

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO RIO GRANDE  
DO NORTE – IFRN  
DIRETORIA ACADÊMICA DE GESTÃO E INFORMÁTICA – DIATINF  
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM REDES DE COMPUTADORES

THIAGO DANTAS DA SILVA

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA EMBARCADO PARA MEDIÇÃO  
REMOTA DE CAMPOS MAGNÉTICOS DINÂMICOS USANDO ZIGBEE**

NATAL – RN  
2015

THIAGO DANTAS DA SILVA

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA EMBARCADO PARA MEDIÇÃO  
REMOTA DE CAMPOS MAGNÉTICOS DINÂMICOS USANDO ZIGBEE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso Superior de Tecnologia em Redes de Computadores do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, em cumprimento às exigências legais como requisito parcial à obtenção do título de Tecnólogo em Redes de Computadores.

Orientador: M. Sc. Jacques Cousteau da Silva Borges  
Coorientador: M.Sc. Allan Aminadab A. Freire Soares

NATAL – RN  
2015

THIAGO DANTAS DA SILVA

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA EMBARCADO PARA MEDIÇÃO  
REMOTA DE CAMPOS MAGNÉTICOS DINÂMICOS USANDO ZIGBEE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso Superior de Tecnologia em Redes de Computadores do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, em cumprimento às exigências legais como requisito parcial à obtenção do título de Tecnólogo em Redes de Computadores.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado e aprovado em 09/03/2015, pela seguinte Banca Examinadora:

**BANCA EXAMINADORA**

Jacques Cousteau da Silva Borges, M. Sc. - Orientador  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte

Allan Aminadab André Freire Soares, M. Sc. - Coorientador  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte

João Moreno Vilas Boas de Souza Silva, Dr. - Convidado  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte

Dedico esse trabalho primeiramente a Deus, pelo seu infinito amor e compaixão, que me capacitou e ajudou em meio às dificuldades. Até aqui a Tua mão me sustentou. A minha mãe querida, sempre presente em todos os momentos da minha vida. Seu carinho e sua ajuda me deram forças para seguir adiante. A minha amada namorada, que sempre me apoiou e auxiliou com seu jeito doce de ser. Mais um passo foi dado, mais um objetivo foi alcançado de muitos que ainda hei de conquistar.

## **AGRADECIMENTOS**

A todos os professores do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte (IFRN) que contribuíram com dedicação e empenho para o meu desenvolvimento e crescimento acadêmico, profissional e pessoal. Seus nomes são inesquecíveis e, por isso, dedico-lhes minha profunda admiração e respeito.

A todos aqueles que acreditaram na realização deste trabalho e deram-me forças e estímulo para dar prosseguimento a esta pesquisa e obter sucesso. Em especial, ao meu orientador, Professor Jacques Cousteau, ao meu coorientador, Professor Allan Aminadab, aos professores Ivanilson Júnior e João Moreno, que me deram total apoio e auxílio durante a pesquisa, e aos professores Ronaldo Maia, Leonardo Minora, Sales Filho, Rodrigo Siqueira, Carlos Rocha, Teobaldo Adelino, Felipe Costa, Fernando Paiva, Leilane Gomes, Alexandre Gomes, Ricardo Kleber, Eduardo Bráulio, Rafael Laffitte, Sandro Luis, João Maria, Jorgiano Márcio e José Alvaro. Aos servidores do DIATINF Maria de Salete, Marcelo Odir, Maria de Fátima e Glauco Teixeira.

A todos os meus colegas de turma e de curso. Em especial, Wallyson Romeiro, Maria Vanessa, Matheus Luiz, Isadora Figueiredo, Gustavo Menezes, Carlos Enrique, Victor Muhat, Michel Madson, Gladerson Pereira, Cledson Luiz, William Furtado, Jonas Paiva, Lucian Gomes, Diego Filgueira, Tuílla Bezerril, Amaro Neto, Henrique Miranda e Wanderson Michel.

E a todos os meus amigos e familiares, que contribuíram de alguma forma para que este sonho se tornasse realidade. A todos os citados e não citados, minha sincera gratidão!

“A vida é como andar de bicicleta. Para manter o equilíbrio, é preciso se manter em movimento.”

Albert Einstein

## RESUMO

Neste Trabalho de Conclusão de Curso é descrito o desenvolvimento e implementação de um sistema embarcado aplicado na medição remota de campos magnéticos dinâmicos artificiais utilizando o conjunto de especificações para comunicação de dados sem fio ZigBee (fundamentadas no padrão IEEE 802.15.4). Na implementação desse sistema foi utilizadas plataformas microcontroladas do tipo Arduino, integradas a um sensor de efeito *Hall* destinado à medição da intensidade desses campos magnéticos dinâmicos. A tecnologia ZigBee aqui usada visa possibilitar a realização em caráter remoto e em tempo real dessas medições de intensidade de campo magnético, além de disponibilizá-las na forma de visualização gráfica por meio de uma interface desenvolvida em LabVIEW.

Palavras-chave: Medição de campo magnético, Arduino, ZigBee.

## **ABSTRACT**

In this Paper for Course Conclusion describes the development and implementation of an embedded system applied to the remote measurement of artificial dynamic magnetic fields using the set of specifications for data communication wireless ZigBee (based on IEEE 802.15.4 standard). In implementing this microcontrolled system platforms were used Arduino type, integrated into a Hall effect sensor for measuring the intensity of dynamic magnetic fields. The ZigBee technology used here is designed to allow the completion of the remote, real-time character of these magnetic field intensity measurements provides them in the form of graphic display through an interface developed in LabVIEW.

**Keywords:** Measuring magnetic fields, Arduino, ZigBee.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Força sobre um condutor percorrido por corrente elétrica	15
Figura 2 - Fita delgada percorrida por corrente elétrica (esquerda) e efeito do campo magnético sobre as correntes (direita)	16
Figura 3 - Topologia em estrela (a), árvore (b) e malha (c)	18
Figura 4 - Sistema de medição de campo magnético	21
Figura 5 - Tela fornecida pelo Serial Monitor	21
Figura 6 - XBee Explorer	23
Figura 7 - Sistema transmissor	24
Figura 8 - Sensor magnético e ímã	25
Figura 9 - Sistemas transmissor (esquerda) e receptor (direita)	26
Figura 10 - LabVIEW	27
Figura A1 - Instalação da IDE Arduino no Ubuntu	32
Figura A2 - Comando de instalação da IDE do Arduino no Linux	33
Figura A3 - Interface de programação do Arduino	33
Figura B1 - Módulo XBee (azul) acoplado ao XBee Explorer (vermelho)	34
Figura B2 - Escolhendo a porta de comunicação (COM)	34
Figura B3 - Configuração via terminal do transmissor e receptor	36
Figura C1 - Programação básica no Arduino	37
Figura D1 - Programação de fluxo de dados no LabVIEW	38
Figura D2 - Painel frontal no LabVIEW	38

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Bandas de frequências e taxas de dados	17
Tabela B1 - Parâmetros de configuração do módulo transmissor	35
Tabela B2 - Parâmetros de configuração do módulo receptor	35

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	Ampère
A/D	Analógico/Digital
BPSK	Binary Phase Shift Keying
EEPROM	Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory
GHz	Gigahertz
Hz	Hertz
IDE	Integrated Development Environment
IEEE	Institute of Electric and Electronic Engineers
kb/s	Kilobits por segundo
KHz	Kilohertz
LTE	Long Term Evolution
MHz	Megahertz
MMDS	Multipoint Microwave Distribution System
NFC	Near Field Communications
O-QPSK	Offset Quadrature Phase Shift Keying
PC	Personal Computer
PHY	Physical
RF	Rádio Frequência
RM-OSI	Reference Model for Open Systems Interconnection
RX	Receiver
TX	Transmitter
USB	Universal Serial Bus
Wi-Fi	Wireless Fidelity
WPAN	Wireless Personal Area Network
ZC	ZigBee Coordinator
ZED	ZigBee End Device
ZR	ZigBee Router

## LISTA DE SÍMBOLOS

Fi

® Registered Trademark

## SUMÁRIO

1	<b>INTRODUÇÃO</b>	13
2	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	14
2.1	CAMPO MAGNÉTICO	14
2.2	SENSORES DE EFEITO HALL	15
2.3	ZIGBEE	17
2.3.1	<b>Dispositivos ZigBee</b>	18
2.3.2	<b>Topologias</b>	18
3	<b>DESCRIÇÃO DOS SISTEMAS</b>	20
3.1	INTEGRAÇÃO DO SENSOR DE EFEITO HALL COM O ARDUINO	20
3.2	COMUNICAÇÃO DE DADOS VIA ZIGBEE	22
3.2.1	<b>O Sistema Transmissor</b>	22
3.2.2	<b>O Sistema Receptor</b>	24
4	<b>RESULTADOS</b>	25
5	<b>CONCLUSÃO</b>	28
	<b>REFERÊNCIAS</b>	29
	<b>GLOSSÁRIO</b>	31
	APÊNDICE A – Instalação da interface de programação do Arduino	32
	APÊNDICE B – Configuração básica do módulo XBee	34
	APÊNDICE C – Programação básica do Arduino para comunicação ZigBee	38
	APÊNDICE D – Programação básica do LabVIEW para comunicação serial	38

## 1 INTRODUÇÃO

As tecnologias que envolvem o uso de comunicação de dados sem fio têm a capacidade de garantir mobilidade entre os elementos terminais de dados de um canal de comunicação enquanto ocorre a troca de informações entre eles.

