBee+INT700+Multímetro digital .....	69
Figura 3.28 - Virtualização do multímetro em IHM. ....	69
Figura 3.29 - XBee e conexões LDR, LM 35, relés e LED sinalização. ....	71
Figura 3.30 - Alterando parâmetros de entrada e saída com o X-CTU.....	72
Figura 3.31 - Circuito acionamento relés. ....	72
Figura 3.32 - Projeto da placa de circuito impresso. ....	73
Figura 3.33 - Placa nó sensor atuador sem fio. ....	74
Figura 4.1 - Topologia para rede de sensores em dutos.....	75
Figura 4.2 - Conexão XBee nas placas de circuito impresso.....	77
Figura 4.3 - Janela do X-CTU, seleção do firmware e parametrização.....	77
Figura 4.4 - Detalhe dos circuitos da fonte de alimentação.....	80
Figura 4.5 - Janela do programa do espectrômetro.....	81
Figura 4.6 - Circuito de detecção da intensidade da luz transmitida. ....	82

Figura 4.7 - Circuito de alimentação do detector. ....	83
Figura 4.8 - Circuito <i>buffer</i> para os LEDs. ....	84
Figura 4.9 - Conexões com as portas do ADC do XBee. ....	85
Figura 4.10 - Nó Sensor Amostras.....	85
Figura 4.11 - Resultantes da luz incidente na amostra.....	87
Figura 4.12 - Diagrama de blocos de detecção síncrona. (26), página 94.....	88
Figura 4.13 - Circuito amplificador síncrono. ....	89
Figura 4.14 - Conexões por fios jumper entre o XBee e o Arduino .....	90
Figura 4.15 - Montagem do circuito nó microcontrolado. ....	91
Figura 4.16 - XBee conectado ao microcomputador através do XBee Explorer. ....	102
Figura 4.17 - Topologia típica de uma rede ZigBee. ....	103
Figura 4.18 - Estrutura de dados API.....	103
Figura 4.19 - Troca de mensagem API.....	104
Figura 4.20 - IHM do Nó Sensor Atuador. ....	106
Figura 4.21 - IHM do Nó Sensor Amostras.....	108
Figura 4.22- IHM do Nó Sensor Amostras Microcontrolado .....	110

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 2.1 - Curva característica da célula fotocondutiva (GE tipo B425).....	31
Gráfico 2.2 - Resposta espectral LDR P-510 Sunrom (fonte (17)). .....	32
Gráfico 2.3 - Sensibilidade relativa espectral do fotodiodo BPW34 (fonte (18))......	33
Gráfico 3.1 - Variação da resistência com intensidade da luz no LDR. ....	49
Gráfico 3.2 - Variação da resistência em função da profundidade do sulco.....	52
Gráfico 4.1 - Variação da intensidade da luz espalhada LED VERDE. ....	92
Gráfico 4.2 - Variação da intensidade da luz espalhada LED AZUL.....	93
Gráfico 4.3 - Variação da intensidade da luz espalhada LED VERMELHO. ....	94
Gráfico 4.4 – Ajustes exponencial e linear luz espalhada.....	95
Gráfico 4.5 - Relação entre $\mu$ e $\lambda$ . ....	96
Gráfico 4.6 - Resultados para sensor a $0^\circ$ da fonte de luz. ....	98
Gráfico 4.7 – Apresentação gráfica dados Tabela 4.2.....	99
Gráfico 4.8 - Resultados para sensor a $90^\circ$ da fonte de luz .....	100

## LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 - Comparativo tecnologias redes sem fio (22). .....	35
Quadro 3.1 - Parâmetros de configuração do dispositivo sensor atuador. ....	74
Quadro 4.1 - Parâmetros de configuração modo SLEEP XBee, fonte (23).....	83
Quadro 4.2 - Nome e identificador dos frames API. ....	104
Quadro 4.3 - Conexões XBee e componentes do Nó Sensor Atuador.....	105
Quadro 4.4 - Conexões XBee e componentes do Nó Sensor Amostras. ....	107
Quadro 4.5 - Conexões XBee e Nó Sensor Amostras Microcontrolado. ....	109

## LISTA DE ABREVIações

AC	corrente alternada
ADC	Analogic Digital Converter
AES	Advanced Encryption Standard
API	Application Program Interface
ASK	Asynchronous Shift Key
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
bps	bits per seconds
C#	Linguagem de programação C Sharp
CBC-MAC	Cipher Block Chaining Message Authentication Code
CRC	Cyclic Redundancy Check
DAC	Digital to Analog Converter
DC	corrente continua
DENTEL	Departamento Nacional de Telecomunicações
DOFS	Distributed Optical Fiber Sensor
EEPROM	Electrical Erasable Programmable Read Only Memory
FBE	Fusion Bonded Epoxy
FBG	Fibber Bragg Grating
FM	Frequência Modulada
GPRS	Rádio de Serviços Gerais de Pacotes
HTTP	Hyper Text Terminal Protocol
ICVS	fonte de tensão controlada por corrente
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IHM	Interface Homem Maquina
IO	Input Output (entrada e saída)
IR	infravermelho - InfraRed
ISM	Industrial Scientific and Medical
ISO	International Organization of Standardization
LDR -	resistor dependente de luz
LED	diodo emissor de luz
MIPS	milhões de informações por segundo
NCAP	Network Capable Applications Processor
NIST	National Institute of Standards and Technology
PC	computador pessoal

POO	programação orientada a objeto
PVHS	Piezoelectric Wafer Active Sensor
PUC	Pontifícia Universidade Católica
RF	Rádio Frequência
RGB	cores vermelha, verde, azul.
RSSF	Rede de sensores sem fio
SHM	Structural Health Monitoring
SPIE	International Society for Optical Engineering
STWS	Smart Transducer Web Service
TEDS	Transducer Electronics Data Sheets
TIM	Transducer Interface Module
UART	Universal Asynchronous Receiver Transmitter
USB	Universal Synchronous Bus
UV	luz ultravioleta
UWB	Ultra Wide Band
WSN	Wireless Sensor Network o mesmo que RSSF
WPA	Wi-Fi Protected Access
WEP	Wired Equivalent Privacy
WIMP	Windows, Icon, Menu, Pointer
WTIM	Wireless Transducer Module

# SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>17</b>
1.1 O PROBLEMA .....	19
1.2 OBJETIVO .....	22
<b>2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS E O ESTADO DA ARTE .....</b>	<b>25</b>
2.1 DISPOSITIVOS ÓTICOS .....	28
2.1.1 Diodos emissores de luz .....	29
2.1.2 Fotorresistores .....	30
2.1.3 Fotodiodo .....	32
2.2 REDE DE SENSORES SEM FIO .....	33
2.2.1 Nó sensores .....	34
2.2.2 Redes sem fio .....	34
2.2.3 ZigBee .....	35
<b>3. ESTUDOS PRELIMINARES .....</b>	<b>43</b>
3.1 MÉTODOS DE DETECÇÃO DA LUZ .....	44
3.2 LUZ TRANSMITIDA E ESPALHADA NA CAMADA DE REVESTIMENTO .....	47
3.3 ERODINDO A AMOSTRA DE EPÓXI .....	50
3.4 SENSOR REMOTO SEM FIO .....	52
3.4.1 Novas amostras .....	53
3.4.2 O módulo sensor e transmissor .....	55
3.5 ESTUDO PRÁTICO DA REDE ZIGBEE .....	62
3.5.1 VIRTUALIZAÇÃO DE PORTAS DE COMUNICAÇÃO RS-232 .....	62
3.5.2 NÓ SENSOR ATUADOR .....	70
<b>4. A REDE SEM FIO PARA DETECÇÃO DO ESTADO DAS AMOSTRAS .....</b>	<b>75</b>
4.1 O XBEE COMO CENTRO DO NÓ SENSOR .....	77
4.2 DESENVOLVIMENTO DO HARDWARE .....	79
4.2.1 NÓS SENSORES DO ESTADO DAS AMOSTRAS .....	80
4.2.2 RESULTADOS LABORATÓRIAS .....	92
4.3 DESENVOLVIMENTO DO SOFTWARE .....	101
4.3.1 A CLASSE PARA NÓ SENSOR ATUADOR .....	105
4.3.2 A CLASSE PARA O NÓ SENSOR AMOSTRAS .....	106
4.3.3 A CLASSE PARA O NÓ SENSOR AMOSTRAS MICROCONTROLADO .....	109
<b>5. CONCLUSÃO .....</b>	<b>111</b>
REFERÊNCIAS .....	115
ÍNDICE .....	119





## 1. INTRODUÇÃO

Os dutos de transporte de petróleo e seus derivados estão instalados por todo o planeta, na superfície da terra, enterrados ou submersos em rios e oceanos, os dutos estão sujeitos a desgaste externos e internos por ações físicas e reações químicas. No ano de 2008, a infraestrutura dutoviária nacional era composta de 547 linhas de dutos (*pipelines*) destinados à movimentação de petróleo, derivados, gás natural e outros produtos. Esses dutos somaram 17 mil km de extensão, divididos em 11,7 mil km para transporte e 5,3 mil km para transferência. Com extensão de 9,1 mil km, 90 *pipelines* destinavam-se à movimentação de gás natural; 388 dutos, com extensão de 5,9 mil km, à movimentação de derivados; 32 dutos, com extensão de 2 mil km, à movimentação de petróleo; e os 76 km restantes, compostos por 37 linhas de dutos, destinaram-se à movimentação dos demais produtos, tais como álcool, solventes e outros de menor importância (1).

A ruptura de uma linha de dutos causa um grande impacto ambiental e prejuízos à produção. Inúmeros são os estudos em busca de soluções que possibilitem a monitoração dos dutos de transportes com objetivos de diminuir os prejuízos com a interrupção da produção e danos ambientais. Para o controle da corrosão interna dos dutos, diferentes tipos de revestimentos podem ser usados, para isolar os líquidos e sólidos que passam pelos dutos, evitando a corrosão de sua parede interna. O uso de revestimento protege o duto da corrosão por ação química e/ou mecânica. Monitorar o estado desse revestimento representa o passo seguinte para garantir paradas de manutenção seguras, antes mesmo que o ataque à superfície do duto comece, evitando prejuízo ambiental e de produção.

Conforme exposto, este trabalho propõe um método de monitoramento de revestimento de base epóxi inovador, que pode ser usado em dutos de produção e transporte de óleo, evitando a erosão, ou a corrosão que ocorre na parede de aço. A solução de instrumentação deste revestimento, óticamente ativo e monitorável, parte de três premissas básicas: em primeiro lugar, que a resina empregada no revestimento tem que conter em sua formulação um componente que possibilite a aplicação de um método ótico para medição de seu desgaste; em segundo lugar, que os fotodetectores e seus respectivos circuitos de condicionamento, ou seja, os dispositivos de sensoriamento usados para determinar a intensidade do fluxo de fótons, sejam instalados de forma a terem uma visada livre da porção de resina observada, portanto, estando no interior do duto; finalmente, em terceiro lugar, desenvolver uma rede sem fio composta de nós sensores capazes de medir a integridade da resina pigmentada e transmitir estes dados adquiridos.

Para simular a corrosão do revestimento dos dutos e validar o método foram utilizadas amostras construídas a base de resina epóxi erodidas mecanicamente por uma fresa. Por limitação mecânica estas amostras são 14 vezes mais espessas do que os revestimentos normalmente utilizados que são da ordem de 500  $\mu\text{m}$ . No desenvolvimento do projeto são sugeridas algumas formas de instalação dos sensores. Estas formas foram testadas apenas no laboratório utilizando-se de dutos a base de PVC.

Neste trabalho, é apresentada uma solução de instrumentação baseada em uma rede sem fio de sensores multipontos, para serem instalados ao longo de linhas de dutos. O monitoramento de múltiplos pontos em rede ZigBee, utilizando módulos XBee, que possibilitou simples integração com os circuitos sensores, torna esta rede de fácil manutenção e flexível, possibilitando a sua ampliação. O uso da tecnologia de redes sem fio ZigBee tem se expandido com a diminuição dos preços.

Foram efetuados estudos preliminares de funcionamento de uma rede ZigBee e para tal foram desenvolvidos nós com adicionais, com um nó sensor atuador capaz de comutar cargas AC e um nó que estabelece um conexão padrão RS232 sem fio.

Para detecção do estado da amostra dois métodos de detecção da luz foram desenvolvidos e construídos os nós sensores para cada um dos métodos.

Um software aplicativo escrito em linguagem C# administra os nós da rede, de uma estação base, a qual um nó coordenador está conectado por uma interface USB. Este aplicativo trata as mensagens recebidas e transmitidas para os nós da rede. Para cada um dos nós foi criado uma interface homem maquina que representa funcionalmente as características de cada um graficamente em uma janela de programa.

Este projeto é promissor em sua concepção, com grande possibilidade de adoção por parte de empresas do setor de transporte de líquidos e gases em dutos. Ademais, o sistema computacional poderá ser aplicado em outros projetos de rede ZigBee, na indústria de forma geral.

O emprego desta tecnologia terá importância social e ambiental, com a prevenção de acidentes em dutos devido à falência por corrosão.

## 1.1 O PROBLEMA

O petróleo apresenta uma composição química bastante complexa, sendo formado por vários hidrocarbonetos, dos quais são extraídos vários tipos de óleos, combustíveis e matéria-prima para a indústria petroquímica. Contudo, este também apresenta em sua constituição diversas impurezas, como compostos orgânicos sulfurados, nitrogenados, oxigenados, organometálicos, água, sais minerais e areia. Tais impurezas são capazes de conferir ao petróleo um elevado grau de corrosividade (2).

Para verificar a integridade das paredes internas, torna-se necessária a inspeção periódica que, em alguns casos, requer paradas da produção e/ou transporte. Adicionalmente, a previsão da periodicidade da inspeção passa a ser crucial e, se houver alguma variável não prevista, podem aparecer falhas fora do controle. Por exemplo, quando a inspeção é realizada com o equipamento que já está muito desgastado.

De acordo com Asel-Tech (3), os acidentes ambientais com dutos de petróleo e derivados podem ser definidos como sendo eventos inesperados que afetam, direta ou indiretamente, a segurança, a empresa e a saúde da população envolvida, causando impactos ao meio ambiente e gerando altos custos de reparação. Num estudo realizado pela *Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration, do US Department of Transportation*, os custos diretos desses acidentes ultrapassaram os US\$ 600 milhões, no período de 2002 a 2009, apenas nos dutos do Estados Unidos da América. Neste total, entretanto, não é considerada a desvalorização das ações da empresa envolvida, que pode ter sido de bilhões de dólares, como no caso recente da *British Petroleum*, pelo acidente no Golfo do México em abril de 2010 (3).

Os acidentes de ordem técnica ocorrem, em sua maioria, devido a corrosões, trincas, erro de escavação, entre outras causas, e são previsíveis, razão pela qual há que se trabalhar principalmente na prevenção desses episódios, sem se esquecer, obviamente, da preparação e intervenção quando da ocorrência dos mesmos.

A Figura 1.2 apresenta as principais causas de ocorrências de vazamentos em dutos. Observa-se que os vazamentos por corrosão são a causa de maior ocorrência, são 212 ocorrências num total de 836, o equivalente a mais de  $\frac{1}{4}$  das ocorrências.



Figura 1.2 - Principais causas de vazamento (3).

O uso de revestimento à base de epóxi tem sido adotado como solução para diminuição dos efeitos da corrosão há mais de 30 anos. Diversas técnicas, como controle de vazão, pressão, tensão, já estão sendo empregadas para monitoramento de dutos. Sensores de fibras óticas são utilizados para monitoração do fluxo que são comparados por algoritmos especialistas, determinando, assim, a existência de vazamento devido à ruptura do duto (4). Essas técnicas concentram na detecção do vazamento nos dutos, logo não evitariam uma parada de produção, mas poderão evitar um acidente de grande proporção.

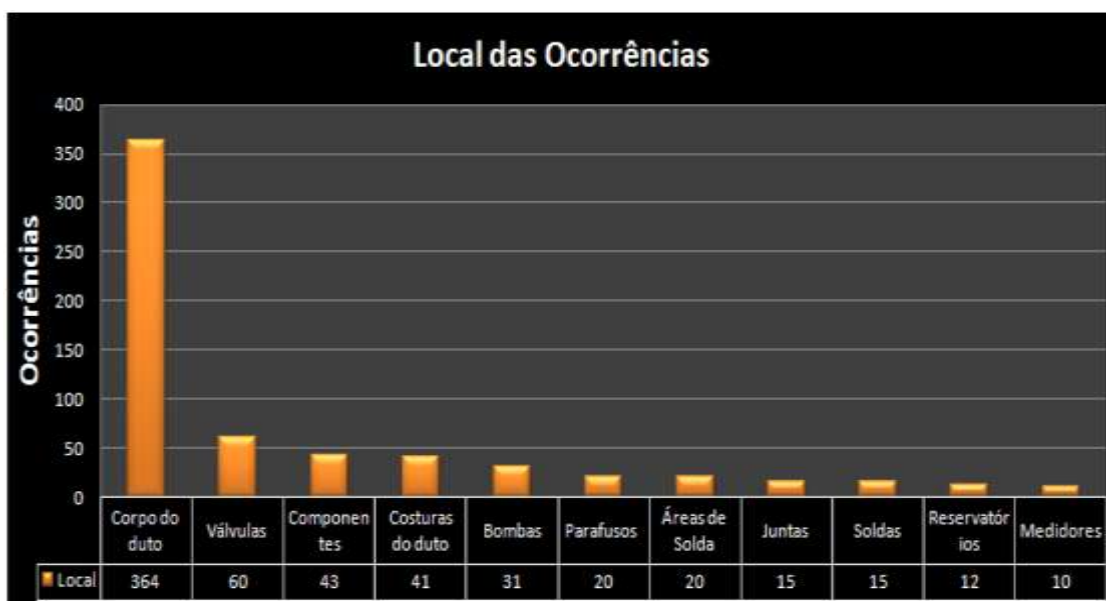


Figura 1.1 - Local das ocorrências (3).

Um dos desafios da indústria de petróleo é obter informações do estado de corrosão dos dutos, evitando acidentes que geram prejuízos de produção, grande impacto ambiental e social negativos, sem a necessidade de numerosas paradas de produção para vistorias locais.

Na Figura 1.1, da mesma fonte citada (ASEL-TECH), observa-se que o grande volume de ocorrência de vazamento é no corpo do duto, o que caracteriza bem o local onde deverá ser priorizada a instalação do ponto de monitoramento.

De forma a evitar acidentes em dutos já afetados com corrosão interna, a Petrobras, em 2002, realizou um estudo de viabilidade técnica e econômica do processo de aplicação do revestimento de dutos em operação. No mercado internacional, a tecnologia do revestimento interno dos dutos *in-situ* é aplicada há mais de 40 anos. Esta tecnologia foi testada em dutos novos e em dutos já instalados de transporte de gás, petróleo e seus derivados, efluentes, etc. O processo é dividido em etapas, que envolvem métodos físicos e químicos de limpeza da superfície interna até a inspeção final do duto, quando estes devem aparentar um metal quase branco. O nível de limpeza da superfície deve estar de acordo com as normas NACE 2 ou SSSPC SP 10 (5). Na etapa final, após a passivação do aço, lavagem com água e secagem com ar comprimido, ocorre a aplicação do revestimento (5). A Figura 1.3 apresenta a etapa de aplicação do revestimento no duto.

Com a monitoração da camada de revestimento, será possível acompanhar a degradação da mesma e, assim, atuar de forma preventiva, programando paradas para manutenção com a devida antecedência, evitando prejuízos de produção e danos à natureza.



Figura 1.3 - Etapa de aplicação do revestimento no duto.

## 1.2 OBJETIVO

O revestimento de dutos é uma técnica empregada para evitar a ação corrosiva direta do petróleo e seus derivados em sua superfície interna. Porém, este revestimento também sofre deterioração. Como mencionado de forma breve na seção 1.1, o objetivo deste trabalho é estudar e desenvolver uma proposta de instrumentação eletrônica para o monitoramento em tempo real, em rede sem fio, da qualidade do revestimento interno de dutos, baseado na detecção das propriedades óticas deste revestimento. Dentro deste, tem-se como objetivos específicos:

- criar experimentos e definir a melhor metodologia para determinação da qualidade da camada de revestimento à base de epóxi que permita a traçabilidade ótica a partir das propriedades de interação da luz com a matéria;
- criar amostras, com materiais similares ao usado nos revestimentos, que simulem o desgaste causado por erosão e observar o comportamento da luz transmitida em escala laboratorial;
- realizar ensaios preliminares de detecção ótica e selecionar emissores e sensores de luz que possam ser utilizados para o modelo ótico de detecção;
- desenvolver instrumentação e metodologia para detecção ótica do revestimento utilizando amostras de matérias similares;
- montar e testar um primeiro nó sensor sem fio, que monitore a qualidade do revestimento da camada à base de epóxi com traçabilidade ótica numa topologia ponto a ponto;
- desenvolver nós adicionais de apoio: um nó com atuadores que possibilite a operação de cargas AC, que possam ligar exaustores e/ou lâmpadas e um nó que permita comunicação direta em formato texto;
- projetar protótipos de nós baseados na tecnologia da rede sem fio, com solução de instrumentação eletrônica para monitoração, por método ótico, da amostra de revestimento, que estabeleça interface direta com os módulos XBee. Desse modo, possibilite utilizar as características funcionais, incluindo um modelo de economia de energia;
- aprimorar os circuitos eletrônicos de apoio e instrumentação para sensoriamento da qualidade do revestimento, e estabelecer interface direta com os módulos XBee. Os circuitos de apoio e instrumentação deverão ser projetados de forma a compatibilizar-se com os módulos XBee, aproveitando-se, assim, ao máximo suas características funcionais;

- desenvolver um nó de rede com funcionalidades de sensoriamento de variáveis do ambiente, como temperatura e intensidade da luz, que atue no meio com base nessas variáveis;
- escrever um software aplicativo a ser executado em microcomputador PC com interface gráfica e com as correspondentes interfaces homem-máquina para controle dos nós da Rede de Sensores sem Fio (RSSF).





## 2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS E O ESTADO DA ARTE

A indústria de petróleo mundial tem instalado milhares de quilômetros de dutos em todo o mundo. Esses dutos são instalados nas mais adversas condições. São dutos aéreos, subterrâneos e submersos na água doce e salgada sujeitos às mais variadas condições do ambiente. Entram por floresta adentro, atravessam mares e passam por grandes centros urbanos, levando o petróleo e seus derivados. O petróleo pode ser encontrado nas mais diversas composições químicas. O petróleo e seus derivados atacam as paredes dos dutos, podendo provocar ruptura e vazamentos com prejuízos ao meio ambiente, à sociedade e ao processo produtivo.

Segundo Morison (4), um dos desafios da indústria de petróleo é como rapidamente obter informações do estado de corrosão dos dutos, evitando acidentes que geram prejuízos de produção, impacto ambiental e social negativos, sem a necessidade de numerosas visitas e parada de produção para vistorias locais. Várias soluções recentes apontam para utilização de sensores baseados em fibra ótica e monitoramento de sistemas de instrumentação em redes. O problema estende-se, pois várias são as condições de instalação das linhas de dutos e de produtos, com diferentes propriedades físicas e químicas, que estão sendo transportados por essas linhas.

Muitas são as possibilidades de emprego das fibras óticas no monitoramento. Uma delas é baseada no espalhamento de *Brillouin* proposto por Lufan Zou, Omur Sezerman, Winston Revie, (6). Um experimento foi realizado em um duto de aço de 1,8m de comprimento, com defeitos pré-incorporados na ordem de 50 a 60% da espessura da parede interna do duto, para simular a degradação estrutural por corrosão. Utilizando-se fibra ótica e sensor de temperatura foi possível identificar os pontos com os defeitos com uma resolução de 10 cm.

Comparados com os sensores elétricos, os sensores em fibras óticas munidas de redes de Bragg (*Fiber Bragg Grating*, FBG) são imunes a interferências eletromagnéticas, resistentes à corrosão, são também pequenos e leves. Com o foco na integridade de dutos enterrados, Liu, Jianping; Wang, Hongju (7) apresentam resultados experimentais de campo que mostram que os sensores FBG têm muitas vantagens, como, por exemplo, a habilidade de monitoramento em tempo real e o fato de ser flexível para desenvolver redes de sensores, sendo conveniente para realizar monitoramento de longo prazo. Além disso, os sensores FBG são confiáveis em longo prazo para o monitoramento de dutos enterrados e aéreos.

Além dos vários empregos e técnicas das fibras óticas, foi apresentado em 2008 na conferência: *Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical and Aerospace Systems*, organizada pela *International Society for Optical Engineering (SPIE) and American Society of Mechanical Engineer*, uma tecnologia emergente para a detecção de danos *in-situ* e avaliação não destrutiva,

monitorando-se a saúde estrutural dos dutos com sensores ativos (Structural Health Monitoring - SHM ativo). Essa tecnologia coloca-se de forma promissora na inspeção e diagnósticos da estrutura dos oleodutos. *Piezoelectric Wafer Active Sensor (PVHS)* são dispositivos sensores ativos que podem estar permanentemente acoplados à estrutura dos *pipelines*. Seu tamanho é pequeno e tem baixo custo (cerca de US\$ 10 cada) tornando-se uma tecnologia potencial para aplicação *in-situ*. O propósito dos pesquisadores Lingyu, Giurgiutiu e Pollock é desenvolver um sistema de sensoriamento permanente para instalações em campo. Tal sistema estará ativo durante o período operacional dos dutos, gravando dados como corrosão e problemas nas paredes, monitorando alterações nos dutos continuamente. Obtendo-se esses dados em tempo real, estratégias de manutenção podem ser estabelecidas, sem deixar que se ocorra a ruptura dos dutos (8).

Espen Hauge (9) apresenta uma proposta que adapta as funções de Luenberger, criando algoritmos com a finalidade de estimar e monitorar as condições de fluxo em uma linha de dutos de petróleo, de forma a localizar e quantificar eventuais vazamentos. Para o monitoramento do duto e para estimar possíveis danos serão necessárias medidas da velocidade, pressão e temperatura na entrada e a velocidade e pressão na saída do duto. Com essas medições de entrada e saída é pode ser utilização o OLGA<sup>1</sup>, que é um simulador computacional para fluxo de fluidos e, assim estimar o fluxo e determinar os pontos de falha. Esse método foi simulado tanto em um duto em linha reta horizontal, quanto num duto com inclinação. Ambas as simulações foram realizadas com petróleo e gás.

No artigo “*The Development of an Intelligent Sensor for the Monitoring of Pipeline System Integrity*”, Umeadi e Jones (10) relatam os testes de laboratório de um programa que avalia a vibração sonora detectada nos dutos para formar uma base de dados do sistema de predição de falhas. A análise da forma de onda do som e sua atenuação foram utilizadas para identificar as mudanças nas características do fluxo do líquido. A eficiência dos sensores piezoelétricos foi testada com uma série de defeitos induzidos artificialmente. As características do fluxo foram analisadas e comparadas com as previsões teóricas. Os resultados mostram que as vibrações do som, detectadas por sensores piezoelétricos, podem determinar alterações nas características do fluxo de água e óleo diesel, a um grau de precisão de forma a compor a base de um dispositivo

---

<sup>1</sup> OLGA é o simulador para a engenharia do fluxo de água, petróleo e gás nos poços, oleodutos e instalações de recebimento. <http://www.sptgroup.com/Products/olga>

integrado de sensores sem fio. Propõem também a criação de um algoritmo baseado em métodos qualitativos para associar as mudanças do fluxo com defeitos nos dutos.

Sistemas submarinos de dutos de transporte de petróleo correm grande risco de danos devido às duras condições de instalação, com impulsão, corrosão e vibrações. Falhas no sistema de dutos submarinos ocorrem ocasionalmente, provocando prejuízos econômicos e danos ambientais. O acompanhamento das condições operacionais destes dutos é de suma importância. Relatam Jin, Shao e Zhang (11) no seu artigo e propõem uma estratégia para monitoramento em tempo real de dutos submarinos. Um novo sensor distribuído de fibra ótica (*Distributed optical fiber Sensor - DFOS*), que usa a teoria de reflectometria ótica no domínio de tempo baseado no retro-espalhamento de Brillouin (*Brillouin backscattering*), é aplicado para controlar a deformação e temperatura ao longo de dutos. Para ser usado em linhas de dutos submarinos de longa distância, este sistema usa tecnologia de multiplexação por divisão de comprimento de onda (*Wavelength Division Multiplex WDM*) e uma série DOFS. Usando um sistema de processamento de sinais para analisar os dados obtidos por estes sensores é possível determinar a deformação ao longo dos dutos. Se a deformação atinge o índice de alarme, o operador poderá adotar medidas a tempo de evitar a ruptura da tubulação.

No artigo *Pipeline Corrosion: Its Remote Detection and Corrosion Management*, Manish Kumar Sinha (12) relata uma falha em um gasoduto com revestimento à base de *Fusion Bonded Epoxy (FBE)*. Alerta sobre a gravidade dos acidentes com dutos em função da corrosão e dos bilhões de dólares anuais de prejuízos da indústria de petróleo e cita a International Organization for Standardization - ISO 13623, que foi estabelecida no acordo ISO TC 67/SC2. Essa norma especifica requisitos e dá recomendações para projetos, materiais, construção, testes, operação, manutenção e abandono de sistemas de dutos metálicos utilizados na indústria de petróleo e gás natural. Na gestão da corrosão estabelece ações de avaliação da corrosão, prevenção da corrosão, monitoramento e inspeções periódicas e qualificação dos gasodutos e dutos de petróleo.

Segundo Pepe, Macedo e Quintela (13), apesar do uso de epóxi ser uma solução já amplamente adotada pela indústria petroquímica e de petróleo, não há uma preocupação ou mesmo o vislumbre de soluções de controle automatizadas e de tempo real, que permitam o acompanhamento da evolução de qualidade dos revestimentos em função do tempo. Propõem, então, o desenvolvimento de uma solução de tecnologia de revestimento baseado em resina epóxi com baixa fricção e baixa molhabilidade, capaz de minimizar o efeito da corrosão em dutos metálicos. Este revestimento, oticamente ativo, possibilitaria o acompanhamento da vida útil da camada de revestimento de forma automatizada e em tempo real, usando para tanto método ótico de detecção.

Assim, faz-se necessário desenvolver uma solução de instrumentação ótico-eletrônica capaz de permitir este monitoramento automático, inteligente e em tempo real, local ou remoto, do estado de conservação de revestimentos de dutos de produção de petróleo.

## 2.1 DISPOSITIVOS ÓTICOS

A luz é composta por partículas que são denominadas de fótons e se propagam em linha reta. O espectro eletromagnético pode ser dividido em diferentes porções que recebem nomes especiais: raios gama, raios-X, ultravioleta (UV), visível, infravermelho (IR), micro-ondas, ondas de rádio, e assim por diante (Figura 2.1). O nome "luz" foi arbitrariamente excluído e diz respeito à radiação eletromagnética que ocupa comprimentos de onda entre  $0.1 \mu\text{m}$  a  $100 \mu\text{m}$ .

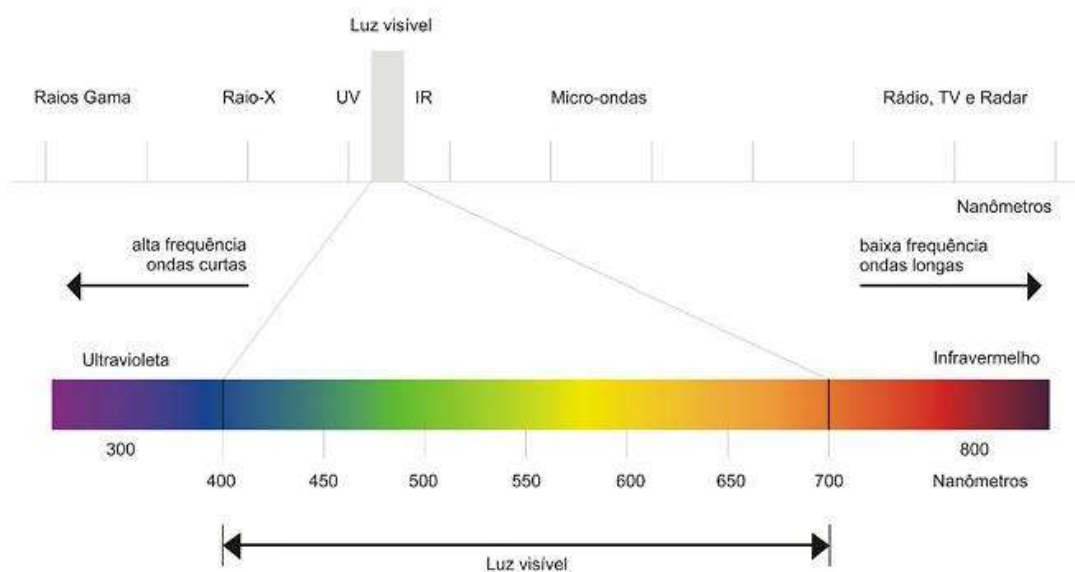


Figura 2.1 - Espectro de luz visível. (26)

Detectores de luz podem ser divididos em duas categorias: os detectores de fótons que convertem a irradiação luminosa em corrente elétrica (por exemplo, os dispositivos baseados em semicondutor), e os detectores térmicos, que, simplesmente, absorvem a energia luminosa e a transformam em calor.

Fenômenos da luz, tais como: reflexão, refração, absorção, interferência, polarização e velocidade de propagação em um dado meio, são de grande relevância no desenvolvimento de instrumentação para a medição baseada em sensores óticos. Detectores de radiação eletromagnética que atuam entre o ultravioleta e o infravermelho são chamados de detectores de luz.

A energia que a luz carrega pode ser interpretada como sendo pacotes discretos, aos quais se dá o nome de *fótons*, mas luz também pode ser interpretada como onda. Sendo assim, a energia de um *fóton*, ou de um feixe luminoso monocromático, depende diretamente desta onda de luz que se propaga. Esta energia pode ser calculada com o auxílio da Equação 2.1, em que  $k$  é a constante de Planck e vale  $6,624 \times 10^{-34}$  joule-segundo (14) e  $f$  a frequência do feixe de luz.

$$W = k f \text{ joules} \quad (2.1)$$

A frequência  $f$ , por sua vez, pode ser relacionada ao comprimento de onda e à velocidade de propagação da luz, dada pela Equação 2.2,

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (2.2)$$

em que:

$\lambda$  =comprimento de onda em metros;

$v$  =velocidade da luz, aproximadamente  $3 \times 10^8$  m/s;

$f$  = frequência da onda que se propaga em hertz.

O comprimento de onda é um parâmetro importante na escolha do dispositivo optoeletrônico de monitoramento. Este parâmetro normalmente é dado em angstroms (Å), nanômetro (nm) ou micrômetro ( $\mu\text{m}$ ), que são submúltiplos do metro (14).

O número de elétrons livres gerados em um dado material condutor ou semicondutor é, em geral, proporcional à intensidade de luz incidente. Intensidade de luz é uma medida do fluxo luminoso incidindo sobre uma superfície de área conhecida. Fluxo luminoso é, em geral, medido em *lumens* (lm) ou watts (15). As duas unidades se relacionam, uma vez que a intensidade de luz é normalmente medida em  $\text{lm}/\text{ft}^2$ , ou seja, o pé-candela (*foot-candle* –*fc*) ou em  $\text{W}/\text{m}^2$ . Sendo assim, a proporcionalidade pode ser estabelecida:  $1 \text{ lm}/\text{ft}^2 = 1 \text{ fc} = 1,609 \times 10^{-9} \text{ W}/\text{m}^2$  (14).

### 2.1.1 Diodos emissores de luz

O diodo emissor de luz ou simplesmente LED, da sigla do nome em inglês *Light Emission Diode*, é um diodo que emite luz quando uma corrente elétrica circula por ele. Em qualquer junção *p-n* polarizada diretamente, existe dentro da estrutura do dispositivo e, em particular próximo da junção, uma recombinação de buracos e elétrons acelerados pela corrente direta devido à polarização. Esta recombinação faz com que o elétron livre, ao se recombinar com um

buraco da rede cristalina do material libere energia. Nas junções  $p-n$  dos dispositivos semicondutores, parte desta energia será emitida na forma de calor e parte na forma de fótons. No silício e germânio, a maior parte é emitida na forma de calor, sendo a luz emitida insignificante. Em outros materiais, como o arsênito de gálio e fósforo (GaAsP) ou fosfeto de gálio (GaP), o número de fótons de luz emitidos após a recombinação é suficiente para criar uma fonte de luz visível. O processo de emissão de luz aplicando-se uma fonte elétrica de energia é chamado de eletroluminescência (15).

Com a utilização de outros elementos como o fósforo ou alumínio, além do arsênio e gálio, os fabricantes produzem diodos emissores de luz capazes de gerar luz em diferentes cores entre o vermelho e o violeta, inclusive infravermelho e ultravioleta.

