

Bruno Antônio de Pinho

***Avaliação do componente NRF51 da Nordic visando
sistemas de medições em hipismo***

São José – SC

Fevereiro / 2014

Bruno Antônio de Pinho

Avaliação do componente NRF51 da Nordic visando sistemas de medições em hipismo

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso Superior de Tecnologia em Sistemas de Telecomunicações do Instituto Federal de Santa Catarina para a obtenção do diploma de Tecnólogo em Sistemas de Telecomunicações.

Orientador:

Prof. Eraldo Silveira e Silva, Dr.

CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM SISTEMAS DE TELECOMUNICAÇÕES
INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA

São José – SC

Fevereiro / 2014

Monografia sob o título “*Avaliação do componente NRF51 da Nordic visando sistemas de medições em hipismo*”, defendida por Bruno Antônio de Pinho e aprovada em 28 de fevereiro de 2014, em São José, Santa Catarina, pela banca examinadora assim constituída:

Prof. Erado Silveira e Silva, Dr.
Orientador

Prof. Roberto de Matos, M. Eng.
IFSC

Prof. Marcio Henrique Doniak, M. Eng.
IFSC

A diferença entre ficção e realidade?

A ficção tem que fazer sentido.

Tom Clancy

Agradecimentos

Dedico meus sinceros agradecimentos àqueles que muito me ajudaram para concluir este trabalho.

Agradeço a toda a minha família por sempre me incentivar a sempre seguir em frente e em especial a meu pai por sempre estar preocupado comigo e sempre me motivar a continuar durante todo o meu período neste curso.

Agradeço também a meu orientador por nunca me deixar desistir deste projeto em todas as vezes que pensei nisso.

Resumo

Este trabalho se insere em um contexto mais amplo de um sistema de medição para apoio ao treinamento no hipismo. Neste sistema pretende-se usar sensores de baseados em RFID ativo localizados nas barreiras de modo a possibilitar não somente a medição de tempo de execução do circuito mas também outros parâmetros como velocidade de aproximação, posição entre outros. Os sensores escolhidos são baseados no componente NRF51 da *Nordic* que encapsula um processador e um módulo de rádio de baixa potência. Neste sentido, o trabalho teve como objetivo específico de estudar esta nova tecnologia e avaliar a potencialidade desta em sistemas de localização e rastreamento. A avaliação visa principalmente levantar curvas de potência recebida em função da distância entre transmissor e receptor, além de avaliar perda de pacotes em função da distância e o consumo de energia. Os resultados dos testes mostram instabilidade da potência recebida em distâncias pequenas quando são usadas antenas no circuito impresso. Resultados melhores foram conseguidos com dispositivos com antena externa. Pela avaliação inicial conclui-se que os componentes NRF51 podem ser usado na aplicação pretendida mas que métodos matemáticos adicionais devem ser usados para estimativa de parâmetros de interesse do sistema de medição a ser concebido.

Palavras-chave: RFID, hipismo, NRF51822, coleta de dados, sistema de medição.

Abstract

This work is part of a larger context of a measurement system for support training in equestrianism. In this system it is intended to use sensors based on active RFID located in barriers to enable not only the measurement of the runtime of the circuit but also other parameters such as approaching speed and position among others. The selected sensors are based on the Nordic NRF51 component which encapsulates a processor and a low power radio module. In this sense, the work had the objective of studying this new technology and evaluate the potential from this in location and tracking systems. The review aims primarily create the received power curves based on the distance between transmitter and receiver, besides evaluating packet loss based on distance, and the energy consumption. The results of tests show instability of the received power over short distances when printed circuit board antennas are used. Best results were obtained with devices that have external antenna. For the initial evaluation it is concluded that the components NRF51 can be used in the desired application but additional mathematical methods should be used to estimate parameters of interest for the measurement system to be designed.

Keywords: RFID, equestrianism, NRF51822, data collection, measurement system.