Atualmente são muitos os dispositivos que fazem uso de tecnologia sem fio para transcepção de dados. As especificações mais conhecidas para implementação de tal tecnologia são: *Bluetooth*, NFC (*Near Field Communications*), Wi-Fi<sup>®</sup>, MMDS (*Multipoint Microwave Distribution System*), Infravermelho e o LTE (*Long Term Evolution*). Dentre estas especificações inclui-se a tecnologia ZigBee, que executa uma comunicação sem fio confiável, a baixas taxas de transmissão e com diminuto consumo de energia, o que o torna apropriado para aplicações de monitoramento e controle remoto de processos.

Aplicada hoje em diversas áreas, o ZigBee foi usado neste trabalho para transferir as medições das intensidades de um campo magnético dinâmico artificial realizadas remotamente através de um sensor de efeito *Hall*. Um sistema de eletrônica embarcada foi implementado por meio de uma plataforma microcontrolada Arduino que opera em conjunto com aquele sensor *Hall* e um módulo transceptor ZigBee. Este último é responsável pela transferência das referidas medições remotas de intensidade de campo à uma estação base [PC] - também equipada com um conjunto Arduino e transceptor ZigBee - destinada ao armazenamento e visualização dessas mensurações.

A principal motivação dessa pesquisa foi criar um produto inovador, otimizado e que possa ser utilizado na medição de velocidade de qualquer aplicação de deslocamentos lineares e/ou rotacionais, principalmente em locais de difícil acesso. Este projeto foi iniciado com um projeto do CNPq, através de uma bolsa PIBIT do IFRN.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Como descrito anteriormente, neste trabalho o ZigBee foi usado para transferir dados de medições de campo magnético, realizadas à distância, com o uso de um sensor de efeito *Hall*. A seguir são descritas as bases teóricas do efeito *Hall* e do ZigBee.

### 2.1 CAMPO MAGNÉTICO

Devido à natureza dos campos eletromagnéticos, e a intrínseca e inseparável ligação entre corrente elétrica e campo magnético, devidamente explicada pelas equações de Maxwell (Lei de Ampère e Lei de Faraday-Lenz), pode-se afirmar que medir campo magnético, é medir corrente elétrica. Com o advento da eletrônica, os amperímetros, voltímetros e demais medidores analógicos de grandezas elétricas, foram gradativamente sendo substituídos por equivalentes digitais, com comparadores e conversores A/D, mas precisos e eficientes, sendo que o antigo método ficou restrito a instalações de alta potência, ou em medições indiretas (BARBOSA, 2006).

Esses sensores são normalmente chamados de sensores indutivos, já que o seu princípio de funcionamento se baseia na Lei de Faraday e na Lei Lenz, que em síntese nos diz que *“a força eletromotriz induzida num circuito elétrico é igual à variação do fluxo magnético concatenado ao circuito”*. Ou seja, quando uma bobina fica sujeita a variação na intensidade do campo magnético, nesta surge uma corrente elétrica induzida, essa corrente será maior quanto maior for a amplitude da variação, ou quanto menor for o tempo em que ela ocorre (BORGES, 2015).

Assim, um mesmo sensor magnético (indutivo) de medição de corrente elétrica, construído para operar em 60Hz, por exemplo, pode nos fornecer valores equivocados, caso haja mudanças significativas na frequência dessa corrente. Uma corrente de 1,0A, 60Hz, produz uma indução 100 vezes menor que uma corrente 1,0A, 6KHz, embora ambas as correntes tenham intensidade de 1,0A.

Portanto, se faz necessária uma correção de valores devido à frequência da grandeza em medição, implicando em circuitos mais complexos e de custo elevado, sendo necessário calibrar o fator de correção para cada nova aplicação. Além de medir grandezas elétricas, os

sensores de campo magnético são amplamente utilizados em medições de grandezas mecânicas, como posição, velocidade e aceleração.

Para medir a frequência de um eixo ou engrenagem em rotação, por exemplo, faz-se uso de um ímã ou bobina no elemento móvel e o sensor no elemento fixo. Para essa aplicação, os circuitos convencionais apresentam os resultados de forma lógica: “campo presente” ou “campo ausente”. O que se mede, portanto é a sequência de pulsos, e com isso temos valores de velocidade, frequência ou aceleração.

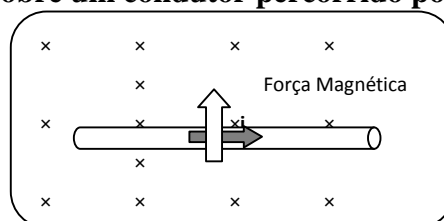
É importante destacar que os sensores indutivos são pouco eficientes em medições de campo estático, como medir o campo de um ímã em repouso ou de uma corrente contínua. Contudo, uma nova tecnologia de medição de campo magnético tem tido cada vez mais espaço nas aplicações industriais. São os sensores de efeito *Hall*, capazes de medir com elevada precisão a intensidade do campo magnético.

## 2.2 SENSORES DE EFEITO HALL

Os primeiros sensores de Efeito *Hall* com aplicação industrial se limitaram a substituir os sensores indutivos de medição de posição e velocidade, gerando um nível lógico (ou pulsos) sempre que havia a presença de uma intensidade mínima de campo magnético. Esses sensores agrupam várias vantagens, tais como o espaço físico reduzido, melhor estabilidade térmica e a capacidade de detectar um campo magnético estático. Mas, afinal de contas, o que é o efeito *Hall*?

Inicialmente, imagine uma corrente elétrica, contínua, em um fio condutor, no sentido indicado na Figura 1. Se um campo magnético for aplicado na região do espaço em que se encontra esse fio, perpendicular ao plano, e entrando na página, irá surgir uma força magnética direcionada para cima (BORGES, 2015).

**Figura 1 -Força sobre um condutor percorrido por corrente elétrica.**



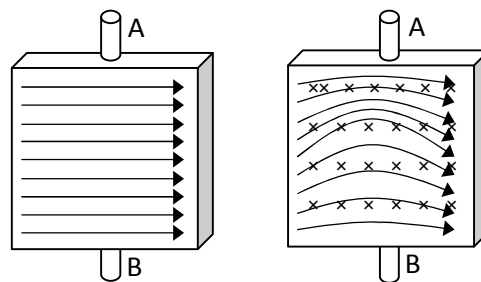
Fonte: BORGES, 2015.



Essa explicação clássica do eletromagnetismo faz referência a apenas um condutor linear, de comprimento finito, e considera-se a região do espaço como sendo infinita, podendo esse condutor se mover livremente para cima continuamente.

Tomemos agora um condutor na forma de uma fita delgada, percorrido por uma corrente elétrica da esquerda para a direita (Figura 2-a). Ao se aplicar um campo magnético perpendicular ao plano, haverá um deslocamento da corrente para cima, semelhante ao nosso exemplo anterior (Figura 2-b). Teremos um acúmulo de portadores negativos na parte inferior da fita, e de positivos na parte superior. Esses deslocamentos ocorrerão até que a força magnética se equilibre com a força eletrostática (TIPLER, 2009).