A queda de tensão típica do LED, em polarização direta, pode variar entre 1,5 V a 4,5 V. Em condições normais de funcionamento, num LED polarizado diretamente, a intensidade da luz emitida é diretamente proporcional à corrente que passa por ele. Os LEDs têm tensão de ruptura muito baixa, tipicamente entre 3V e 7V, e são facilmente danificados se polarizados reversamente (16). A Figura 2.2 mostra o símbolo elétrico utilizado para representação do LED nos circuitos eletrônicos.

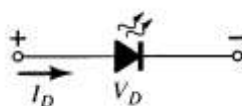


Figura 2.2 - Símbolo gráfico do LED .

### 2.1.2 Fotorresistores

A célula fotocondutiva é um dispositivo semicondutor, cuja resistência entre os terminais varia com a intensidade da luz incidente, mais conhecido como Resistor Dependente de Luz ou do inglês *Light Dependent Resistor* (LDR). Na Figura 2.3 (b), tem-se o LDR e o símbolo elétrico usado para representá-lo. Os materiais fotocondutivos mais frequentemente utilizados na fabricação dos LDR são o sulfeto de cádmio (CdS) e o seleneto de cádmio (CdSe). A célula fotocondutiva não tem uma junção como nos fotodiodos. A Figura 2.3 (a) apresenta a foto de um LDR, estes dispositivos não têm polos como os diodos, logo seus terminais podem ser ligados em ambas as posições no circuito.

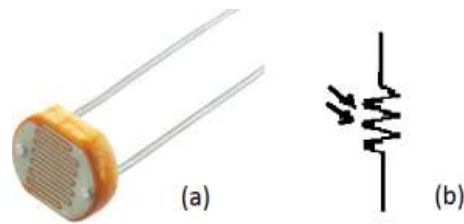


Figura 2.3 - LDR em (a) o componente e (b) símbolo

Na medida em que a iluminação sobre o dispositivo aumenta de intensidade, o estado de condução da estrutura também aumenta, devido à maior disponibilidade de elétrons livres. Este aumento no número de elétrons de condução na estrutura tem como resultado a redução do valor da resistência entre os terminais do dispositivo (15).

A curva de sensibilidade típica para um dispositivo fotocondutivo, em escala logarítmica, pode ser vista no Gráfico 2.1.

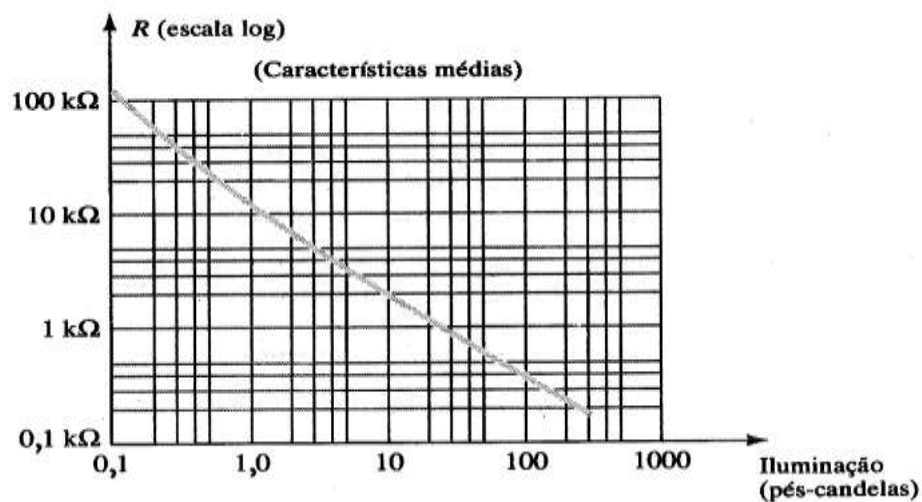


Gráfico 2.1 - Curva característica da célula fotocondutiva (GE tipo B425)

Como o olho humano, a sensibilidade das células fotocondutivas é dependente do comprimento de onda de luz (da cor) da luz incidente. As células fotocondutoras de CdS apresentam uma resposta à luz muito similar ao do olho humano, sendo geralmente utilizadas em aplicações como: controle de exposição de câmeras, máquinas fotocopadoras, equipamentos de

teste de calorimetria, densímetros, controle noturno de luz, entre outros. O Gráfico 2.2 apresenta a resposta espectral de um LDR fabricado pela Sunrom (17).

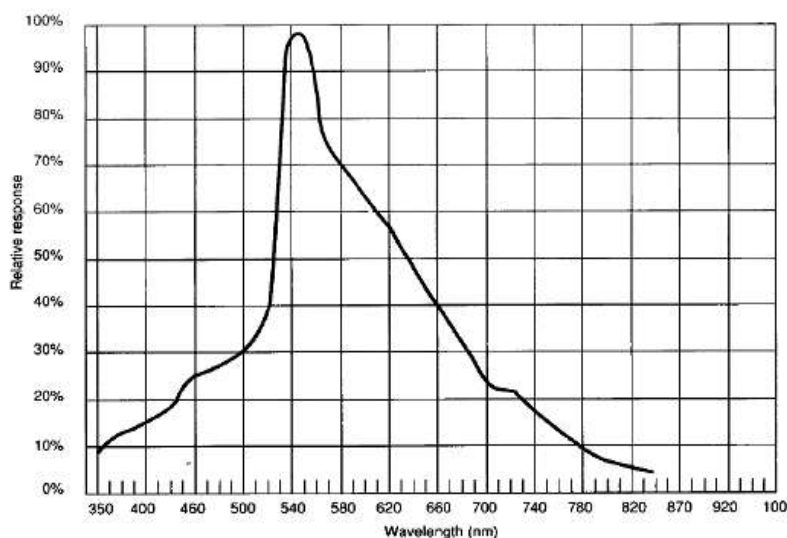


Gráfico 2.2 - Resposta espectral LDR P-510 Sunrom (fonte (17)).

### 2.1.3 Fotodiodo

O fotodiodo é um dispositivo semicondutor muito utilizado em medidas de intensidade de luz e, sobretudo, em sistemas de comunicação por transmissão ótica de informação, como, por exemplo, em sistemas de telecomunicações.

A Figura 2.4 (a) apresenta o símbolo elétrico do fotodiodo utilizado nos circuitos eletrônicos (as duas setas menores e paralelas representam a luz que chega ao diodo). Uma imagem de um fotodiodo, de estrutura similar ao utilizado neste trabalho, com uma grande janela para detecção da luz pode ser vista em (b). Em (c) são apresentados vários modelos de encapsulamento de fotodiodos.

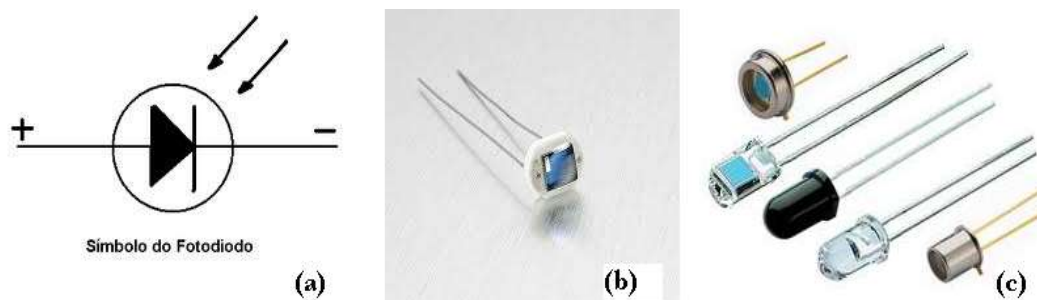


Figura 2.4 - Fotodiodos – representação gráfica e modelos



O princípio de funcionamento do fotodiodo é o efeito foto elétrico, no qual os fótons são convertidos em corrente elétrica em materiais semicondutores. Isto é, quando a energia luminosa bombardeia uma junção  $pn$ , ela pode liberar elétrons de valência, que passam para a banda de condução. Quanto mais intensa for a luz incidente na junção, maior será a corrente reversa do diodo. O fotodiodo é otimizado para ter uma alta sensibilidade à luz incidente (16). Nesse dispositivo, uma janela deixa passar a luz através do encapsulamento e chegar até a junção no interior da pastilha. A luz penetrante produz elétrons livres e lacunas. Uma observação importante é que os fotodiodos são ligados aos circuitos com polarização reversa.

O Gráfico 2.3, apresenta a curva de sensibilidade do fotodiodo BPW34 da Siemens utilizado neste trabalho. Observa-se que sua melhor eficiência está entre 800 nm e 900 nm, porém pode ser utilizado satisfatoriamente em aplicações que trabalhem na faixa de comprimento de onda entre 400 nm aos 1100 nm segundo dados do fabricante (18).

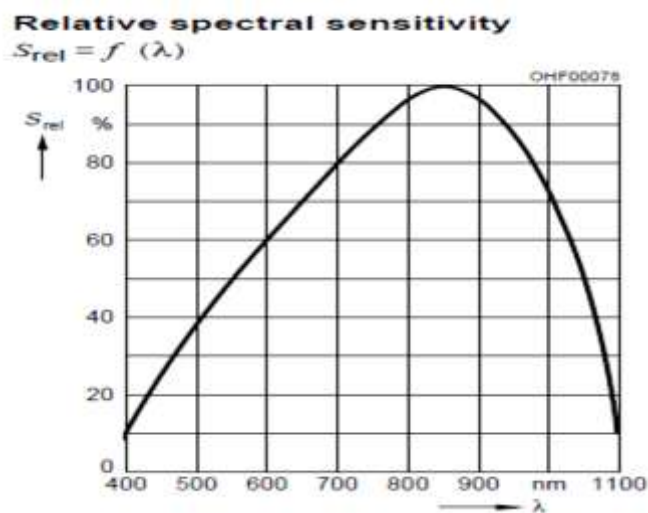


Gráfico 2.3 - Sensibilidade relativa espectral do fotodiodo BPW34 (fonte (18)).

## 2.2 REDE DE SENSORES SEM FIO

Uma rede de sensores sem fio é composta de um número tipicamente grande de dispositivos sem fio. Esses dispositivos são capazes de realizar medidas de fenômenos físicos, tais como temperatura, luz, som e umidade, e transmiti-las em um canal de um meio sem fio, para uma aplicação remota que toma decisões baseadas nas informações recebidas (20).

Segundo Kazen Sohraby (21), uma rede de sensores sem fio é uma infraestrutura composta de dispositivos sensores e atuadores, sistemas computacionais e sistema de comunicação apta a oferecer ao administrador a capacidade de observar e reagir a eventos e fenômenos de um ambiente específico. Por administrador entendem-se empresas comerciais, industriais ou do governo. O ambiente pode ser as propriedades do mundo físico, um sistema biológico, um sistema de produção industrial, dentre outros sistemas.

Uma rede de sensores sem fio é composta de quatro componentes principais: um conjunto de sensores e/ou atuadores distribuídos ou localizados; uma rede para a interligação dos sensores, geralmente, mas nem sempre, utilizando-se transmissores de rádio frequência; um ponto central para agregação das informações; e um conjunto de recursos de computação no ponto central (ou além) para lidar com dados de correlação, evento de tendências, status, consulta e mineração de dados.

### **2.2.1 Nó sensores**

Um sensor é um dispositivo que converte um fenômeno físico em um sinal elétrico. Como tal os sensores representam parte da interface entre o mundo físico e o mundo dos dispositivos eletrônicos, como os computadores. A outra parte das interfaces é representada pelos atuadores, que convertem sinais elétricos em fenômenos físicos.

Um nó sensor geralmente é composto de: microcontrolador com entrada e saídas digitais e analógicas, unidade de memória, fonte de alimentação, sensores e/ou atuadores e um sistema de comunicação (19).

### **2.2.2 Redes sem fio**

Os sistemas de rede sem fio em sua maioria utilizam modulação em rádio frequência. O licenciamento para utilização das bandas de rádio é regulado pelas autoridades governamentais, no Brasil a ANATEL é o órgão responsável. Algumas bandas são livres de licenciamento como a banda Industrial, Científica e Médica (ISM) em 2.4 GHz, que é utilizada pelos padrões sem fio WiFi, Bluetooth e ZigBee.

O Quadro 2.1 apresenta características de redes sem fio com modulação em rádio frequência. A escolha do padrão para este projeto foi baseada na comparação das características apresentados neste quadro.

	Bluetooth	UWB <sup>2</sup>	ZigBee <sup>3</sup>	Wi-Fi
IEEE padrão	802.15.1	802.15.3	(802.15.4) MAC/PHY	802.11/a/b/g/n
Banda	2.4 GHz	3.1-10.6 GHz	868/915 MHz; 2.4 GHz	2.4 GHz; 5 GHz
TX dados	1 Mb/s	110 Mb/s	10 -115Kb/s	54 Mb/s
Cobertura	10m	10m	10-3200m	100m
Nº de canais	79	(1-15)	1/10; 16	14 (2.4 GHz)
Banda/canal	1 MHz	500 MHz - 7.5 GHz	0.3/0.6 MHz ; 2 MHz	22 MHz
Coexistência	Adaptive freq. hopping	Adaptive freq. hopping	Dynamics freq. selection	Dynamics freq. selection, (802.11h)
Topologia	ponto a ponto	ponto a ponto	Cluster tree, Mesh	ESS
Max núm. nós	8	8	>65000	2007
Criptografia	E0	AES	AES	WEP, AES
Autenticação	Shared secret	CBC-MAC	CBC-MAC(ext. of CCM)	WPA (802.11i)
Proteção dados	16-bit CRC	32-bit CRC	16-bit CRC	32-bit CRC
Consumo	Médio	Baixo	Muito baixo	Alto

Quadro 2.1 - Comparativo tecnologias redes sem fio (22).

Dentre os padrões de rede sem fio foi escolhida a rede ZigBee, pois é a que possui a maior quantidade de características que combinam com os requisitos de uma rede de sensores sem fio. Dentre elas, destacam-se a quantidade de nós possíveis, a cobertura, a topologia suportada, o mais baixo consumo de energia e suporte ao modo *sleep*.

### 2.2.3 ZigBee

A especificação ZigBee foi desenvolvida a partir da formação de um consórcio entre fabricantes de semicondutores, empresas de tecnologia, OEM e usuários finais em todo o mundo (22). Os membros têm o foco na definição de uma especificação global que garanta interoperabilidade, baixo custo e baixo consumo de energia para aplicações em redes sem fio. Assim, possibilita a integração de dispositivos como interruptores, termostatos, contadores de eletricidade e controles remotos, bem como dispositivos sensores mais complexos encontrados

---

<sup>2</sup> UWB – Ultra Wide Band

<sup>3</sup> O protocolo ZigBee é construído sobre o padrão IEEE 802.15.4 que define as camadas de física e de enlace.

em abundância na área de saúde, edifícios comerciais e setores da automação industrial, ao mundo de TI.

O padrão ZigBee especifica uma pilha completa de protocolos que possibilita o seu uso em aplicações de controle sem fio. O protocolo ZigBee é construído sobre o padrão IEEE 802.15.4, que definem as camadas física (PHY) e a camada MAC. A Figura 2.5 apresenta a arquitetura ZigBee.

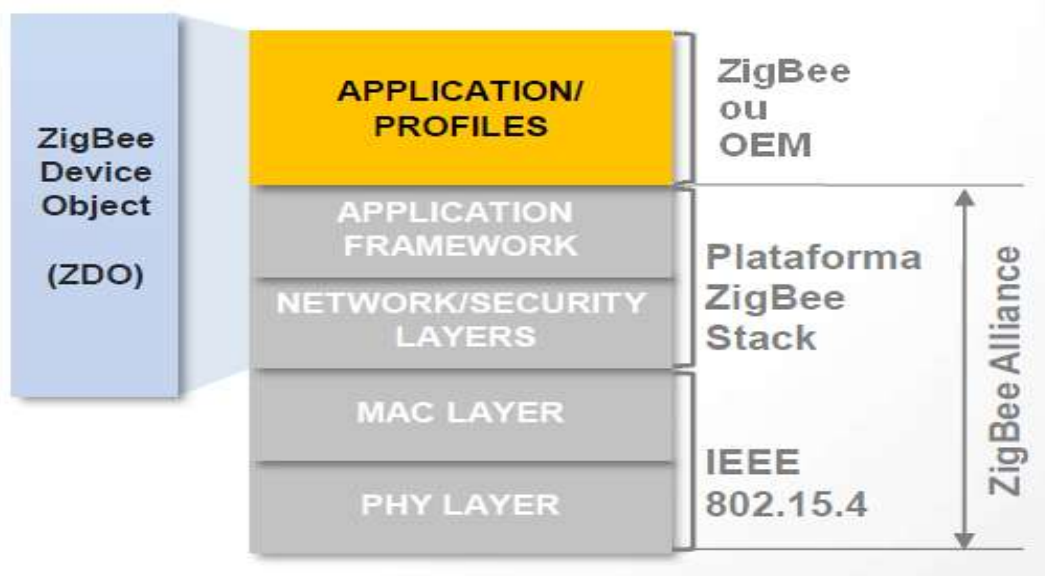


Figura 2.5 - Arquitetura em camadas da rede ZigBee (22).

O ZigBee especifica camadas de rede para administrar a formação da rede, para endereçamento, para roteamento, uma camada de aplicação para administrar os modelos dos dispositivos da rede, para ligações entre aplicações e para os objetos das aplicações. A ativação dos dispositivos a rede e procedimentos de configuração são disponibilizados por um *framework* de comissionamento (*ZigBee Device Object - ZDO*).

Os módulos XBee consistem de um *firmware* ZigBee instalado em um hardware XBee. O módulo XBee RF Modem é um transceptor sem fio. O XBee utiliza um protocolo totalmente implementado para uma rede de comunicação de dados, fornecendo recursos e robustez necessários a uma rede de comunicação de sensores sem fio (RSSF / WSN – Wireless Sensor Network). Recursos como o endereçamento, reconhecimentos e tentativas ajudam a assegurar a entrega de dados de forma segura para o nó pretendido. O XBee também tem recursos adicionais, além da comunicação de dados, para uso em monitoramento e controle.

Os módulos XBee/XBee-PRO ZB RF tem firmware compatíveis com a especificação ZigBee 2007 e com características de baixo custo e baixa potência para uso em redes de sensores sem fio. Basicamente, este módulo diferencia-se pela potência de transmissão RF que são de 2mW com alcance de 120m ao ar livre e 40m em interiores e o de 50mW com alcance de 1600m ao ar livre e 90m em interiores respectivamente.

Uma rede ZigBee opera nas frequências ISM, que ocupam as bandas de 868 MHz com 1 canal (Europa), 915 MHz com 10 canais (Estados Unidos) e em outras partes do mundo 2,4GHz com 16 canais. Nestas bandas, não são requeridas licença para funcionamento pelos órgãos gestores. As redes ZigBee oferecem excelente imunidade contra interferências. Têm a capacidade de hospedar milhares de dispositivos numa Rede (mais que 65.000 determinada pela capacidade de endereçamento de 16 bits), com taxas de transferências de dados variando entre 10Kbps a 115Kbps, mesmo na presença de outros sistemas que funcionam na banda de 2.4 G Hz. Essas características são fundamentais para a garantia e confiabilidade das transmissões. Os módulos XBee e XBee-PRO RF podem ser instalados utilizando-se antenas e cabos construídos com conectores padrão (Tipo-N, SMA, TNC), caso a instalação seja realizada profissionalmente e de acordo com as diretrizes da FCC [1]. Quanto à antena, pode ser de três modelos diferentes. A escolha do tipo da antena está ligada, principalmente, à infraestrutura da instalação.

Os módulos XBee podem ser configurados com funções coordenador (*coordinator*), roteador (*router*) ou dispositivo final (*end-device*). O coordenador é responsável pela construção da rede. Quando inicializado o roteador ou um dispositivo final buscam por um coordenador para se associarem a uma rede.

A comunicação entre os nós de uma rede ZigBee pode ocorrer no modo AT (transparente) ou API. O modo AT é também chamado de modo transparente, pois todos os dados que chegam a UART são transmitidos por RF e todo o dado recebido via RF são entregues a UART, no formato texto puro, simulando uma conexão direta ponto a ponto sem fio. Dependendo do tipo de rede e funcionalidade desejada, deve-se definir o firmware a ser instalado em cada XBee e configurar suas funcionalidades através de parâmetros pré-estabelecidos. Os fabricantes disponibilizam software de apoio para instalação e configuração dos firmwares.

O firmware para o modo API possibilita maior controle sobre a rede e algumas funcionalidades só são possíveis neste modo, como o envio de amostras das linhas de IO. O modo API transmite *frames* de mensagens padrões. Estes *frames* têm estruturas definidas, alterando parte do seu corpo em função da funcionalidade. Os *frames* que transportam informações das linhas IO digitais e analógicas propiciam a identificação do nó, transmitindo, no

*frame* o endereço do remetente. Os tipos de *frames* transmitidos podem ser de transmissão, de recepção, de envio de comandos, resposta de comandos, dentre outros. A configuração dos módulos é efetuada diretamente por comandos no modo AT ou API através da UART, enviados a módulos remotos no modo API através de um *frame* de Requisição remota de comando AT ou utilizando o software X-CTU<sup>4</sup>.

Um módulo XBee pode assumir diversas funcionalidades, dependendo do *firmware* instalado. Assim, um XBee pode ser configurado como um coordenador, roteador ou dispositivo final, funcionando no modo AT ou API. O que muda é o *firmware* instalado e as definições dos parâmetros. Através de comandos configuram-se os parâmetros de endereçamento, rede, segurança, interface RF, interface serial, comandos de IO, diagnósticos, modo de suspensão (*sleep mode*) e modo de execução dos comandos. Esses comandos são formados por dois caracteres alfabéticos, seguidos dos caracteres de parâmetros, e são prefixados pelas letras “AT”. Uma lista completa destes comandos está disponível da documentação do módulo (23).

Dentre os diversos comandos temos o identificador de rede (NI – *Node Identifier*), que aceita até 20 caracteres, que é um nome de identificação único do nó, e o comando SM, que configura o modo de suspensão do sinal RF, que define o modo de economia de energia. Apenas os módulos XBee configurados como dispositivos finais (*end-devices*) aceitam configuração para o modo de economia de energia.

Os módulos XBee tem a habilidade para monitorar e executar amostragens das linhas analógica e digitais. As amostragens das portas analógicas e digitais podem ocorrer por um comando de solicitação de amostragem, automaticamente em períodos estabelecidos, ou por detecção de mudança de estado de uma porta digital. As portas IO, são configuradas como linhas digitais de saída ou entrada e quatro destas portas podem ser configuradas com linhas de entrada analógicas com 10 bits de resolução, com tensões entre 0 V e 1,2 V, com impedância de entrada de 1 M Ohms quando efetuando a leitura.

Os dispositivos ZigBee foram projetados para ser usados com alimentação de baterias e serem capazes de funcionar no modo *sleep* por longos períodos de tempo. Como os dispositivos finais não podem ser acordados por uma solicitação por RF, os coordenadores e os roteadores são equipados com capacidades adicionais (incluindo *buffer* de pacotes e *timeouts* de transmissão estendida) para garantir a entrega de dados de forma confiável aos dispositivos finais.

---

<sup>4</sup> X-CTU é um software de suporte para programação dos módulos XBee, disponibilizado pela DiGi International Inc.

Para um dispositivo final fazer parte de uma rede ZigBee, esse deve encontrar um dispositivo roteador ou coordenador que o permita associar-se. Uma vez que o dispositivo final associou-se à rede é formada uma relação pai-filho entre o roteador ou coordenador e o dispositivo final.

Quando o dispositivo final sai do modo de hibernação, transmite um *poll request* para o seu pai. Quando seu pai recebe uma transmissão *poll request*, ele verifica uma fila de pacotes para ver se tem alguma mensagem guardada para o dispositivo final que o enviou o *poll request*. Em seguida envia uma confirmação de camada MAC (*ACK*) ao dispositivo final com informação da existência ou não de dados a serem enviadas para o dispositivo final. Se o dispositivo final recebe o reconhecimento (*ACK*) e toma conhecimento que nenhum dado aguardava por ele, ele retorna ao modo *sleep*. Caso contrário ele permanecerá ativo para receber os dados. Este protocolo está representado na Figura 2.6. Esse processo de troca de mensagens permite o dispositivo final entrar no modo *sleep*, desligando o receptor RF quando não existe nenhum dado a receber, a fim de reduzir o consumo de corrente e conservar a carga das baterias.

O dispositivo final pode somente enviar dados diretamente ao seu pai. Se o dispositivo final precisa transmitir em *broadcast* ou *unicast* para outros dispositivos da rede, ele envia a mensagem diretamente ao seu pai e seu pai se encarregará de entregá-la, realizando os procedimentos de encaminhamento necessários para entregar o pacote ao destino.

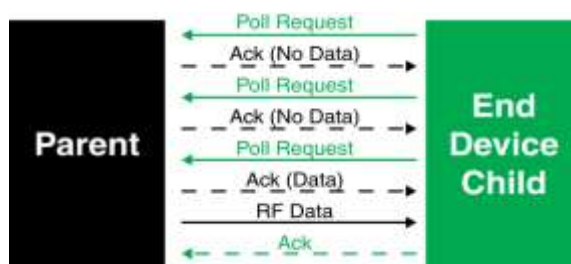


Figura 2.6 - Protocolo de requisição de dados dispositivo-final.

Cada roteador ou coordenador mantém uma tabela de filhos, que contém os endereços dos dispositivos finais associados a ele. Nesta relação o coordenador ou roteador exerce a função de pai do dispositivo-final. Se esta tabela de filhos está completamente cheia, o roteador ou coordenador não poderá mais associar dispositivos finais a ele.

Desde que não é garantido que um dispositivo-final esteja ativo em determinada hora, o roteador pai é responsável por gerenciar os pacotes de mensagens que chegam para serem

entregues aos seus dispositivos finais filhos. Se um pai recebe uma transmissão de dados RF para um dos seus filhos, e tem suficiente espaço de memória de armazenamento de mensagens, ele irá armazenar a mensagem. A mensagem será armazenada até um tempo de expiração de mensagem ou até o dispositivo-final tornar-se ativo e solicitar as suas mensagens.

Os dispositivos finais XBee suportam dois tipos diferentes do modo *sleep*:

- pino de sinal *sleep*;
- *sleep* cíclico.

O pino nove (*Sleep\_RQ*) do módulo XBee possibilita que um microcontrolador externo controle em que modo o módulo XBee estará: ativo ou no modo *sleep*.

Nos dois tipos de hibernação, os dispositivos finais XBee, chamam seus pais a cada 100 ms enquanto estão ativos para readquirir mensagens armazenadas. Quando uma transmissão de requisição de mensagem é enviada pelo dispositivo final, este habilita o receptor até que uma transmissão do sinal *ACK* seja recebida do pai. Em geral, a resposta à requisição de mensagem ocorre em 10ms. O sinal *ACK*, indica se o pai tem dados armazenados ou não para o dispositivo final. Se o sinal *ACK*, informa que o pai tem dados armazenados para ser transmitido para o dispositivo final, esse mantém o receptor RF ativo para receber os dados; caso contrário, desliga o receptor RF para reduzir o consumo de corrente (economizar bateria), até o próximo ciclo de ativo.

Assim que o módulo entra em modo de hibernação, o pino *On/Sleep* (pino 13) é colocado em nível baixo para indicar que o módulo está entrando em modo *sleep*.

O pino 9 (*Sleep\_RQ*) controla o estado do módulo XBee. Quando o pino 9 é colocado em nível alto, o módulo concluirá as operações de transmissões ou recepção pendentes e entrará no modo *sleep*. Por exemplo, se o módulo ainda não está associado a uma rede e o pino 9 é colocado em nível alto, o módulo entrará no modo *sleep* após a conclusão do processo de associação à rede. O módulo sairá do modo *sleep* se o sinal do pino 9 passar para o nível baixo.

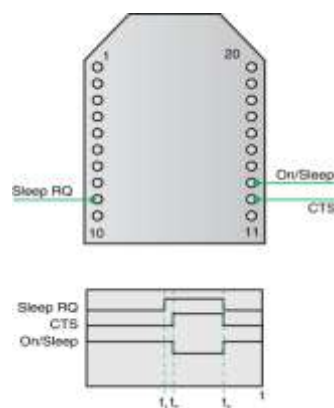


Figura 2.7 - Posição dos pinos SLEEP e gráfico de tempo dos eventos.



Na Figura 2.7 acima  $t_1$ ,  $t_2$  e  $t_3$  representam os seguintes eventos:

$t_1$  – tempo quando o *Sleep\_RQ* é posicionado no nível alto;

$t_2$  – tempo quando o XBee entra no modo *sleep* (o sinal CTS só muda de estado se o controle de fluxo estiver habilitado);

$t_3$  – tempo quando o *Sleep\_RQ* é reposicionado em baixo e o módulo é ativado.

O tempo entre  $t_1$  e  $t_2$  varia dependendo do estado do módulo. No pior caso, se o dispositivo final estiver tentando se associar a uma rede, ou esperando por um sinal *ACK* de uma transmissão, este atraso poderá ser de até alguns segundos.

Quando o módulo está ativo e associado a uma rede, transmite uma requisição de dados para o pai para saber se este tem alguma mensagem armazenada. O dispositivo final continuará enviando esta solicitação a cada 100ms, enquanto estiver ativo. O pai e os dispositivos remotos devem ser configurados corretamente para armazenarem os dados e utilizarem o tempo adequado de espera.



### 3. ESTUDOS PRELIMINARES

Cada nó de monitoramento é constituído de um módulo de sensoriamento remoto composto pelos seguintes componentes: circuito de conversores e reguladores de tensão, circuito de dispositivos emissores de luz, dispositivos detectores de luz, circuito eletrônico para sensoriamento, circuitos de aquisição de dados e transmissão dos dados. Os circuitos eletrônicos requerem alimentação em corrente contínua, o que determina a necessidade de conversão de tensão AC em DC. Para maior flexibilidade de uma rede de sensores sem fio podem ser utilizadas baterias. O consumo total do nó e a capacidade de armazenamento de carga da bateria determinam o tempo de vida útil de operação do nó de sensoriamento. Os módulos de sensoriamento remoto deverão ser capazes de funcionar por longo período. O menor consumo de energia possível é um ponto norteador do desenvolvimento dos circuitos de sensoriamento e do protocolo de aquisição e transmissão dos dados.

Os dutos, normalmente, são de grande extensão e estão instalados em áreas isoladas. Um baixo consumo de energia nos sistemas de transmissão determina uma baixa potência de irradiação e, portanto, um pequeno raio de alcance do sinal. Um módulo ZigBee, de 2mW, alcança uma distância de cerca de 120 metros em local aberto. Como este módulo possibilita a retransmissão do sinal, é possível atingir grandes distâncias utilizando vários módulos. Assim, por exemplo, com 10 pontos será possível atingir cerca de 1200 metros. Outra opção, quando da existência de fonte de alimentação ininterrupta, será a utilização de módulos de 50mW. Estes atingem cerca de 1600 metros em campo aberto, com visada direta. Outro aspecto a ser considerado é a determinação da quantidade máxima de pontos de retransmissão do sinal para o volume de dados a serem retransmitidos.

Os diversos pontos da rede de monitoramento serão configurados, administrados e gerenciados a partir de um sistema computacional. Entende-se como configuração a capacidade do sistema definir a estrutura lógica da rede, com informação de localização do ponto de monitoração, condições do ponto de monitoração, como tipo da fonte de energia, comercial ou baterias, definição de rota e parametrizações tais como: período de aquisição e transmissão dos dados por ponto, prioridade, etc. Por administração entende-se o monitoramento do nível de tensão DC da fonte de energia, a coleta de dados e supervisão do funcionamento dos pontos da rede de sensoriamento, entre outros. As funções de gerência analisam os dados recebidos e apresentam relatórios de acompanhamento do estado de degradação do revestimento por nó.

. A apresentação da parte experimental é antecedida pela apresentação dos métodos de detecção da luz. O trabalho foi iniciado com o desenvolvimento de experimentos para teste de

conceito e da técnica e serão apresentados em ordem cronológica de execução. Na seção 4.2, é apresentada a rede de sensores sem fio, base deste trabalho.

### 3.1 MÉTODOS DE DETECÇÃO DA LUZ

Na interação entre luz e matéria, três são os processos ou fenômenos que resultam dessa interação: a luz incidente sobre uma porção material sofrerá reflexão parcial, parte será transmitida e parte final absorvida pelo material.

Dessa forma, é possível escrever a expressão (3.1) de conservação da intensidade inicial como:

$$I_o = I_{tra} + I_{ref} + I_{abs} \quad (3.1)$$

Na Figura 3.1, está representada a seção de corte, ao longo do eixo paralelo ao comprimento do tubo. Nesta seção, podem ser vistas: a casca em aço carbono (pontilhado escuro) e o revestimento (amarelo). Ainda na Figura 3.1 está assinalada, com uma seta para a direita, a direção e o sentido de fluxo do líquido transportado. Nos desenhos esquemáticos a seguir, não estão sendo respeitadas as dimensões reais de tubos e da camada de revestimento (13).

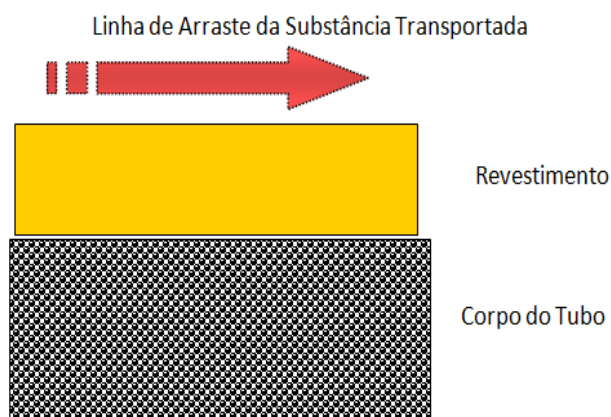


Figura 3.1 - Seção de Corte ao Longo do Eixo Paralelo ao Comprimento do Tubo.

A ação desse fluxo de líquidos e outros componentes sólidos em suspensão atacam a camada de revestimento provocando corrosão e deterioração.

Como apresentado na expressão (3.1),  $I_0$  representa a intensidade de uma fonte de excitação. Essa fonte de luz pode ser gerada a partir de diodos emissores de luz (LEDs) de alta eficiência e alta potência, que são fontes de luz eficientes no espectro visível e infravermelho sendo detectadas por fotodiodos, por exemplo.

Em um primeiro cenário, a detecção do estado de conservação do epóxi pode ser estabelecida observando-se a luz transmitida na camada de revestimento.

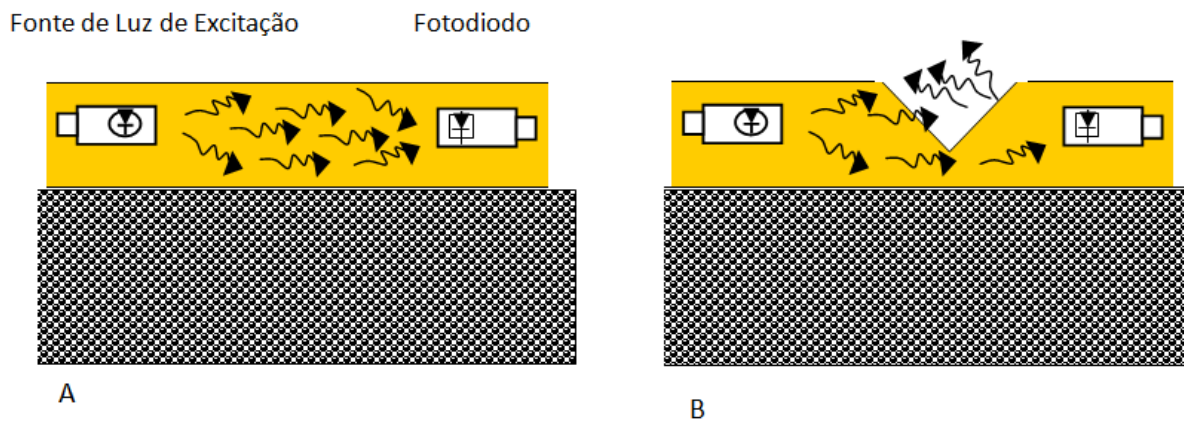


Figura 3.2 - Modelo detecção pela luz transmitida .

Na Figura 3.2 (A), está representada a camada de revestimento dotada de uma fonte de luz e um detector de fótons em uma escala que possibilita visualização do método proposto. Nesta representação, a camada de revestimento ainda não foi erodida e o número de fótons transmitidos pelo meio é um número  $N$ . Já na Figura 3.2(B), como a camada de revestimento encontra-se parcialmente desgastada, o número de fótons transmitidos diminui. A diferença da intensidade inicial e final pode ser medida ao longo do tempo, estabelecendo, assim, uma linha temporal da degradação da camada de epóxi (13).