Sumário

Lista de Figuras

Lista de Abreviaturas p. 13

1 Introdução p. 15

1.1 Contexto e Motivação p. 15

1.2 Objetivos p. 16

1.3 Organização do texto p. 16

2 Fundamentação Teórica p. 18

2.1 Uma visão geral sobre RFID p. 18

2.1.1 Princípio de Funcionamento p. 18

2.1.2 Tipos de etiquetas p. 19

2.1.3 Onde o RFID ativo pode ser utilizado p. 21

2.2 Sistemas de Localização em Tempo Real p. 21

2.2.1 Tecnologias utilizadas para localização de objetos p. 22

2.2.2 Métodos utilizados para determinar o posicionamento do receptor . . . p. 22

2.2.3 Métodos utilizados para determinar a distância entre o transmissor e o receptor p. 24

2.3 O Projeto OpenBeacon p. 26

2.3.1 Visão geral do projeto p. 26

2.3.2 Componentes do sistema p. 26

2.3.3 Projetos derivados p. 27

2.4	Sistemas Comerciais e os produtos da <i>Nordic</i>	p. 29
2.4.1	NRF24LE1	p. 29
2.4.2	NRF51822	p. 29
2.5	Aplicações do RFID ativo no esporte equestre	p. 29
2.6	Conclusões	p. 30
3	Estudo dos kits de avaliação e desenvolvimento do NRF51	p. 31
3.1	Estrutura do NRF51822	p. 31
3.1.1	Cortex-M0	p. 32
3.1.2	Descrição do módulo de rádio	p. 35
3.1.3	Outros periféricos	p. 41
3.2	Kits e sistema utilizados do NRF51822	p. 43
3.2.1	PCA10000	p. 44
3.2.2	PCA10001	p. 44
3.2.3	PCA10004 e PCA10005	p. 44
3.3	O sistema de desenvolvimento	p. 45
3.4	Softwares e bibliotecas disponibilizadas pela <i>Nordic</i>	p. 46
3.5	Conclusão	p. 47
4	Experimentos de Avaliação	p. 49
4.1	Experimento 1 - Teste básico de comunicação	p. 49
4.2	Experimento 2 - Levantamento de curva da Potência recebida pela Distância	p. 50
4.3	Experimento 3 - Quantidade de erros durante a transmissão e controle da potência de transmissão	p. 58
4.4	Experimento 4 - Consumo de energia	p. 62
4.5	Conclusão	p. 66
5	Conclusões	p. 67

5.1	Análise de preenchimento de requisitos usando o NRF51	p.67
5.2	Conclusões Finais	p.68
5.3	Trabalhos Futuros	p.69
Anexo A – Imagens do Experimento 4 - Consumo de energia		p.70
Referências Bibliográficas		p.75

Lista de Figuras

2.1	Visão Geral Sistema RFID (THOMPSON, 2006)	p. 19
2.2	Exemplo de lateração para uma localização em 2D. (TEIXEIRA, 2010)	p. 23
2.3	Exemplo de angulação. (TEIXEIRA, 2010)	p. 24
2.4	Tag OpenBeacon. (http://www.openbeacon.org/File:BruCON2011-Tag.jpg) . .	p. 26
3.1	Diagrama em Blocos mostrando a estrutura do NRF51822 (NORDIC-SEMICONDUCTORS, 2013)	p. 32
3.2	Diagrama em Blocos mostrando a estrutura de um microcontrolador com um núcleo <i>Cortex-M0</i> (YIU, 2011)	p. 32
3.3	Diagrama em Blocos mostrando a estrutura do <i>Cortex-M0</i> (YIU, 2011)	p. 34
3.4	Mapa de memória mostrando as regiões do <i>Cortex-M0</i> (YIU, 2011)	p. 34
3.5	Mapa de memória mostrando as regiões do NRF51822 (NORDIC-SEMICONDUCTORS, 2013)	p. 36
3.6	Formato do quadro transmitido pelo NRF51822 (NORDIC-SEMICONDUCTORS, 2013)	p. 37
3.7	Diagrama em Blocos do módulo de rádio do NRF51822 (NORDIC-SEMICONDUCTORS, 2013)	p. 37
3.8	Diagrama em Blocos mostrando como são criados os endereços no NRF51822	p. 39
3.9	Diagrama de Fluxo mostrando o funcionamento do transceptor NRF51822 (NORDIC-SEMICONDUCTORS, 2013)	p. 41
3.10	Diagrama em Blocos da placa PCA10000 (NORDIC-SEMICONDUCTORS, 2013)	p. 44
3.11	Diagrama em Blocos da placa PCA10001 (NORDIC-SEMICONDUCTORS, 2013)	p. 45