**Figura 2 - Fita delgada percorrida por corrente elétrica (esquerda) e efeito do campo magnético sobre as correntes (direita).**



Fonte: BORGES, 2015.

Em 1879, durante seu doutorado, Edwin H. Hall descobriu esse efeito, sob orientação de Henry A. Rowland. A tensão entre os pontos A e B passou a ser chamada de tensão Hall, assim como o efeito aqui descrito. Essa tensão é proporcional ao campo magnético aplicado, independente se ele é contínuo ou oscilatório (BORGES, 2015).

É importante destacar que os sensores de efeito *Hall* (HALLIDAY, RESNICK e WALKER, 2013) oferecem várias vantagens práticas, tais como: tamanho físico reduzido, ótima estabilidade térmica e capacidade de detectar e mensurar a intensidade de campos magnéticos dinâmicos.

### 2.3 ZIGBEE

As redes sem fio de abrangência pessoal (WPAN - *Wireless Personal Area Network*), especificadas pelo padrão IEEE 802.15 possuem características de funcionamento que coadunam muito bem com as aplicações propostas nesse TCC. Dentre os principais característicos de uma WPAN elencam-se a seguir aqueles que nortearam a escolha dessa tecnologia como parte integrante desse projeto de pesquisa: o baixo custo de implementação, o pequeno consumo de energia, o bom alcance do sinal propagado e o tamanho reduzido dos dispositivos empregados na montagem da rede (SANTOS, 2013).

O WPAN trabalha com três faixas de frequência, são elas: 868 MHz, 915 MHz e 2.4 GHz. A Tabela 1 descreve importantes informações em relação a tais frequências, que variam de acordo com a banda adotada (SANTOS, 2013).

**TABELA 1 - Bandas de frequências e taxas de dados (ERGEN, 2004).**

PHY	Banda de frequência (MHz)	Parâmetros de espelhamento		Parâmetros dos dados		
		Taxa de espelhamento (kchip/s)	Modulação	Taxa de bits (kb/s)	Taxa de símbolo	Símbolos
868/915	868 - 868,6	300	BPSK	20	20	Binário
	902 - 928	600	BPSK	40	40	Binário
2.450	2.400 - 2.483,5	2.000	O-QPSK	250	62,5	16 símb.

Dentre as tecnologias WPAN disponíveis adotamos a ZigBee (MARÇAL, 2008), que corresponde a um conjunto de especificações para comunicação sem fio desenvolvidas na camada de rede do modelo RM-OSI (KUROSE, 2014) e baseada nas estruturas das camadas física e de enlace propostas pelo padrão IEEE 802.15.4.

ZigBee é um padrão definido por uma aliança entre empresas de diferentes ramos de mercado, denominado “ZigBee Alliance”. O “ZigBee Alliance” é uma associação aberta, sem fins lucrativos, que possui aproximadamente 400 membros que ajudaram a tornar o ZigBee um padrão confiável e fácil de usar. A parceria trabalha em promover mundialmente o ZigBee como o principal padrão para uso de aplicações sem fio que envolvam redes de sensores, controle, automação, domótica, entre outras funcionalidades (ZIGBEE, 2014).

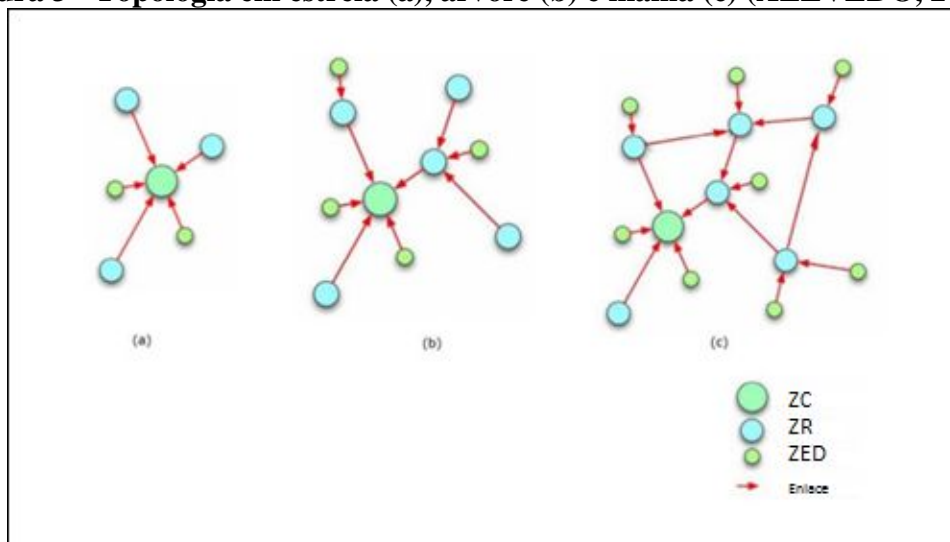
### 2.3.1 Dispositivos ZigBee

Numa rede ZigBee pode-se encontrar três tipos distintos de dispositivos quanto as suas funcionalidades dentro da rede. São eles: o Coordenador (*ZigBee Coordinator, ZC*), o Roteador (*ZigBee Router, ZR*) e os Dispositivos Finais (*ZigBee End Device, ZED*). O Coordenador executa funções como: criação de uma rede, transmissão de avisos, gerenciamento e armazenamento de informações dos nós de rede, além de rotear mensagens entre os nós por ele interconectados (KINNEY, 2003). O Roteador é responsável pelo encaminhamento dos pacotes entre os dispositivos da rede, enquanto o Dispositivo Final geralmente exerce a função de *host* dedicado à ações de sensoriamento (AZEVEDO, 2014).

### 2.3.2 Topologias

Uma rede ZigBee suporta três tipos de topologia de rede, são elas: estrela, árvore e malha. Na topologia em estrela, como se pode observar na Figura 3-a, toda a comunicação entre os dispositivos (ZR e ZED) se dá através de um único Coordenador (localizado no centro da rede), que pode ser alimentado continuamente, enquanto os demais componentes normalmente são alimentados por baterias (KINNEY, 2003). A topologia em árvore é uma evolução da topologia em estrela, onde novos dispositivos se conectam à rede através do final de um ramo (ou roteador). A topologia em malha é uma evolução da topologia em árvore, onde os dispositivos se conectam entre si, formando uma rede de malha.

**Figura 3 - Topologia em estrela (a), árvore (b) e malha (c) (AZEVEDO, 2014).**



Fonte: <http://www.gta.ufrj.br/ensino/CPE825/2006/resumos/TrabalhoZigbee.pdf>

A Figura 3-b (p. 18) mostra o exemplo de uma topologia em árvore, no caso, vê-se mais a direita, três novos dispositivos conectados à rede formando a nova topologia (árvore). A malha é a interconexão por vários caminhos possíveis entre os nós (ZR e ZED), possibilitando a troca de informação de forma redundante (em casos de falhas entre os nós) e a cobertura de áreas mais extensas (Figura 3-c).

Segundo AZEVEDO (2014): "*A formação de uma nova rede ZigBee é iniciada através de uma primitiva da camada de rede que é restrita ao coordenador ZigBee que não pertence a nenhuma rede*". Inicialmente, o Coordenador faz uma varredura por um conjunto de canais. Em seguida, em ordem crescente de níveis de energia, os canais encontrados são ordenados. Então, o coordenador define um canal para criar a rede, de acordo uma busca prévia que ele fez em cada canal para encontrar dispositivos de rede ZigBee. A partir daí, um identificador lógico é definido e será atribuído a futuros dispositivos da rede. Por fim, o Coordenador permite o ingresso de outros dispositivos à rede (AZEVEDO, 2014).

No caso do sistema estudado operou-se com o ZigBee na frequência de 2450MHz, com taxa de transferência de dados de até 250Kbps, numa rede ponto-a-ponto cuja infraestrutura de comunicação conta com apenas dois dispositivos: um atuando como Coordenador (ZC) e outro exercendo a função de Dispositivo Final (ZED).

### 3 DESCRIÇÃO DOS SISTEMAS

O sistema desenvolvido nessa pesquisa foram implementado em duas etapas distintas. Na primeira tem-se a integração do sensor de efeito *Hall* com a plataforma Arduino dando início ao sistema embarcado. Na segunda integrou-se o módulo de comunicação ZigBee a esse sistema.