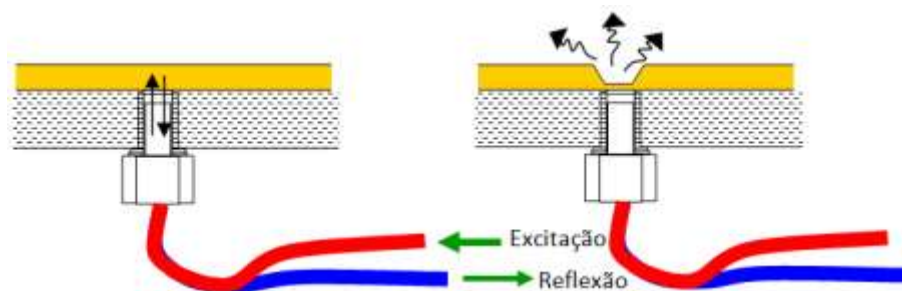


Figura 3.3 - Detecção da Qualidade da Camada de Epóxi por Reflexão.

Ainda fazendo referência à expressão (3.1), o segundo termo dessa expressão dá conta da parcela de luz refletida por uma superfície ou interface. Na Figura 3.3, é apresentado um esquema simplificado para detecção da qualidade da camada de epóxi por reflexão.

Nesse caso, a espessura da camada é medida por reflexão. Em tal aplicação, a falta de fótons também denota um afinamento do revestimento.

Finalmente, aplicando as particularidades do último termo da expressão (3.1) - ou seja, a absorção de luz - é possível pensar na pigmentação do revestimento por um fluoróforo<sup>5</sup>. O fato de excitar esse material em um dado comprimento de onda faz com que este emita um ou mais ondas em comprimentos de onda mais longos. A luz de fluorescência que retorna pode, então, ser detectada, tanto sua intensidade, como a intensidade relativa de seus componentes, podendo servir como medida da espessura e do envelhecimento da camada (13), Figura 3.4.

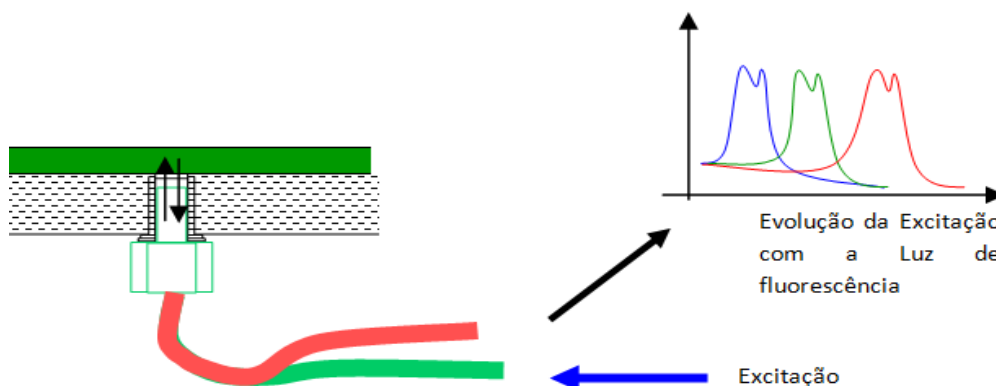


Figura 3.4 - Detecção da qualidade da camada de epóxi por fluorescência.

Diodos emissores de luz (LED) serão utilizados com fontes de luz e os fotoresistores e os fotodiodos serão utilizados como detectores de luz. De acordo com os resultados experimentais obtidos, será determinada a melhor distribuição física para instalação dos LEDs e detectores de luz nos tubos. Definida esta primeira parte, que também levará em consideração a quantidade de fontes e detectores de luz a serem instalados em uma seção de um duto, os experimentos devem avançar na direção do modelo para aplicação prática em campo, chegando o mais próximo da realidade. A possibilidade de simular o desgaste da camada de revestimento ou controlar o

---

<sup>5</sup>É um componente de uma molécula que faz com que esta seja fluorescente, absorvendo um determinado comprimento de onda e emitindo um comprimento de onda maior.

desgaste da camada de revestimento, mecânica e quimicamente nos modelos experimentais, é de suma importância para obtenção dos resultados esperados.

Cada um dos métodos apresentados define características específicas para o desenvolvimento dos detectores, tanto em relação às características dos circuitos eletrônicos de detecção quanto às características físicas de construção e localização das fontes e detectores de luz.

### 3.2 LUZ TRANSMITIDA E ESPALHADA NA CAMADA DE REVESTIMENTO

Foram iniciados os testes para determinação do estado da camada de revestimento pelo método de detecção da luz transmitida, apresentada na seção 3.1. Considerando-se os resultados experimentais positivos quanto à possibilidade de detecção do desgaste da camada de revestimento por este método, o trabalho será conduzido nesta linha.

Por questões de implementação prática e teste, a camada de revestimento dos dutos foi substituída por amostras à base de epóxi<sup>6</sup>, ou simplesmente, amostra. Em geral, a camada de revestimento de proteção para os dutos tem espessura da ordem de 400  $\mu\text{m}$ , bem inferior à espessura das amostras preparadas neste projeto. Além do mais, a camada de revestimento deve possibilitar a traçabilidade ótica. Neste particular, o material utilizado para os testes de laboratório devem permitir a transmissão da luz através deles. Para amostras opacas o método proposto neste item não é adequado.

Um primeiro experimento foi desenvolvido para que pudessem ser levantados dados sobre o comportamento da luz incidente em uma amostra de epóxi. Para tal foi utilizado um peça feita em perfil de alumínio com dimensões 13,73 X 37,85 x 38,08 mm, apresentada na Figura 3.5. Em um de suas faces laterais foi feito um orifício central e instalado um LED azul de alto brilho de 5 mm. Na face oposta, foi feito outro orifício, também no centro, e instalado um LDR; na face oposta, à 90° em relação à face onde o LED foi instalado, um terceiro orifício foi feito para a instalação do segundo LDR. Os LDRs e o LED estavam voltados para o centro da estrutura de alumínio. Foi utilizado um suporte para o LED de forma a melhor acomodá-lo na face da estrutura e possibilitar a substituição do LED por outros de diferentes cores. Todo o corpo da estrutura foi pintado com preto fosco e, após secagem, esta forma foi preenchida gradualmente com adesivo epóxi da marca Araldite.

---

<sup>6</sup> Produtos à base de epóxi são amplamente utilizadas na proteção de dutos de aço.  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Fusion\\_bonded\\_epoxy\\_coating](http://en.wikipedia.org/wiki/Fusion_bonded_epoxy_coating)

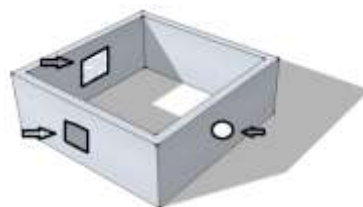


Figura 3.5 - Corte de um perfil de alumínio

O resultado dessa montagem está apresentado na Figura 3.6, onde podem ser observados fios de cobre encapados em plástico amarelo. Esses fios estão ligados aos terminais dos LDRs. A Araldite Hobby – Resina é um preparado de resina epóxi à base de Resina Epóxi Bisfenol A, na faixa de concentração entre 60-100 % e 1,4 – *Butandiol diglicidiléter* na faixa de concentração entre 7-13 %, apresentando cor azulada (24).

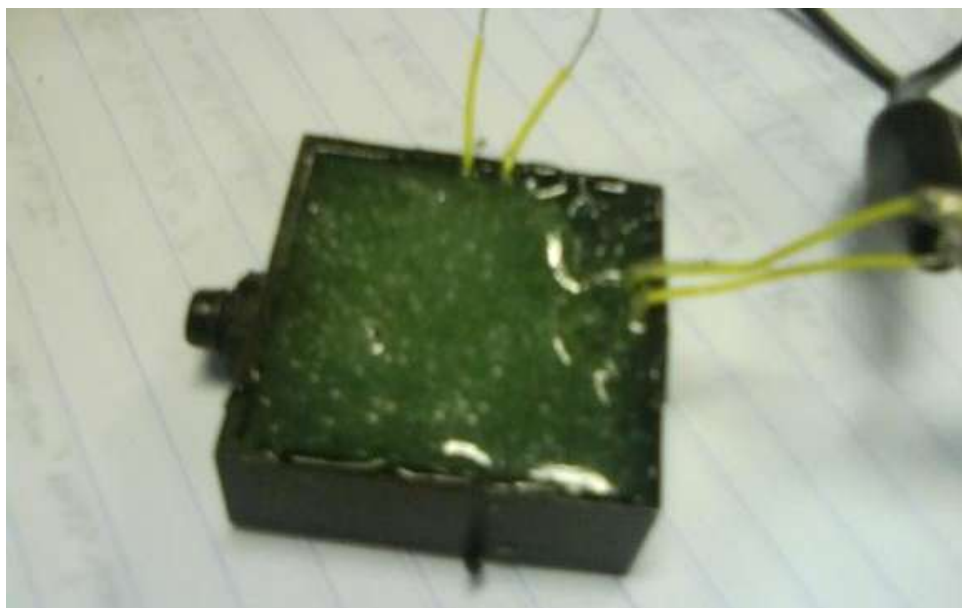


Figura 3.6 - Estrutura de perfil de alumínio preenchida com epóxi.

A proposta é medir a variação da resistência elétrica dos LDRs em função da variação da intensidade da luz de um LED transmitida através da amostra de epóxi. O circuito apresentado na Figura 3.7 foi montado utilizando uma fonte de tensão variável, um resistor de 1 k ohms e um

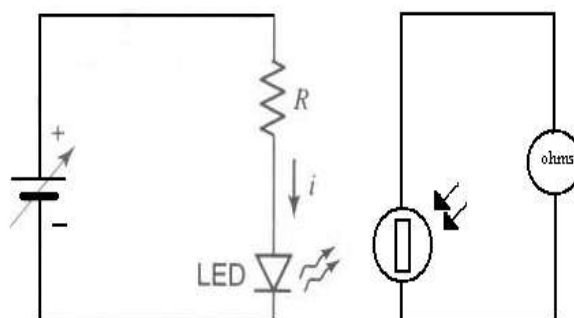


Figura 3.7 - Circuito elétrico para medir a variação da resistência de um LDR.



LED azul de alto brilho ligado em série. Os LDRs estavam ligados diretamente aos terminais dos multímetros.

Utilizando multímetro digital da ICEL modelo MD6700, os valores das medidas de resistência nos 2 LDRs foram anotados, com variação de tensão contínua (DC) de polarização do circuito do LED entre 12,00 volts e 2,50 volts. As medidas obtidas têm certa dinâmica e variaram em mais de uma escala do multímetro. Para a apresentação gráfica dessas medidas, estas foram normalizadas para serem apresentadas na escala kilo ohms. A partir da média de quatro réplicas de medidas obteve-se o Gráfico 3.1. Comparando as medidas realizadas com e sem a resina epóxi observou-se que a absorção de luz pelo epóxi é superior a 50%. Esse comportamento assegura a possibilidade de utilização dessa variável como grandeza sensível para o monitoramento dos revestimentos epóxi. A variação das medidas foi lida em ambos os detectores de fótons, um montado na mesma linha que o LED a  $0^\circ$  e o outro formando um ângulo de  $90^\circ$ .

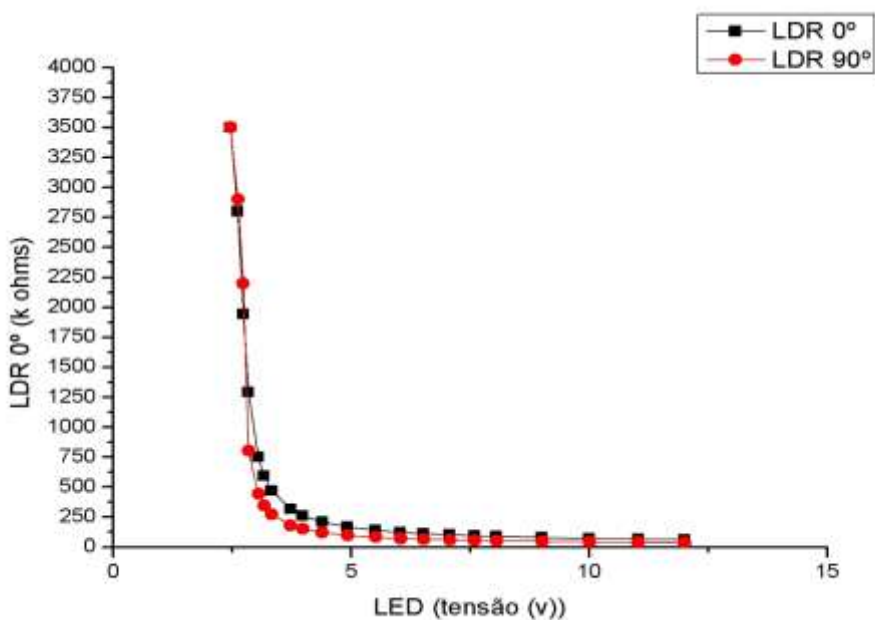


Gráfico 3.1 - Variação da resistência com intensidade da luz no LDR.

A Figura 3.8 apresenta uma imagem do experimento, onde se vê a luz azul do LED e os terminais em fio vermelho dos LDRs. A estrutura foi instalada em um ambiente isolado, onde foi possível evitar a influência da iluminação ambiente, lâmpadas fluorescentes e a luz natural. Assim pode-se afirmar que a luz transmitida observada foi, em quase sua totalidade, devida apenas à luz do LED. Essas medidas eram feitas a cada 30 segundos.

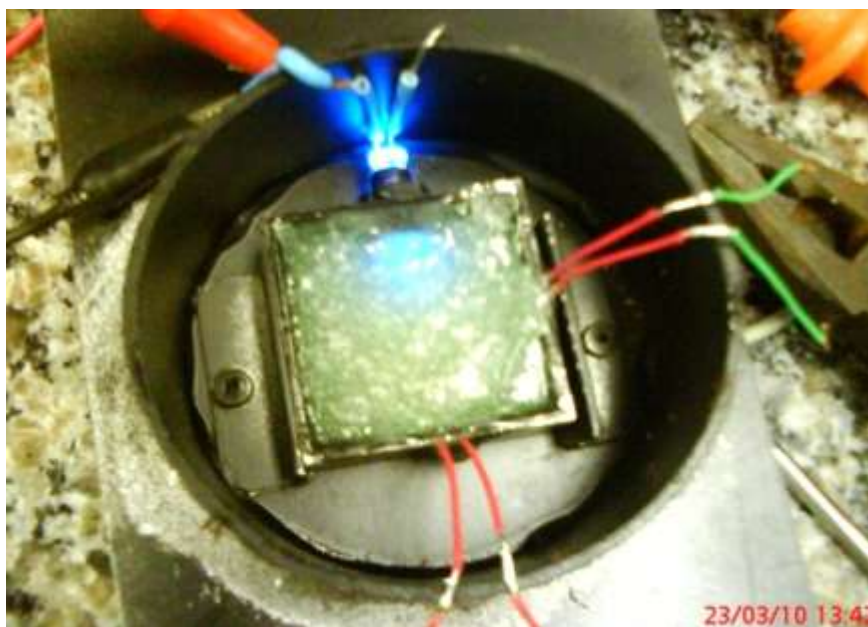


Figura 3.8 - Montagem do experimento com o LED ligado.

### 3.3 ERODINDO A AMOSTRA DE EPÓXI

Um segundo experimento foi executado utilizando-se a mesma montagem do primeiro. A diferença é que agora o epóxi seria erodido em passos de 1 mm, utilizando-se uma fresa de 12 mm de diâmetro, e anotando-se as medidas a cada passo, conforme Figura 3.9 e Figura 3.10. As medidas eram feitas 30 segundos depois de posicionada uma amostra de epóxi na caixa de medida, em seguida a caixa era fechada para evitar a interferência da luz ambiente e de eventuais efeitos de fluorescência. Com um circuito similar ao da Figura 4.8, com a fonte de tensão fixa em 9V, foram anotadas as leituras nos multímetros para cada passo.

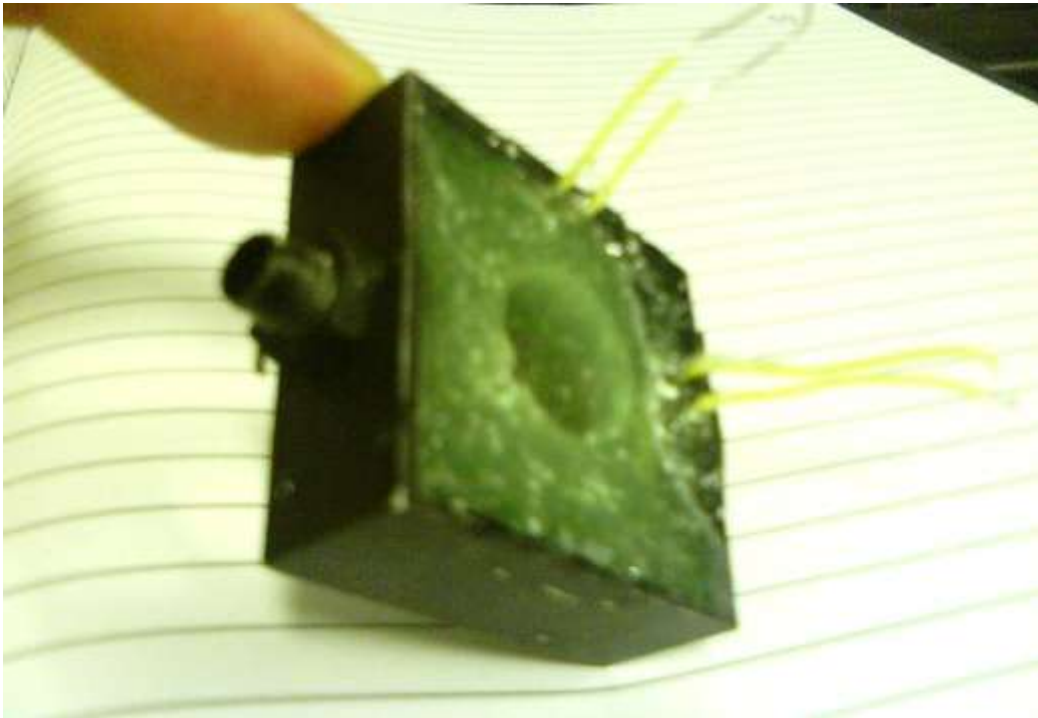


Figura 3.9 - Fase de erosão do epóxi.

O Gráfico 3.2 apresenta os valores de resistência do LDR em função da profundidade do desgaste. Observa-se a partir deste gráfico que o valor da resistência lida no LDR varia em uma faixa que possibilita desenvolver instrumentação para detecção da qualidade de revestimentos utilizando a luz transmitida como parâmetro de avaliação.

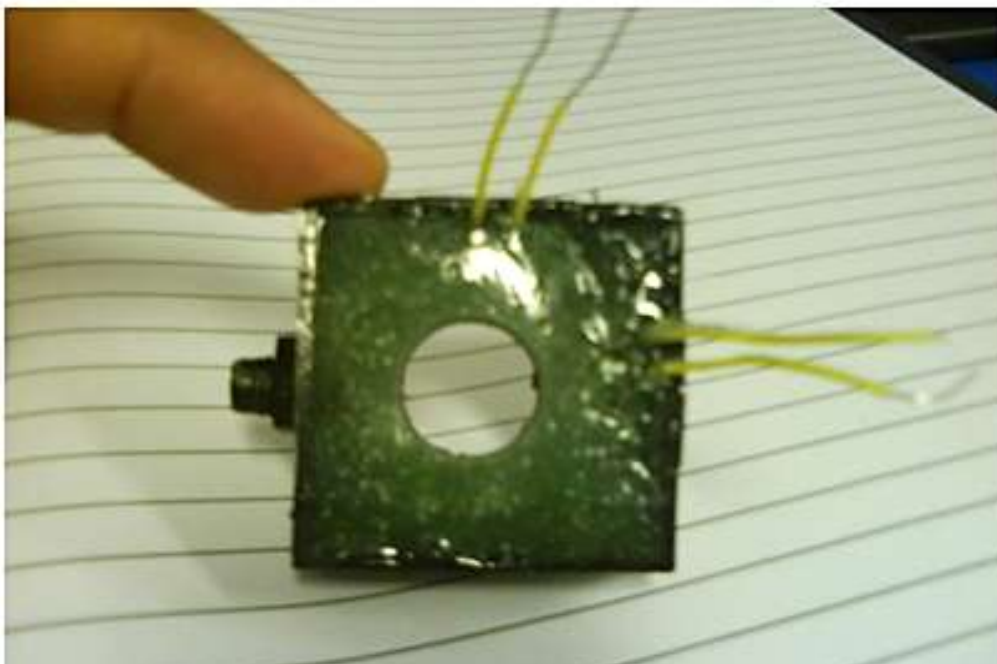


Figura 3.10 - Amostra com epóxi totalmente erodido.

A utilização dos LDRs nesta etapa foi importante para mostrar que é possível medir desgastes em amostra de epóxi medindo a luz transmitida. Em vista das suas características físicas e elétricas, esse sensor não seria adequado para a detecção da luz transmitida, inclusive em função de sua velocidade de resposta, repetitividade, susceptibilidade à temperatura e precisão. Tomou-se então a decisão de usar fotodiodos como detectores de luz.

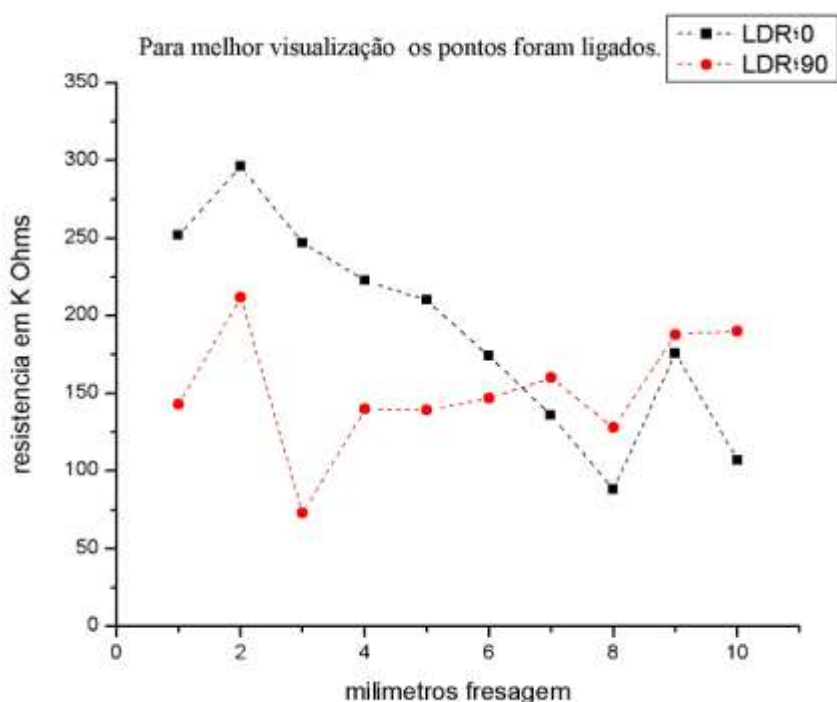


Gráfico 3.2 - Variação da resistência em função da profundidade do sulco.

#### 3.4 SENSOR REMOTO SEM FIO

Um nó sensor básico é composto por cinco componentes principais. (1) Um controlador para processar todos os dados relevantes, com capacidade de executar localmente código de programação, (2) memória para armazenamento do programa e dados intermediários dos sensores e atuadores, (3) os sensores e/ou atuadores propriamente ditos, que são dispositivos que podem observar ou controlar parâmetros físicos do ambiente; (4) um sistema de comunicação, para que os nós transmitam e recebam informações por um canal sem fio; por fim, (5) a fonte de energia. Normalmente, utilizam-se baterias e, algumas vezes, é possível a recarga com a utilização de painéis solares (25).

Cada um desses componentes tem de funcionar de forma equilibrada, de tal modo que todas as tarefas necessárias sejam executadas com o menor consumo possível de energia.

Tanto os dispositivos de comunicação como o microcontrolador devem estar inativos o maior tempo possível, utilizando-se um temporizador programável para que estes dispositivos sejam periodicamente reativados.

Com base na composição de um nó sensor e adotando a luz transmitida como parâmetro para determinação da qualidade da camada de revestimento epóxi, o próximo passo foi construir um sensor remoto para detectar a intensidade da luz transmitida pela amostra de epóxi. Os dados deste sensor serão transmitidos em formato de texto para um receptor remoto ligado a um microcomputador.

Este sensor funciona numa configuração ponto a ponto. Para aperfeiçoar os testes novas amostras foram elaboradas.

#### **3.4.1 Novas amostras**

As amostras anteriores eram relativamente grandes e demandavam tempo para confecção, além de grande quantidade de epóxi. Com as primeiras amostras o processo de erosão era efetuado simultaneamente com os testes, retardando ainda mais cada medida. Uma vez que a determinação da qualidade da camada de epóxi pela luz transmitida foi validada, foram preparadas amostras menores, previamente erodidas para os testes. Foi utilizado, então, um perfil tubular de alumínio de seção quadrada, com medida interior de 22 mm e altura de 7 mm. Assim, oito amostras foram confeccionadas. A Figura 3.12 apresenta as formas. Essas formas foram preenchidas com Araldite Hobby e, após a secagem, foram desenformadas. As formas foram recobertas com fita adesiva para facilitar a remoção das amostras. Após a secagem do Araldite, elas se soltaram facilmente depois de pressionadas, como mostra a Figura 3.11. O passo seguinte foi erodir sete das amostras com uma fresa. A primeira com 1 mm de profundidade, e as demais com passos de 0,5mm de profundidade até a última que ficou com a profundidade de 4.0mm.



Figura 3.12 - Forma para as amostras

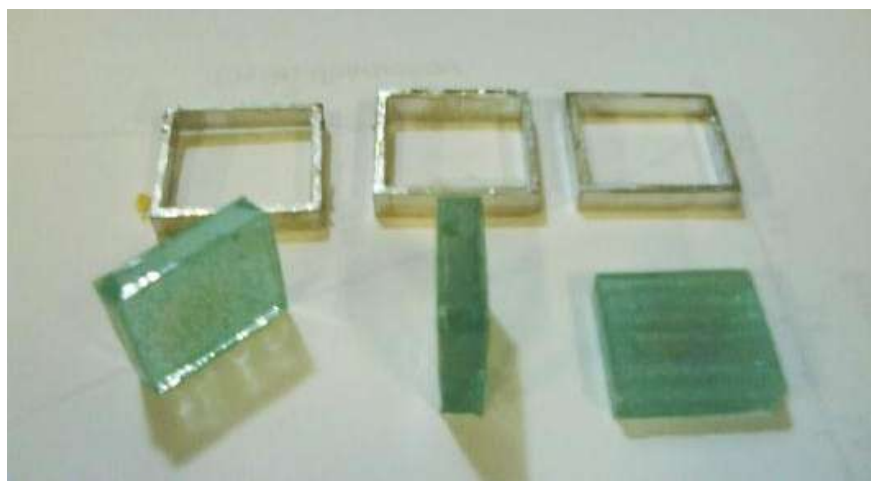


Figura 3.11 - Amostras a base de epóxi, fora da forma.



Figura 3.13 - Amostras fresadas e sulco preenchido com cola azul.

A Figura 3.13 apresenta algumas das amostras já erodidas e preenchidas com cola plástica Acrilex na cor azul, as quais, após secagem, adquiriram uma cor azul escuro.

A partir de amostras prontas, os testes de verificação poderiam ser mais dinâmicos. As amostras seriam substituídas em um casulo específico para elas e os dados detectados pelos sensores seriam transmitidos para o receptor remoto.

### 3.4.2 O módulo sensor e transmissor

Este trabalho foi desenvolvido em duas etapas: primeiramente foi projetado, construído e testado todo o circuito em um *protoboard*; o passo seguinte concentrou-se nas melhorias e no projeto de uma placa de circuito impresso, com um casulo para substituição dinâmica das amostras.

#### 3.4.2.1 O PROJETO NO SENSOR NO PROTOBOARD

As seguintes etapas de definição da metodologia e testes foram executadas:

- a) levantamento da plataforma do microcontrolador para desenvolvimento do protótipo. Foi escolhida a ATMel considerando-se os seguintes pontos:
  - disponibilidade de Kits Arduino com este microcontrolador;
  - facilidade de implementação de comunicação pela porta USB;
  - quantidade de portas analógicas e digitais disponíveis, e
  - a corrente disponível para acionamento dos LEDs sem a necessidade de utilização de *buffer* adicional ao circuito;
- b) estudo da plataforma e programação do Arduino;
- c) desenvolvido o circuito de amplificação do sinal do fotodiodo com amplificador operacional TL082;
- d) procedimento de aquisição e transmissão dos dados adquiridos.
- e) a escolha de um transmissor e receptor de rádio frequência.

O módulo Arduino-mini utiliza microcontrolador ATmega168. Esse microcontrolador é de 8 bits, de 8 MHz de clock com 16 K de memória Flash, 512 bytes de EEPROM, 1 K bytes de memória RAM.

O sensor remoto é constituído dos seguintes blocos funcionais:

- a) alimentação – regulação e filtragem;
- b) LEDs de sinalizações;
- c) código de controle e logica de funcionamento;
- d) emissão da luz;

- e) detecção da luz;
- f) aquisição do sinal de luz transmitida;
- g) transmissão dos dados.

A Figura 3.15 mostra essa montagem. Nesse experimento, foi utilizado um fotodiodo, como discutido na seção 2.1.3. Como o sinal elétrico do fotodiodo é muito pequeno, é necessária a utilização de um circuito amplificador. O fotodiodo funciona como uma fonte de corrente. A luz incidente na janela de detecção de um fotodiodo (ver Figura 2.4) gera uma corrente reversa que é proporcional à intensidade luminosa, porém essa corrente é muito baixa para ser medida diretamente. A solução é amplificar a corrente gerada pelo fotodiodo e transformá-la em tensão.

Assim a tensão resultante pode ser convertida em um sinal digital por um conversor analógico digital (ADC) interno do microcontrolador. Para obter a tensão na saída do amplificador proporcional à corrente de entrada, utilizou-se a configuração ICVS – amplificador de transresistência (*current-controlled voltage source*), que é uma fonte de tensão controlada por corrente. Essa tensão de saída será ligada a um ADC. A Figura 3.14 apresenta o desenho do circuito amplificador de corrente para o fotodiodo, que será proporcional à intensidade luminosa que chega à janela do diodo, transformando-a em tensão.

O sinal de saída do amplificador operacional está ligado ao pino AD2 do Arduino-mini. Esse pino dá acesso a uma porta analógica configurada como entrada. O ADC possui resolução de 1024 bits e foi configurado para utilizar tensão de referência interna de 5 V.

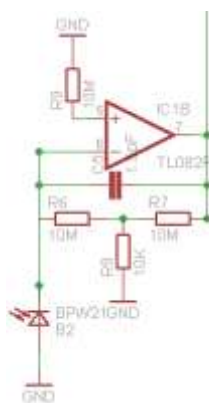


Figura 3.14 - Circuito amplificador do sinal fotodiodo

Foi desenvolvido um firmware utilizado uma ferramenta para codificação, compilação e carga do programa para os kits Arduino<sup>7</sup>. Esse código controla os passos de aquisição,

<sup>7</sup> Esta ferramenta está disponível em <http://arduino.cc/en/Main/Software>



conversões, sinalização e transmissão dos dados, disponível no Apêndice A - Código Arduino-mini transmissor. Além de executar passos como: colocar o pino D13 no nível alto, ligando assim o LED branco de alto brilho.

A luz emitida pelo LED é transmitida pela amostra de epóxi e atinge a janela do fotodiodo. Esses fótons de luz são convertidos em corrente elétrica, que é amplificada e transformada em tensão sendo lida pelo ADC, pino AD2. Os valores na porta AD2 são convertidos em texto no formato ASCII e transmitidos serialmente pela porta digital D3. Esse pino funciona com a saída serial para o transmissor. O pino correspondente a esta porta digital (D3) está conectado ao transmissor de RF da Keymark de 315/433,92 MHz. O transmissor de RF tem modulação FM ASK (modulação por chaveamento de amplitude), operando com a tensão de 5 V, tem um consumo de 10 mA, com taxa de transmissão entre 300 bps a 10 Kbps, que são valores razoáveis para um nó de sensor remoto. Tal transmissor recebe os dados seriais no pino 2 e os transmite. O receptor executa o procedimento reverso desmodulando o sinal RF e entregando no pino 2, a informação digital serial.

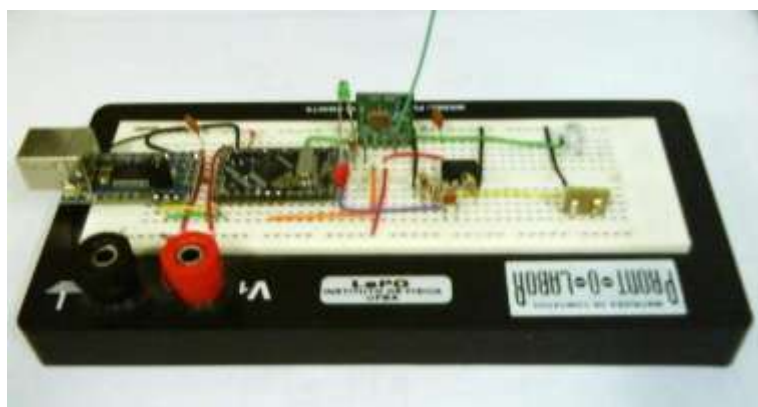


Figura 3.15 - Sensor remoto ponto a ponto no *protoboard*.

#### 3.4.2.2 O MÓDULO RECEPTOR E APRESENTADOR

Um kit Arduino Mega foi utilizado no nó receptor. Um módulo receptor RXD1 da Keymark foi utilizado. Este módulo recebe um sinal modulado e é dotado de um circuito demodulador entregando um sinal digital serial. Este sinal foi ligado a uma porta digital no kit Arduino, que o decodifica. O Arduino Mega provê uma conexão USB, através um circuito integrado FTDI, que é vista pelo microcomputador como uma conexão serial por porta COM. Esta montagem foi realizada em *protoboard* e é apresentada na Figura 3.16.

Alguns códigos exemplos para comunicação serial estão disponibilizados para este kit, o que facilitou a elaboração do firmware necessário ao tratamento e apresentação dos dados seriais recebidos pelo receptor. Efetuando a conexão por esta porta a ferramenta de depuração

apresenta os dados recebidos no monitor do microcomputador, ligado ao microcontrolador pela porta USB. O código do programa está no Apêndice C - CÓDIGO ARDUINO-MEGA RECEPTOR RF.

A monitoração remota do desgaste das amostras de epóxi foi conseguida, sendo este um passo importante, pois surgiram novas perguntas que motivaram o aperfeiçoamento dos ensaios. Foram aumentados para dois pontos de detecção, um para a luz transmitida a  $0^\circ$ , outro para a luz espalhada a  $90^\circ$ , usando fotodiodos, similar à configuração usada no experimento com os dois LDRs.

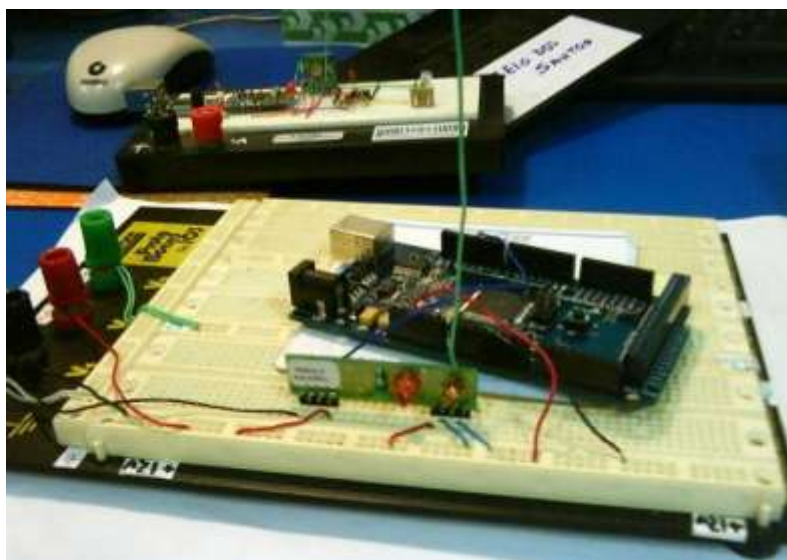


Figura 3.16 - No primeiro plano, um receptor RF e o

### 3.4.2.3 A EVOLUÇÃO DO CONCEITO

Este experimento repete os conceitos desenvolvidos no experimento anterior. Porém, esta abordagem amplia a quantidade de pontos de monitoração da amostra de epóxi para 2, em um mesmo ponto sensor, adapta os circuitos duplicando-os e criando um casulo para substituição das amostras. Esses casulos foram construídos com material preto fosco de modo que a luz ambiente não exerça influência significativa na intensidade da luz detectada pelos sensores óticos.