3.12	Diagrama em Blocos das placas PCA10004 e PCA10005 (NORDIC-SEMICONDUCTORS, 2013)	p. 45
3.13	Rede sem fio usando o protocolo Gazell em uma topologia estrela (NORDIC-SEMICONDUCTORS, 2013)	p. 47
4.1	Fluxograma mostrando o funcionamento do procedimento utilizado para testar o funcionamento das placas.	p. 51
4.2	Fluxograma mostrando o funcionamento do procedimento utilizado para obter os valores para a criação das curvas	p. 53
4.3	Curvas da potência recebida nas três taxas de transmissão possíveis com pacotes de 1 byte.	p. 54
4.4	Curvas da potência recebida nas três taxas de transmissão possíveis com pacotes de 240 bytes.	p. 54
4.5	Cenário demonstrando como foi realizada a segunda parte do Experimento 2.	p. 55
4.6	Curvas da potência recebida nas três taxas de transmissão possíveis com pacotes de 1 byte com introdução de ruído.	p. 55
4.7	Curvas da potência recebida nas três taxas de transmissão possíveis com pacotes de 240 bytes com introdução de ruído	p. 56
4.8	Curvas da potência recebida nas três taxas de transmissão possíveis com pacotes de 1 byte utilizando a PCA10005.	p. 57
4.9	Curvas da potência recebida nas três taxas de transmissão possíveis com pacotes de 240 bytes utilizando a PCA10005.	p. 57
4.10	Procedimento para verificar a quantidade de pacotes perdidos	p. 59
4.11	Pacotes perdidos com a potência de transmissão em 0 dBm.	p. 60
4.12	Pacotes perdidos por erro de crc com a potência de transmissão em 0 dBm.	p. 60
4.13	Pacotes perdidos com a potência de transmissão em -20 dBm.	p. 61
4.14	Pacotes perdidos por erro de crc com a potência de transmissão em -20 dBm.	p. 61
4.15	Placa PCA10005	p. 62
4.16	Medição do consumo de energia transmitindo pacotes a uma taxa de 1 Mb com 4 dBm de potência	p. 63

4.17	Medição do consumo de energia transmitindo pacotes a uma taxa de 1 Mb com 0 dBm de potência	p. 63
4.18	Medição do consumo de energia transmitindo pacotes a uma taxa de 1 Mb com -20 dBm de potência	p. 64
4.19	Medição do consumo de energia recebendo pacotes a uma taxa de 1 Mb . . .	p. 64
4.20	Medição do consumo de energia com o módulo de rádio desativado	p. 65
4.21	Gráfico mostrando um comparativo do consumo de energia em todas os casos testados.	p. 65
A.1	Medição do consumo de energia transmitindo pacotes a uma taxa de 2 Mb com 4 dBm de potência	p. 70
A.2	Medição do consumo de energia transmitindo pacotes a uma taxa de 250 Kb com 4 dBm de potência	p. 71
A.3	Medição do consumo de energia transmitindo pacotes a uma taxa de 2 Mb com 0 dBm de potência	p. 71
A.4	Medição do consumo de energia transmitindo pacotes a uma taxa de 250 Kb com 0 dBm de potência	p. 72
A.5	Medição do consumo de energia transmitindo pacotes a uma taxa de 2 Mb com -20 dBm de potência	p. 72
A.6	Medição do consumo de energia transmitindo pacotes a uma taxa de 250 Kb com -20 dBm de potência	p. 73
A.7	Medição do consumo de energia recebendo pacotes a uma taxa de 2 Mb . . .	p. 73
A.8	Medição do consumo de energia recebendo pacotes a uma taxa de 250 Kb . .	p. 74

Lista de Abreviaturas

RFID *Radio Frequency Identification*

RSSI *Received Signal Strength Indicator*

SAW *Surface Acoustic Wave*

UII *Unique Item Identifier*

WORM *Write Once, Read Many*

RW *Read and Write*

SAW *Surface Acoustic Wave*

RTLS *Real Time Location System*

GPS *Global Positioning System*

ToA *Time of Arrival*

AoA *Angle of Arrival*

TDoA *Time Difference of Arrival*

GPL *GNU Public License*

SRAM *Static Random Access Memory*

EEPROM *Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory*

FIFO *First In First Out*

USB *Universal Serial Bus*

WDMI *Wireless Dimmer*

WMCU *Wireless Matrix Control Unit*

SoC *System-on-Chip*

HF *High Frequency*

MAC *Media Access Control*

UDP *User Datagram Protocol*

RF *Rádio Frequência*

CPU *Central Processing Unit*

RAM *Random Access Memory*

WIC *Wakeup Interrupt Controller*

NVIC *Nested Vectored Interrupt Controller*

APB *Advanced Peripheral Bus*

AHB *Advanced High-performance Bus*

JTAG *Joint Test Action Group*

SWD *Serial Wire Debug*

ULA *Unidade Lógica e Aritimética*

RTC *Real Time Counter*

WDT *Watchdog Timer*

TWI *Two Wired Interface*

UART *Universal Asynchronous Receiver/Transmitter*

IDE *Integrated Development Environment*

ESB *Enhanced Shock Burst*

AP *Access Point*

1 Introdução

1.1 Contexto e Motivação

Esse trabalho teve como inspiração inicial o desenvolvimento de um sistema de identificação, localização e medição de tempo aplicada ao hipismo. O hipismo é um conjunto de esportes praticados com cavalos e inclui o salto, polo, corrida, adestramento, entre outros. A modalidade de salto consiste na execução de um circuito onde o cavaleiro e seu cavalo devem passar por um total de 10 a 15 obstáculos ordenados em uma pista que mede entre 700 e 900 metros. A altura dos obstáculos varia de 40 cm a 165 cm, dependendo da categoria na qual se disputa.