#### 3.1 INTEGRAÇÃO DO SENSOR DE EFEITO *HALL* COM O ARDUINO

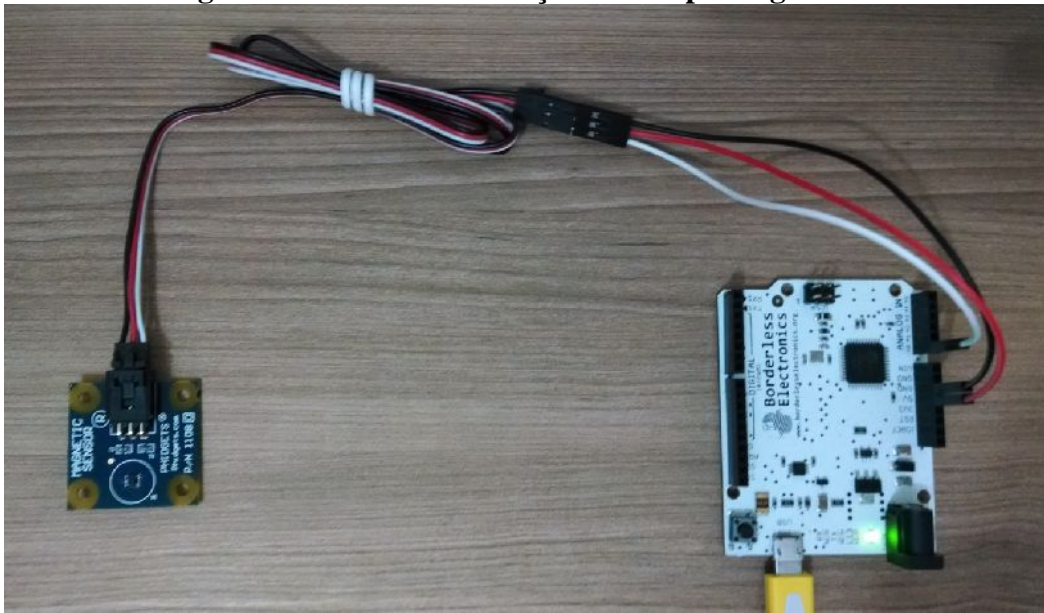
Nesta etapa foi integrado o sensor *Phidgets Magnetic Sensor* (modelo 1108) - com funcionamento baseado em efeito *Hall* - à plataforma Arduino (modelo Duemilanove). Tais dispositivos podem ser vistos trabalhando em conjunto na Figura 4 (p. 21). O sensor é o responsável pelas medições de intensidade do campo magnético fornecendo como resposta de transdução uma tensão de saída situada na faixa de 0 a 5V, proporcional a intensidade de campo magnético mensurado.

A fórmula de conversão para Gauss, unidade padrão no Sistema Internacional de Unidades para medição de intensidade de campo magnético, a partir do valor de tensão gerado pelo sensor é dada segundo o fabricante PHIDGETS (2014) por:

$$(G) = 500 - (V_{in} \cdot 200) \quad \text{equação (1)}$$

O sensor possui 3 pinos: um pino denominado *power* (alimentação), sempre alimentado com +5V (fio vermelho), um pino referenciado como *ground* (terra), sempre alimentado com 0V (fio preto) e o pino que funciona como saída analógica (fio branco) – pino de resposta. Este último é conectado a uma das portas analógicas do Arduino que desse modo realiza a leitura dos valores de tensão fornecidos pelo sensor.

**Figura 4 - Sistema de medição de campo magnético.**

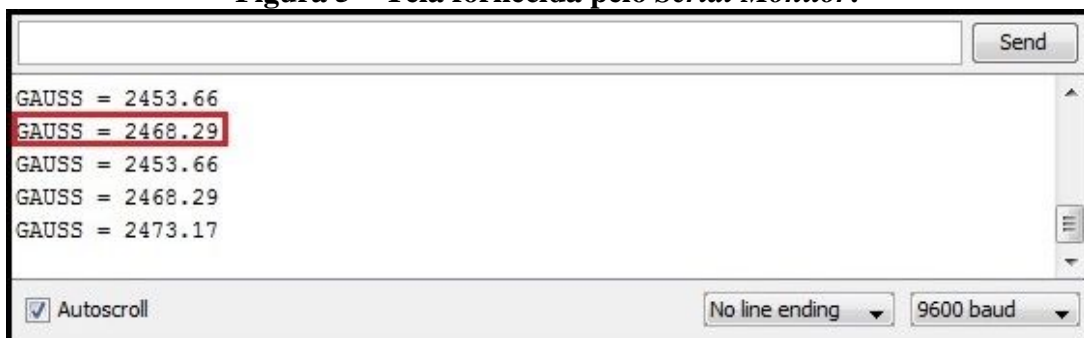


Através do ícone *Serial Monitor* disponível na IDE do Arduino, é possível observar numa tela de monitoramento os valores de tensão produzidos pelo sensor de efeito *Hall* em tempo real (Figura 5).

No caso deste trabalho plotou-se esses valores na tela já devidamente convertidos para Gauss pelo próprio programa computacional armazenado no Arduino que executava imediatamente a fórmula de conversão (equação 1) para as medidas na forma de tensão obtidas pelo sensor.

Os dados coletados pelo Arduino podem ainda ser armazenados de modo permanente na memória EEPROM disponível na própria plataforma – de tamanho máximo 512 Kbytes para o Duomilanove, sem que ocorram perdas de informação coletada quando se desliga o Arduino da sua fonte de alimentação (MONK, 2014).

**Figura 5 – Tela fornecida pelo *Serial Monitor*.**



### 3.2 COMUNICAÇÃO DE DADOS VIA ZIGBEE

A comunicação sem fio (*wireless*) é parte fundamental do sistema proposto neste artigo, pois possibilita a troca de dados através do espaço livre entre os dispositivos envolvidos no processo mesmo que esses se encontrem a dezenas de metros de distância um do outro.

A proposta aqui analisada foi implementada com módulos *wireless* de comunicação ZigBee denominados XBees. Tais dispositivos são módulos RF (Rádio Frequência) que utilizam o padrão ZigBee para realizar comunicação. Optou-se por esses módulos devido a sua simplicidade de configuração por meio de uma interface serial, além da possibilidade do estabelecimento de redes e de endereçamento dos módulos serem operacionalizadas via *software* gratuito denominado X-CTU. O Apêndice B mostra em detalhes a configuração básica de um módulo XBee.

Nesta etapa, acrescentou-se um segundo Arduino que possuía acoplado um módulo de recepção ZigBee destinado a captação remota dos dados coletados. Nesse momento, a rede ZigBee contava com dois módulos XBees (modelo XBEE PRO S1) para a comunicação *wireless*, dois XBees *shields* (modelo Eletronics) e dois Arduinos (modelo Duemilanove) aos quais os módulos *wireless* estavam associados.

Os XBees *Shields* utilizados em ambos Duomilanove – uma *shield* em cada - é uma placa que associa o Arduino ao módulo Xbee da seguinte maneira: o módulo XBee é conectado à *shield* XBee, que por sua vez é conectada à placa contendo o Arduino. O conjunto completo de componentes supracitados compõem o sistema transceptor ZigBee.

#### 3.2.1 O Sistema Transmissor

O sistema transmissor é formado pelo sensor, um Arduino, uma *shield* XBee e um módulo Xbee. Para configurar o módulo XBee, se faz necessário o uso de um dispositivo denominado XBee *explorer* e do X-CTU. O XBee *explorer* conecta o módulo Xbee ao computador, através de uma porta USB. O XBee do transmissor está configurado como ZED e envia informações de leitura para o módulo XBee do sistema receptor, configurado como ZC. Na Figura 6 (p. 23) é possível ver o XBee *explorer* utilizado na configuração módulos.

O sensor mede continuamente quaisquer campos magnéticos exercidos sobre ele e repassa essas informações para o Arduino - programado para ler esses valores na porta analógica A0. Este recebe esses dados e os repassa para o módulo XBee. A comunicação entre o Arduino e o módulo XBee ocorre através das portas analógicas 2 e 3 do Arduino, denominadas TX e RX, respectivamente, via comunicação conhecida como *Link Serial*.