A Figura 3.17 apresenta o layout de ligações do Arduino-mini, com o microcontrolador ATmega168 representado pelo indicador U1, soldado em uma placa de circuito impresso, disponibilizando de forma mais segura a maioria dos terminais do microcontrolador para as etapas de desenvolvimento. Nessa placa também estão instalados um cristal e os circuitos integrados de regulação de tensão de alimentação.

Um passo muito importante foi a montagem dos circuitos eletrônicos em uma placa de circuito impresso projetada e manufaturada, apresentada na Figura 3.18.

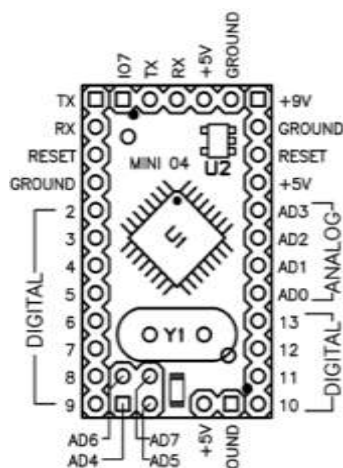


Figura 3.17 - Diagrama módulo Arduino-mini

O sensor remoto foi composto por quatro módulos:

- a) o circuito de detecção ótica - o fotodiodo no circuito é visto como uma fonte de corrente e o amplificador com realimentação negativa do tipo ICVS, que funciona como um conversor corrente tensão quase perfeito, com impedância de entrada zero e impedância de saída zero (16). Essa configuração é normalmente utilizada nos circuitos de detecção ótica utilizando-se fotodiodos;
- b) o transmissor com modulação FM (o mesmo da seção 3.4.2.1). Nessa frequência uma antena de 17,2 cm foi ligada ao transmissor conforme mostra a Figura 3.18 (fio de cor verde ligado à placa);
- c) o adaptador mini USB para conexão com o PC via USB e carga do programa;
- d) circuito de conversão e regulação de tensão. (A Figura 3.19 apresenta todo o circuito);
- e) foi utilizado um LED vermelho e um LED azul, um em cada casulo, como luz de excitação para as amostras.

O código de programação utilizado no experimento anterior foi adequado ao novo projeto de hardware, procedendo de maneira similar à detecção da luz transmitida e a transmissão dos dados.

Na montagem foi utilizado um soquete de 40 pinos para acomodar o Arduino-mini e o USB-Mini, como apresentado na imagem da Figura 3.18. A Figura 3.19 apresenta o circuito eletrônico completo. No desenvolvimento foi utilizado um software de apoio que também auxilia na elaboração do layout do circuito impresso. O desenho do circuito apresenta dois kits Arduino mini 04, porém só foi utilizado um. Na falta da biblioteca gráfica para representação do Arduino mini-USB, necessária à elaboração do layout da placa de circuito impresso, foi reutilizado a representação do Arduino mini 04.

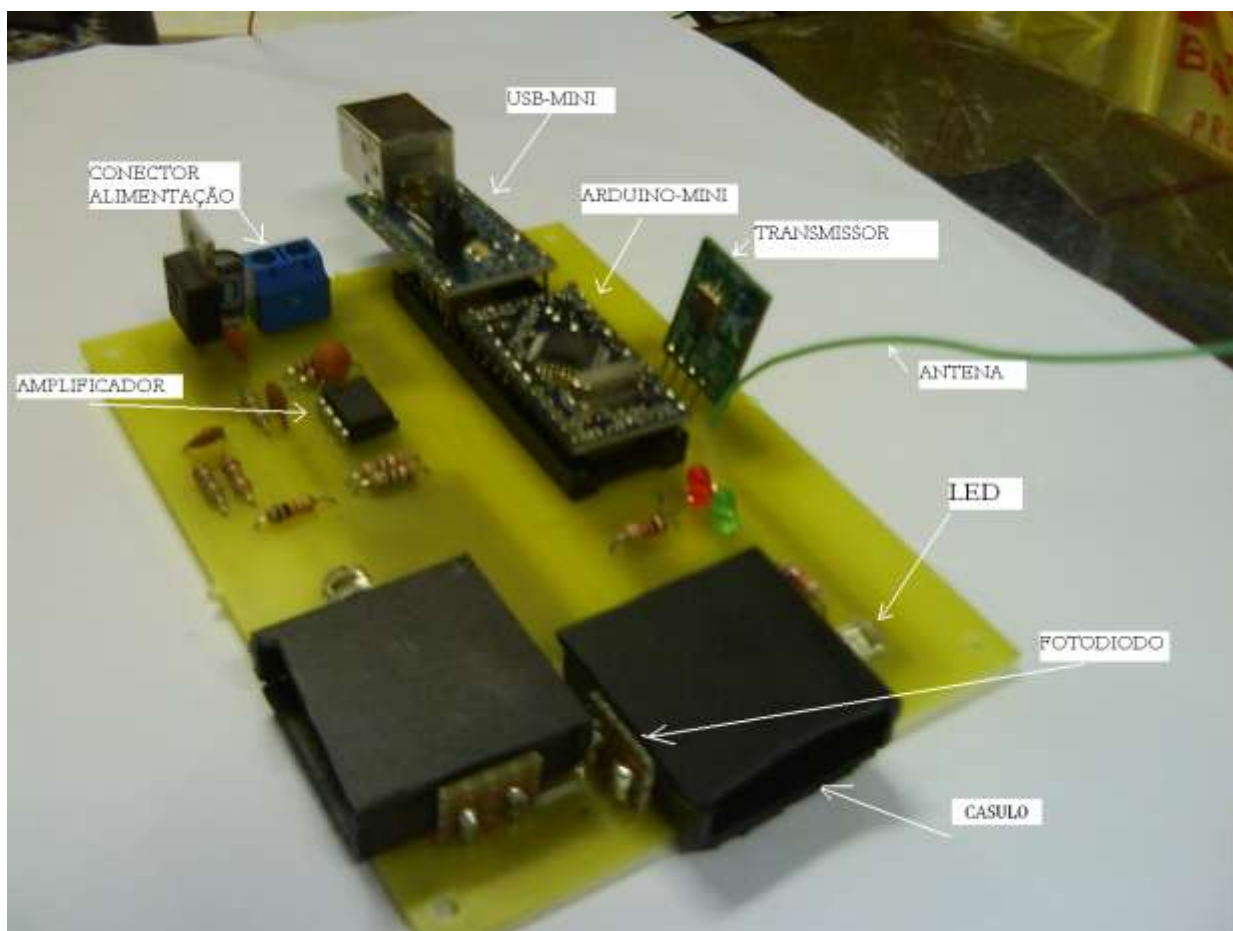


Figura 3.18 - Foto sensor com dois casulos de detecção.

O funcionamento lógico do circuito é realizado por um microcontrolador. Foram ligados dois LEDs para sinalizar sobre o estado da qualidade da amostra a partir de valores de luz detectados. Um LED vermelho e um verde sinalizam o resultado dos testes da qualidade da mostra. Após cinco leituras consecutivas do ADC, é calculada a média e comparada com um valor padrão de referência de uma amostra em bom estado. Esse resultado é sinalizado localmente utilizando-se um LED verde para indicar o bom estado da amostra e o LED vermelho em caso contrário, e os dados adquiridos são transmitidos por RF.

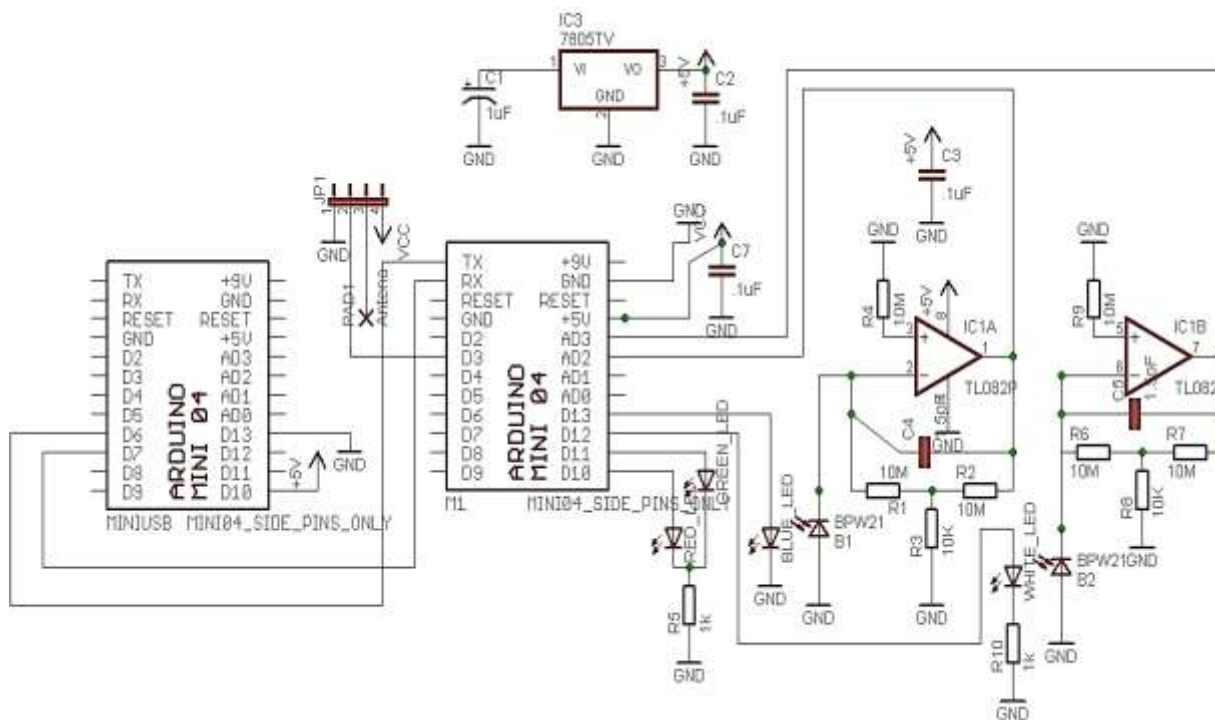


Figura 3.19 - Circuito eletrônico foto sensor.

As conexões e definições utilizadas apresentadas a seguir foram utilizadas na elaboração do código de programa.

Um LED azul conectado no DigitalPIN 9 - sensor 1; um LED branco conectado no DigitalPIN 12 - sensor 2. Leitura da tensão no AnalogPIN - AD2, proveniente da saída de um amplificador TL082 - pino 1, responsável pela conversão da corrente em tensão proveniente do fotodiodo 1. Leitura da tensão no AnalogPIN - AD3, proveniente da saída de um amplificador TL082 - pino 7, responsável pela conversão da corrente em tensão proveniente do fotodiodo 2. As leituras das portas do ADC ocorrerão num período entre 21 segundos e 30 segundos, com uma amostragem da entrada analógica AD2 e AD3, num total de 10 leituras, após cálculo da média aritmética, prepara-se uma mensagem com informações como: número da mensagem, ponto de medida e resultado da medida.

A conclusão deste experimento mostrou que alguns requisitos são importantes como: controle de mensagens transmitidas e recebidas, formação rede multipontos, modo de hibernação para economia de baterias, entre outros.

Neste segundo experimento, houve maior diferença entre as tensões lidas entre as amostras em bom estado e as deterioradas, porém ainda seria necessário melhorar o circuito de detecção e amplificação, de forma a proporcionar uma faixa maior de tensão diminuindo os erros de qualificação das amostras, avaliados a partir de medidas quantitativas.

A necessidade de melhorar as medidas impulsionou a pesquisa de soluções. Uma dessas seria utilizar um amplificador adequado que não requeresse alimentação simétrica e a pesquisa de uma solução para o protocolo da rede de sensores sem fio.

### 3.5 ESTUDO PRÁTICO DA REDE ZIGBEE

Escolhido o protocolo ZigBee para o desenvolvimento da rede sem fio, que é o objetivo final deste projeto de pesquisa, foi necessário o estudo mais aprofundado de certos aspectos técnicos desses dispositivos inteligentes de comunicação.

O melhor caminho para o aprendizado, tanto das características e requisitos técnicos, quanto da filosofia deste tipo de comunicação sem fio, foi colocar imediatamente em prática os conceitos e os novos conhecimentos adquiridos, à medida que a pesquisa bibliográfica avançava. Neste processo de pesquisa e ação de fixação de conhecimento, foi imaginado um exercício prático, que consistia na integração de um multímetro digital de bancada a um sistema remoto de medição e comando de medição usando como interface e meio de comunicação a tecnologia ZigBee. Outro exercício prático foi a construção de um nó sensor que realiza medidas de temperatura e luminosidade ambiente e atua ligando um ventilador para compensar a temperatura e uma lâmpada para compensar a luminosidade.

#### 3.5.1 VIRTUALIZAÇÃO DE PORTAS DE COMUNICAÇÃO RS-232

Os módulos XBee podem ser configurados para funcionar no modo AT, também chamado de modo transparente ou API. No modo AT, todos os dados que chegam à UART são transmitidos via RF e recebidos na UART de destino de forma transparente como se fosse uma conexão ponto a ponto com cabo. A Figura 3.20 apresenta essa conexão. Com base no modo transparente de comunicação do módulo XBee, foi montada uma rede ponto multiponto e desenvolvido um programa para virtualizar portas RS-232 de um micro computador.

Nos microcomputadores atuais as portas de comunicação seriais padrão RS-232, têm sido substituídas por portas USB. Apesar de limitadas quanto à velocidade de transferência de dados as portas RS-232 ainda satisfazem os requisitos de várias aplicações.

Alguns modelos de multímetros de bancada dispõem destas portas para comunicação com microcomputadores. Os mais modernos vêm equipados com portas USB. Apesar de os computadores atuais proverem algumas portas USB, o alcance da transmissão, segundo a especificação técnica, é de no máximo 6m, limitando a distância de instalação dos dispositivos ligados ao computador.

Dessa limitação da distância de transmissão dos dados e da possibilidade de coleta de dados



Figura 3.20 - Conexão ponto a ponto XBee (23).

de forma remota sem fio, deu-se início ao estudo de uma solução para virtualização das portas RS-232 por uma rede ZigBee. Que significa que esta solução permitirá controlar a partir de um microcomputador através de uma única porta RS-232 uma ou mais portas RS232 remotamente por uma rede sem fio utilizando módulos XBee e placas de interface tipo a INT700.

Numa rede ZigBee, os módulos XBee (ver Figura 3.21) podem ser configurados como coordenador, roteadores ou dispositivos finais. O coordenador é responsável pela construção da rede e é único para uma dada rede (23). Quando inicializados os roteadores ou dispositivos finais buscam um coordenador para se associarem à rede.



Figura 3.21 - Módulo XBee (23)

Quando um XBee é configurado no modo AT, é possível enviar texto diretamente ao módulo remoto a partir de um módulo local conectado a uma porta RS-232 ou USB em um computador. Esse modo de funcionamento é também chamado de modo transparente, pois os dados que chegam à UART são transmitidos por RF e os dados recebidos na RF de destino são

entregues à UART, simulando uma conexão direta ponto a ponto (23). Nessa aplicação a transparência dos dados transmitidos e recebidos é o desejado. Os comandos enviados aos multímetros e as respostas recebidas não sofrerão modificação, serão transmitidos e recebidos sem alterações. Essa funcionalidade garante a conexão da UART do XBee ao multímetro, que também usa comunicação em texto simples, através de sua porta serial. Falta, então, uma interface de conversão do sinal da UART do XBee para o padrão de tensão RS-232.

Foram utilizados módulos XBee/XBee-PRO RF, constituídos a partir de um firmware ZigBee instalado em um hardware XBee S2 modelo XBee2, fabricados pela Digi International Inc. Os módulos XBee RF têm uma porta serial assíncrona que pode se comunicar com qualquer dispositivo com lógica e tensões compatíveis com a UART. Este dispositivo utiliza lógica CMOS com sinais que variam entre 2,8 a 3,4V, sendo necessário o uso de conversores de nível e tensão para o interfaceamento com dispositivos seriais como as portas RS-232. Para tanto foram utilizados kits de desenvolvimento INT700. As placas INT700, ilustradas na Figura 3.22, foram projetadas para facilitar o desenvolvimento de aplicações utilizando o XBee. Esses kits contam com reguladores de tensão de alimentação, conexões e suporte à comunicação. São apresentadas em versões para as portas RS-232 e USB. Nessa aplicação, foi utilizada uma placa INT700 USB conectada ao microcomputador e três placas INT700 com portas seriais RS-232 conectadas a

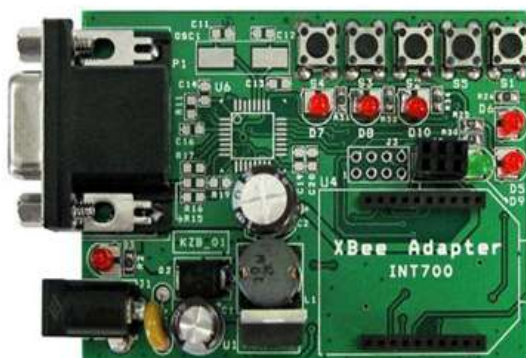


Figura 3.22 - Placa de desenvolvimento XBee *Adapter* INT700.

multímetros da ICEL, modelo MD6700, versão 0048. Para a aplicação aqui explorada, não foram utilizadas as demais conexões e outras facilidades da placa INT700, sendo utilizado apenas o circuito de alimentação e regulação e a conexão das portas USB e RS-232.

Os multímetros MD6700 são munidos de uma porta RS-232, que possibilita total programação do multímetro e, opcionalmente, uma interface GPIB. A operação do multímetro através da interface RS-232 é efetuada com o envio e recepção de caracteres texto, no formato ASCII, facilitando a programação através do envio de comandos no formato texto e os devidos



tratamentos das mensagens de resposta. A porta de comunicação do MD6700 funciona de 300 a 9600 bps no modo *full duplex*. É importante que sejam observadas as demais configurações necessárias, como: o tamanho da palavra, bit de parada, bit de paridade, os quais devem estar combinando nos dois lados das portas de comunicação - do XBee e do Multímetro-MD6700. Os valores das configurações citadas anteriormente foram: 9600, n, 8,1. Esses parâmetros foram configurados no multímetro através de funções do teclado, disponíveis no manual do fabricante, e no XBee utilizando um aplicativo fornecido pelo fabricante, o X-CTU, cuja interface é apresentada na Figura 3.23.

O tipo de rede e suas funções devem ser definidos escolhendo-se o firmware e os parâmetros do modem a ser instalado em cada módulo XBee. Utilizando o X-CTU, foi realizada a carga dos firmwares e modificados os parâmetros de configuração definindo-se, assim, as funções do coordenador e dos dispositivos finais.

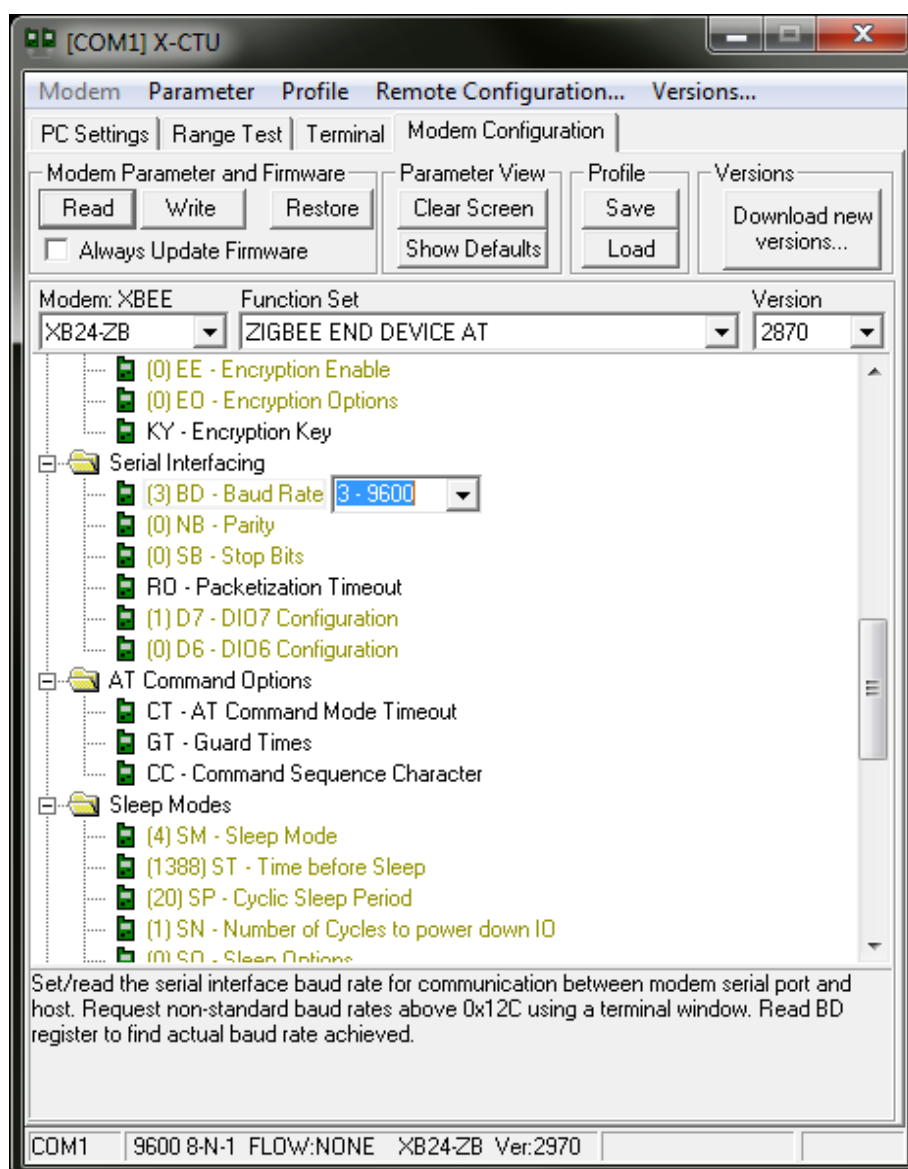


Figura 3.23 - Software de configuração para os módulos XBee.

O modo API possibilita maior controle sobre a rede e algumas das funções, como a de sensoriamento multiponto, só estão disponíveis neste modo. O modo API funciona com a transmissão e a recepção de pacotes de dados estruturados padrões. Na documentação, estes pacotes de dados são referenciados à palavra do inglês *frame*, que será utilizada de agora em diante. Os *frames* têm forma definida, alterando parte do corpo dependendo da função escolhida e tipo de mensagem. Dentre os *frames*, foram utilizados, principalmente, as do tipo 10 (*ZigBee Transmit Request*) para envio das mensagens de comandos para o MD6700; e os do tipo 90 (*ZigBee Receive Packet*) no tratamento das respostas dos comandos que transmitem a leitura dos multímetros (22).

A Figura 3.24 apresenta a topologia de rede ZigBee utilizada; a linha cheia indica associação entre o dispositivo final e o coordenador da rede. Uma rede ZigBee é composta de apenas um coordenador (C), nenhum, um ou mais roteadores (R) e vários dispositivos finais (E). Um roteador pode ter associado a ele até 10 dispositivos finais.

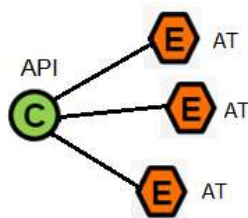


Figura 3.24 - Topologia de rede utilizada.

A topologia da rede constituída neste experimento foi formada por um módulo XBee configurado como coordenador (C) no modo API e por três módulos configurados como dispositivos finais (E), no modo AT como mostra a Figura 3.24. O modo API no coordenador foi escolhido por possibilitar o endereçamento de mensagens, enviando, assim, o comando ao multímetro desejado e, desse modo, também poder identificar a origem das transmissões recebidas. O multímetro conectado ao XBee (no modo AT), instalado na placa INT700, recebe o comando no formato de texto. O envio dos comandos pelo coordenador é efetuado através de *frames* tipo 10.

Cada módulo ZigBee tem um endereço único de 64 bits determinado durante o processo de fabricação (23). O coordenador elege um endereço de 16 bits único para cada módulo durante o processo de associação à rede. Sempre que um módulo XBee configurado como roteador ou dispositivo final é inicializado, é executado o procedimento de associação à rede, sendo que o coordenador assume a tarefa de administração. Tal procedimento facilita a inclusão de mais nós na rede; no caso específico deste trabalho, multímetros adicionais, sem que haja necessidade de

reconfigurar a rede. Para enviar um comando a um determinado multímetro, é utilizado o endereço de 64 bits fixo de cada módulo e o endereço de 16 bits, estabelecido pelo coordenador. O coordenador da rede terá o endereço de 16 bits igual de 0x00h.

Para distâncias superiores ao alcance de transmissão do módulo, que depende do ambiente e da potência de RF, facilmente pode-se introduzir um ou mais módulos roteadores (R) na rede, (como sugere a Figura 3.25), sem a necessidade de alterações na funcionalidade da rede existente. O módulo roteador funcionará como um repetidor das mensagens entre o coordenador e os dispositivos finais. O roteador deverá estar configurado no modo API.

Nessa etapa do trabalho foram resolvidos os problemas da distância máxima de transmissão para portas RS-232, assim como os números de portas seriais disponíveis no microcomputador de aquisição, apenas acrescentando à rede mais módulos XBee como dispositivos finais. É importante observar a taxa máxima de transmissão de dados exigida para cada aplicação, de forma a determinar o número máximo de dispositivos finais (E) na rede.

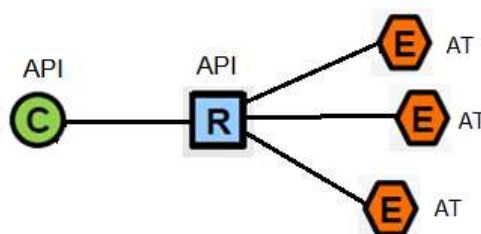


Figura 3.25 - Topologia de rede ZigBee com um roteador.

Para o exemplo apresentado, a rede montada se mostrou rápida e eficiente para a aquisição de dados, com possibilidades de múltiplas conexões de multímetros e criação de arquivos de log e consequente facilidade para tratamento desses dados.

Na Figura 3.26, está representada a troca de mensagens entre dois XBee, o coordenador no modo API e o dispositivo-final no modo AT.

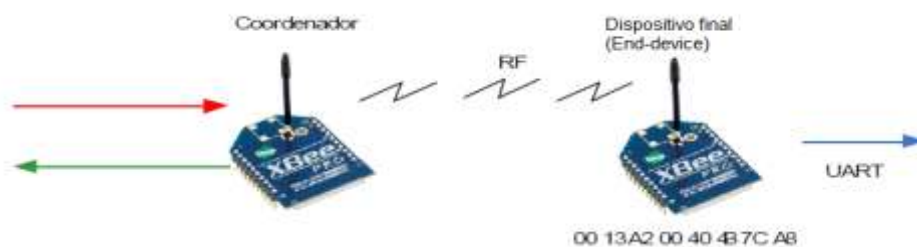


Figura 3.26 - Troca de mensagem entre o coordenador e o dispositivo final.

Multímetros virtuais podem então ser operados em janelas na tela do PC, nas quais é possível efetuar comandos de forma remota por um simples acionamento do mouse, sobre botões virtuais e idênticos aos existentes no multímetro real. Foi possível também observar as leituras das medidas individualmente e criar arquivos de logs dos dados adquiridos. A tela da representação virtual do multímetro é apresentada na Figura 3.28. Com base em tal modelo, foi possível monitorar a coleta de dados, bem como definir o período de início e fim da coleta de dados de cada multímetro.

Esta configuração representa um aumento na rapidez de montagem de uma rede sem fio de coleta remota de dados, com fácil ampliação do número de pontos (nós da rede), aumento da flexibilidade da montagem e posicionamento físico dos pontos de rede adicionais, sem a preocupação com a distância máxima de transmissão da porta RS-232. É importante medir a capacidade máxima de dados transmitidos em cada trecho da rede, quanto maior o número de nós menor a taxa efetiva de transmissão de dados. As distâncias máximas de transmissão entre os módulos ZigBee não dependem apenas da potência de RF e do tipo da antena, dependem também da presença de estruturas que absorvam e/ou reflitam as ondas eletromagnéticas. É possível efetuar testes para determinar o nível de sinal e distância máxima entre os trechos da rede.

A Figura 3.27 mostra a placa INT700, em que se observa o XBee instalado e a interligação com um cabo serial ao multímetro.

Para o controle e o gerenciamento das mensagens entre nós da rede, foi escrito em linguagem C# um programa utilizando as bibliotecas do NET Framework 4.0 e a IDE do Visual Studio 2010. Este programa processa os diversos *frames* de mensagens recebidas e transmitidas entre o nó coordenador e demais nós ZigBee conforme mensagens 1 e 2 apresentados. Esta aplicação, mesmo simples, possibilitou o aprendizado das diversas funções e protocolos de trocas de mensagens da rede. Possibilitando desta forma a construção da base de conhecimento necessária à montagem de uma rede de sensores sem fio baseada na rede ZigBee.



Figura 3.27 - Conexão Xbee+INT700+Multímetro digital

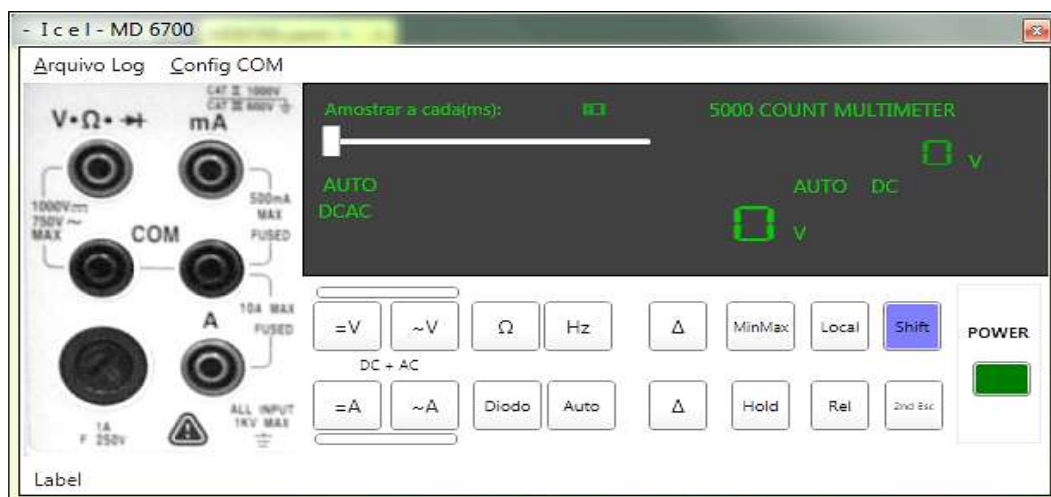


Figura 3.28 - Virtualização do multímetro em IHM.

### 3.5.2 NÓ SENSOR ATUADOR

Em um determinado ambiente de sensoriamento que utilize de uma rede de sensores sem fio podem ocorrer necessidades de acionamento de dispositivos que ajustem as condições desejadas do ambiente monitorado, como temperatura e luminosidade. Para tanto foi construído um nó sensor atuador que utiliza medidas da intensidade luminosa e temperatura do ambiente para ligar ou desligar equipamento por meio de relés, controlando-os remotamente. Este nó, por exemplo, pode ser utilizado para acionamento de válvulas ou registros em uma linha de dutos regulando vazão e temperatura.

O programa de administração remota solicita, num tempo determinado pelo usuário, a este nó que execute a amostragem das portas digitais e analógicas. Com base nas informações enviadas pelo XBee, toma decisão, de acordo com valores predeterminados, e envia ou não uma mensagem determinando a alteração dos estados das portas de saídas digitais alterando ou não a condição de operação dos relés. O funcionamento desse nó será detalhado na seção 4.3.1.

A intensidade de luz ambiente é determinada a partir do valor da resistência ôhmica lida por um sensor LDR. Um *trimpot* e um resistor de 18 K ohms formam este trecho do circuito. O resistor de 18 K ohms limita a corrente máxima para evitar danos à porta de entrada do XBee e o *trimpot* regula a tensão, compatibilizando com a faixa de tensão de funcionamento do ADC do XBee.

A temperatura ambiente é obtida a partir da conversão de tensão lida no sensor de temperatura LM35. Esse sensor fornece, em sua saída, uma tensão proporcional à temperatura em graus centígrados, numa relação de 10,0 mV/°C. O pino 3, (AD2/DIO2) configurado como entrada analógica recebe o sinal do LDR por intermédio de um resistor variável (*trimpot*), usado para ajustar a faixa de tensão deste sensor entre 0 a 1,2V, que equivale à faixa de trabalho das portas do ADC do XBee. O pino 2 (AD1/DIO1) recebe o sinal do LM35, possibilitando medidas de temperatura entre +0° C a 120° C. O detalhe do circuito discutido está apresentado na Figura 3.29.

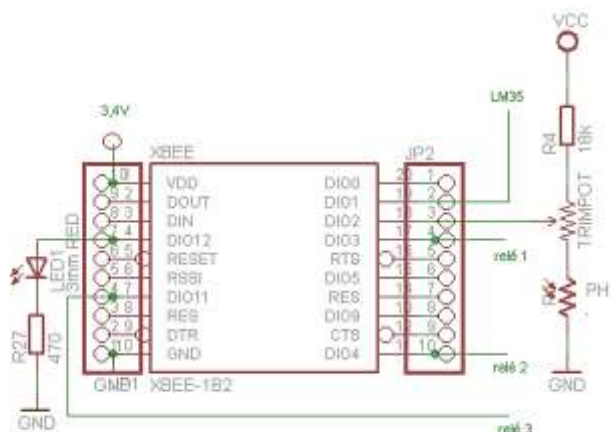


Figura 3.29 - XBee e conexões LDR, LM 35, relés e LED sinalização.

Um LED vermelho de 3 mm ligado ao pino 4 (DIO12) é utilizado para sinalização do modo de operação do nó. Esta sinalização visual facilita a monitoração local dos nós.

Três diferentes cargas podem ser chaveadas pelos três relés, cujos conectores permitem conexões nas posições normalmente aberto (NA) e normalmente fechado (NF). Os relés suportam corrente máxima de 7A e tensão de 250 V. Os relés são acionados por portas digitais do XBee configuradas como saída. Um comando remoto muda a saída de uma porta digital do nível baixo para alto. Deste modo o respectivo transistor BC 548 (veja detalhe Figura 3.31) entra em saturação operando o relé. Quando entra em operação, este dispositivo energiza a bobina do relé e os contatos mecânicos são atracados. Esses parâmetros podem ser alterados a qualquer momento e determinam as características de funcionamento ou estado das portas digitais ou analógicas.

A função desses pinos do XBee é determinada por comando de programação em seu firmware. Neste nó, os pinos DIO1 e DIO2 foram configurados como entradas analógicas, com os comandos ATD12 e ATD22. Esses comandos podem ser enviados localmente ou remotamente ao XBee ou por uma modificação direta do parâmetro utilizando-se o X-CTU, conforme apresentado na Figura 3.30. Nesta figura estão indicados os valores possíveis e as funções a eles atribuídas para o comando D2 porta AD2/DIO2.

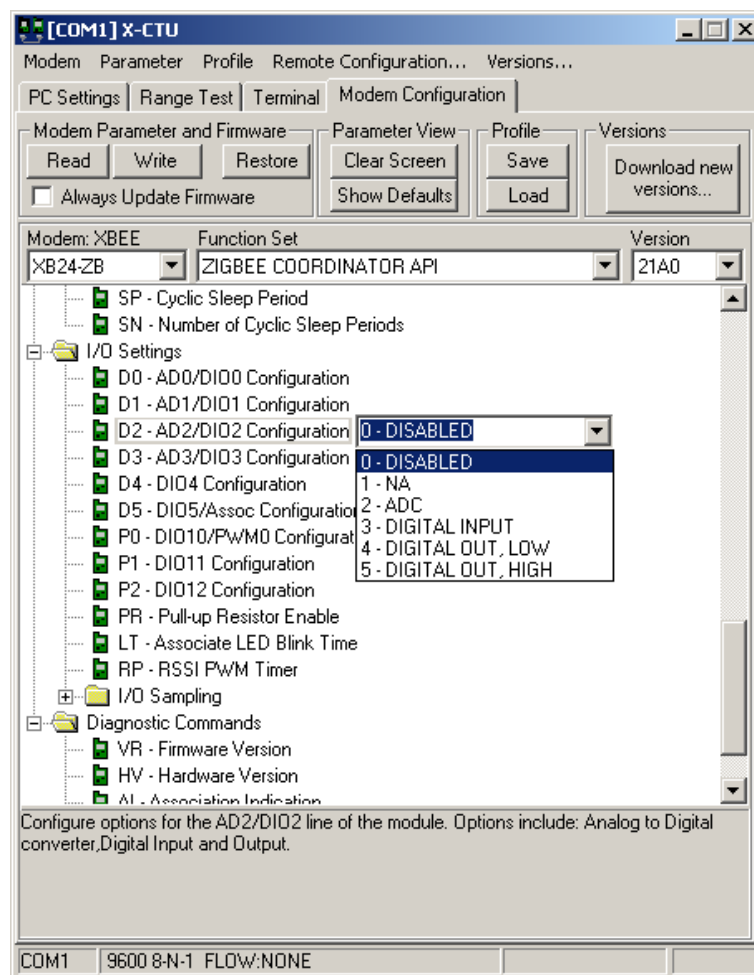


Figura 3.30 - Alterando parâmetros de entrada e saída com o X-CTU.