Em uma visão inicial o sistema não seria utilizado somente para competições mas também como apoio ao treinador identificar as condições de aproximação, apoiando no diagnóstico nos problemas de salto. Existem alguns sistemas comerciais identificados (não nacionais) cujo sensoreamento é baseado em sistema fotoelétrico. Baseando-se em estudos anteriores realizados no âmbito do IFSC (GREFF; DONIAK, 2009), a concepção inicial do sistema levou a escolha do sensoreamento baseado em *Radio Frequency Identification* (RFID) ativo, que poderia proporcionar mais informações relevantes, possui baixo custo e é mais robusto que o sensoreamento fotoelétrico.

O RFID consiste em um pequeno transmissor de dados via rádio que permite enviar uma informação de identificação de algum objeto a ele associado. No RFID passivo o dispositivo é alimentado a partir da energia da onda eletromagnética transmitida por outro dispositivo, o leitor da identificação. O RFID pode ser usado em diversas tipos de aplicações de identificação e localização. No caso do RFID ativo, em que os sensores são alimentados localmente, pode-se ter capacidades adicionais de comunicação, localização por triângulação, entre outras.

Para a implementação da sistema de medição optou-se por usar os kits do componente NRF51822 da Nordic (NORDIC-SEMICONDUCTORS, 2013) devido a ser uma tecnologia mais recente, baixíssimo consumo, reduzido tamanho, capacidade de suportar o *Low Power Bluetooth* (*Bluetooth 4.0*), ser flexível e ter um módulo para controlar a potência e de verificar o

Received Signal Strength Indicator (RSSI), o que simplificaria os procedimentos de localização. A *Nordic* disponibiliza dois kits para o NRF51822 sendo um kit de avaliação e um kit de desenvolvimento. Juntamente com estes kits a *Nordic* disponibiliza uma série de programas de apoio e protocolos para o apoio ao desenvolvimento de aplicações.

Considerando que a tecnologia a ser usada é nova e necessitaria de um investimento para o seu domínio, decidiu-se por mudar o foco do trabalho mas mantendo o contexto do sistema de mediação discutido. No lugar de partir para a especificação, projeto e implementação de uma aplicação, limitou-se o trabalho a um estudo da nova tecnologia e uma avaliação das potencialidades da mesma no sistema alvo. Inclui-se nesta avaliação os testes para verificar a perda de pacotes e potência do sinal recebido em função da distância, capacidade de controle da potência transmitida e o consumo de energia.

1.2 **Objetivos**

O objetivo do trabalho é o estudo e a avaliação da tecnologia de RFID ativo disponibilizada pela *Nordic*, através do componente NRF51822, verificando a sua aplicabilidade em sistemas de identificação e localização.

Como objetivos específicos coloca-se:

- estudo do hardware e software do componente NRF51822, das suas placas de desenvolvimento e avaliação, e do software de suporte;
- planejamento e execução de testes para avaliação do controle da potência transmitida, leitura de RSSI, perda de potência e de pacotes em função da distância e consumo de energia.
- avaliação inicial da aplicabilidade do NRF51822 no sistema de medição para hipismo.

1.3 **Organização do texto**

O texto está organizado da seguinte forma: no Capítulo 2 é apresentada a fundamentação teórica do trabalho. Neste capítulo apresenta-se o funcionamento e utilização de sistemas RFID e um resumo das tecnologias utilizadas em sistemas de localização. O projeto *OpenBeacon* é apresentado como referência para o RFID ativo e por usar os primeiros componentes de RFID ativo da *Nordic*. No Capítulo 3 será abordado o estudo dos dispositivos baseados no NRF51822

da *Nordic* e que estão sendo avaliados para uso no sistema de medição para o hipismo. No Capítulo 4 serão descritos os testes feitos com os componentes para averiguar a possibilidade de sua utilização na proposta. Ao final do capítulo apresenta-se uma primeira análise de viabilidade na aplicação do NRF51 no sistema alvo. Por fim, no Capítulo 5 são apresentadas as conclusões e a possibilidade de trabalhos futuros.