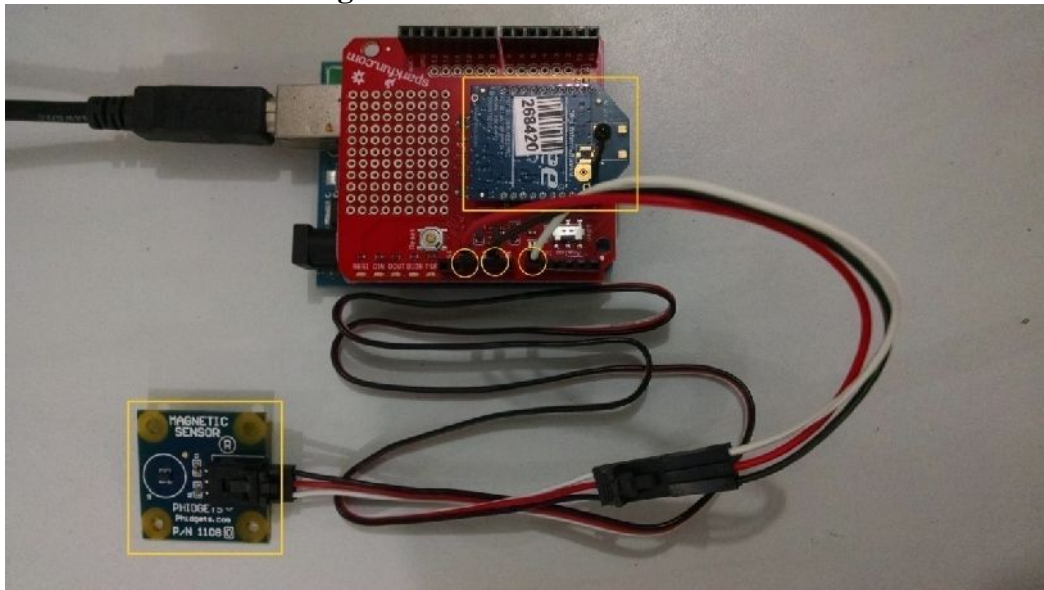
**Figura 6 - XBee Explorer.**



Por fim, o módulo XBee, após receber os valores fornecidos pelo Arduino, os retransmite usando o meio de comunicação sem fio para o módulo XBee presente no sistema receptor. O envio das informações foi programado para ocorrer num intervalo de 100ms. O sistema transmissor pode ser observado na Figura 7 (p. 24). Dos itens marcados em amarelo, o módulo XBee é que está conectado sobre a *shield* XBee (placa vermelha conectada ao Arduino). As três marcações no meio da figura são referentes às portas usadas do Arduino: a vermelha (5V), a preta (terra, 0V) e a branca (porta analógica, "A0"), respectivamente. Na outra marcação em amarelo mais abaixo na figura, encontra-se o sensor de efeito *Hall* (Figura 7 - p. 24).



**Figura 7 – Sistema transmissor.**



### 3.2.2 O Sistema Receptor

O sistema receptor opera da seguinte forma: o módulo XBee permanece constantemente lendo valores, referentes a leitura do sensor, que são enviados pelo XBee do sistema transmissor. Ele recebe as informações e as repassa para o Arduino - usando as portas 2 e 3, como ocorre no transmissor.

O Arduino, por sua vez, envia tais informações para o computador através de um cabo USB, porém, usando uma conexão serial. Dessa forma, as informações podem ser visualizadas através do *Serial Monitor* da IDE do Arduino ou em outro *software* qualquer que possa realizar a leitura desses valores através da porta serial. O LabVIEW (será visto exemplo deste em conjunto com o sistema mais adiante) é um exemplo desse tipo de *software*. O sistema receptor é constituído basicamente dos mesmo dispositivos vistos no transmissor (Figura 7), a diferença é que não possui o sensor de efeito *Hall* acoplado.

## 4 RESULTADOS

Com os sistemas prontos, testes foram realizados. Para verificar a medição realizada pelo sensor, um pequeno ímã foi usado como fonte de campo magnético para o sensor. Aproximando-o do sensor, pôde-se perceber um gradual aumento do campo magnético lido e afastando-o do sensor, o oposto ocorreu.

O ímã empregado foi um ímã permanente N48, também conhecidos como ímãs de neodímio-boro ( $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ ), ou ímãs de “terra-rara”, já que os elementos que o compõem recebem essa classificação na tabela periódica. Esses ímãs são produzidos por sinterização, a partir de óxidos e metais, sendo todas as operações executadas sob proteção de gases inertes. Devido a sua alta oxidação, empregam-se revestimentos metálicos como zinco, ouro e níquel. Atualmente, estes estão entre os ímãs permanentes mais energéticos e acessíveis, sendo amplamente utilizados em pesquisas acadêmicas e produtos industriais (MAIA, 2011).

BORN (2008), afirma que esses ímãs são muito poderosos em comparação a sua massa, mas também são mecanicamente frágeis e perdem seu magnetismo em temperaturas acima de  $120^\circ\text{C}$ . Por terem um custo menor que o tradicional samário-cobalto, eles os têm substituído em diversas aplicações. ANDERSON (2010) acrescenta algumas vantagens dos ímãs de neodímio, como sua alta energia (até 50 MGOe), atrelada a um menor custo por energia. Alta resistência à desmagnetização, razoável estabilidade à temperatura, e temperatura de trabalho de  $80^\circ$  a  $180^\circ\text{C}$ . Na figura 8 observa-se o ímã - marcado em vermelho à direita - em conjunto com o sensor de efeito *Hall* - marcado em vermelho à esquerda.

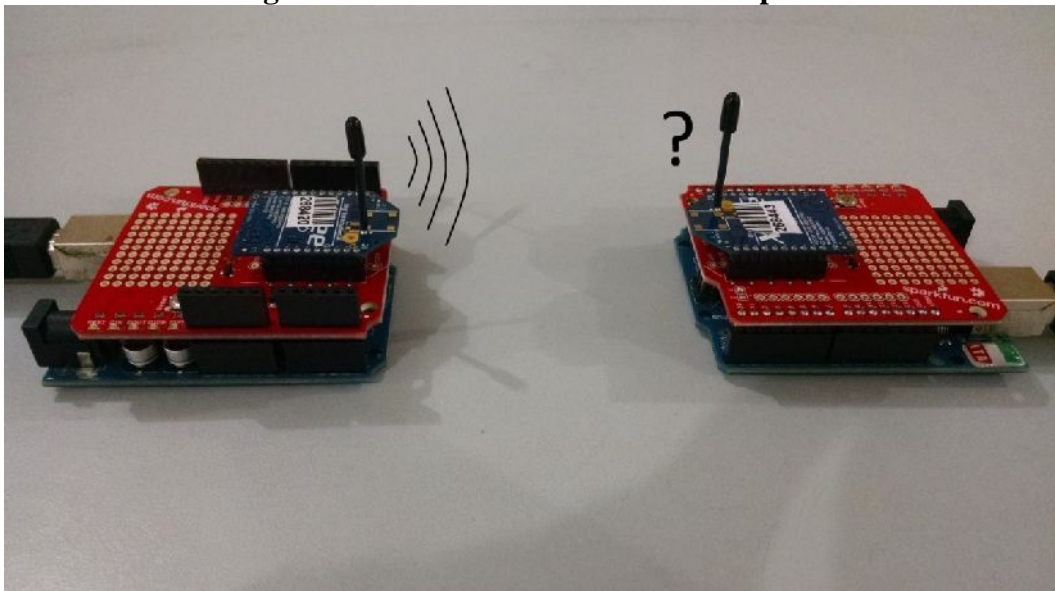
**Figura 8 – Sensor magnético e ímã.**



O intervalo entre as medições foram programadas no Arduino para serem realizadas a cada 100ms e mesmo com esse intervalo consideravelmente baixo, não houve perda de pacotes ou atrasos na comunicação.

No quesito distância de comunicação efetiva de dados, foram realizados dois testes: o primeiro num ambiente aberto e outro num ambiente fechado. No primeiro ambiente, o sistema conseguiu se comunicar, sem que houvesse perda ou atrasos, a 120 metros de distância. No segundo ambiente, a distância obtida foi pouco mais que 15 metros. Em ambos os testes, os resultados se mostraram bastante satisfatórios, confirmando a qualidade da comunicação sem fio ZigBee executada pelos módulos utilizados. A Figura 9 apresenta ambos os sistemas, transmissor (esquerda) e receptor (direita).