Para a operação dos relés, os pinos do XBee foram configurados com saídas digitais, com os comandos ATD34, ATD44, ATP15, este último com saída em nível alto. Na inicialização deste nó o terceiro relé está comutado, enquanto os outros dois relés não estão comutados. Um LED vermelho foi ligado a um pino, configurado com saída digital pelo comando ATP25. Esse comando ativa o LED assim que a placa é alimentada. Os módulos XBee proveem quatro portas conversoras analógicas digitais, que funcionam na faixa de tensão que vai de 0 mV a 1200 mV, com 10 bits de resolução e impedância de 1M Ohms e uma taxa de amostragem de 1 K Hz (23).

Os módulos XBee podem ser configurados para transmitirem automaticamente amostra de todas as portas analógicas e digitais em períodos programados. Porém, para este nó sensor, a amostragem das portas digitais e analógicas é feita em intervalos de tempo definidos pelo operador, através do aplicativo gerenciador, como apresentado na seção 4.3.1. A identificação do XBee, para o qual será enviado o comando, é realizada através do endereço único de 64 bits de



cada módulo e do nome de identificação do módulo, definido durante a etapa de configuração. Este nome de identificação é armazenado pela aplicação no momento da associação de um dado XBee à rede. Os parâmetros do módulo XBee desse nó sensor, apresentados no Quadro 3.1, serviram de base para a construção do código de programa da aplicação de controle e gerência.

Conectores de três vias foram instalados para facilitar a conexão das cargas aos relés.

A Figura 3.32 mostra o projeto do layout do circuito impresso, da placa nó sensor atuador. A Figura 3.33 mostra a placa do circuito impresso deste nó. O circuito completo do dispositivo sensor atuador está disponível no Apêndice F - DIAGRAMA DE CIRCUITO NÓ SENSOR ATUADOR.

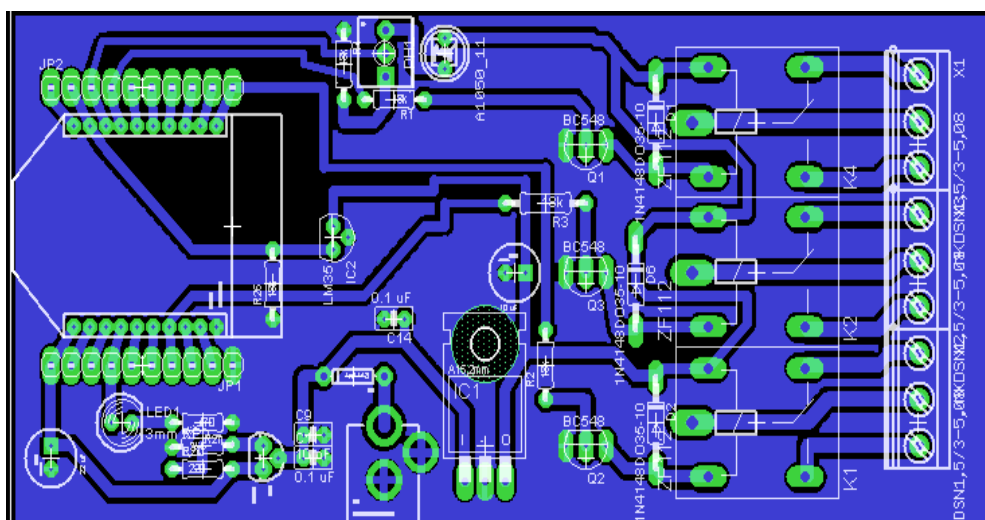


Figura 3.32 - Projeto da placa de circuito impresso.

O nó sensor tem três relés que são operados remotamente através de comandos enviado ao XBee instalado neste nó. Esses comandos estão apresentados no Quadro 3.1. Os valores dos parâmetros desse quadro são os de definição do XBee para este nó especificamente. Os valores possíveis para os parâmetros estão disponíveis na documentação do módulo XBee (23). Preliminarmente, todo e qualquer módulo XBee a ser instalado neste modelo de placa deve ter estes parâmetro programados para poderem ser identificado e funcionarem adequadamente.

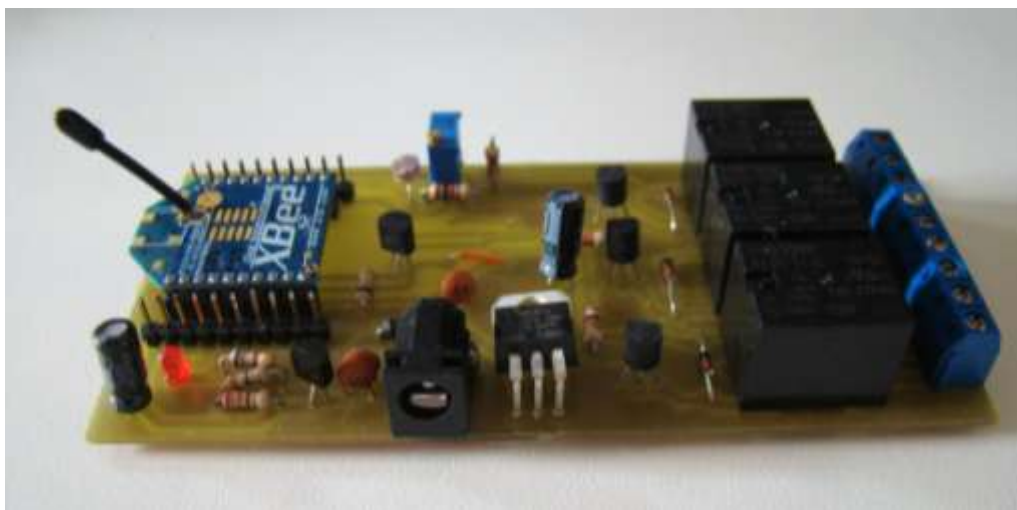


Figura 3.33 - Placa nó sensor atuador sem fio.

Comando	Parâmetro	Descrição
ID	0x7	PAN ID – determina a qual rede o módulo pode se associar.
NI	ZIGRELE	Identifica o nome do dispositivo.
D0	0x0	AD0/DIO0 - <i>disabled</i> – desabilitado
D1	X02	AD1/DIO1 - configurado como entrada analógica ligada ao LM35
D2	0x2	AD2/DIO2 - configurado como entrada analógica ligada ao LDR
D3	0x4	AD3/DIO3 – pino ligado ao relé 1 – não comutado
D4	0x4	DIO4 – pino ligado ao relé 2
P1	0x5	PWM/DIO11 – pino ligado ao relé 3 – comutado
P2	0x5	CD/DIO12 ligado ao LED de sinalização
PR	0x3FF	Resistores de <i>pullup</i>
SM	0x0	Modo de <i>sleep</i> não ativado

Quadro 3.1 - Parâmetros de configuração do dispositivo sensor atuador.

#### 4. A REDE SEM FIO PARA DETECÇÃO DO ESTADO DAS AMOSTRAS

Neste ponto do trabalho, os conceitos de rede sem fio baseada em tecnologia ZigBee foram testados e desenvolvidos. O passo que segue é o projeto da rede de sensores para aplicações mais gerais. O projeto desenvolvido foi separado em duas partes: o hardware e o software.

No projeto do hardware foram desenvolvidos os circuitos eletrônicos dos nós sensores, os *layouts* das placas impressas, além da montagem, os testes de funcionamento dessas placas e a definição dos parâmetros específicos dos módulos XBee para cada tipo de nó sensor e também os códigos de programação para os micro controladores.

No projeto do software foi desenvolvida uma aplicação utilizando Programação Orientada a Objeto (POO), levando em consideração características tais como: facilidade de codificação, ferramenta de desenvolvimento integrada orientada a objetos, ferramentas de depuração, diagnósticos e testes, suporte a WEB, material de apoio, códigos exemplos. A utilização da IDE do Visual Studio 2010 e das bibliotecas NET Framework e NET Micro Framework foram fundamentais para obtenção dos resultados.

Para o modelo de sensoriamento de dutos, a topologia apresentada na Figura 4.1 é a que melhor representa a constituição para esta rede, com distribuição dos sensores em linha, onde E é um nó como dispositivo final, R um nó Roteador, C um nó Coordenador, A um Modem de longo alcance 3G/4G/Satélite e  $d$  é a distância entre dois nós.

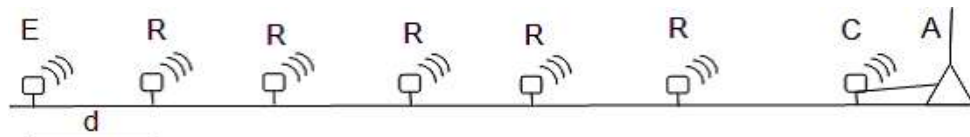


Figura 4.1 - Topologia para rede de sensores em dutos.

Para esta topologia é usado um XBee em uma extremidade como coordenador (C) e um como dispositivo final (E) na outra extremidade, sendo que os demais nós seriam roteadores (R). Esta função possibilita a retransmissão dos pacotes até o coordenador que está ligado via UART a outro modem de grande alcance (ex. GPRS (A)) para a retransmissão dos dados entre o coordenador e um servidor remoto (centro de cálculo ou sala de comando).

A distância máxima ( $d$ ) entre os nós de sensoriamento está relacionada com a potência dos transmissores e esta potência está diretamente relacionada com o consumo de energia; logo, a

escolha dos módulos ou da distância entre os módulos determina a capacidade do sistema de alimentação de energia. O módulo de 2 mW consome cerca de 40mA/h em 3.3 V, enquanto o módulo de 50mW consome 295mA. Outro parâmetro para definição da distância é a necessidade de redundância de retransmissão. No caso de falha de um nó, outro nó próximo deverá assumir a retransmissão, sem causar parada de um seguimento ou de toda a rede.

Um novo módulo XBee, o DigiMesh, possibilita que módulos configurados com firmware de roteador também possam entrar no modo inativo, criando assim, uma rede completa de nós de baixo consumo de energia. O modo inativo, de todos os nós da rede, por vezes chamado de modo de suspensão ou *sleep* é conseguido mediante a sincronização de relógios de cada um dos módulos. A rede toma internamente a decisão de eleger um dos módulos, que servirá de referência, possibilitando a retomada autônoma do modo ativo da rede.

Para cada nó de sensoriamento necessitamos da fonte de energia, circuitos de sensoriamento, portas ADC, portas digitais, meio de transmissão e protocolos de rede. Como os módulos XBee contam com quatro portas ADC, de 10 bits, internas e portas digitais de entrada ou saída, além do suporte para a constituição de uma rede sem fio (protocolos, transmissor e receptor RF) restam a serem projetados, desenvolvidos e montados os circuitos de sensoriamento e conversores de energia.

Os circuitos do módulo sensor, apresentados na seção 3.4.2.3, tiveram que ser re-projetados e adequados às características técnicas requeridas para a interface com os módulos XBee. O circuito de alimentação teve que ser redefinido de acordo com o consumo em corrente e as tensões de alimentação necessárias ao conjunto.

Para o funcionamento em uma rede de sensores os módulos XBee devem ser configurados no modo API. No modo API a comunicação entre os módulos é realizada através de *frames* padrões, o que possibilita o conhecimento do endereço de origem da mensagem, identificando desse modo o nó de sensoriamento e seus dados. São 18 pacotes de mensagens possíveis nessa versão estudada neste projeto. Para a administração das mensagens foi necessário o aprimoramento do programa utilizado anteriormente, adicionando código para tratamento dos demais tipos de *frames*.

O controle dos nós da rede de sensoriamento foi efetuado através de uma aplicação, que roda em micro computadores PC, com suporte gráfico. Tal aplicação é responsável pela configuração, administração, armazenamento de dados e monitoramento dos nós sensores da rede sem fio.

#### 4.1 O XBEE COMO CENTRO DO NÓ SENSOR

Nesta seção, é apresentado um resumo das características e especificações dos módulos XBee e do protocolo ZigBee utilizadas no desenvolvimento do hardware. Para cada nó sensor, será utilizado um módulo XBee.

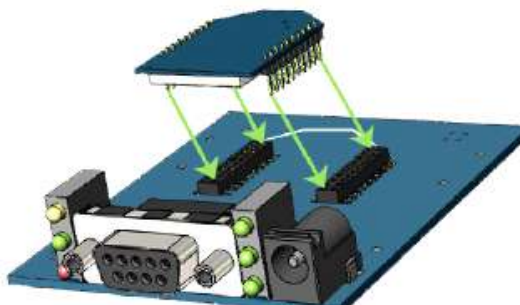


Figura 4.2 - Conexão XBee nas placas de circuito impresso.

Os módulos XBee foram desenvolvidos para serem montados em um soquete de inserção de 20 pinos, soldado em uma placa de circuito impresso. A Figura 4.2 mostra uma placa de circuito impresso com interface RS-232 DB9 fêmea e um módulo XBee sendo instalado. Os módulos XBee são do tipo *dual in line* com duas filas de 10 pinos e distância entre pinos de 2,00 mm, requerendo conector específico, diferente do padrão de 2,54 mm.

Foi utilizada uma placa INT700, apresentadas na Figura 3.22, para conexão do XBee ao

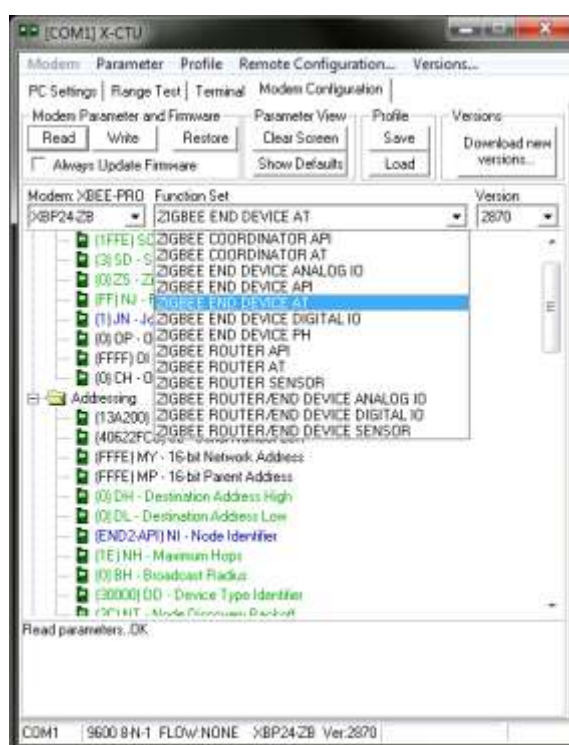


Figura 4.3 - Janela do X-CTU, seleção do firmware e parametrização.

microcomputador, e o software X-CTU da Figura 4.3. Este software é utilizado para parametrização e carga dos respectivos firmwares aos módulos XBee. Essa placa contém o circuito de regulação de tensão DC adequada ao XBee, como interface de comunicação USB ou RS-232 e outras facilidades de apoio ao desenvolvimento. As recomendações e características a seguir são muito importantes para o projeto dos nós que utilizam os módulos XBee, e foram traduzidas do manual do fabricante (23).

Os módulos XBee são alimentados com tensão DC entre 2.1 a 3.6 V, com corrente de operação de 40mA em 3.3 V, para a versão de 2mW.

A fonte de alimentação deve estar dentro da faixa de tensão recomendada e de baixo ruído. Isto determina o desempenho do rádio de RF. Para redução do ruído foram instalados capacitores de filtro próximo ao pino 1 do módulo XBee, com valores de 1uF e 8.2pF (23). Se o XBee estiver ligado a uma fonte de tensão chaveada, esta deve funcionar em frequências inferiores a 500Hz e deve ter ondulação (*ripple*) menor que 250 mVpp.

Na prática apenas os pinos VCC, GND, DOUT e DIN são necessários para o funcionamento do módulo XBee para a comunicação em rede. Para garantir ações de atualização do firmware, é necessário também conectar os pinos RTS e DTR.

Todos os pinos não utilizados podem ser deixados desconectados. Os pinos das portas de entrada digital devem ser colocados em nível alto usando resistores de *pull-up* de 30K, que são ativados pelo comando PR.

Para aplicações que necessitem de baixa corrente, durante o período de *sleep*, as entradas nunca devem ser deixadas flutuantes. Para tanto se utilizam os resistores internos de *pull-up* ou *pull-down*, resistores externos, ou podem ser programadas as linhas não utilizadas como linhas de saída.

Os demais pinos podem ser utilizados de acordo com a conveniência, por exemplo: o pino 15 pode ser ligado a um LED para indicar associação do nó à rede, enquanto que um LED ligado ao pino 20 indica a ação de comissionamento.

A capacidade de corrente de cada pino é limitada a 4mA, estando o pino configurado como fonte ou sorvedouro. A capacidade total de corrente de todos os pinos ativos está limitada a 40 mA.

O pino 14 (VRef) foi conectado à tensão de referência 3,3V para garantir o funcionamento adequado das entradas de conversões analógicas digitais; caso não utilizado, deve-se conectar o pino ao GND.

O layout das placas não exige, segundo especificações, posicionamento específico para os módulos XBee. Não há restrições especiais na disposição dos processadores, cristais e demais componentes, porém é importante observar o posicionamento do módulo na placa, de forma a possibilitar a irradiação do sinal de RF. Existem três tipos de antena possíveis para os módulos e o posicionamento dos mesmos deve ser considerado de acordo com suas características mecânicas. As trilhas do circuito impresso devem ter a espessura adequada para suportarem a corrente máxima. O tipo de antena a ser utilizada deve ser observado de acordo com as condições de instalação dos módulos.

As antenas externas devem ser posicionadas o mais distantes possível de objetos metálicos. Objetos metálicos próximos ou entre as antenas de transmissão e recepção bloqueiam o sinal ou causam perda de intensidade, diminuindo assim o alcance de transmissão. Para cada um dos tipos de antena devem ser observadas as condições de instalação para obtenção da máxima eficiência.

Com base nas especificações do XBee, versão 2007, foram projetados três modelos de circuito de sensores de rede sem fio, (Wireless Sensor Network – WSN ou RSSF), que serão apresentados a seguir.

#### 4.2 DESENVOLVIMENTO DO HARDWARE

Foram projetados três tipos de nós para a rede de sensores sem fio, com dois circuitos diferentes. Um que fornece tensão regulada em 3,3 V e 5V e o outro que fornece tensão de -5V, necessitando de dois adaptadores AC/DC. Conectores de força padrões foram instalados facilitando a utilização da alimentação por adaptadores AC/DC ou baterias de 9v. Circuitos reguladores de tensão foram construídos possibilitando alimentação por fontes de tensões com variação de 7,5 V a 20 V. Um diodo protege o circuito de alimentação de eventual inversão de polaridade. O regulador de tensão LM317 é usado para fornecer a tensão de alimentação para o XBee, e um circuito integrado LM 7805 regula a tensão de 5 V para os demais componentes do circuito. Para o nó sensor que utiliza também tensão de -5 V outro regulador 7905 foi utilizado. A Figura 4.4 (A) e (B) apresenta detalhes dos dois circuitos de regulação das fontes de alimentação.

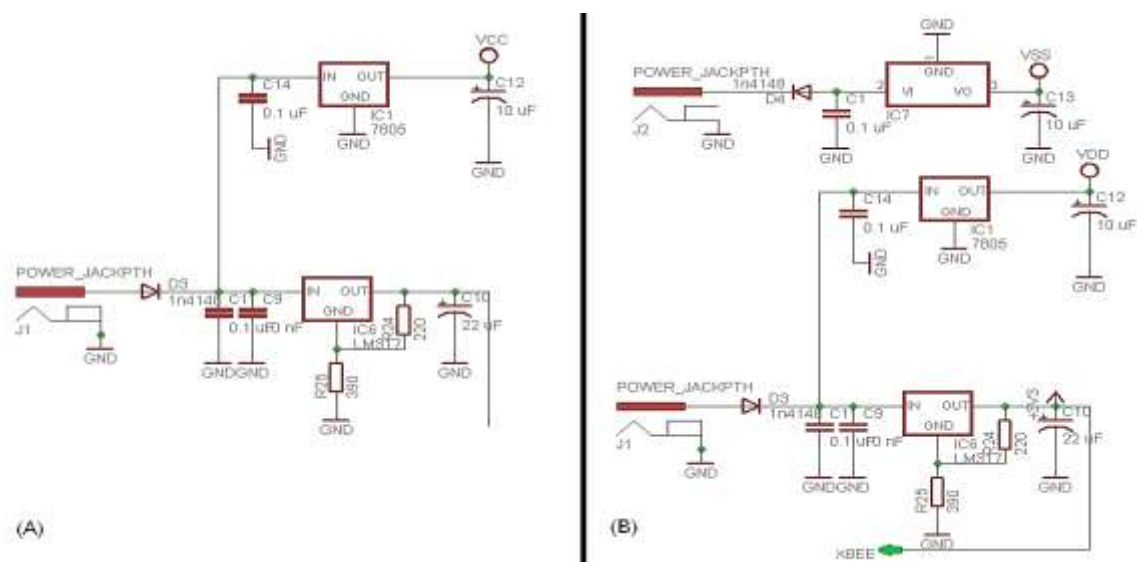


Figura 4.4 - Detalhe dos circuitos da fonte de alimentação.

#### 4.2.1 NÓS SENSORES DO ESTADO DAS AMOSTRAS

Dois circuitos eletrônicos para os nós de detecção da qualidade das amostras de epóxi foram desenvolvidos. Os nós adotam como centro do projeto as características funcionais dos módulos XBee que utilizam o firmware de rede sem fio ZigBee.

No primeiro nó de detecção da qualidade da amostra, a luz emitida pelo LED RGB é constante, não pulsada. Os terminais do LED são alimentados com uma corrente constante. O segundo circuito utiliza um microcontrolador ATmega168 do kit Arduino-mini, que gera um sinal em onda quadrada em 4 KHz para acender o LED. Há assim dois modos de geração da luz que determinam dois modos de detecção da luz transmitida pelas amostras. O primeiro circuito tem apenas um fotodiodo posicionado a  $90^\circ$  em relação à luz incidente para detectar assim a componente da luz espalhada pela amostra. O segundo circuito tem adicionalmente um fotodiodo posicionado a  $0^\circ$  em relação à fonte de luz incidente, detectando assim a luz transmitida. Ambos os nós utilizam a sinalização do modo de operação do módulo XBee, através dos pinos 9 e 13, ou seja, os sinais ON/SLEEP e SLEEP\_RQ. Deste ponto em diante serão apresentados aspectos comuns dos dois nós.

Para os testes em laboratório, foram utilizadas as mesmas amostras apresentadas na seção 3.4.1, usadas como referências para determinação da qualidade da camada de revestimento à base



de epóxi. Utilizou-se também um casulo em que as amostras, com diferentes níveis de desgaste, são inseridas para serem qualificadas.

A luz gerada no LED, após ser transmitida e espalhada pela amostra de epóxi, atinge a janela do fotodiodo, como descrito na seção 3.4.2.3, para em seguida ser detectada, amplificada e convertida em informação digital a ser transmitida para o nó que disponibilizará em sua UART para um software aplicativo para tratamento dos dados.

Foi determinada a resposta espectral da luz gerada pelo LED RGB. Os dados para a construção do gráfico, apresentado pela Figura 4.5, foram obtidos de um espectrômetro da Ocean Optics USB2000. Através desse gráfico foi possível determinar os comprimentos de onda de maior intensidade para as cores azul, vermelha e verde. Comparando os resultados desse gráfico e a curva característica do fotodiodo utilizado (Gráfico 2.3), conclui-se que o fotodiodo escolhido é adequado para detecção da luz emitida por este LED RGB. O gráfico da Figura 4.5 apresenta com a cor verde a resposta espectral correspondente a todas as cores do LED; a linha em azul, as cores vermelha e azul; a linha em vermelho que está sobreposta com o máximo em cerca de 620 nanômetros, somente a cor vermelha.

A intensidade da luz transmitida pela amostra é detectada pelo fotodiodo e o amplificador

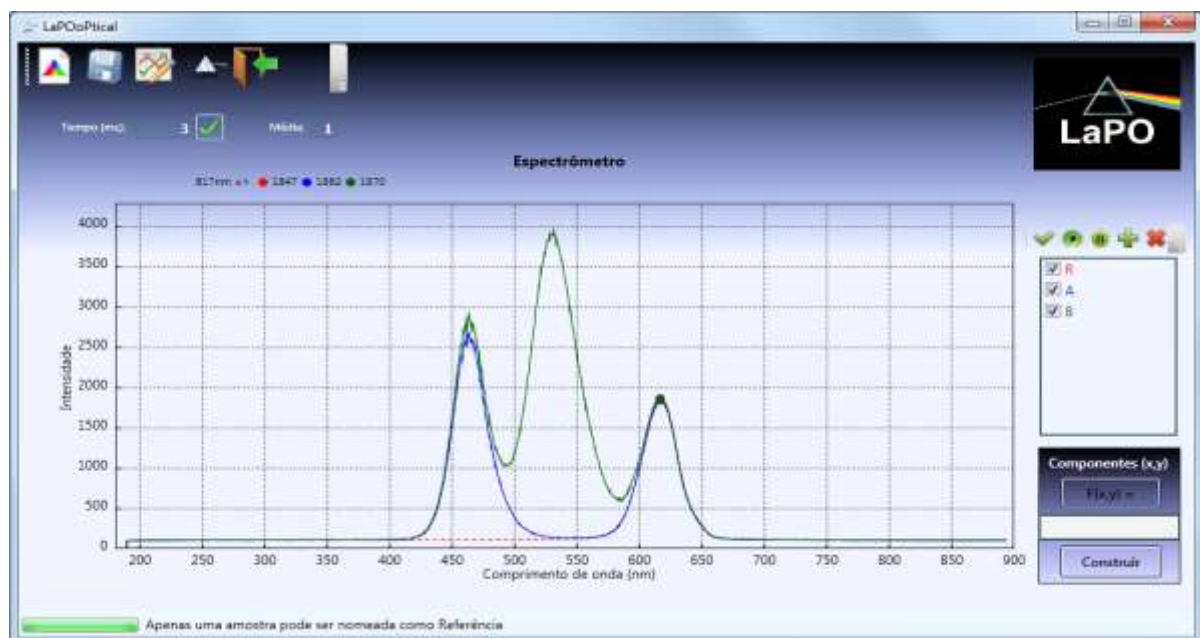


Figura 4.5 - Janela do programa do espectrômetro.

operacional OPA2381 efetua a conversão da intensidade de corrente em níveis de tensão. Esse amplificador operacional apresenta excelente desempenho para aplicações com alimentação simples entre 2,7V e 5,5V. É um amplificador da Texas Instruments, desenvolvido para ser montado na configuração de transimpedância, com características como: alta precisão, baixo

ruído e baixo consumo, sendo capaz de amplificar correntes da ordem de 10 nA e é indicado para aplicações de monitoramento com fotodiodos. Estes conjuntos de características, somados à facilidade de ser alimentado com uma fonte de tensão simples, determinaram a sua escolha. Apesar de só estar disponível nos encapsulamentos MSOP-8 ou DFN-8, o que dificultou a sua montagem, devido ao tamanho e condições de soldagem ao circuito, ele foi preferido em relação ao TL081. Este amplificador operacional também pode ser utilizado em aplicações com fotodiodos, porém necessita de fonte simétrica para o adequado funcionamento. A Figura 4.6 apresenta o circuito de detecção da intensidade da luz, sugerido pelo fabricante, numa configuração alimentada por fonte de tensão simples, utilizado nos dois nós sensores da qualidade das amostras. A entrada não inversora foi ligada à terra por um resistor de 100 K $\Omega$  e um capacitor de 0.1  $\mu$ F, formando um filtro RC, que diminui o ruído. Esta ligação do resistor à terra define a tensão de polarização na entrada V+, que também pode servir como ponto de referência para compatibilizar a tensão de saída deste amplificador e a escala do ADC.

Para o XBee que será conectado a esse nó sensor, foi carregado o firmware para dispositivo final na versão 29A0, no modo API. Apenas nesse modo, o XBee funciona no modo *sleep*. No modo *sleep*, o XBee periodicamente ativa o rádio e transmite os dados adquiridos nas entradas analógicas e digitais. O Quadro 4.1 apresenta os parâmetros e descrição dos comandos para funcionamento no modo *sleep* (23).

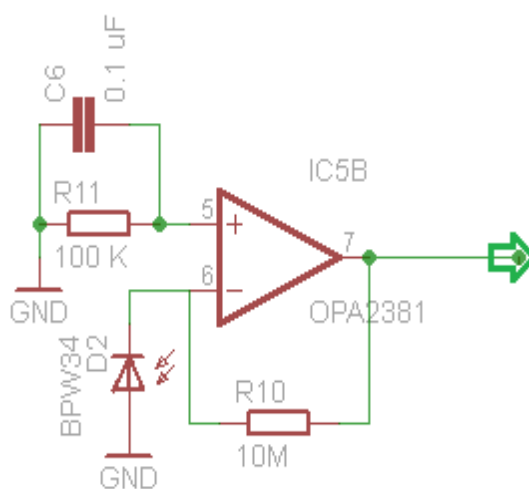


Figura 4.6 - Circuito de detecção da intensidade da luz transmitida.

Comando	Faixa	Descrição
SP	0x20 – 0xAF0 (x10ms) (320-28,000ms)	Configura o período de <i>sleep</i> do módulo
SN	1 – 0xFFFF	Configura o multiplicador do período de <i>sleep</i>
SO	0-0xFF	Define opções de comportamento do modo <i>sleep</i>

Quadro 4.1 - Parâmetros de configuração modo SLEEP

XBee, fonte (23).

#### 4.2.1.1 NÓ SENSOR AMOSTRAS

O circuito de alimentação e regulação deste circuito utiliza a fonte de tensão simples, que foi apresentada na seção 4.2.

O projeto deste circuito usa o pino 13 (ON/ SLEEP) do XBee para diminuir o consumo de energia. Quando o XBee está ativo, o pino 13 vai para nível alto, o transistor BC 548 satura e aciona o relé que comuta a alimentação dos demais componentes do circuito. Quando o XBee entra no modo *sleep*, para economizar energia, o sinal do pino vai para o nível baixo, o transistor entra no estado de corte, o relé comuta abrindo os contatos e assim desliga a alimentação para o circuito de detecção, como pode ser visto na Figura 4.7. Deste modo, este nó funcionará com baixo consumo de energia durante o período de *sleep*, aumentando a vida útil das baterias, aproveitando as características de funcionamento do XBee.

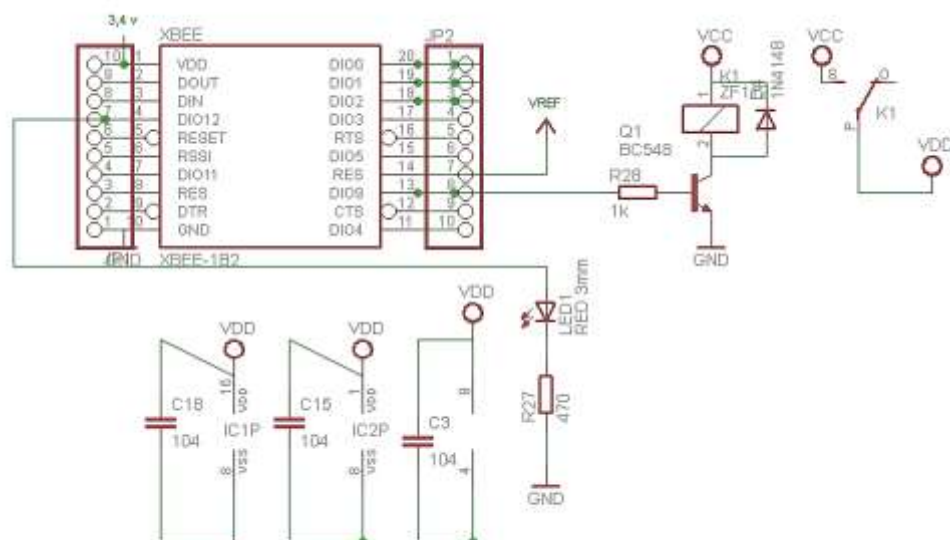


Figura 4.7 - Circuito de alimentação do detector.

Quando ativo, o XBee executa periodicamente a amostragem das portas digitais e analógicas e as transmite para um dispositivo remoto. Os parâmetros DH e DL do XBee determinam o endereço do destino da transmissão das amostras. Se DH e DL forem 0x00h, os dados da amostragem serão transmitidas para o coordenador da rede. O período de amostragem é determinado pelo comando IR. Se o parâmetro de IR for zero, a amostragem periódica será desativada. Valores entre 50 e 65535 são reconhecidos e a unidade de tempo é o milissegundo. Por exemplo: definindo o parâmetro do comando IR em 1000, o período de amostragem será executado pelo XBee a cada 1000 ms. Ainda na Figura 4.7, pode ser visto o pino 14 do XBee onde é aplicada a tensão de referência (VREF) para o ADC.

O XBee foi configurado para permanecer ativo durante um período de dois segundos e no modo *sleep* por 27,26 segundos. A cada ciclo ativo do XBee, os circuitos lógicos e de detecção são ativados e ocorre a amostragem das portas digitais e analógicas.

Foi utilizado um circuito lógico 4049N, composto de seis *buffers* inversores, para acender os LED, desta forma as portas digitais de saída do XBee ficam protegidas. Através destas portas digitais do XBee, é possível definir qual ou quais cores do LED RGB estarão acesas. Quando o XBee inicia o modo de *sleep*, este circuito não está alimentado e o LED RGB está apagado. Este circuito de alimentação do LED é apresentado na Figura 4.8.

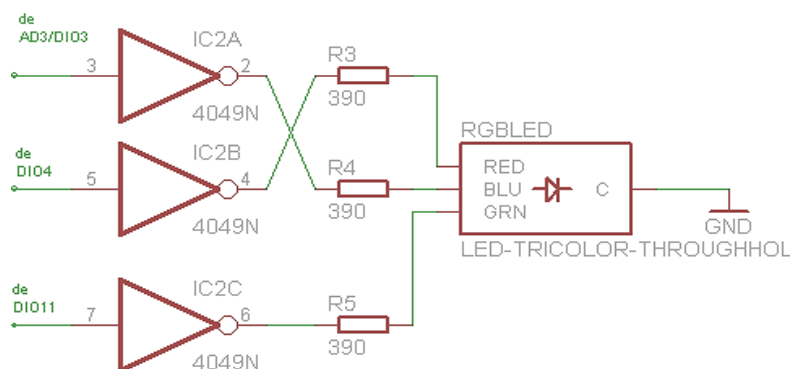


Figura 4.8 - Circuito *buffer* para os LEDs.

A tensão de saída do circuito do amplificador de transimpedância, relativa à intensidade da luz espalhada na amostra de epóxi, e a tensão de saída do LM35, relativa à temperatura ambiente, são digitalizadas pelo ADC do XBee. Em seguida, estas palavras digitais são então transmitidas ao coordenador da rede. A Figura 4.9 mostra estas conexões do circuito.

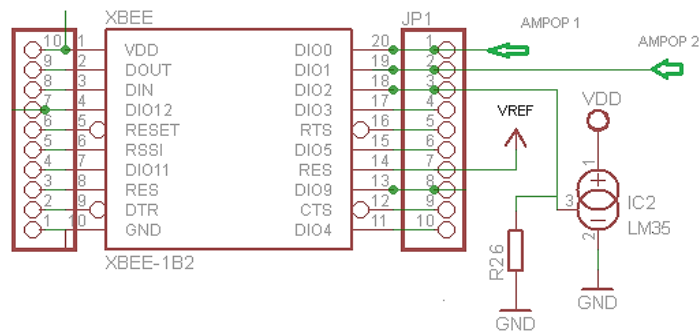


Figura 4.9 - Conexões com as portas do ADC do XBee.

Neste nó, o fotodiodo está posicionado a  $90^\circ$  da fonte de luz (LED). Com este posicionamento, o fotodiodo está detectando a intensidade da luz espalhada pela amostra para as três cores geradas pelo LED RGB e controladas por saídas digitais do XBee. A medição da intensidade da luz em outros comprimentos de onda é uma técnica utilizada nos processos de química analítica (26). Neste tipo de análise observam-se substâncias que absorvem um determinado comprimento de onda e outros não (26). Assim, é possível avaliar o estado das amostras, não apenas pelos desgastes, por abrasão ou corrosão, mas também considerando as alterações causadas por reações químicas entre a camada de revestimento dos dutos e compostos do petróleo. A Figura 4.10 apresenta a foto desta placa de circuito impresso com uma amostra sem desgaste sendo encaixada no casulo.