2 *Fundamentação Teórica*

Este capítulo apresenta algumas referências teóricas para a proposta. Inicialmente será apresentada uma visão geral sobre sistemas RFID e em particular, sobre o RFID com etiquetas ativas a ser explorado neste trabalho. Na sequência é realizado um sumário sobre técnicas de localização em tempo real sendo detalhada uma técnica de localização baseada em lateração que potencialmente será usada no sistema de medição vislumbrado. O projeto *Openbeacon* e seus derivados, uma das fontes de inspiração do trabalho é então apresentado. Os produtos da *Nordic* associados ao RFID ativo são apresentados na sequência. Finalmente, são discutidas aplicações do RFID em sistemas de medição e localização para esporte, e em específico, as possibilidades de aplicação em esportes de equitação, tendo como objetivo inicial a modalidade de salto, contexto no qual se insere esta proposta.

2.1 Uma visão geral sobre RFID

O RFID tem suas origens na segunda guerra mundial. Durante a guerra já era possível identificar a presença de aviões inimigos com a ajuda de radares, porém não era possível saber se o avião era de um inimigo ou de um aliado. Os alemães porém acabaram descobrindo que se os aviões girassem enquanto voltavam para base, o sinal era refletido de volta (funcionando como um sistema RFID passivo). Desde então, a pesquisa na área de RFID vem recebendo altos investimentos existindo hoje muitos sistemas comerciais na área de identificação e localização.

2.1.1 Princípio de Funcionamento

O RFID (HUNT; PUGLIA; PUGLIA, 2007) é uma tecnologia de comunicação sem fio que permite a um usuário a identificar um objeto ou pessoa. A Figura 2.1 mostra uma visão geral do sistema.

Como pode ser observado na Figura 2.1 um sistema RFID é composto por três componentes básicos: uma etiqueta, um leitor e um sistema de hospedagem envolvendo a aplicação, base

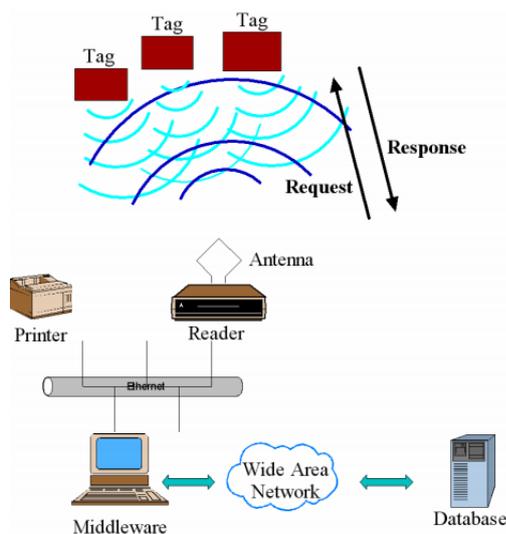


Figura 2.1: Visão Geral Sistema RFID (THOMPSON, 2006)

de dados, entre outros. Permeando estes componentes, normalmente existe uma camada intermediária de software que presta serviços, referentes ao RFID, para a aplicação. Trata-se de um *middleware* voltado ao sistema RFID.

A etiqueta (*tag*) é composta basicamente por um chip semicondutor e uma antena. A função básica da etiqueta é armazenar uma informação (pode ser um número de série, instruções, etc) e transmiti-las através de um sinal.

A função do leitor (*reader*) é fazer a comunicação entre a etiqueta que identifica o usuário e o *middleware*, que faz a interface com a *aplicação*. Adicionalmente a isso ele pode criptografar/descriptografar a informação, fazer autenticação e implementar alguma forma de evitar colisões entre pacotes. A antena pode estar acoplada diretamente ao leitor ou ser um produto a parte.

2.1.2 Tipos de etiquetas

Quanto a fonte de alimentação da etiqueta, pode-se ter as seguintes classificações:

- **Passivas:** As etiquetas passivas usam a energia captada do sinal recebido do leitor, para enviar o sinal de retorno. Graças a esse fator, elas se tornam menores e mais baratas que as etiquetas ativas porém elas possuem um alcance menor, uma memória interna menor, e precisam de um leitor com uma maior potência para transmitir o sinal;
- **Ativas:** As etiquetas ativas, por sua vez, possuem uma bateria interna o que permite um sinal com alcance maior, tipicamente também possuem memórias maiores (até 128 KB),

porém devido a esses fatores elas, são maiores, possuem um preço maior e um tempo de vida menor (de 2 a 7 anos) (HUNT; PUGLIA; PUGLIA, 2007);

- **Semi-Ativas:** A etiqueta semi-ativa tem como objetivo ter as vantagens tanto da passiva quanto da ativa e eliminar as desvantagens de ambas. As etiquetas semi-ativas assim como as ativas possuem uma bateria interna, porém ao contrário destas, elas não utilizam sua bateria interna para se comunicar. Para a comunicação, as etiquetas semi-ativas funcionam do mesmo modo que as passivas devido a isso o tempo de vida da bateria aumenta consideravelmente;
- **Surface Acoustic Wave (SAW):** As etiquetas SAW são etiquetas passivas, porém elas funcionam de uma maneira diferente das etiquetas normais. Ao contrário das etiquetas normais onde um semicondutor físico provê a energia, as etiquetas SAW convertem o sinal do leitor em ondas acústicas de superfície na superfície do chip, estas passam através de refletores que codificam um único trem de pulsos, este trem de pulsos é então convertido em uma onda de rádio e então transmitido (JONES; CHUNG, 2010).