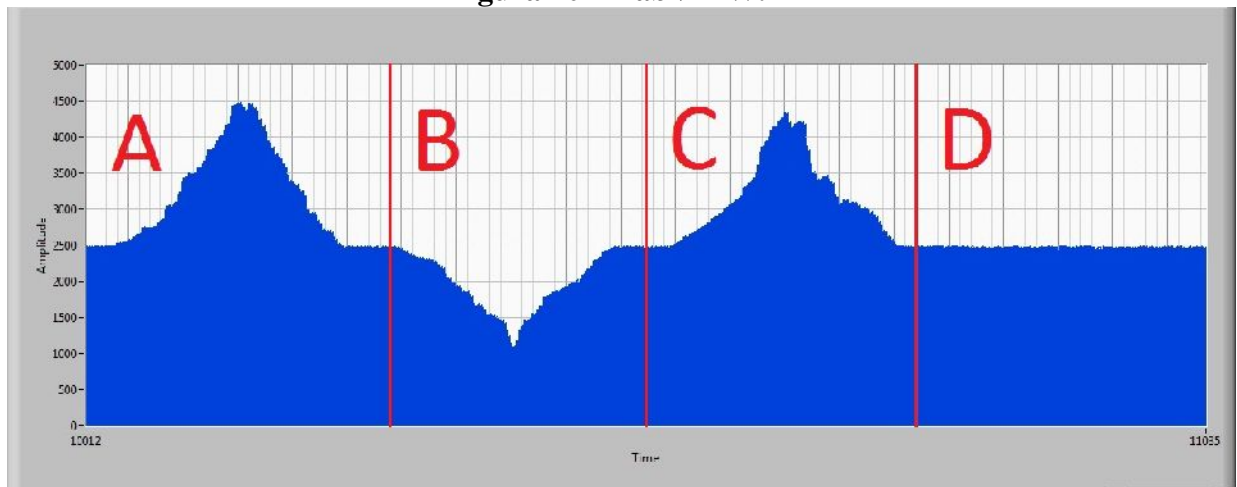
**Figura 9 – Sistemas transmissor e receptor.**



Foi desenvolvido um instrumento virtual (IV), utilizando a plataforma LabVIEW, versão 2012, afim de melhor visualizar as leituras realizadas pelo sistema desenvolvido. O termo é um acrônimo de “*Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*”, e é uma linguagem de programação gráfica originária da *National Instruments*, voltada principalmente para instrumentação e automação. A programação é realizada de acordo com o modelo de fluxo de dados, através de diagramas de blocos que levam o código gráfico do programa, que é em seguida compilado. Esta linguagem gráfica é chamada de linguagem “G”. Uma outra grande vantagem desta plataforma, é a interface com o usuário, conforme pode-se observar na Figura 10 (p. 27).

Tal interface foi programada para exibir de forma gráfica o resultado das leituras (em Gauss) realizadas através dos sistemas desenvolvidos. A parte indicada pela letra “A” mostra a leitura no momento em que o ímã foi aproximado e logo em seguida afastado do sensor de efeito *Hall*, situação percebida pelo aumento e declínio no gráfico. Na parte “B”, foi realizado o mesmo experimento, porém com a polaridade do ímã invertida. A parte “C” é similar a “A” e a “D” mostra o instante em que não há aproximação do ímã sobre o sensor.

**Figura 10 – LabVIEW.**



Dessa forma, utilizando o método de leitura mostrados nas partes "A" e "C" da figura, foi aplicado o monitoramento sobre um eixo em movimento (com um ímã acoplado em seu corpo) a fim de observado sua frequência de rotação. O sensor de efeito *Hall* foi acoplado a uma base estática na altura do ímã. A maneira com que o ímã girava acompanhando o movimento de rotação do eixo, sensibilizava o sensor no momento em que passava por este. Assim, foi possível mensurar a sua frequência de rotação. Por fim, com tais informações foi possível calcular a velocidade de rotação do eixo.

## 5 CONCLUSÃO

Os testes realizados com o sistema proposto mostraram sua boa funcionalidade e consequente flexibilidade de aplicação em diversas situações reais, tais como, a medição direta da velocidade de rotação de um eixo ou medição indireta da velocidade linear de um veículo calculada a partir da rotação de uma de suas rodas, ou em qualquer outra aplicação de deslocamentos lineares e rotacionais, principalmente em lugares de difícil acesso, seja pelo espaço reduzido, seja, pelas enormes distâncias que se poderia ter que percorrer.

Nas medições e testes realizados percebeu-se que os sensores do tipo *Hall* são estáveis, sensíveis à variação da intensidade de campo e bastantes precisos, operando sem falhas nas diferentes frequências testadas.

A realização desta pesquisa e conclusão deste trabalho contribui de forma bastante significativa para o crescimento acadêmico na área de Redes de Computadores, pois ajudou a entender e aprofundar de forma prática os conhecimentos teóricos vistos em sala de aula no decorrer do curso em relação à comunicação sem fio entre *hosts*, principalmente em relação ao padrão ZigBee.

Como perspectiva futura, o sistema implementado possibilita o uso de outros tipos de sensores, como por exemplo, sensores de temperatura, umidade, campo eletromagnético ou gás, dedicados a uma vasta possibilidade de aplicações diferentes das aqui estudadas.

Os resultados desta pesquisa também culminaram em um artigo científico, que foi submetido a revista *Holos*, e se encontra em análise da revista, para uma edição especial de aniversário do DIATINF.

## REFERÊNCIAS

- ANDERSON, Jeremy J. “**Structural and Magnetic Properties of Neodymium - Iron - Boron Clusters**” (2010). Mechanical (and Materials) Engineering. Dissertations Master Science, Lincoln, Nebraska, USA, 2010.
- AZEVEDO, Tiago. **Roteamento ZigBee**. Disponível em: <<http://www.gta.ufrj.br/ensino/CPE825/2006/resumos/TrabalhoZigBee.pdf>>. Acesso em: 21 de junho de 2014.
- BARBOSA, F. Q. Redução das incertezas nas medições de grandezas elétricas em uma bancada de ensaios de desempenho de compressores. **Dissertação de Mestrado**: Universidade Federal de Santa Catarina. Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial. Florianópolis-SC, 2006.
- BORGES, J.C.S.; LIMA FILHO, A.C.;BELO, F. A. Sensor Hall effecton analyses Mechanical Stress. **Journal of Mechanics Engineering and Automation**. v.5, p. (19-25), 2015. ISSN/ISBN: 2159-5275. doi: 10.17265/2159-5275/2015.01.003.
- BORN, Adriano. **Desenvolvimento de um gerador elétrico acionado pelas ondas do mar**. Monografia de graduação. Engenharia elétrica. ULBRA. Canoas, 2008.
- ERGEN, S. C. **ZigBee/IEEE 802.15.4 Summary**. 2004.
- HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jean. **Fundamentos de física: eletromagnetismo**. Rio de Janeiro: LTC, ed. 9, v. 3, p. (195-198), 2012.
- KINNEY, Patrick. **ZigBee technology: Wireless Control that Simply Works**, 2003.
- KUROSE, James F. e ROSSE, Keith W. **Redes de computadores e internet: uma abordagem top-down**. São Paulo: Pearson, p. (35-41), 2014.
- MAIA, Thales Alexandre Carvalho. **Projeto e Construção de um Gerador a Ímãs Permanentes de Fluxo Axial para Turbina Eólica de Pequena Potência**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2011.
- MARÇAL, Isabela Sachetim. **Bluetooth e zigbee padrões para redes pessoais sem fio**. Londrina, 2008. p. (31-35).
- MONK, Simon. **30 projetos com Arduino**. Tradução de Anatólio Laschuk. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2014.
- PHIDGETS. **1008 userguide**. Disponível em: <[http://www.phidgets.com/docs/1108\\_User\\_Guide](http://www.phidgets.com/docs/1108_User_Guide)>. Acesso em: 5 de agosto de 2014.
- SANTOS, Everton Luiz Ferret dos. A IEEE 802.15.4 como plataforma de comunicação de dados. **Revista Ilha Digital**, Florianópolis, v. 4, p(97-105), 2013.

TIPLER, Paul A. **Física para Engenheiros**, Sexta edição, Vol. 2, LTC, São Paulo-SP, 2009.