Figura 4.10 - Nó Sensor Amostras

Analogamente ao primeiro sensor e atuador, para controle e administração deste nó, um código de programa foi desenvolvido e será discutido na seção 4.3.2. Este circuito difere do anterior apenas no que tange a coleta de informação e por transmitir dados coletados em períodos definidos e utilizar o modo *sleep*. Neste dispositivo não figuram circuitos atuadores. O diagrama completo do circuito pode ser visto no Apêndice G – DIAGRAMA CIRCUITO NÓ SENSOR AMOSTRAS.

#### 4.2.1.2 NÓ SENSOR AMOSTRAS MICROCONTROLADO

O projeto deste circuito utiliza outra abordagem. Este nó sensor é diferente do anterior por utilizar um microcontrolador embarcado. O LED é aceso de forma intermitente por uma onda quadrada. Neste nó são utilizados circuitos de detecção síncrona para a luz transmitida e espalhada que dependem de uma fonte de alimentação de tensão simétrica.

Este nó com microcontrolador também tem como objetivo detectar a qualidade de amostras construídas à base de epóxi, sendo capaz de executar um código de programa local, possibilitando a tomada de decisão, como forçar que o módulo XBee saia do modo *sleep* e efetue amostragem das portas e as transmita ou mesmo realizar outros métodos de detecção, tipo a modificação da frequência utilizada pelo detector síncrono independente do diálogo com um computador remoto de controle.

Para tanto foi utilizado um Arduino-mini, que tem um microcontrolador ATmega168, já utilizado no experimento da seção 3.4.2.1. Neste projeto, o pino ON/SLEEP do XBee está ligado a um pino do microcontrolador. Deste modo, é possível que o microcontrolador reconheça que o módulo XBee foi ativado ou que entrou no modo *sleep*, por um código de programa que monitora o sinal deste pino.

Outra característica deste nó é que o microcontrolador pode forçar o XBee a sair do modo *sleep*, posicionando a sua saída DIO3 em nível alto. Este sinal é comunicado ao pino 9 (SLEEP\_RQ) do XBee, que detecta a mudança de estado de alto para baixo e sai do modo *sleep*. Para simular esta função, foi instalada na placa uma microchave ligada ao Arduino. O código de programa em execução detecta o fechamento da microchave e envia sinal para o XBee. Estas conexões foram feitas com fios (*jumper*) que saem do Arduino-mini para o XBee e levam os sinais ON/SLEEP e SLEEP\_RQ. Filas de pinos foram instaladas em linha com o XBee e com o Arduino, de forma a possibilitar estas conexões e demais conexões deste nó sensor.

Uma das funções do microcontrolador é gerar pulsos em 4 KHz<sup>8</sup> para acender uma cor específica do LED, determinada por um sinal digital proveniente do XBee. Quando o XBee estiver no modo *sleep*, os circuitos continuarão energizados, diferente do circuito anterior; o LED RGB não será aceso, pois ele é controlado pelo microcontrolador, e a rotina de ativação do LED RGB não é executada quando o XBee está no modo *sleep*. O circuito deste nó consome mais energia do que o anterior e utiliza alguns artifícios para minimizar este consumo.

Este nó também utiliza um casulo de cor preta, no qual as amostras de epóxi são inseridas para teste que pode ser visto na Figura 4.15. Neste casulo, estão instalados dois fotodiodos, um fotodiodo está a 0° em relação à fonte de luz incidente e o outro está a 90°. Obtêm-se, assim, duas medidas da intensidade da luz: a da luz transmitida e a da luz espalhada pela amostra.

A representação gráfica da Figura 4.11<sup>9</sup> ajuda na compreensão do comportamento e definições sobre a propagação da luz. Nesta figura a luz incidente na amostra se desdobra em três componentes: a luz absorvida, a transmitida e a espalhada. A intensidade da luz resultante da mesma direção da luz incidente é a luz transmitida. Parte da energia da luz é absorvida pelo volume do material. A outra parte da luz, que geralmente emerge em diferentes direções, em relação à luz incidente, é a luz espalhada.

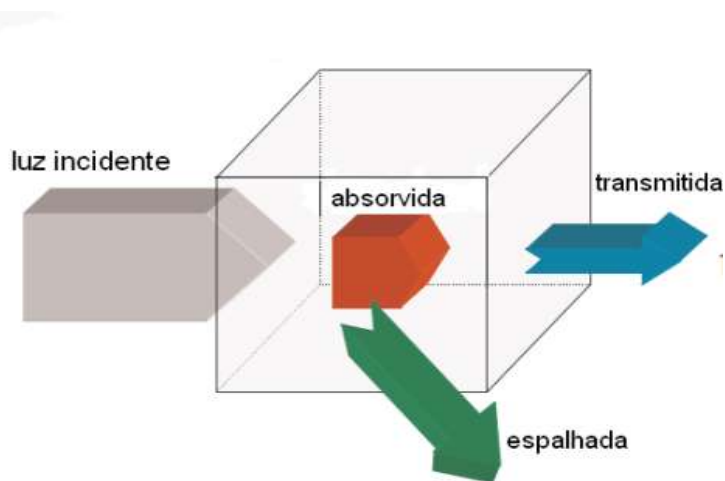


Figura 4.11 - Resultantes da luz incidente na amostra

---

<sup>8</sup> Esta frequência foi escolhida dentro da faixa utilizada por muitos projetistas de instrumentos óticos, que está entre 2 e 20 KHz. ( (26), página 68)

<sup>9</sup> Retirada e traduzida do slide da aula 21 *Absorption and Transmission of light and the Beer-Lambert Law*, citada na nota 3.

O circuito do nó sensor apresentado na seção 4.2.1.1, acende o LED RGB com tensão contínua. O LED aceso emite, assim, uma luz constante. Neste novo nó, a cor do LED a ser acesa é definida por um sinal digital proveniente do XBee. Ao invés da utilização da corrente contínua, um sinal modulado é injetado ao LED RGB. Isto gera um feixe de luz modulada em frequência. Três saídas digitais do XBee estão ligadas às portas de entrada digitais do Arduino, este as lê continuamente e assim que detecta que o XBee saiu do modo *sleep*, determina a cor ou cores do LED a ser(em) acesa(s). O programa do microcontrolador reconhece cada um dos sinais, que corresponde a uma dada cor do LED (vermelho, azul e verde-*Red, Blue e Green*). O processador passa então a modular o sinal de acendimento em forma de onda quadrada de frequência 4 KHz, até que o XBee volte ao modo de *sleep*.

O tempo que o XBee permanece ativo é configurado pelo comando ST (*Time Before Sleep*) e pode variar de 1 ms até 65534 ms. Para este nó, este valor foi definido em 2 segundos.

Este sinal modulado em onda quadrada da luz do LED requer outra abordagem para detecção da intensidade da luz. O primeiro estágio do circuito de detecção é semelhante ao do nó sensor anterior, que já foi descrito e apresentado na Figura 4.6. O segundo estágio utiliza um amplificador operacional TL082 e um *switch* bilateral CD4016BC, em configuração para detecção síncrona da luz modulada. Um diagrama em blocos de um circuito detector síncrono é apresentado na Figura 4.12 (fonte (26), página 94).

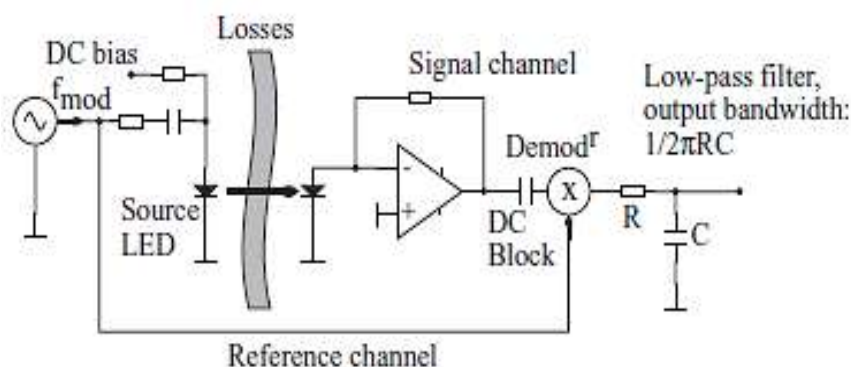


Figura 4.12 - Diagrama de blocos de detecção síncrona. (26), página 94.

A modulação da luz emitida pelo LED tem como objetivo diminuir o ruído de interferência de outras fontes de luz. A detecção síncrona possibilita que sinais detectados pelo fotodiodo de outras fontes de luz pulsantes ou contínuas, tais como lâmpadas fluorescentes, tenha alta rejeição. Este processo aumenta consideravelmente a sensibilidade e a precisão da leitura do nível de luz de muito baixa intensidade, tanto para a luz transmitida quanto para a



espalhada. E, portanto, aumenta a sensibilidade na determinação da qualidade das amostras, uma vez que este modelo de detecção separa o sinal de luz proveniente da fonte original do resto do ruído ambiente.

A modulação da luz incidente na amostra por um sinal de frequência fixa e a demodulação após a transmissão pela amostra, pelo sinal de referência defasado de 180°, é conhecida como detecção síncrona. Esta é uma técnica muito utilizada para rejeição do ruído do sinal original<sup>10</sup>.

Os fótons da luz modulada, gerados pelo LED e transmitidos pela amostra de epóxi, são detectados pelo fotodiodo, que os transforma em corrente elétrica, que é amplificada pelo OPA2381. Esta tensão é proporcional à intensidade da foto-corrente da saída do diodo. Este circuito foi discutido na seção anterior e apresentado na Figura 4.6.

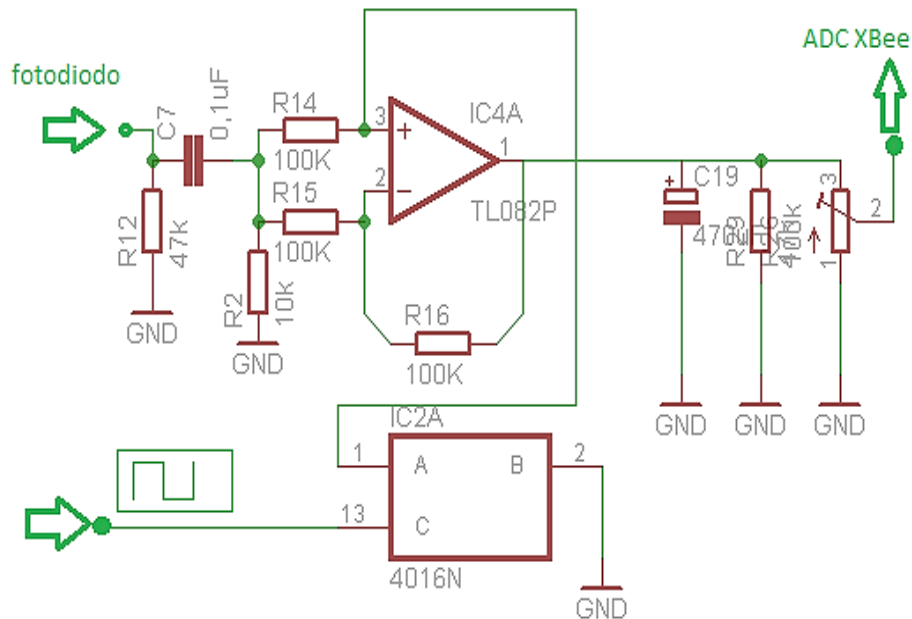


Figura 4.13 - Circuito amplificador síncrono.

Neste nó sensor, são utilizados dois destes circuitos: um para detecção da luz transmitida pela amostra e outro para detecção da luz espalhada. O sinal modulado em 4 KHz, resultante da luz transmitida ou espalhada pela amostra, passa agora por filtro RC, removendo as componentes DC e componentes de baixas frequências. Este sinal segue para o circuito de detecção síncrona,

<sup>10</sup> Esta técnica é amplamente apresentada no capítulo 5 do livro Photodetection and Measurement de Mark Johnson (26)



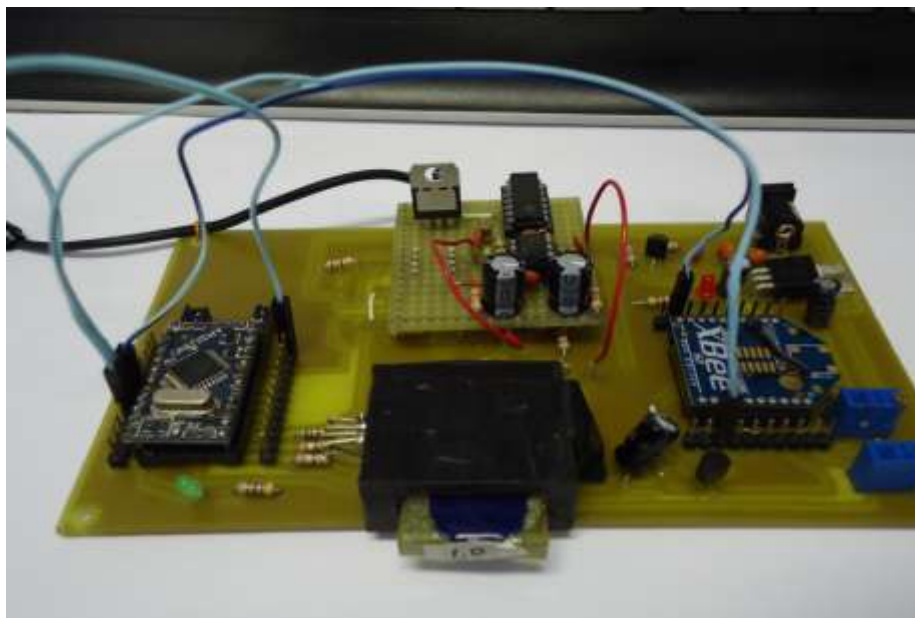


Figura 4.15 - Montagem do circuito nó microcontrolado.

O diagrama do circuito está disponível no Apêndice H – DIAGRAMA CIRCUITO NÓ SENSOR AMOSTRA MICROCONTROLADO.

O código de programa que define a lógica de funcionamento encontra-se no Apêndice D - CÓDIGO NÓ SENSOR AMOSTRAS MICROCONTROLADO.

Uma classe de programa para este nó foi desenvolvida e será apresentada na seção 4.3.3.

## 4.2.2 RESULTADOS LABORATÓRIAS

Para os dois nós desenvolvidos foram efetuado testes do circuito de detecção da intensidade da luz transmitida. As tensões foram medidas diretamente na saída de cada um dos circuitos de detecção. A metodologia e os resultados são discutidos a seguir.

Com o Nó Sensor Amostra, foram realizadas sete réplicas de cada uma das oito amostras. Foi utilizado um multímetro digital da marca LINI-T, modelo UT30B, na escala 2000 mV e um LED RGB serviu como fonte de luz, onde cada uma das pastilhas foi acesa individualmente. As amostras foram inseridas no casulo de medição, uma a uma em sequência, começando pela amostra sem nenhum desgaste e indo até a amostra com o maior desgaste. O casulo tem como objetivo diminuir a interferência das outras fontes de luz, presentes no ambiente de teste, sobre a amostra. O resultado para as cores verde e azul são apresentadas nos Gráfico 4.1 e Gráfico 4.2 respectivamente.

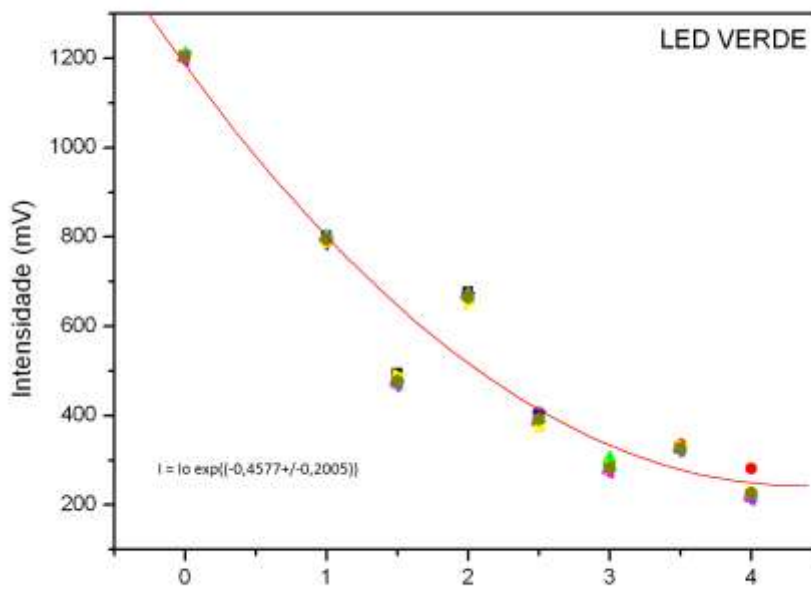


Gráfico 4.1 - Variação da intensidade da luz espalhada LED VERDE.

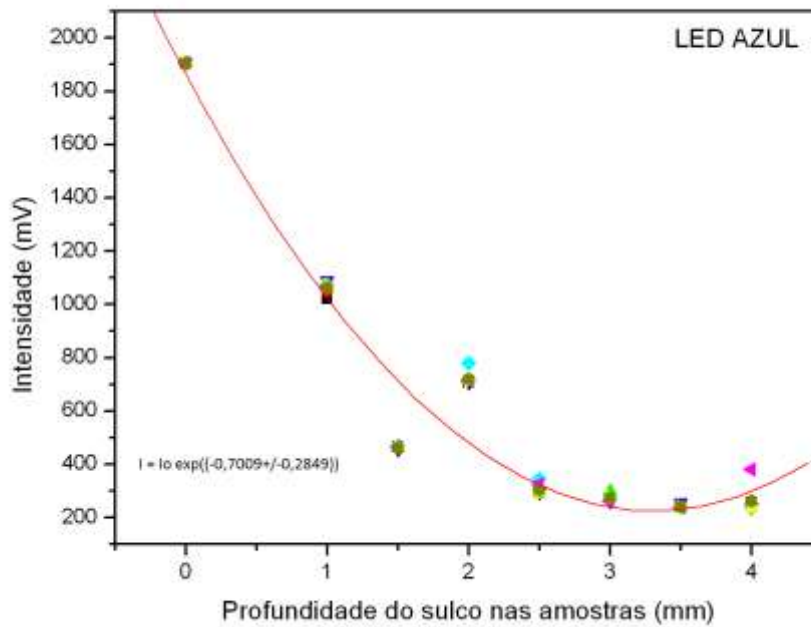


Gráfico 4.2 - Variação da intensidade da luz espalhada LED AZUL

As curvas dos Gráfico 4.1 e Gráfico 4.2 podem ser comparadas com a curva que caracteriza a lei de Beer-Lambert. Esta lei diz que “a intensidade da luz emitida decresce exponencialmente à medida que a espessura do meio absorvente aumenta aritmeticamente” (14). Esta lei é expressa pela Equação 4.1.

$$I = I_0 e^{-\sigma\lambda x} \Rightarrow \frac{I}{I_0} = e^{-\mu x} \quad (4.1)$$

Em que  $\mu$  é o coeficiente de atenuação linear expresso em  $\text{cm}^{-1}$ , sendo função do comprimento de onda  $\lambda$  e  $\sigma$  que é a constante de absorção, característica de cada material (27),  $x$  é a espessura do material em que a luz é transmitida ou espalhada.

Conclui-se que a variação da profundidade do sulco das amostras, aumentada em passos de 0,5 mm, resultou numa variação exponencial da intensidade da luz espalhada, equivalente à relação estabelecida pela Equação 4.1. Fica evidente que esta metodologia de detecção da qualidade da amostra, usando a medida da intensidade da luz espalhada, pode ser usada para

determinação do desgaste do revestimento epóxi. A lei de Beer- Lambert é válida tanto para a luz transmitida quanto para a luz espalhada<sup>11</sup>.

Para o LED vermelho, o resultado foi diferente, conforme pode ser visto na Gráfico 4.3. Se atento unicamente à forma de dispersão dos pontos experimentais uma correlação do tipo exponencial não fica muito evidente. Apesar disto foi forçado um ajuste exponencial, usando a mesma equação e método de ajuste utilizado para os dados obtidos com os LED's azul e verde. Mesmo com a aparente linearidade dos pontos medidos, foi possível ajustar a exponencial. O Gráfico 4.4 apresenta este ajuste.

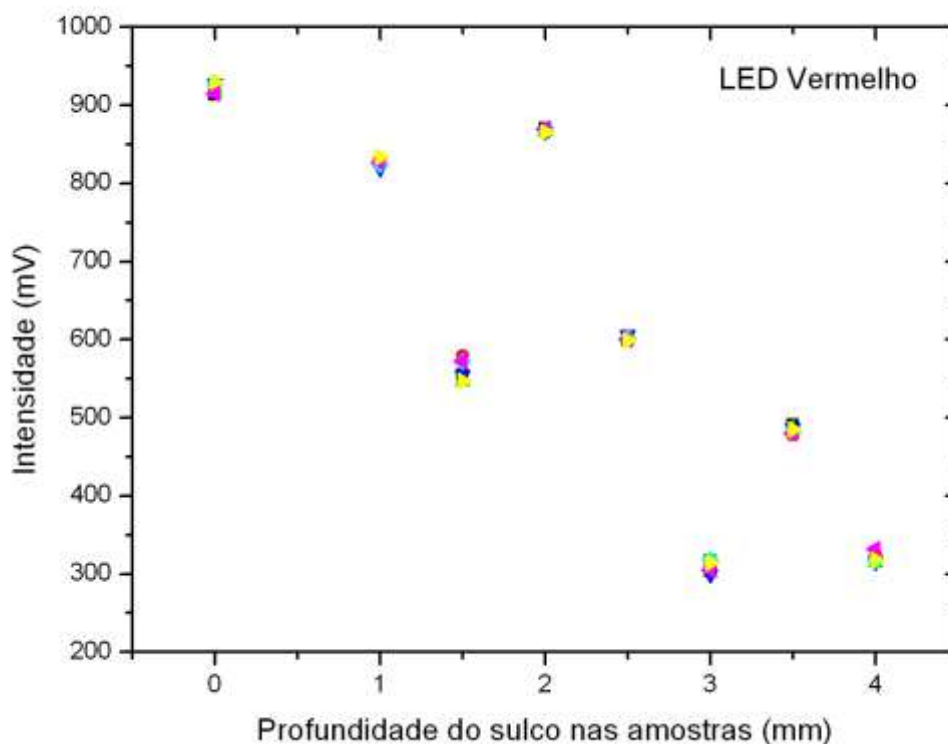


Gráfico 4.3 - Variação da intensidade da luz espalhada LED VERMELHO.

---

<sup>11</sup> Esta conclusão foi apresentada na página 10, no slide da aula 21 *Absorption and Transmission of light and the Beer-Lambert Law*, disponível em <http://www.physics.uoguelph.ca/~pgarrett/teaching/PHY-1070/PHY-1070%2520Lectures.html>

Mesmo tendo obtido êxito no ajuste por uma função do tipo Beer-Lambert, é difícil não ficar tentado a fazer um ajuste linear dos resultados das medições com o LED vermelho. Na verdade esta seria a tendência natural de qualquer pesquisador que tivesse obtido tais pontos experimentais.

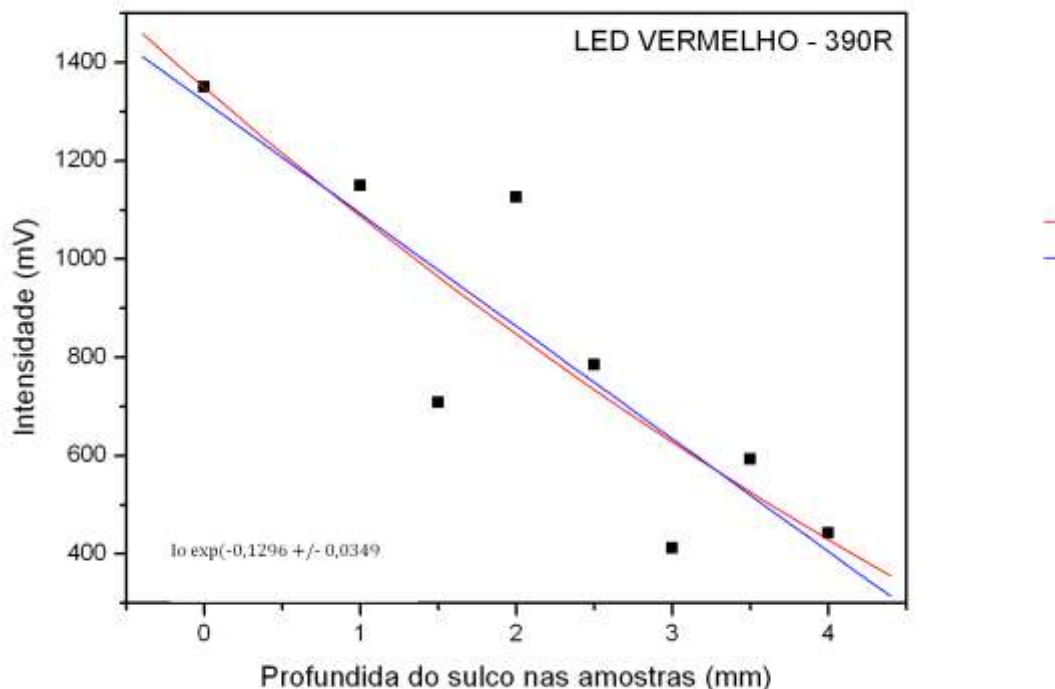
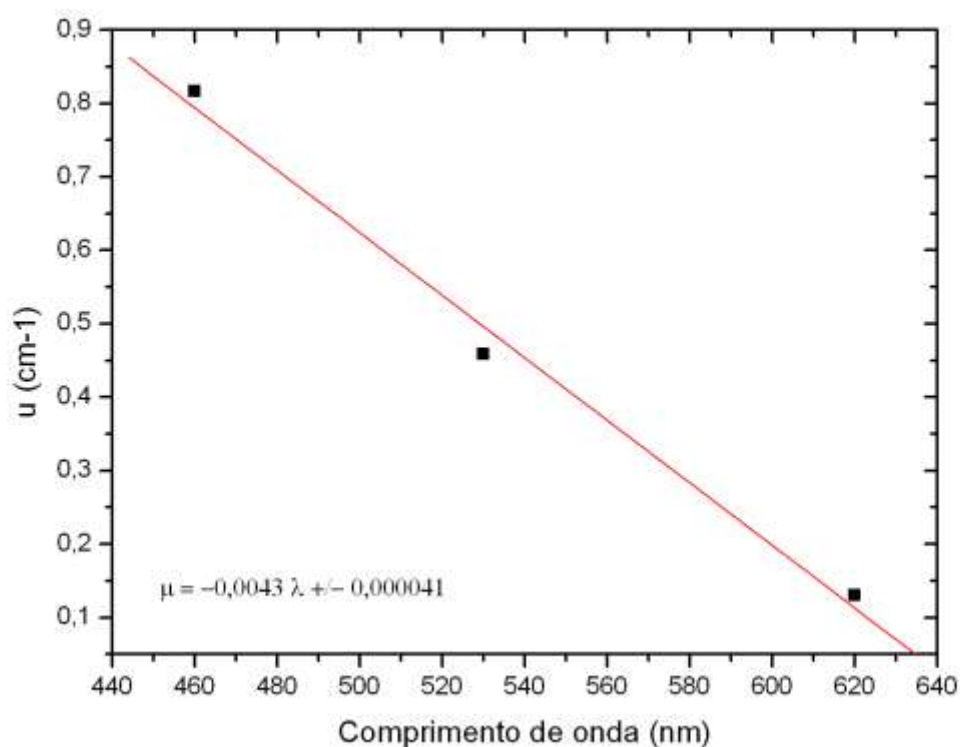


Gráfico 4.4 – Ajustes exponencial e linear luz espalhada.

No Gráfico 4.4, a linha azul é o resultado do ajuste por análise em uma regressão linear e em vermelho para um ajuste por exponencial. A luz vermelha que incide na amostra também é espalhada pela cola e pelo recheio utilizado para o preenchimento do sulco conforme discutido na seção 3.4.1. Entretanto este espalhamento é muito menor que para a luz azul e verde, por isto têm-se a impressão que a dependência entre a intensidade transmitida e profundidade do sulco é uma função linear. Tal afirmação encontra reforço nos resultados obtidos para os diferentes  $\mu$ 's obtidos pelo ajuste dos pontos experimentais dos três diferentes LED's apresentados na Tabela 4.1. A partir destes dados é possível construir, mesmo que somente com três pontos um gráfico da dependência entre o valor de  $\mu$  e o valor de  $\lambda$  central de cada LED. O Gráfico 4.5 apresenta esta dependência.

Tabela 4.1 - Valores de  $\mu$  em função de  $\lambda$ .

$\lambda$	$\mu$
460	0,816
530	0,458
620	0,130

Gráfico 4.5 - Relação entre  $\mu$  e  $\lambda$ .

Em primeira aproximação é possível afirmar que para o sistema ótico investigado  $\mu$  pode ser escrito como na Equação 4.2, onde o valor -0,0043 representa a constante de absorção ( $\sigma$ ) do material utilizado para confecção das amostras, logo:

$$\mu \lambda = -0,0043 \cdot \lambda \pm 0,000041 \quad (4.2)$$

Como previsto pela lei de Beer-Lambert, (Equação 4.1) este resultado demonstra que o método ótico pode ser usado na determinação da profundidade de avarias e defeitos em uma



camada de epóxi. Entretanto, para maior segurança e sensibilidade na medida esta análise deve usar mais de um comprimento de onda de luz de excitação, de forma a evitar ambiguidade de resultados. O que reforça o uso de LED RGB como fonte de luz nesta técnica.

Como esperado a constante de decaimento da intensidade da luz ( $\mu$ ) é função do comprimento de onda. Logo a partir da Equação 4.2 é possível determinar o comportamento da variação da intensidade da luz em função da espessura de forma contínua mesmo para espessuras inferiores as das amostras testadas. É importante ressaltar que a partir desta conclusão será possível determinar a deterioração dos revestimentos nos dutos que tem espessura na ordem de 0,5 mm.

Analisando os resultados das medidas obtidas através de nó detector da intensidade da amostra temos as seguintes considerações:

- o conversor analógico digital utilizado tem resolução de 10 bits;
- a variação da tensão medida entre a amostra sem desgaste e uma erodida, com um sulco de 4 mm é de 978 mV.

Aplicando simplesmente a teoria da amostragem, o sensor desenvolvido poderia determinar variações da ordem de 4,8  $\mu\text{m}$  na espessura da amostra, entretanto a incerteza final do equipamento desenvolvido impossibilita tal resolução. A razão para tanto é inerente à propagação dos diferentes erros envolvidos na cadeia de medição.

Uma vez computado, o erro relativo máximo entre as medidas de uma mesma espessura foi de 1%. Erroneamente, tal número levaria a um erro médio de 0,57% se feita uma análise por consistência interna. Por uma questão de coerência e assumindo que, eventualmente, nem todas as fontes de erro foram levadas em conta nesta análise, é mais seguro e realista, baseado nos números obtidos por consistência externa, assumir que as variações nas medidas da espessura terão uma incerteza de 2%, ou seja, duas vezes o desvio relativo máximo. Então, apesar de um ADC com resolução de aproximadamente uma parte em mil, só é possível determinar variação nas amostras de duas partes em cem, ou seja, maiores que 80 $\mu\text{m}$ . Os revestimentos utilizados industrialmente tem espessura de cerca de 500 $\mu\text{m}$ , logo este método é capaz de identificar variações na ordem de 16%, cerca de 1/6 da espessura do revestimento.

Para o Nó Sensor Amostra Microcontrolado, que executa detecção síncrona da luz transmitida e espalhada, foram efetuadas sete réplicas de medidas com as oito amostras e anotados os medidos com auxílio de um osciloscópio digital da RIGOL modelo DS1062C. As tensões medidas são relativas à intensidade da luz detectada pelos fotodiodos posicionados a  $0^\circ$  e a  $90^\circ$  em relação à fonte de luz.

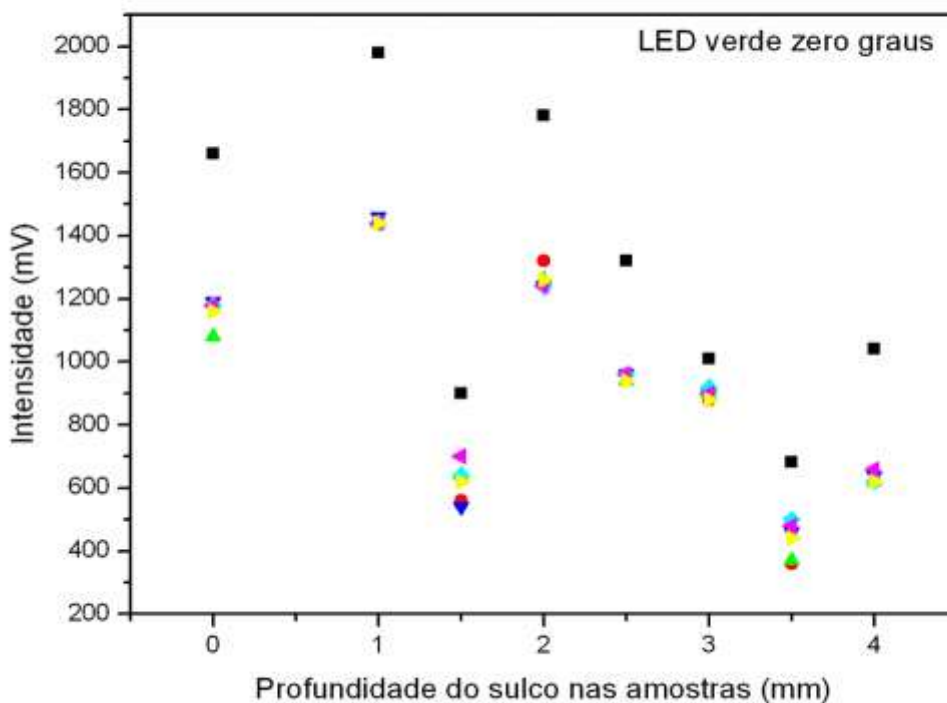


Gráfico 4.6 - Resultados para sensor a  $0^\circ$  da fonte de luz.

Os dados obtidos das medições com o foto diodo à  $0^\circ$ , em relação à fonte de excitação, são mostrados no Gráfico 4.6. Este gráfico mostra uma dispersão muito grande dos valores das medições. Além disso, o gráfico também mostra certa tendência de diminuição da intensidade da luz transmitida em função da profundidade do sulco da amostra. É importante observar a boa repetitividade na forma com que estes pontos estão dispersos, como pode ser observado na Tabela 4.2. Nesta tabela são apresentados os valores do coeficiente angular, obtidos por ajustes numérico dos pontos experimentais por uma regressão linear, de cada uma das sete séries de medidas. Corroborando com o observado, o Gráfico 4.7 apresenta os dados da Tabela 4.2. Neste gráfico fica patente que a dispersão pode ser representada por uma família de curvas paralelas, chegou-se a esta conclusão mediante o uso, em primeira aproximação um conjunto de retas.

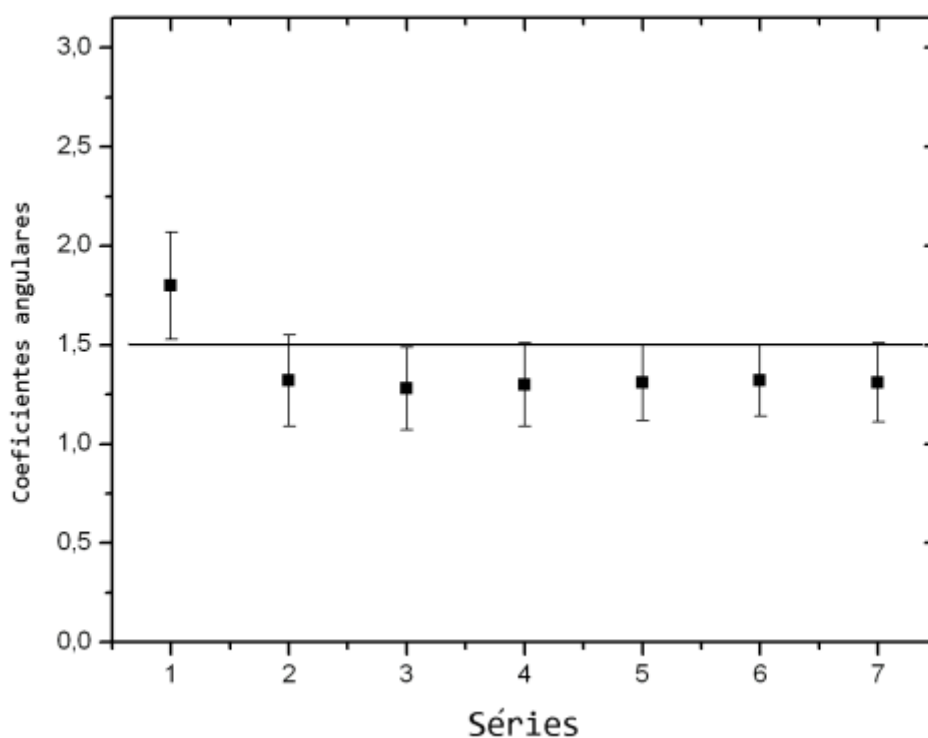


Gráfico 4.7 – Apresentação gráfica dos dados da Tabela 4.2

Tabela 4.2 - Coeficientes Angulares das séries de medidas da luz transmitida.