As etiquetas também podem ser classificadas em relação a sua capacidade de armazenamento:

- **Single-bit:** Esse tipo de etiqueta possui um único bit armazenado e somente pode ser lida. Essa etiqueta é utilizada em lojas como um sistema anti-roubo. Assim, caso o cliente tente sair da loja sem pagar a etiqueta irá funcionar como um interruptor acionando o alarme;
- **UII:** (*Unique Item Identifier* (UII) ou para o português Identificador Único de Item) essas etiquetas já vem com um numero de série armazenado de fabrica e não podem ser modificadas;
- **Write Once, Read Many (WORM):** são etiquetas que podem ser configuradas uma única vez pelo o usuário e, após isso, poderão apenas ser lidas. Elas são usadas para armazenar o número de série de um produto;
- **Read and Write (RW):** essas etiquetas são o tipo mais sofisticado e versátil dos quatro podendo ser programadas para armazenarem informações ou instruções. A informação armazenada também pode ser encriptada além disso a ela também permite que sua memória seja reescrita (HANSEN; GILLERT, 2008).

2.1.3 Onde o RFID ativo pode ser utilizado

O RFID ativo por ter um alcance maior é normalmente utilizado em sistemas de localização para projetos nas mais diversas áreas como:

- **Segurança:** O *TSI PRISM RFID* é um sistema de localização desenvolvido pela empresa Alanco para presídios com o objetivo de eliminar o custo da contagem manual de detentos, diminuir os custos do sistema prisional e tornar o ambiente mais seguro. Entre as funcionalidade do sistema se encontram identificação e localização individual, distribuição de alimentos e medicamentos, gerenciamento de áreas restritas e locais específicos, informações de entrada e saída.
- **Automóveis:** Uma companhia do Reino Unido está desenvolvendo uma placa de automóveis com RFID ativo. O sistema possibilita os sensores de velocidade e outros mecanismos a identificar automóveis em uma distancia de até 300 metros. O sistema tem como objetivos por pedágios, para pagamento eletrônico, localização, roubos, etc (HUNT; PUGLIA; PUGLIA, 2007).
- **Esportes:** Um dos meios utilização do RFID nos esportes é embutindo etiquetas nos ingressos. Isso foi feito em 2005 na *Tennis Master's World Cup* e em 2006 na Copa do Mundo FIFA, com o intuito de aumentar a segurança e evitar falsificações de ingressos.

O RFID também pode ser empregado diretamente nos esportes. Um exemplo desse tipo de utilização está no golfe onde é muito comum os golfistas ficarem horas procurando a bola após uma tacada ruim, para resolver esse problema a empresa *Radar Golf* desenvolveu um equipamento com um leitor embutido permitindo assim a localização da bola. O aparelho funciona de modo muito semelhante a de um detector de metais, emitindo um som que aumenta gradualmente conforme o usuário se aproxima da bola.

O golfe porém não é o único esporte a utilizar o RFID: maratonistas, ciclistas, triatletas, e esquiadores também o utilizam já que com ele é possível gravar informações em tempo real além de ser possível localizar os participantes durante o percurso.

2.2 Sistemas de Localização em Tempo Real

Um Sistemas de Localização em Tempo Real ou do inglês *Real Time Location System* (RTLS) permite localizar, gerenciar, analisar, ou ainda utilizar as informações sobre as pessoas

ou objetos que estejam utilizando um dispositivo que faça uso de uma tecnologia que permita uma localização em tempo real.

2.2.1 Tecnologias utilizadas para localização de objetos

Não existe uma tecnologia utilizada para implementação de sistemas de localização em tempo real que seja boa (tenha baixo custo, alta precisão e cobertura universal) para todos os tipos ambientes por isso é necessário escolher a tecnologia que melhor se adapta as necessidades do projeto.