ZIGBEE. **ZigBee alliance**. Disponível em: <<http://www.zigbee.org/>>. Acesso em: 20 de junho 2014.

## GLOSSÁRIO

Arduino: plataforma de prototipagem eletrônica.

Bluetooth: tecnologia de comunicação sem fio para áreas de redes pessoais.

Gauss: unidade padrão no Sistema Internacional de Unidades para medição de intensidade de campo magnético.

Host: hospedeiro ou qualquer máquina ou computador conectado à uma rede.

Link Serial: comunicação que se dá em série, normalmente usa uma porta COM.

Magnetic Sensor: sensor magnetic.

Router: o mesmo que roteador.

Shields: placas complementares usadas em conjunto com o Arduino

Software: programa computacional.

Wireless: comunicação sem fio.



## APÊNDICE A – Instalação da interface de programação do Arduino.

No site oficial do Arduino ([arduino.cc](http://arduino.cc)) há um guia (na língua inglesa) de instalação da IDE do Arduino para os principais sistemas operacionais (Windows, Mac OS X e Linux) que explica passo a passo o que deve ser feito. Para a pesquisa aqui apresentada, a IDE foi instalada em um sistema operacional Linux, mais especificamente Ubuntu 14.04 (64 bits). A Figura A1 mostra em parte a página de orientação de instalação do Arduino.

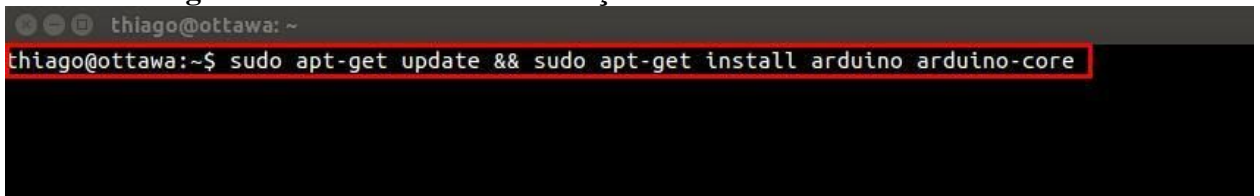
**Figura A1 - Instalação da IDE Arduino no Ubuntu.**

The screenshot shows the Arduino Playground website. The main heading is "Install Arduino on Ubuntu Linux". Below it is a "Table of Contents" with several links, including "Ubuntu 12.04 and newer" which is highlighted with a red box. Below the table of contents, the heading "Ubuntu 12.04 and newer" is followed by a terminal command: `sudo apt-get update && sudo apt-get install arduino arduino-core`, which is also highlighted with a red box. The text below the command states: "After the installing the stable version, development versions or nightly builds can be downloaded from the arduino.cc servers, unpacked anywhere, they run out of the box (as of August 8 2013, tested with Uno R3)".

Fonte: <http://playground.arduino.cc/Linux/Ubuntu>.

Seguindo os passos marcados na Figura 1, foi executado o comando de instalação no terminal, como se pode observar na Figura A2 (p. 33). As linhas finais da instalação podem ser vistas na Figura 3 e a Figura 4 exibe a interface recém instalada no Linux e inicialmente limpa, sem nenhum código escrito.

**Figura A2 - Comando de instalação da IDE do Arduino no Linux.**

A terminal window with a dark background. The prompt is 'thiago@ottawa: ~'. A red rectangular box highlights the command 'sudo apt-get update && sudo apt-get install arduino arduino-core' entered at the prompt.

```
thiago@ottawa:~$ sudo apt-get update && sudo apt-get install arduino arduino-core
```

A IDE do Arduino já instalada pode ser visualizada na Figura A3. A interface é simples, apenas uma janelinha em branco onde os códigos podem ser digitados.

**Figura A3 - Interface de programação do Arduino.**



## APÊNDICE B – Configuração básica do módulo XBee.

Como descrito no início da seção 3.2.1, para se configurar o módulo XBee se faz necessário o uso do dispositivo XBee *explorer* e do software X-CTU instalado. A Figura B1 mostra um módulo XBee acoplado ao XBee *explorer*.

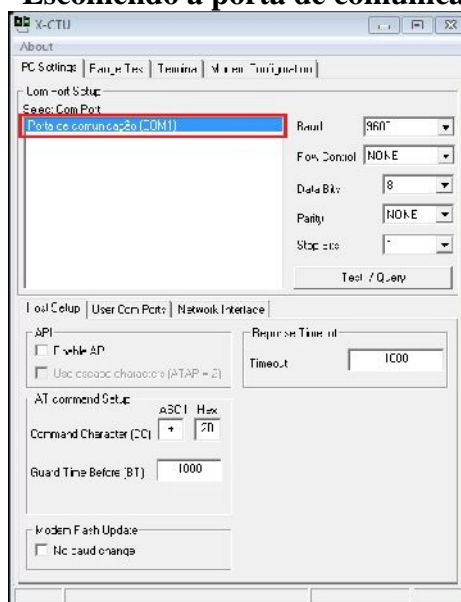
**Figura B1 – Módulo XBee (azul) acoplado ao Xbee *explorer* (vermelho).**



Fonte: <https://learn.sparkfun.com/tutorials/xbee-shield-hookup-guide>

Com o módulo acoplado ao XBee *explorer*, basta conectar o equipamento a uma das interfaces USB do computador e abrir o X-CTU. No *software*, inicialmente deve-se escolher a porta COM (Figura B2) na qual o XBee *explorer* está conectada e em seguida ir até a aba “Terminal” para se iniciar a configuração.

**Figura B2 – Escolhendo a porta de comunicação (COM).**



Na aba terminal, os parâmetros básicos a serem configurados são os seguintes: endereço de rede, endereço de comunicação do módulo destino, endereço do próprio módulo e um nome atribuído ao módulo. Vale salientar que o exemplo aqui mostrado trata-se de uma comunicação *peer-to-peer* (ponto-a-ponto), onde apenas dois dispositivos compõem a rede. As Tabelas 1 e 2, a seguir, mostram os parâmetros que devem ser configurados.

**Tabela B1 – Parâmetros de configuração do módulo transmissor.**

Transmissor		
Comando	Valor Função	Função
ATID	10	Endereço de rede
ATDL	2	Endereço do módulo destino
ATMY	1	Endereço do módulo local
ATNI	TX	Nome do módulo
ATWR	---	Salva as configurações
ATCN	---	Sai do modo de comando