<i>Medidas</i>	<i>A</i>	<i>Erro</i>
1	1,80	±0,27
2	1,32	±0,23
3	1,28	±0,21
4	1,30	±0,21
5	1,31	±0,19
6	1,32	±0,18
7	1,81	±0,20

A razão para a dispersão experimental pode ter a haver com a qualidade da montagem usada para as medições. Como mencionado na seção 3.4.2.3, um arranjo mecânico na forma de casulo foi montado para este mister. Variações na forma da amostra, assim como folgas

mecânicas no casulo podem ter ocasionado a fuga da luz de excitação, ou reflexão difusa desta mesma luz, entre a parede da amostra e as paredes internas do casulo.

Esta ambiguidade não é observada nas medidas da luz espalhadas à 90°, apresentadas no Gráfico 4.8. Os dados podem ser analisados aplicando a mesma metodologia usada para obter os resultados do Nó Sensor Amostras, da seção 4.2.1.1.

Observa-se também que o Gráfico 4.8 apresenta menor dispersão dos pontos comparando-os aos do Gráfico 4.1, o que indica que este método de detecção síncrona apresenta claramente uma menor relação sinal ruído.

Considerando os resultados obtidos nos dois métodos de detecção, dos dois diferentes nós sensores, e considerando os custos para construção dos circuitos, incluídos os custos das fontes utilizadas em cada um, conclui-se que, para este caso estudado, o primeiro método é suficiente e mais econômico no processo de determinação do estado da qualidade da amostra.

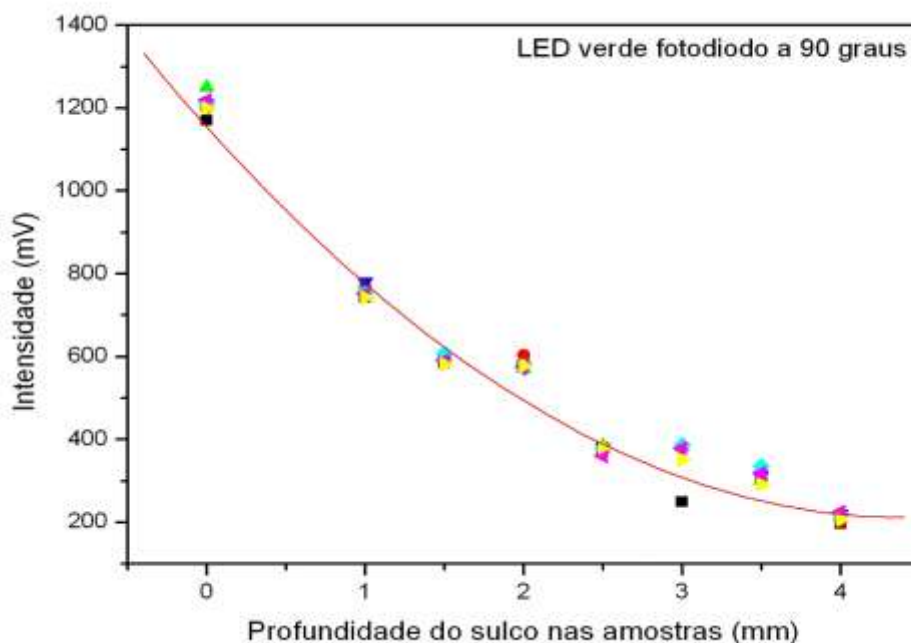


Gráfico 4.8 - Resultados para sensor a 90° da fonte de luz

### 4.3 DESENVOLVIMENTO DO SOFTWARE

Foi desenvolvido um software aplicativo, composto de um programa principal e classes de programa em linguagem C# utilizando interface WIMP( *Windows, Icons, Menus and Pointers*). O programa principal deste aplicativo trata as mensagens entre os módulos XBee, configurados como roteadores ou dispositivos finais, como apresentado na seção 4.2, e o módulo XBee coordenador da rede conectado ao microcomputador. Na construção deste software aplicativo foram utilizadas as bibliotecas .NET Framework versão 4.0, .NET Micro Framework Toolkit, bibliotecas do XBee disponíveis no site CodePlex<sup>12</sup> e o Visual Studio 2010.

Cada um dos nós sensores tem características específicas e estas são simuladas em uma interface gráfica. Com base em cada hardware projetado parâmetros e funções específicas foram transformados em propriedades e métodos de uma classe correspondente. Estas classes representam o funcionamento lógico de cada um dos circuitos eletrônicos dos nós desenvolvidos apresentados nas seções anteriores que formam esta rede de sensores sem fio baseada em XBee.

Cada nó sensor possui um soquete específico para instalação de um módulo XBee, previamente parametrizado e identificado para aquele tipo específico de nó. Um programa principal identifica cada tipo de nó da rede e cria uma instância da classe equivalente. Despacha, então, os dados transmitidos por cada um dos nós para a instância de código correspondente para o devido tratamento, a tomada de decisão e a apresentação.

Os nós da rede são controlados pelas seguintes classes de programa:

- a) Nó Sensor Amostras, referente à seção 4.2.1.1;
- b) Nó Sensor Amostras Microcontrolador, referente à seção 4.2.1.2;
- c) Nó Sensor Atuador, referente à seção 0;
- d) Nó transparente para conexão RS-232 com multímetro digital, referente à seção 3.5;

Quando em modo API, o coordenador conectado a um microcomputador disponibiliza em sua UART as mensagens recebidas dos nós da rede no formato de *frames*. Os tipos de mensagens a serem transmitidas devem ser preparados com os *frames* correspondentes e enviados ao coordenador pela sua UART para o devido encaminhamento.

O módulo XBee, com os devidos parâmetros da rede, está ligado a um microcomputador, por meio de uma interface conhecida como XBee Explorer, apresentada na Figura 4.16. Esta

---

<sup>12</sup> <http://www.codeplex.com/>

interface possibilita ligar o XBee diretamente à porta USB. Esta interface tem os circuitos eletrônicos necessários para adequação da tensão de alimentação de 5V para 3,3 V e interfaceamento USB através de um chip FTDI. Deste modo, todas as mensagens recebidas e transmitidas trafegam pela porta USB e são vistas pelo programa principal, através de uma porta de comunicação serial padrão. O programa principal conecta-se a essa porta durante o procedimento de inicialização.



Figura 4.16 - XBee conectado ao microcomputador através do XBee Explorer.

A rede é estabelecida automaticamente e cada nó com firmware roteador ou dispositivo-final se associa a ela à medida que é ligado. Durante o procedimento de associação, o nó pode enviar um *frame* de identificação, chamado de *Node Identification Indicator*, que tem identificador igual a 0x95. Este *frame* carrega em seu corpo informações específico do nó. Uma dessas informações é o nome de identificação do nó, que está em um conjunto de caracteres com comprimento máximo de 20 bytes. Este conjunto é utilizado pela aplicação para identificar o nó sensor. Todos os tipos de *frame* utilizados neste trabalho podem ser consultados na documentação dos módulos XBee.

A função de identificação do nó é definida através do comando JN, com parâmetro igual a 1, que é definido em todos os módulos que não são configurados para operarem no modo *sleep*. Para os nós sensores, que funcionam com o modo *sleep* ativado, esta função foi desabilitada, pois aumentaria o tráfego da rede desnecessariamente, uma vez que sempre que saírem do modo *sleep* estes nós transmitiriam informações de identificação. Para identificação de toda a rede, a aplicação envia o comando ND (*Node Discovery*) ao coordenador. O coordenador executa, então, uma solicitação em *broadcast* a todos os nós requerendo que se identifiquem, e suas respostas são disponibilizadas na sua UART. A UART do coordenador está ligada ao microcomputador; assim que a leitura for feita pela aplicação, os nós ativos na rede serão identificados.

A topologia da rede vai se estabelecendo à medida que os nós se associam. Esta topologia é determinada pela qualidade do sinal entre os nós e pelo número máximo de associações que um

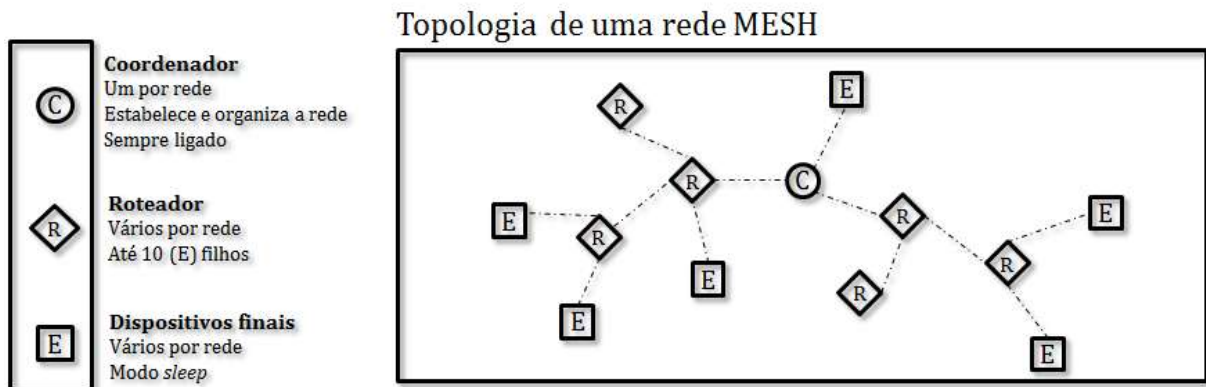


Figura 4.17 - Topologia típica de uma rede ZigBee.

mesmo nó pode suportar, além de ser determinado pelo tamanho da memória reservada pelos nós roteadores para armazenamento de informações dos inter-relacionamentos. A Figura 4.17, retirada do manual do XBee (23), mostra uma topologia típica de uma rede ZigBee em que estão presentes todos os tipos de nós e todos os tipos de relacionamento entre tipos de nós. A linha que interliga os diversos nós representa uma associação direta entre dois nós e não uma conexão física. A figura demonstra também que um dispositivo final, que tenha se associado à rede através de um roteador, não pode trocar mensagens com outros da rede diretamente, mas apenas pelo roteador que lhe concedeu o acesso à rede, estabelecendo assim, uma relação “pai-filho”.

Os módulos usados nesta rede foram configurados com AP=1. Para este modo, o *frame* é definido como a estrutura apresenta na Figura 4.18. O campo cmdID nesta figura é o identificador do tipo de mensagem API que está contida no campo cmdData.

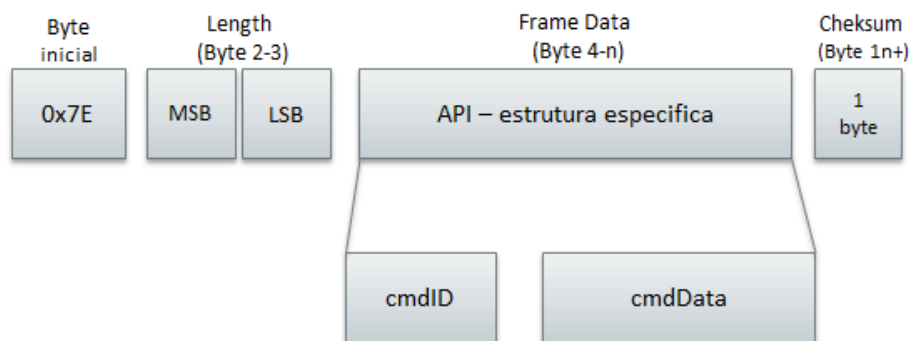


Figura 4.18 - Estrutura de dados API

O software aplicativo desenvolvido neste trabalho dá suporte aos tipos de API *frames* apresentados no Quadro 4.2. Neste quadro, identificam-se algumas API, que especificam como os **comandos, respostas de comandos e mensagens de status dos módulos** são enviadas e recebidas ao módulo através de um *frame* de dados pela UART. A Figura 4.19 mostra uma troca de mensagens, um *frame* de número 0x17, de comando, e o *frame* de número 0x97, como resposta.

Nome API frame	API ID
<i>AT Command</i>	0x08
<i>AT Command – Queue Parameter Value</i>	0x09
<i>Remote AT Command</i>	0x17
<i>Remote AT Command Response</i>	0x97
<i>ZigBee Transmit Request</i>	0x10
<i>AT Command Response</i>	0x88
<i>Modem Status</i>	0x8A
<i>ZigBee Transmit Status</i>	0x8B
<i>ZigBee Receive Packet</i>	0x90
<i>ZigBee IO Data Sample RX Indicator</i>	0x92
<i>Node Identification Indicator</i>	0x95
<i>Remote Command Response</i>	0x97

Quadro 4.2 - Nome e identificador dos frames API.

O programa principal efetua a conexão com a UART do XBee por uma porta COM, trata as mensagens recebidas e em seguida as despacha para as devidas instâncias das classes. Além disso, o programa principal prepara e envia mensagens a serem transmitidas ao coordenador, com os devidos *frames*.

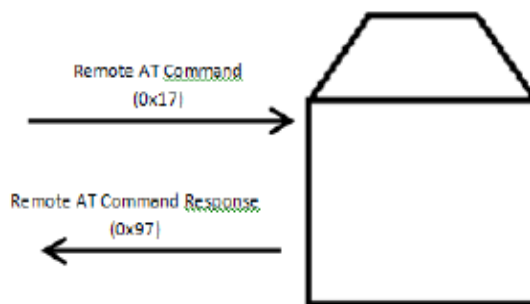


Figura 4.19 - Troca de mensagem API.



### 4.3.1 A CLASSE PARA NÓ SENSOR ATUADOR

Esta classe de programa foi desenvolvida tendo como referência o nó sensor atuador apresentado na seção 0. Esta classe representa, em termos de lógica de programação, as características deste nó. As características funcionais de cada nó podem ser representadas a partir da relação entre os parâmetros e funções do hardware e o código em linguagem de programação.

Duas portas conversoras analógicas digitais e quatro portas digitais, disponíveis no módulo XBee, estão associadas aos componentes do circuito eletrônico da placa conforme Quadro 4.3. Numa representação direta os dados deste quadro são as propriedades que compõem a classe. Os métodos desta classe são os seguintes: o método para operação dos relés; o método para acender o LED de sinalização; o método para converter em palavra numérica, a informação de tensão, referente à temperatura e à luminosidade; além dos demais métodos de apresentação e controle da própria interface homem máquina (IHM<sup>13</sup>).

Nome	Pino	Comando	Parâmetro	Descrição função
AD1/DIO1	19	D1	2	Sensor temperatura – LM35
AD2/DIO2	18	D2	2	Sensor de luz - LDR
AD3/DIO3	17	D3	4	Relé 1
DIO4	11	D4	4	Relé 2
DIO11	7	P1	5	Relé 3
DIO12	4	P2	4	LED sinalização
DIO5	15	IS	1	LED associação

Quadro 4.3 - Conexões XBee e componentes do Nó Sensor Atuador.

A IHM<sup>13</sup> mostrada na Figura 4.20 possibilita que o operador defina algumas características funcionais deste nó, descritas a seguir:

- o período de solicitação automática para aquisição de dados;
- o valor relativo de luminosidade (%) em que o relé selecionado será acionado;
- a temperatura (°C) que o relé selecionado será acionado;
- um botão para comutação de um relé selecionado;

---

<sup>13</sup> Uma Interface Homem Máquina é uma aplicação de software que apresenta informações para um operador ou usuário sobre o estado de um processo, e aceita instruções de um operador através de controles em sua interface, tipicamente gráficas.

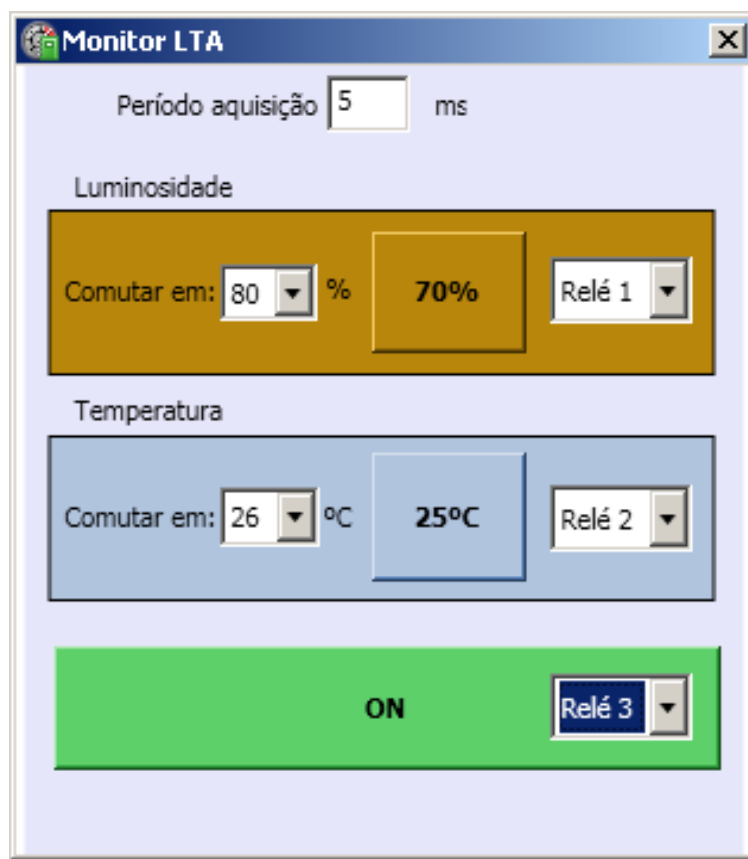


Figura 4.20 - IHM do Nó Sensor Atuador.

- a escolha do relé associado a cada parâmetro físico (temperatura ou luminosidade).

Com base nos dados recebidos pelo programa principal, referente à amostragem das portas do XBee instaladas neste nó, e nos valores definidos pelo operador nos *combobox* da IHM, a aplicação toma a decisão e define o novo estado dos relés e envia os comandos correspondentes para mudança de estado dos relés, caso necessário.

#### 4.3.2 A CLASSE PARA O NÓ SENSOR AMOSTRAS

Esta classe de programa representa as características funcionais do hardware do nó sensor de amostras da seção 4.2.1.1. Esta classe simula, em termos de funções lógicas, as características deste nó relacionando seus parâmetros e funções com as propriedades e métodos em um programa.

Este nó sensor de amostras utiliza duas portas analógicas e seis portas digitais disponíveis no módulo XBee, relacionadas aos componentes do circuito eletrônico da placa, conforme Quadro 4.4, indicado na coluna “Tipo” pelas letras A e D, respectivamente. Numa representação direta, os dados desse quadro são propriedades que compõem a classe. Dentre os métodos

funcionais desta classe, há um método para acender o LED de sinalização, um para conversão das informações de tensão referente à temperatura, outro método para a definição da cor do LED RGB, além de outros métodos para apresentação destas informações e controle da própria IHM.

Nome	Tipo	Pino	Comando	Parâmetro	Descrição função
AD1/DIO1	A	19	D1	2	Detector luz – OPA2381
AD2/DIO2	A	18	D2	2	Sensor temperatura LM35
AD3/DIO3	D	17	D3	5	4049 - LED Vermelho (R)
DIO4	D	11	D4	4	4049 - LED Verde (G)
DIO11	D	7	P1	5	4049 - LED Azul (B)
DIO9	D	13	ON/SLEEP		Operação relé alimentação
DIO12	D	4	P2	4	LED sinalização
DIO5	D	15	IS	1	LED associação

Quadro 4.4 - Conexões XBee e componentes do Nó Sensor Amostras.

Este nó sensor funciona no modo de economia de energia, utilizando o sinal ON/SLEEP do XBee, para alimentar os circuitos de detecção da qualidade da amostra por luz espalhada (fotodiodo instalado a 90° em relação ao LED) e do sensor de temperatura. O módulo XBee sai do modo *sleep* a cada 27,26s e permanece ativo por 2s, ativando assim, os circuitos da placa e transmitindo os dados adquiridos das portas digitais e analógicas. A transmissão é efetuada no formato de um *frame* 0x92h, com os valores de tensão da saída do amplificador operacional OPA2381 e do sensor de temperatura, já na forma numérica. O programa principal identifica e desmonta este *frame*. Um bloco de dados deste *frame* contém as informações das amostras das portas IO, que são tratadas por esta classe para serem apresentadas na IHM da Figura 4.21.

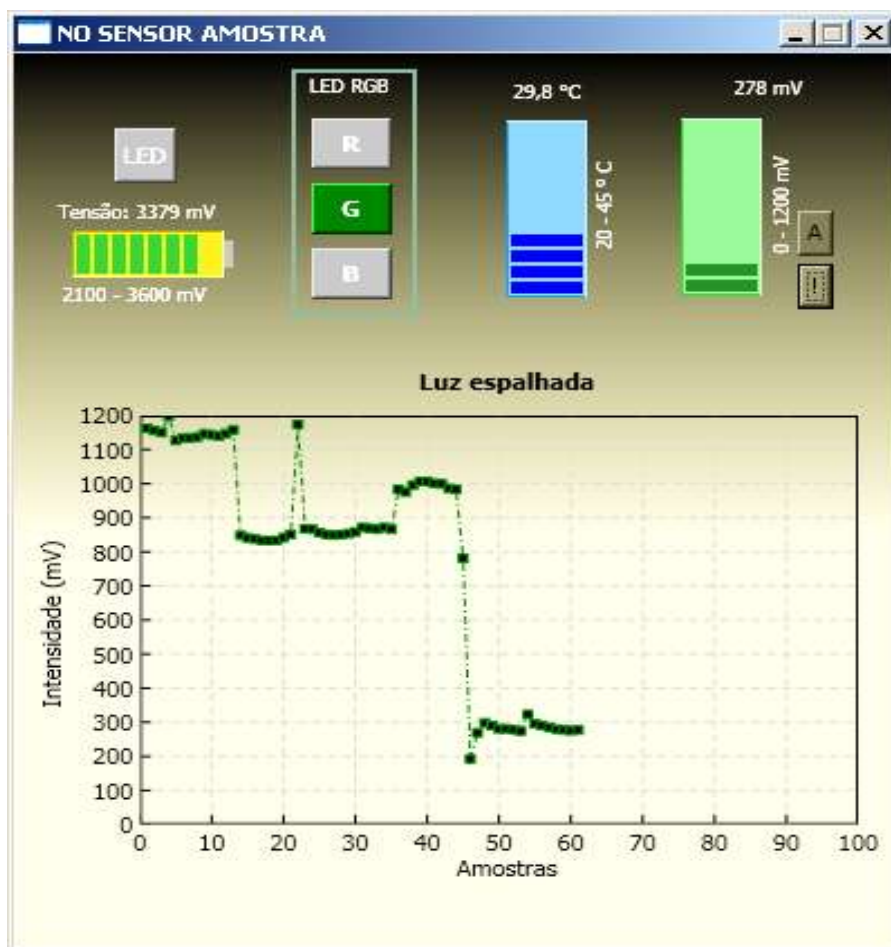


Figura 4.21 - IHM do Nó Sensor Amostras.

Nesta IHM, são apresentados os últimos valores recebidos da temperatura do nó sensor ( $^{\circ}\text{C}$ ) e da intensidade da luz espalhada na amostra de epóxi. Esta apresentação é feita na forma de um gráfico de barra vertical nas cores azul e verde, respectivamente.

O estado de carga da bateria pode ser avaliado pela tensão que ela fornece. Para monitorar o estado de carga do sistema de alimentação do nó, o XBee converte a tensão do conjunto de baterias em uma palavra digital. Assim a partir do momento que a tensão de alimentação do XBee cair de 3,0V, este valor é incluído automaticamente ao *frame* 0x92, junto com os dados das amostras analógicas. Esta informação é, então, representada em um gráfico de barra horizontal, nas cores amarela e verde. O acompanhamento das condições de carga da bateria é essencial para o funcionamento do nó sensor.

Ainda nesta interface são apresentados, de forma gráfica, os dados recebidos dos valores das medidas de intensidades da luz espalhada na amostra. O gráfico é montado com a cor correspondente do LED que estava aceso.

Quando o nó é iniciado, a cor padrão incidente na amostra é verde, conforme dados do Quadro 4.4. Porém, caso seja desejado pelo operador, outra cor ou cores podem ser acesas, em conjunto ou individualmente. Estas cores podem ser selecionadas acionando-se, com a ajuda do mouse, os botões correspondentes sob o texto LED RGB da IHM.

O botão LED é utilizado para acender ou apagar o LED vermelho de 3mm instalado na placa e pode ser utilizado para sinalização pelo operador para rotinas de manutenção do nó.

### 4.3.3 A CLASSE PARA O NÓ SENSOR AMOSTRAS MICROCONTROLADO

Como descrito na seção anterior, esta classe de programa representa as características funcionais do hardware do nó sensor de amostras da seção 4.2.1.2. Como a IHM para este nó, apresentada na Figura 4.22 tem similaridades funcionais com a IHM da seção anterior, somente as diferenças serão apresentadas nesta seção.

Este nó sensor de amostras utiliza três portas analógicas e sete portas digitais disponíveis no módulo XBee, conforme Quadro 4.5.

Nome	TIPO	Pino	Comando	Parâmetro	Conectado
AD0/DIO0	A	20	D0	2	Detector síncrono a 0°
AD1/DIO1	A	19	D1	2	Detector síncrono a 90°
AD2/DIO2	A	18	D2	2	Sensor temperatura LM35
AD3/DIO3	D	17	D3	5	Arduino D6 (R)
DIO4	D	11	D4	4	Arduino D7 (G)
DIO11	D	7	P1	5	Arduino D8 (B)
DIO9	D	13	ON/SLEEP		Arduino D3
DIO8/DTR	D	9	SLEEP_RQ		Arduino D2
DIO12	D	4	P2	4	LED sinalização
DIO5	D	15	IS	1	LED associação

Quadro 4.5 - Conexões XBee e Nó Sensor Amostras Microcontrolado.

Neste nó, o método que trata os dados do detector síncrono para o fotodiodo a 0° foi adicionada à lista de métodos discutidos anteriormente. Assim, na IHM aparece uma barra vertical em verde com a indicação da intensidade em mV do último valor recebido. Além do gráfico para acompanhamento das últimas 100 medidas.

Esta IHM não mostra a informação da tensão de alimentação no XBee, pois este nó será alimentado com adaptadores AC/DC.

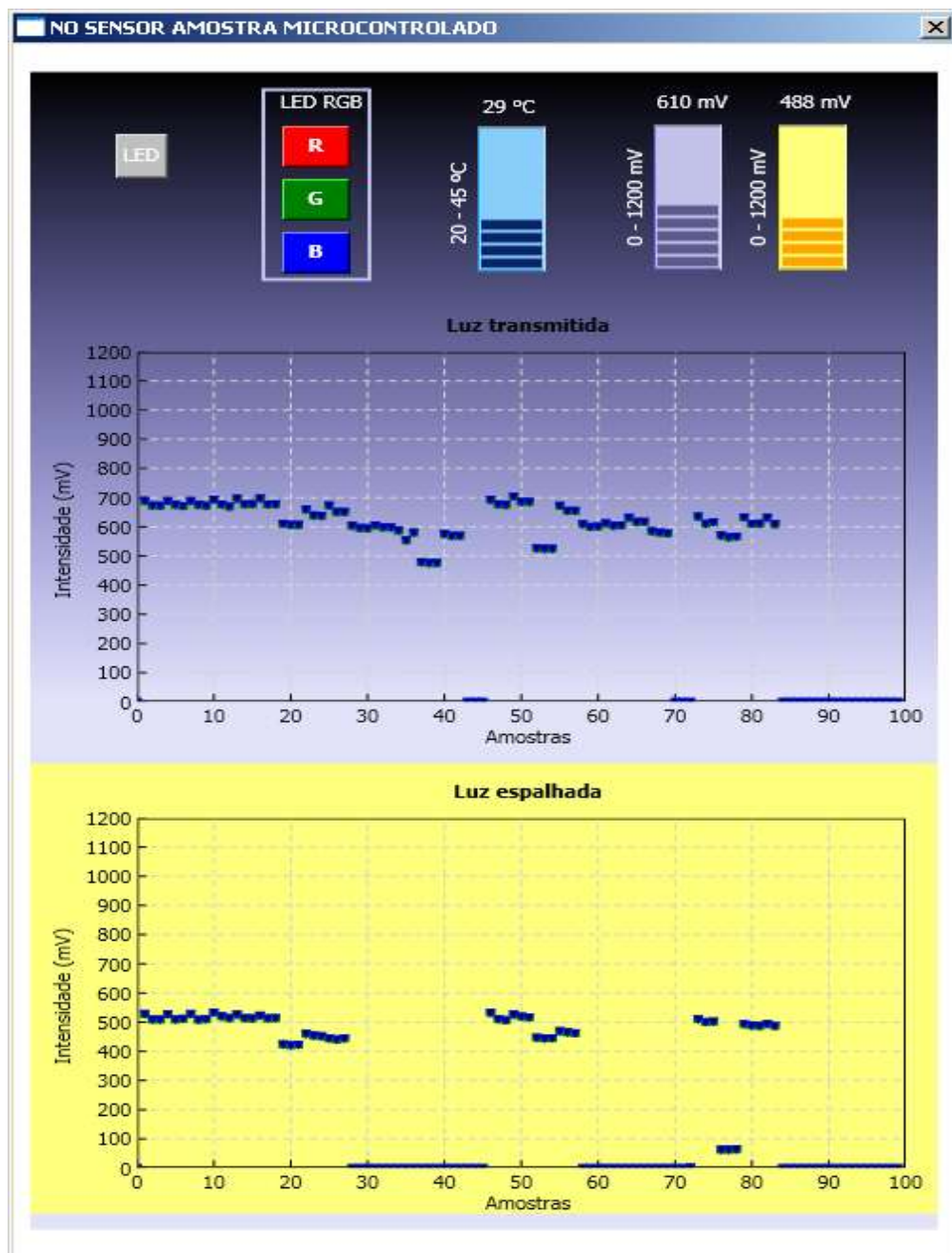


Figura 4.22- IHM do Nó Sensor Amostras Microcontrolado

## 5. CONCLUSÃO

Este trabalho propõe uma solução de instrumentação para detecção da qualidade de revestimento epóxi de dutos de produção e transporte de óleo ou água de produção baseada no monitoramento da propriedade ótica de transmissão.

Foram construídos dois tipos de nós sensores de detecção do estado de amostras, que podem fazer parte de uma rede de sensores sem fio baseada em XBee, gerenciada por um software aplicativo rodando em microcomputador PC. Os nós são munidos de fotodiodos para a detecção da intensidade da luz e LED's RGB, usados como fonte de luz de excitação. Além destes dispositivos, cada um dos nós é dotado de um módulo XBee, que realiza a aquisição de dados e transmissão para o nó de controle da rede.

O nó de controle, ligado a um microcomputador pela porta USB, recebe as transmissões dos nós remotos e as apresentam em suas respectivas IHM.

Ao longo do desenvolvimento deste trabalho, foram utilizadas amostras de epóxi, em escala de bancada, para simular o revestimento das paredes dos dutos nos testes de laboratório.

Na detecção do estado das amostras, observou-se uma relação exponencial entre a intensidade da luz espalhada no interior da amostra e a luz incidente, à medida que a profundidade de desgaste do sulco da amostra aumentava de forma linear. O comportamento observado foi do tipo postulado pela Lei de Beer-Lambert. Este resultado qualifica o método desenvolvido como viável e robusto para a detecção da qualidade das amostras de epóxi. Em particular, para a determinação da espessura do revestimento epóxi, sendo possível medi-la com resolução de aproximadamente 80  $\mu\text{m}$ . Desta forma, os resultados obtidos apontam para a possibilidade da aplicação deste tipo de detecção da qualidade dos revestimentos ativos em linhas de dutos reais.

A adoção do LED RGB como fonte de luz de excitação possibilitou a medição da luz espalhada em três diferentes comprimentos de onda – ou seja, luz vermelha, verde e azul. Foi possível constatar diferentes comportamentos dos resultados das medidas de espalhamento de luz em função da frequência da luz incidente, o que reforça e confere maior confiabilidade aos resultados obtidos, já que este comportamento é predito pela lei de Beer-Lambert.

Um terceiro nó sensor atuador, que detecta a intensidade da luz ambiente com um LDR e a temperatura com um LM 35, foi construído. Este nó recebe comandos remotos de um IHM para operação de relés que podem energizar cargas AC. A presença de relés neste nó permite, por exemplo, o acionamento remoto de válvulas de pressão e/ou registros eletromecânicos.

Uma rede ZigBee foi constituída utilizando-se os três nós projetados e mais um nó conectado a um multímetro digital, dotado de saída serial, por intermédio um módulo XBee e uma placa INT700. Assim, o multímetro pode ser comandado remotamente e transmitir os resultados de suas medidas. A rede mostrou-se robusta e eficiente para a aquisição e transmissão de dados.

O software principal, também referido no texto como “software aplicativo”, foi escrito em linguagem C#, utilizando a IDE do Visual Studio 2010, o .NET Framework 4.0 e o .NET Micro Framework. Foi utilizada a plataforma Windows no desenvolvimento e teste deste aplicativo. Para o Linux, o Solaris e o MacOS o MONO, que é um *cross-platform* para o .NET Framework, pode ser utilizado. Este software aplicativo recebe os distintos frames, trata-os e despacha-os para as correspondentes IHM dos nós sensores, apresentadas em diferentes janelas gráficas, em uma interface WIMP. Por estas IHM, são apresentados os dados adquiridos em cada um dos nós e também pode ser mudada a condição de funcionamento do mesmo, através do o envio de comandos pelo simples acionamento de um botão na IHM.

Deve ser considerado que, para a aplicação em campo, serão necessárias as devidas adequações do trabalho aqui desenvolvido para a detecção da qualidade dos revestimentos nos dutos de petróleo.

É importante considerar também que os circuitos e as placas impressas dos nós sensores deverão ser projetados para atender características técnicas de cada nó sensor de uma rede sem fio. Dimensões e consumo total de energia são essenciais, sendo que o hardware aqui desenvolvido utilizou componentes discretos que impactaram em tamanho e consumo total de energia dos protótipos. Para aplicação real, a integração dos circuitos em um único chip é uma solução possível para atender às limitações e aos requisitos de engenharia, atingindo assim, as dimensões e o consumo de energia requerida.

Para o Nó Sensor Amostra Microcontrolado, poderia ser utilizado um módulo transceptor ZigBee com um segundo processador. Além de maior integração funcional, possibilitaria a execução de um programa embarcado para administração dos frames transmitidos, e a tomada local de decisão. Além disso, o referido módulo seria muito útil na construção de nós baseados em detecção síncrona de pequenos sinais.

Ainda como sugestão para a topologia de rede para linha de dutos, nós da rede com funções de roteamento, que funcionam no modo *sleep*, já estão disponíveis para uso. Com estes dispositivos, é possível obter baixo consumo de energia em toda a rede, pois os nós roteadores também podem funcionar no modo de baixo consumo de energia, ao entrarem no modo *sleep*.



Finalmente, este trabalho apresenta uma proposta de solução de instrumentação que demonstra a possibilidade de monitoração de revestimento epóxi de dutos de transporte de petróleo e seus derivados, servindo, muito provavelmente, para a diminuição de prejuízos e danos ambientais em decorrência de vazamentos devido à sua ruptura. Foi demonstrado que, com uma rede ZigBee formada de Nós Sensores de Amostra, é possível efetuar o monitoramento remoto ou local, em tempo real, da qualidade de amostras de base epóxi. O uso desses sensores em uma rede de monitoramento sem fio cria a possibilidade de ampliação fácil da rede e maior facilidade de sua manutenção.