GPS

O Sistema de Posicionamento Global ou do inglês *Global Positioning System* (GPS) foi criado em 1973, sendo constituído por um grupo de 24 satélites, e concebido inicialmente com fins militares porém após os anos 80 se tornou disponível para o público em geral. O GPS determina a posição de um objeto através de uma lateração, por isso é necessário que o receptor receba o sinal de pelo menos quatro satélites (PAZ; CUGNASCA; SARAIVA, 1997).

WI-FI

É possível usar uma rede Wi-Fi em conjunto com protocolos para se criar um RTLS, uma das vantagens desse sistema é a possibilidade de se usar um único ponto de acesso para fazer a localização embora que conseqüentemente faça com que o sistema tenha uma baixa precisão.

RFID

É possível ter um RTLS com RFID através de uma triangulação ou lateração através da potência do sinal. Um dos cenários em que esse tipo de sistema pode ser utilizado é quando se tem vários leitores recebendo o sinal de uma ou mais etiquetas, como cada leitor receberá uma potência diferente é possível se ter uma relação da distância entre as etiquetas e cada um dos leitores e assim saber a posição das etiquetas (ABREU et al., 2010).

2.2.2 Métodos utilizados para determinar o posicionamento do receptor

Existem diferentes métodos para se determinar o posicionamento de um objeto, porém cada um deles se adapta melhor a um determinado cenário e deve-se verificar qual deles se adapta melhor a suas necessidades. Entre os principais estão:

Triangulação

“A **triangulação** consiste em utilizar as propriedades geométricas dos triângulos para determinar a localização de um objeto. Pode ser dividida em dois grupos: **lateração** que utiliza distâncias e **angulação**, em que são utilizados ângulos.” (TEIXEIRA, 2010)

Lateração São necessários pelo menos três pontos de referência (transmissores), cuja posição deve ser conhecida. Se a distância entre os transmissores e o receptor pode ser medida, é possível desenhar círculos utilizando como base essa medida para o raio. A localização do receptor se dá na área de intersecção desses círculos (Figura 2.2), porém, os valores obtidos dos transmissores geralmente são correspondentes a potência do sinal e não a distância e, portanto, é necessário que haja uma conversão. Embora o procedimento descrito seja válido para uma localização em 2D, para uma localização em 3D há poucas diferenças que são a adição de um quarto ponto de referência, que é utilizado para a altura, e ao invés de círculos são usadas esferas.

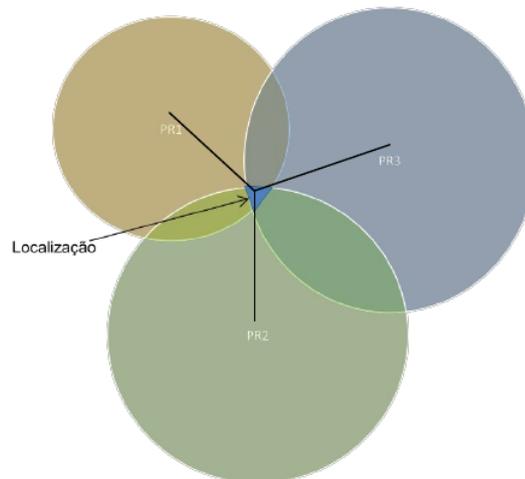


Figura 2.2: Exemplo de lateração para uma localização em 2D. (TEIXEIRA, 2010)

Angulação

“A angulação é muito semelhante à lateração, exceto no que se refere a utilização de distâncias para calcular a posição em duas dimensões são necessários dois ângulos e a distância entre dois pontos de referência.

Na localização em três dimensões são necessários dois ângulos, a distância entre dois pontos de referência e uma medida de azimute ¹ como pode ser visto na Figura 2.3. No

¹Um azimute é uma direção dada em graus, variando de 0 a 360, sendo 0 correspondente ao norte e aumentando no sentido horário.

entanto, a angulação exige que sejam utilizadas antenas específicas, capazes de determinar a origem e o ângulo do sinal recebido.”(TEIXEIRA, 2010)

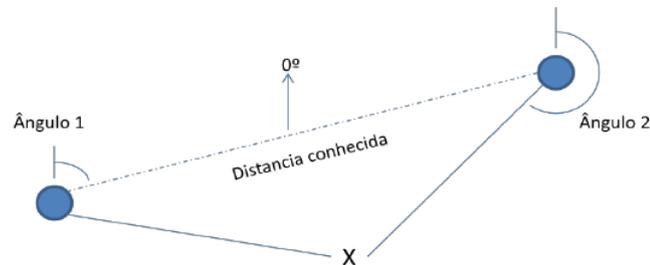


Figura 2.3: Exemplo de angulação. (TEIXEIRA, 2010)

Analise de padrões

Esse método tem como base a formulação de um modelo de referência do ambiente, um mapa, que identifique o ambiente através de valores que sirvam de base para a localização. Para isso seja possível deve ser feito um período de aprendizagem quando o sistema for utilizado pela primeira vez e que deve ser usado novamente sempre que houverem mudanças no local que possam levar a alterações no modelo já existente. Entre os principais métodos de se implementar essa solução estão:

Captura de imagens: Nesse caso um aparelho fica capturando imagens até que haja uma alteração em um padrão já pré-inserido (uma imagem de referencia) no sistema e assim tomar alguma medida.