Fonte: <http://labdegaragem.com/profiles/blogs/tutorial-como-utilizar-o-xbee>

**Tabela B2 – Parâmetros de configuração do módulo receptor.**

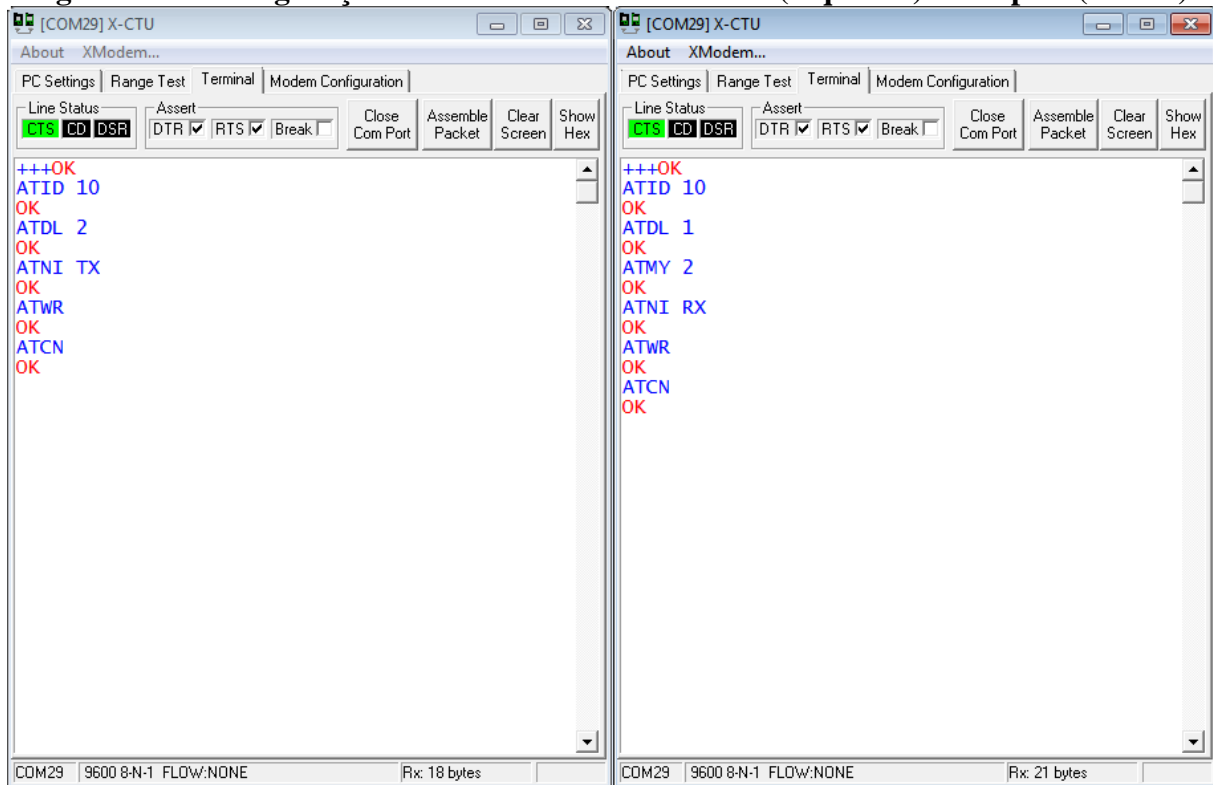
Transmissor		
Comando	Valor Função	Função
ATID	10	Endereço de rede
ATDL	1	Endereço do módulo destino
ATMY	2	Endereço do módulo local
ATNI	RX	Nome do módulo
ATWR	---	Salva as configurações
ATCN	---	Sai do modo de comando

Fonte: <http://labdegaragem.com/profiles/blogs/tutorial-como-utilizar-o-xbee>

É importante observar que, como os dois dispositivos devem pertencer à mesma rede, os seus ATIDs devem ser configurados com o mesmo número, no caso 10. Outra observação é que os comandos ATDL e ATMY possuem a mesma numeração, todavia se invertem de acordo com o tipo de dispositivo (TX ou RX). O ATMY é endereço do próprio módulo e o ATDL é o endereço do módulo destino com o qual deseja se comunicar.

Voltando a aba terminal, para se iniciar a configuração é preciso ativar o modo de comando. Para tal, deve-se inicialmente executar o comando “+++”. Se um “Ok” surgir após a execução, está tudo certo e o terminal está pronto para a execução dos comandos de configuração. Os comandos devem ser digitados de forma relativamente rápida, pois se houver demora, o terminal sairá do modo de configuração. Caso isso ocorra, basta apertar duas vezes no botão “Close Com Port”, localizado no canto superior direito da janela. Sempre que um comando é executado com sucesso, um “Ok” surge logo em seguida para confirmar. A Figura B3 ilustra a configuração de um módulo TX (esquerda) e um módulo RX (direita).

**Figura B3 – Configuração via terminal do transmissor (esquerda) e receptor (direita).**



## APÊNDICE C – Programação básica do Arduino para comunicação ZigBee.

A programação básica no microcontrolador Arduino para que ocorra comunicação entre os módulos XBee pode ser vista na Figura C1, abaixo. O importante a se entender, é que na função “void setup”, ambas as portas seriais usadas na comunicação (XBee.begin e Serial.begin, no código), devem ser “setadas” para 9600 *baud*. O primeiro é usado para comunicação serial entre módulos ZigBee e o segundo é usado para a comunicação serial com o computador conectado ao Arduino.

**Figura C1 – Programação básica no Arduino.**



```

sketch_feb25a | Arduino 1.0.1
File Edit Sketch Tools Help
sketch_feb25a $
// We'll use SoftwareSerial to communicate with the XBee:
#include <SoftwareSerial.h>
// XBee's DOUT (TX) is connected to pin 2 (Arduino's Software RX)
// XBee's DIN (RX) is connected to pin 3 (Arduino's Software TX)
SoftwareSerial XBee(2, 3); // RX, TX

void setup()
{
  // Set up both ports at 9600 baud. This value is most important
  // for the XBee. Make sure the baud rate matches the config
  // setting of your XBee.
  XBee.begin(9600);
  Serial.begin(9600);
}

void loop()
{
  if (Serial.available())
  { // If data comes in from serial monitor, send it out to XBee
    XBee.write(Serial.read());
  }
  if (XBee.available())
  { // If data comes in from XBee, send it out to serial monitor
    Serial.write(XBee.read());
  }
}
26 Arduino Duemilanove w/ ATmega328 on COM8

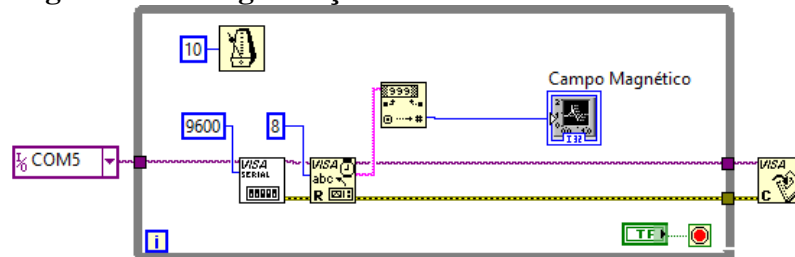
```

Fonte: <https://learn.sparkfun.com/tutorials/xbee-shield-hookup-guide>

## APÊNDICE D – Programação básica do LabVIEW para comunicação Serial.

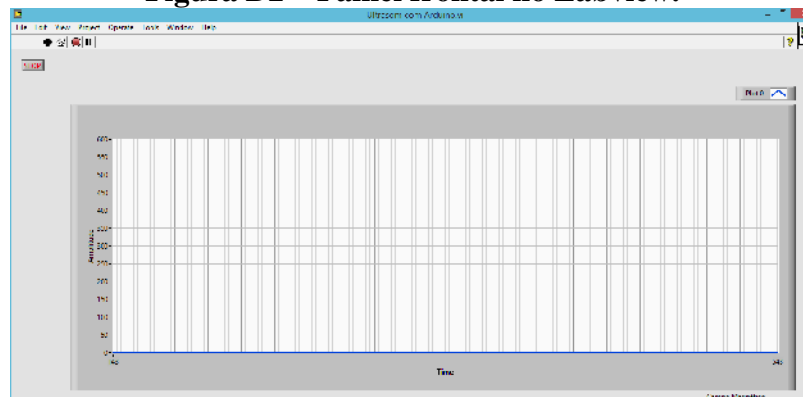
A programação em LabVIEW é realizada em dois ambientes: os diagramas de blocos e fluxo de dados, e ao painel frontal, onde é realizada a interface com o usuário. Na imagem dos digramas de blocos, é possível configurar para que o programa receba dados provenientes da porta serial (protocolo VISA), conforme a Figura D1:

**Figura D1 – Programação de fluxo de dados no Labview.**



Neste caso, os dados de intensidade de campo magnético serão enviados pelo Arduino para a porta COM5, que será lida a uma taxa de 9600 baud (bloco VISA SERIAL), com palavras em 8 bits (VISA READER). A informação é recebida como um string, que é convertida em uma variável numérica. No LabVIEW, as linhas “rosas” representam fluxo de strings, enquanto as linhas “azuis” representam fluxo de variáveis numéricas do tipo inteiro. Variáveis Booleanas são representadas pelo barramento verde, como o botão STOP, no canto inferior direito do diagrama de blocos. O valor do campo magnético é então enviado para o Bloco de construção do gráfico, que é ajustado no painel frontal (Figura D2). O marcador no canto superior esquerdo indica o tempo que esses procedimentos serão realizados, para novamente serem repetidos indefinidamente. Neste caso, 10ms.

**Figura D2 – Painel frontal no Labview.**



## ÍNDICES DE ASSUNTOS

- Comunicação sem fio, 13
- Campo magnético, 14
  - Lei de Ampère e Lei de Faraday-Lens, 14
- Efeito Hall, 15
- ZigBee, 17
  - Dispositivos, 18
  - Topologias, 18
    - Formação de uma rede ZigBee, 19
- Integração do sensor com o Arduino, 20
- Comunicação via ZigBee, 22
- Testes realizados, 25