## REFERÊNCIAS

- 1 ANP AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis**. Rio de Janeiro. 2009.
- 2 CONSULTCHI, A.; ROSSBACH, P.; CALDERON, H. I. **Source and Interface Analysis**, Mexico, v. 35, n. 3, p. 293-245, Feb 2003.
- 3 ASEL-TECH. Asel-Tech Tecnologia e Automação Ltda. **Asel-Tech**. Disponível em: <<http://www.asel-tech.com.br/>>. Acesso em: 11 dez. 2010.
- 4 MORISON, D. **Remote monitoring of pipeline corrosion using fiber optic sensors**. NACE - International Corrosion Conference Series. Toronto: NACE International. 2008. p. 082901-082909.
- 5 COTEQ. **Emprego de Tevestimento para Proteção Interna em Dutos**. 6ª Conferência sobre Tecnologia de Equipamentos. Salvador: [s.n.]. 2002. p. 8.
- 6 ZOU, L.; SEZERMAN, O.; REVIE, W. **Pipeline corrosion monitoring by fiber optic distributed strain and temperature sensors**. NACE - International Corrosion Conference Series. Ottawa: NACE International. 2008. p. 081461-081468.
- 7 LIU, J. et al. **Study on buried pipeline security early-warning system in landslide area based on fiber bragg grating sensors**. Proceedings of the ASME International Pipeline Conference. Hebei: American Society of Mechanical Engineers. 2008. p. 587-590.
- 8 LINGYU, Y.; GIURGIUTTU, V.; POLLOCK, P. **A multi-mode sensing system for corrosion detection using piezoelectric wafer active sensors**. Proceeding of SPIE - Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical and Aerospace System 2008. Columbia: SPIE. 2008. p. 9.
- 9 ESPEN HAUGE, O. M. A. J. M. **Model-Based Monitoring and Leak Detection in Oil and Gas Pipeline**. **SPE Project, Facilities & Construction**, New York, set. 2009. 53-60.
- 10 UMEADI, B. B. N.; JONES, K. G. **The Development of an Intelligent Sensor for the Monitoring of Pipeline System Integrity**. SPE Russian Oil and Gas Technical Conference and Exhibition. Moscow: SPE. 2008. p. 11.
- 11 JIN, W.-L.; SHAO, J.-W.; ZHANG, E.-Y. **Basic strategy of health monitoring on submarine pipeline by distributed optical fiber sensor**. Proceeding of the International

Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering - OMAE. New York: American Society of Mechanical Engineers. 2003. p. 531-536.

12 SINHA, M. K. **Pipeline Corrosion: Its Remote Detection and Corrosion Management.** SPE Indian School of Mines. Canton: Society of Petroleum Engineers. 2006. p. 4.

13 PEPE, I. M.; MACEDO, M. A.; QUINTELLA, C. M. **Relatório Técnico - Desenvolvimento do Revestimento Inteligente com Traçabilidade Óptica, Baixa Fricção e Baixa Molhabilidade para uso com Óleos Parafínicos e Asfálticos e com CO<sub>2</sub>.** UFBA, UFS. Salvador, p. 45. 2010. (1).

14 CEPA - CENTRO DE ENSINO E PESQUISA APLICADA. e-física Ensino de Física on-line, 2011. Disponível em: <<http://efisica.if.usp.br/>>. Acesso em: 1 nov. 2011.

15 BOYLESTAD, R. L. **Dispositivos Eletrônicos e Teoria de Circuitos.** 8ª Edição. ed. São Paulo: Printice Hall, 2006.

16 ALBERT MALVINO, D. J. B. **Eletrônica.** 7ª Edição. ed. São Paulo: McGraw Hill, v. II, 2008.

17 SUNROM TECHNOLOGIES. SUNROM. **Sunrom Technologies**, 2011. Disponível em: <<http://www.sunrom.com>>. Acesso em: 21 dez. 2011.

18 SIEMENS SEMICONDUCTOR GROUP. Silicon PIN Photodiode. **Siemens Semiconductor**, p. 6, 1998. Disponível em: <[www.siemenssemiconductor.com](http://www.siemenssemiconductor.com)>. Acesso em: 10 out. 2010.

19 WILSON, J. **Sensor Technology Handbook.** 1ª Edição. ed. Oxford: Elsevier, 2005.

20 CRC PRESS LLC. **Handbook of sensor networks.** New York: CRC Press, 2005.

21 KAZEN SOHRABY, D. M. T. Z. **Wireless Sensor Networks Technology, Protocols and Applications.** 1ª Edição. ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2007.

22 ZIGBEE ALLIANCE, fev. 2011. Disponível em: <<http://www.zigbee.org/>>.

23 DIGI INTERNATIONAL INC. **XBee®/XBee-PRO® ZB RF Modules Manual.** Minnetonka: Digi International, 2010.

24 BRASCOLA. **Araldite Hobby Resina.** São Paulo, p. 8. 2005. (FISPQN° 016/2001).

25 HOLGER KARL, A. W. **Protocols and Architectures for Wireless Sensor Network.** 1ª Edição. ed. West Sussex: John Wiley & Sons, 2005.

- 26 JOHNSON, M. **Photodetection and Measurement**. 1º Edição. ed. New York: McGraw Hill, 2003.
- 27 UNIVERSITY OF GUELPH. Department of Physics, 2011. Disponível em: <<http://www.physics.uoguelph.ca/~pgarrett/teaching/PHY-1070/lecture-21.pdf>>. Acesso em: 29 dez. 2011.
- 28 SALVADOR, S. F.; LUIZ ANTONIO, L. E. S.; IVAN, D. A. M. F. **MANUAL PARA MONITORAMENTO - INSPEÇÃO BASEADA EM RISCO - IBR**. Rio de Janeiro. 2003.
- 29 NOGUEIRA, E. A. **Estudo de desempenho de Base Torpedo – um novo método para instalação do revestimento condutor índice de desempenho**. Rio de Janeiro, p. 327-350. 2009.
- 30 MOSZKOWICZ, V. N. **Monitoração de Deformações em Dutos Utilizando Sensores a Fibra Óptica com base em Rede de Bragg**. Rio de Janeiro. 2002.
- 31 TAYLOR, F. W. **Princípios de Administração Científica**. São Paulo: Atlas, 1990.
- 32 SANT'ANNA, S. E. A. **Conversão de peças de metal para plástico: o desafio da seleção de polímeros, tendências e exemplos**. PLASTSHOW 2006. São Paulo: ARANDA. 2006. p. 1-13.
- 33 STOIANOV, I.; NACHMAN, L.; MADDEN, S. PIPENET: A Wireless Sensor Network for Pipeline Monitoring. **COMPENDEX**, Massachusetts, U.S.A., 25 April 2007. 264-273.
- 34 TANENBAUM, A. S. **Computer Networks**. 4ª Edição. ed. [S.l.]: Prentice-Hall , v. 1, 2003.
- 35 BANNASCH, R. **PhillyIMC**, abr. 2010. Disponível em: <<http://www.phillyimc.org/en/improving-reliability-underwater-communication-0>>.
- 36 JASCO APPLIED SCIENCES. **Underwater Acoustics: Noise and the Effects on Marine Mammals**. 3ª Edição. ed. [S.l.]: Jasco Applied Sciences, 2010.
- 37 BROWN, N. K.; DANTE, J. F.; FRIEDERSDORF, F. J. **Diaphragm-based pipeline corrosivity monitoring system**. Internatinal Corrosion Conference Series. Charlottesville: NACE International. 2009. p. 9.
- 38 FOROUZAN, B. A. **Comunicação de Dados e Rede de Computadores**. 3ª Edição. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.

- 39 TROELSEN, A. **Pro C# 2010 and the .NET 4 Platform**. 5ª Edição. ed. New York: Apress, 2010.
- 40 SHARP, J. **Microsoft Visual C# 2010**. 1ª Edição. ed. Redmond: Microsoft Press , 2010.
- 41 XU, J. **Practical C# Charts and Graphics**. 2007. ed. Phoenix: UniCAD Publishing, 2007.
- 42 MCCONNEL, S. **Code Complete**. 2ª Edição. ed. Porto Alegre: Bookman, 2005.
- 43 RONALD J. TOCCI, N. S. W. G. L. M. **Sistemas Digitais**. 10ª Edição. ed. São Paulo: Pearson Printice Hall, 2007.
- 44 NÍDIA M. L. LUBISCO, S. C. V. I. V. S. **MANUAL DE ESTILO ACADÊMICO**. 4ª Edição. ed. Salvador: EDUFBA, 2008.
- 45 FRADEN, J. **Handbook of Modern Sensor**. 3ª Edição. ed. San Diego: Springer, 2004.
- 46 KANG LEE, E. S. Wireless Sensor Network Based on IEEE 1451.0 and IEEE 1451.5-802.11. **The Eighth International Conference on Electronic Measurement and Instruments**, Maryland, 2007. 5.
- 47 ALBERT Y. ZOMAYA. **Handbook of Sensor Networks**. Ottawa: Wiley Interscience, 2005.

## ÍNDICE

- 7805, 79
- 7905, 79
- AC, 43, 79
- acidentes, 18, 19, 21
- ADC, 13, 56, 57, 60, 61, 70, 76, 84, 90, 121
- amplificador, 55, 56, 59, 61, 62, 81, 84, 88, 107
- Arduino, 55, 56, 57, 60, 80, 86, 88, 90, 109, 121
- Arduino Mega, 57
- Arduino-mini, 60
- ATmega168, 55, 80, 86, 128
- bits*, 37, 38, 55, 56, 66, 72, 76
- BPW34, 33
- broadcast*, 39, 102
- buffer, 38, 55, 84
- comandos, 38, 64, 66, 68, 71, 72, 73
- coordenador, 23, 37, 38, 39, 63, 65, 66, 67, 68, 75, 84, 101, 102
- cristal, 58
- DC, 43, 49, 78, 79, 89
- diagnósticos, 38, 75
- dispositivo, 28, 29, 30, 31, 32, 34, 37, 38, 39, 40, 41, 64, 66, 67, 71, 73, 74, 75, 82, 84, 102, 103
- dispositivos finais, 38, 39, 40, 63, 65, 66, 67, 101
- FM ASK, 57
- frames*, 37, 66, 68, 76, 101, 104
- hardware, 36, 59, 64, 75, 77, 79, 106, 109
- ICVS, 56, 59
- IHM, 13, 38, 71, 78, 105, 106, 107, 108, 109, 110
- INT700, 64, 66, 77
- intensidade da luz, 23, 30, 48, 53, 58, 81, 84, 85, 87, 88, 93, 98, 108
- LM317, 79
- microcontrolador, 40, 53, 55, 56, 60, 80, 86, 87, 88, 90, 101
- mini transmissor, 121
- modo API, 37, 66, 67, 76, 82, 101
- modulação, 57, 59, 88, 89
- monitoramento, 4-7, 17, 20, 21, 36, 43, 49, 76, 82, 101
- ON/SLEEP, 80, 86, 107, 109
- OPA2381, 81, 89, 107
- pacotes de mensagens, 37, 39, 76
- parâmetros, 37, 38, 52, 65, 71, 73, 75, 84, 101, 105, 106
- protoboard*, 55
- pull-down*, 78
- pull-up*, 78
- rede, 4-7, 18, 23, 33, 34, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 43, 44, 61, 62, 63, 65, 66, 67, 68, 73, 74, 75, 76, 78, 79, 80, 84, 101, 102, 103
- remotos, 35, 38, 41
- RF, 36, 37, 38, 39, 40, 57, 60, 62, 63, 64, 67, 68, 76, 78, 79, 127
- ripple*, 78
- roteador, 37, 38, 39, 66, 67, 76, 102, 103
- sensores, 4-7, 28, 33, 34, 35, 36, 37, 43, 44, 52, 55, 58, 62, 68, 75, 76, 79, 82, 100, 101
- serias, 57
- SLEEP\_RQ, 80, 86, 109
- software, 37, 60, 75, 101
- temperatura, 23, 33, 52, 70, 84, 105, 107, 108, 109, 128
- TL082, 55, 61, 88
- transmissão, 32, 37, 38, 40, 41, 43, 47, 55, 56, 57, 59, 63, 66, 67, 68, 76, 79, 84, 89, 107, 127, 128
- UART, 14, 37, 38, 62, 63, 64, 75, 101, 102
- unicast*, 39

ZigBee, 18, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 43, 62, 63,

64, 65, 66, 68, 75, 77, 80, 103, 104



## APÊNDICES

### A - Código Arduino-mini transmissor

```

/* Inicio da parte TX */
#include <avr/io.h>
#include <util/delay.h>
#ifndef F_CPU
//define cpu clock speed if not defined
#define F_CPU 8000000
#endif
//set desired baud rate
#define BAUDRATE 1200
//calculate UBRR value
#define UBRRVAL ((F_CPU/(BAUDRATE*16UL))-1)
//define receive parameters
#define SYNC 0XAA// synchro signal
#define RADDR 0x44
#define LEDON 0x11//switch led on command
#define LEDOFF 0x22//switch led off command
/* Fim dos includes do código TX */
int sensorPhD = 2
int sensorLED = 13;
int LED_OK = 11;
int LED_BAD = 10;
//int TXPin =
int txok = 3;
int txbad = 5;
float TensaoOKLida = 1.15;
float TensaoBADLida = 3.57;
int PdrDelay = 1000;
int SumSRead =0;
int AvrRead =0;
int resolucaoAD = 1024;
int valuetocompare = 0;
int tmaxAD = 5;
int tminAD = 0;

void setup() {
  USART_Init();
  Serial.begin(9600);
  // declara o SensoLED como saida => OUTPUT:
  pinMode(sensorLED, OUTPUT);
  pinMode(LED_OK, OUTPUT);
  pinMode(LED_BAD, OUTPUT);
  pinMode(sensorPhD, INPUT);
  analogReference(DEFAULT);
  valuetocompare = (((TensaoBADLida-TensaoOKLida)/2)+TensaoOKLida)/(tmaxAD-
tminAD)*resolucaoAD;

```

```

}

void loop() {
  digitalWrite(sensorLED,HIGH);
  delay(PdrDelay*5);

  SumSRead = 0;
  for (int i=1; i<5; i++) {
    SumSRead = SumSRead + analogRead(sensorPhD);
    delay(PdrDelay);
  }

  AvrRead = SumSRead/5;
  Serial.println(AvrRead);
  Serial.println(valuetocompare);
  digitalWrite(sensorLED,LOW);

  if (AvrRead <= valuetocompare)
  {
    // Resultado bom
    for (int i=1; i<= txok; i++) {
      SendMsg(LED_OK);
    }
    delay(PdrDelay*30);
  }
  if (AvrRead > valuetocompare)
  {
    // Resultado ruim
    for (int i=1; i<= txbad; i++) {
      SendMsg(LED_BAD);
    }
    delay(PdrDelay*15);
  }
}

void SendMsg(int PinLED) {
  digitalWrite(PinLED, HIGH);
  Send_Packet(RADDR, LEDON);
  delayms(100);
  digitalWrite(PinLED, LOW);
  Send_Packet(RADDR, LEDOFF);
  delayms(100);
}

void USART_Init(void)
{
  //Set baud rate
  UBRRL=(uint8_t)UBRRVAL;
  UBRRH=(UBRRVAL>>8); //high byte
  UCSRC=(1<<URSEL)|(0<<UMSEL)|(0<<UPM1)|(0<<UPM0)|
        (0<<USBS)|(0<<UCSZ2)|(1<<UCSZ1)|(1<<UCSZ0);
}

```

```
//Enable Transmitter and Receiver and Interrupt on receive complete
UCSRB=(1<<TXEN);
}
void USART_vSendByte(uint8_t u8Data)
{
    // Wait if a byte is being transmitted
    while((UCSRA&(1<<UDRE)) == 0);
    // Transmit data
    UDR = u8Data;
}
void Send_Packet(uint8_t addr, uint8_t cmd)
{
    USART_vSendByte(SYNC);//send synchro byte
    USART_vSendByte(addr);//send receiver address
    USART_vSendByte(cmd);//send increment command
    USART_vSendByte((addr+cmd));//send checksum
}
void delayms(uint8_t t)//delay in ms
{
    uint8_t i;
    for(i=0;i<t;i++)
        _delay_ms(1);
}
```

## B - CÓDIGO ARDUINO-MINI TRANSMISSOR 2 PONTOS

```

*/
#include <VirtualWire.h>
int sensorPhD1 = 2; // sensor 1 – entrada analógica
int sensorLED1 = 4; // saída digital LED azul
int sensorPhD2 = 3; // sensor 2- entrada analógica
int sensorLED2 = 12; // saída digital LED vermelho
int LED_OK = 11; // - pino para o LED Verde estado OK do revestimento
int LED_BAD = 10; // - pino para o LED Vermelho estado BAD do revestimento
int txok = 3; // - quantas vezes será transmitida a mensagem OK e piscado o LED
Verde
int txbad = 5; // - quantas vezes será transmitido o sinal BAD e piscadas do LED
vermelho float TensaoMINLida = 1.123; // - valor esperado para revestimento RUIM, o
máximo de luz ABSORVIDA
float TensaoMAXLida = 1.489; // - valor esperado para revestimento BOM, o máximo de
luz transmitida
int PdrDelay = 1000; // - valor de espera 1s
int resolucaoAD = 1024; // - resolução do conversor AD
int valuetocompare = 0;
int tmaxAD = 5; // - tensão máxima referência AD
int tminAD = 0; // - tensão mínima referência AD
int msgnumber=0;

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  Serial.println("Running setup");
  // declara o SensoLED como saída => OUTPUT:
  pinMode(sensorLED1, OUTPUT);
  pinMode(sensorLED2, OUTPUT);
  pinMode(LED_OK, OUTPUT);
  pinMode(LED_BAD, OUTPUT);
  pinMode(sensorPhD1, INPUT);
  pinMode(sensorPhD2, INPUT);
  analogReference(DEFAULT); // - define o valor de referência DAC para 5 volts
  // - calcula o valor médio de tensão OK e BAD e converte num número entre 0 e 1023
para comparação
  valuetocompare = (((TensaoMAXLida-
TensaoMINLida)/2)+TensaoMAXLida)/(tmaxAD-tminAD)*resolucaoAD;

  Serial.println("Iniciando TX");
  // Initialise the IO and ISR
  // vw_set_ptt_inverted(true); // Required for DR3100
  vw_setup(1200); // Bits per sec
}

void loop() {

  LeiaSensor(sensorLED1,sensorPhD1);

```

```

    LeiaSensor(sensorLED2,sensorPhD2);
}
void LeiaSensor(int led, int phtd)
{
    int SumSRead =0; // - acumulador das leitura para cálculo da média.
    int AvrRead =0; // - valor médio da SOMA
    char cphtd[2];
    char cmsg[40];
    char cnumbermsg[10];
    cmsg[0]=0;
    itoa(phtd,cphtd,2); // - cria a string do sensor phtd
    // - liga o LED do sensor
    digitalWrite(led,HIGH);
    // - espera 2 segundos, diminui o tempo por causa do aumento da corrente
    delay(PdrDelay*2);
    // - inicia procedimento de leitura do sensor
    // - efetua 5 leitura com um intervalo de um segundo
    for (int i=1; i<5; i++) {
        SumSRead = SumSRead + analogRead(phtd);
        delay(PdrDelay);
    }
    // - calcula a média
    AvrRead = SumSRead/5;
    Serial.print("Sensor =>");
    Serial.print(phtd);
    Serial.print(" Leitura = ");
    Serial.println(AvrRead);
    // Serial.println(valuetocompare);
    digitalWrite(led,LOW);
    // - monta a mensagem a ser enviada composta do M+(número da
mensagem)+S(número do sensor)+Status
    strcat(cmsg,"M");
    msgnumber++; // - incrementa o número da mensagem
    itoa(msgnumber,cnumbermsg,10);
    strcat(cmsg,cnumbermsg);
    strcat(cmsg,"S");
    itoa(phtd,cphtd,2);
    strcat(cmsg,cphtd);
    if (AvrRead >= valuetocompare)
    {
        // - resultado ok
        strcat(cmsg," = OK");
        for (int i=1; i<= txok; i++) {
            SendMSG(LED_OK,cmsg);
        }
        delay(PdrDelay*30);
    }
    if (AvrRead < valuetocompare)
    {
        // - resultado bad
        strcat(cmsg," = BAD");
    }
}

```

```
    for (int i=1; i<= txbad; i++) {
        SendMSG(LED_BAD,cmsg);
    }
    delay(PdrDelay*15);
}
}
// - acende o LED, transmite mensagem e apaga o LED
void SendMSG(int PinLED, char* fullmsg) {
    digitalWrite(PinLED, HIGH);
    delay(200);
    const char *msg = "";
    msg=fullmsg;

    vw_send((uint8_t *)msg, strlen(msg));
    vw_wait_tx(); // Wait until the whole message is gone

    digitalWrite(PinLED, LOW);
    delay(100);
}
```

## C - CÓDIGO ARDUINO-MEGA RECEPTOR RF

```

// receiver.pde
//
// Simple example of how to use VirtualWire to receive messages
// Implements a simplex (one-way) receiver with an Rx-B1 module
//
// See VirtualWire.h for detailed API docs
// Author: Mike McCauley (mikem@open.com.au)
// Copyright (C) 2008 Mike McCauley
// $Id: receiver.pde,v 1.3 2009/03/30 00:07:24 mikem Exp $

#include <VirtualWire.h>

void setup()
{
  Serial.begin(9600); // Debugging only
  Serial.println("Iniciado");

  // Initialise the IO and ISR
  vw_set_ptt_inverted(true); // Required for DR3100
  vw_setup(1200); // Bits per sec

  vw_rx_start(); // Start the receiver PLL running
}

void loop()
{
  uint8_t buf[VW_MAX_MESSAGE_LEN];
  uint8_t buflen = VW_MAX_MESSAGE_LEN;

  if (vw_get_message(buf, &buflen)) // Non-blocking
  {
    int i;

    digitalWrite(13, true); // Flash a light to show received good message
    // Message with a good checksum received, dump it.
    // Serial.print("Inicio transmissão: ");

    for (i = 0; i < buflen; i++)
    {
      // Serial.print(buf[i], HEX);
      Serial.print(buf[i]);
      // Serial.print(" ");
    }
    Serial.println("");
    digitalWrite(13, false);
  }
}

```

## D - CÓDIGO NÓ SENSOR AMOSTRAS MICROCONTROLADO

```

// Definição de valores constantes. Atribuição dos pinos Digitais e Analógicos
const int ledRPin = 10; // conectado ao pino Vermelho(Red) do LED RGB
const int ledGPin = 11; // conectado ao pino Verde (Green) do LED RGB
const int ledBPin = 12; // conectado ao pino Azul (Blue) do LED RGB
const int multiPin = 13; // ao circuito multiplicador de sinal
const int wakePin = 2; // para acordar o XBee - wakeup
const int awakedPin = 3; // para saber se o XBee esta ativo - awake
const int temperaturePin = A0; // Ligado LM35 => 10 mV por grau centigrado
const int awakedLEDPin = 9; // conectado ao LED que indica que o arduino acordou
o XBee.

// Variables will change:
int ledRState = LOW; // (R) estado inicial do LED Vermelho
int ledGState = LOW; // (G) estado inicial do LED Verde
int ledBState = LOW; // (B) estado inicial do LED Azul
int ledAwakeR = LOW; // LED que sinaliza que ocorreu um desperta randômico.
int multiState = LOW; // estado inicial do sinal Multiplier
int minTemp = 140; // Temp mínima aproximada 15°C <=> 150mV -
1100/1024
int maxTemp = 326; // Acima Temperatura máxima força leitura ~ 35°C => 350mV
int temperatureC = 0; // Temperatura lida
int conta = 0; // Incrementa até 7 então reinicia como 0
int result = 0;
long previousMillis = 0;
int xBeeSleep = LOW; // Estado do XBee - sleep ou awake
int wakeTemp = 0; // Variável se a temperatura passar de
long interval = 1000; // intervalo para alternar cada LED entre ligado e desligado
(milissegundos)

void setup() {
  // define como serão utilizados os pinos digitais, como saída (OUTPUT) ou
  entrada(INPUT)
  Serial.begin(9600); // inicia a comunicação serial , utilizado para depuração.
  pinMode(ledRPin, OUTPUT);
  pinMode(ledGPin, OUTPUT);
  pinMode(ledBPin, OUTPUT);
  pinMode(multiPin, OUTPUT);
  pinMode(wakePin, OUTPUT);
  pinMode(awakedPin, INPUT);
  analogReference(INTERNAL); // utiliza referência interna de 1.1 volts no ATmega168
}

void loop()
{
  // Ler a temperatura do LM35 e compara com os valores estabelecidos
  // Se a temperatura estiver menor ou maior do que os limites
  // força o XBee a acordar e iniciar aquisição e transmissão dos dados
  temperatureC = analogRead(temperaturePin);

```



```

if ((temperatureC <= minTemp) || (temperatureC >= maxTemp))
{
  digitalWrite(wakePin,HIGH);
  digitalWrite(awakedLEDPin,HIGH);
  delay(10);
  digitalWrite(wakePin,LOW);
}
// Verifica se o XBee esta acordado
xBeeSleep = digitalRead(awakedPin);
if (xBeeSleep = HIGH)
{

  if (millis() - previousMillis > interval)
  {
    // salva o contador de tempo
    previousMillis = millis();

    // if R is to be ON or OFF
    result = conta & 1;
    // Serial.println("Conta: ");
    // Serial.println(conta, DEC);
    // Serial.println(result, DEC);
    if (result > 0)
      ledRState = LOW;
    else
      ledRState = HIGH;

    // if G is to be ON or OFF
    result = conta & 2;
    if (result > 0)
      ledGState = LOW;
    else
      ledGState = HIGH;

    // if B is to be ON or OFF
    result = conta & 4;
    if (result > 0)
      ledBState = LOW;
    else
      ledBState = HIGH;

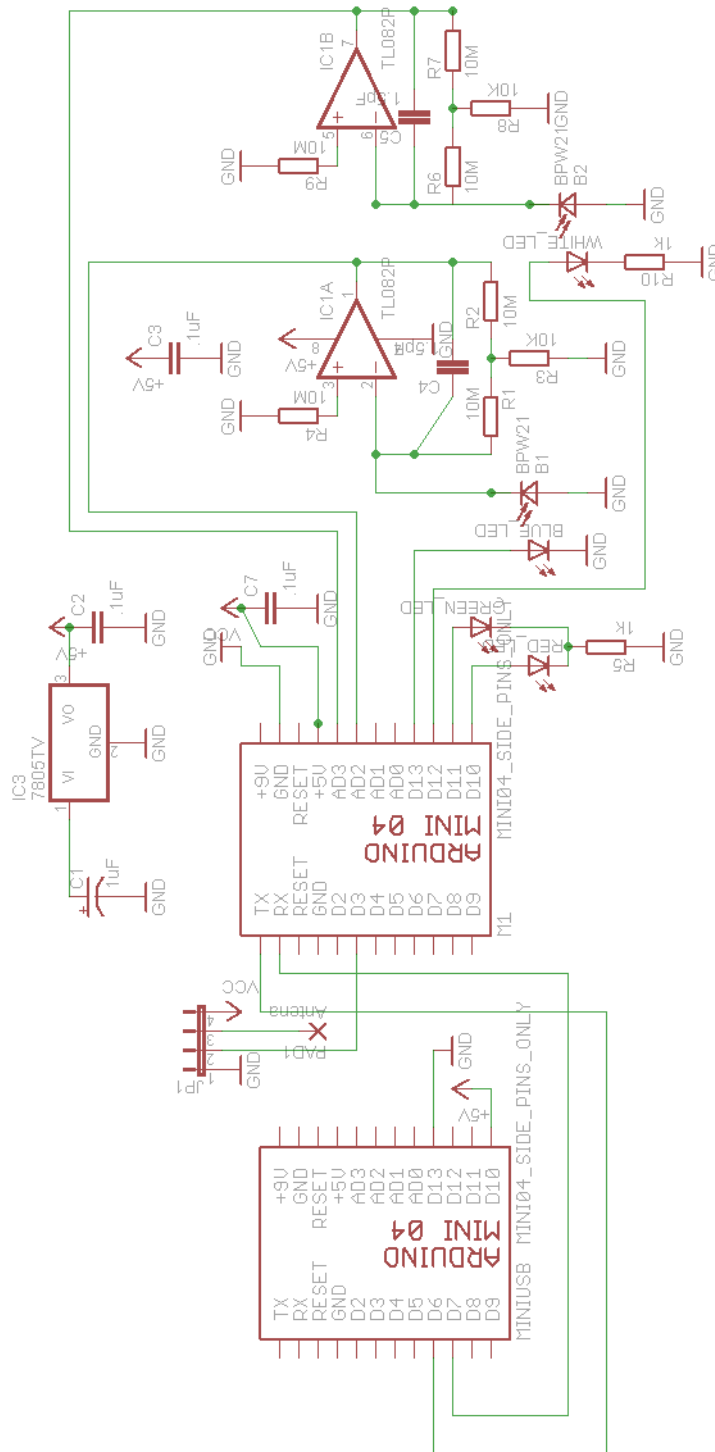
    // set the LED with the ledState of the variable:
    digitalWrite(ledRPin, ledRState);
    // Serial.print(ledRPin, DEC);
    // Serial.println(ledRState,DEC);
    digitalWrite(ledGPin, ledGState);
    // Serial.println(ledGPin,DEC);
    // Serial.print(ledGState,DEC);
    digitalWrite(ledBPin, ledBState);
    // Serial.println(ledBPin, DEC);
    // Serial.print(ledBState, DEC);
  }
}

```

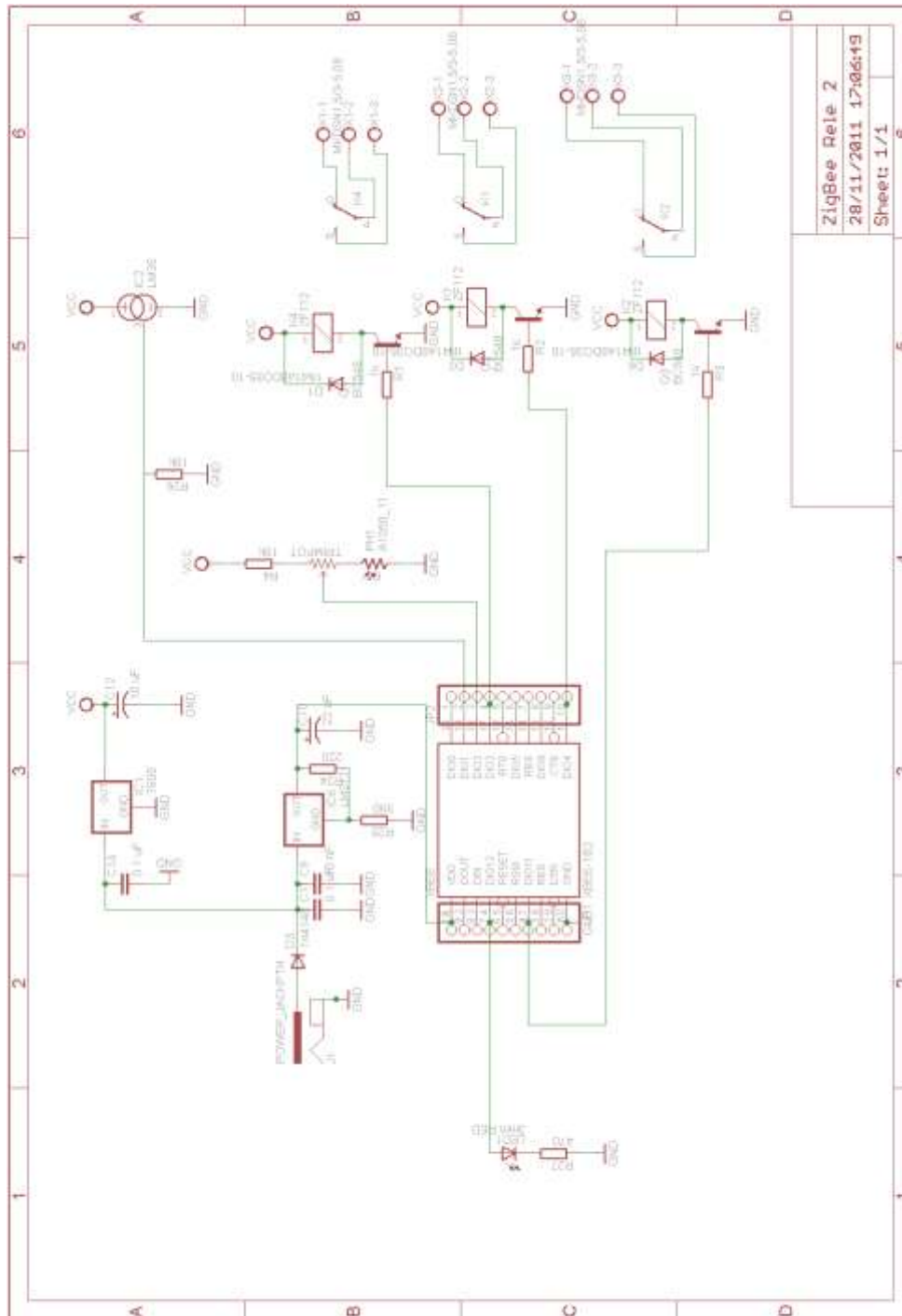
```
digitalWrite(multiPin, HIGH);

conta++;
if (conta == 8)
{
    // reinicia sequência
    conta = 0;
}
// Espera a metade do contador interval e reseta multiPin
while (millis() - previousMillis > interval/2)
{
    // mantém o multiplicador em sinal alto pela metade do tempo
}
digitalWrite(multiPin, LOW); // leva o multiplicador para sinal baixo
}
// Desativa o LED sinalizador do modo forçado
digitalWrite(awakedLEDPin,LOW);
}
}
```

E - DIAGRAMA DO CIRCUITO DO FOTO SENSOR MICROCONTROLADO

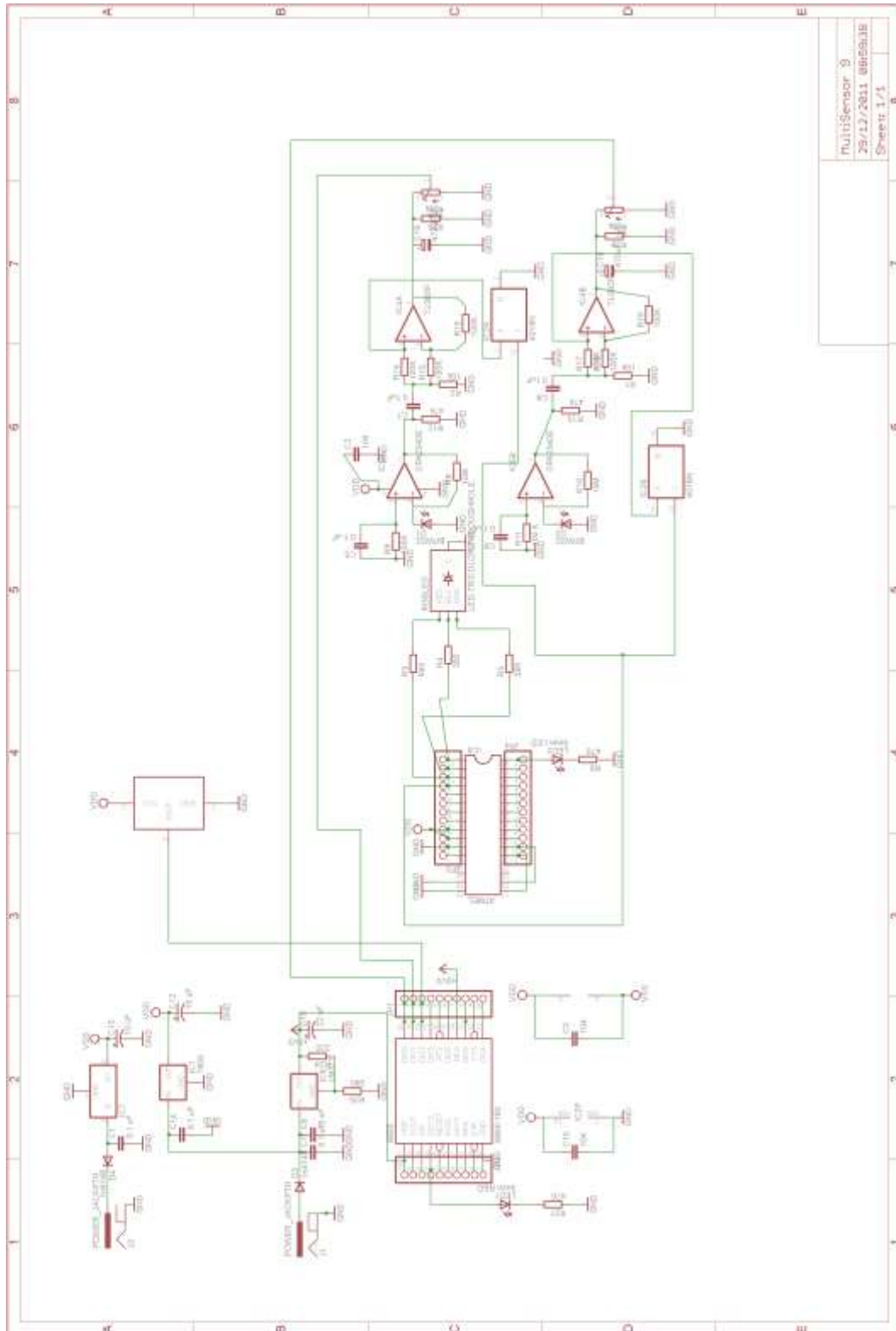


F - DIAGRAMA DE CIRCUITO NÓ SENSOR ATUADOR





H - DIAGRAMA CIRCUITO NÓ SENSOR AMOSTRA MICROCONTROLADO



MultiSensor 3  
29/11/2011 08:59:18  
Sheet 1/1