Finger Print: Esse procedimento é feito em duas etapas. A primeira etapa é a de treinamento onde é criado uma base de dados que relaciona a potência do sinal recebido e uma posição esse procedimento é feito com diversos transmissores diferentes para assim se criar um mapa. A segunda etapa é a localização em tempo real onde são utilizados algoritmos para se determinar a localização do receptor com base no mapa montado durante a etapa de treinamento.

2.2.3 Métodos utilizados para determinar a distância entre o transmissor e o receptor

As tecnologias utilizadas para fazerem localização utilizam métodos (técnicas) para determinar a distância entre os transmissores e o receptor para assim determinar a sua posição porém

não existe um método que seja eficiente para todos os ambiente (TEIXEIRA, 2010). Alguns métodos utilizado são:

Time of Arrival (ToA)

Faz a medição da distância através do tempo que o sinal leva para se propagar entre o transmissor e o receptor. Dependendo do tipo de sinal utilizado (Rádio Frequência (RF) ou ultrassom) se usa a velocidade da luz ou do som para se fazer o cálculo da distância. Este tipo de medição necessita que o receptor e o transmissor estejam sincronizados aumentando assim a complexidade, consumo de energia e custo do sistema.

Time Difference of Arrival (TDoA)

Assim como o **ToA** o **TDoA** faz o cálculo da distância através do tempo de propagação do sinal, porém ao contrário do **ToA**, os receptores e o transmissor não precisam estar sincronizados, em contra partida os receptores necessitam ter relógios internos sincronizados entre eles e que possam ser sincronizados periodicamente. O **TDoA** faz a medição verificando o tempo de recepção em cada um dos receptores para então estimar a diferença nos instantes de recepção do sinal em cada receptor (PEREIRA et al., 2011).

Angle of Arrival (AoA)

“Exige que o ambiente em estudo possua um conjunto de antenas direcionais (cobrindo 360 graus) em cada ponto de acesso. Ao receber um sinal de uma estação móvel o ponto de acesso determina qual antena recebe o sinal com maior amplitude, dessa forma indica a direção de onde o sinal foi gerado, este procedimento é feito com outro ponto de acesso e nesse caso têm-se duas linhas onde é possível identificar a localização da estação através da intersecção das linhas.” (BISATTO; PERES, 2009)

RSSI

A atenuação do sinal transmitido em função da distância entre o transmissor e o receptor pode ser usada para se determinar a localização do receptor. O receptor pode ser localizado com pelo menos três pontos de referência e a sua atenuação correspondente (BOUET; SANTOS, 2008).

2.3 O Projeto OpenBeacon

O projeto *OpenBeacon*² (OPENBEACON, 2013) foi fundado em 2006 pela companhia *Bit-manufaktur GmbH* como uma plataforma aberta para aplicações com RFID ativo operando na banda de 2.4 GHz. O *Openbeacon* é baseado em software livre, muito flexível, reprogramável e de baixo custo. Os códigos de *firmware* e os esquemáticos de hardware se encontram disponíveis sobre a *GNU Public License (GPL)*.

2.3.1 Visão geral do projeto

Um sistema *Openbeacon* é um conjunto específico de software e hardware envolvendo *Openbeacons* que implementam uma funcionalidade específica. Embora o *Openbeacon* seja muito flexível e cada sistema acabe sendo diferente do outro a maioria deles podem ser classificadas de duas maneiras:

- **Mestre/escravo** é o clássico sistema RFID onde um ou mais *Openbeacons* (etiquetas) trocam informações com dispositivos chamados estações base (leitores);
- **Peer-to-Peer** neste tipo de sistema os *Openbeacons* comunicam-se uns com outros diretamente de tal maneira que acabam criando uma rede *mesh*.

2.3.2 Componentes do sistema



Figura 2.4: Tag OpenBeacon. (<http://www.openbeacon.org/File:BruCON2011-Tag.jpg>)

²Todas as informações sobre o *OpenBeacon* foram retiradas do site do projeto.

OpenBeacon tag

A etiqueta *Openbeacon* (Figura 2.4) é constituída basicamente por um microcontrolador PIC16F688 e um transceptor NRF24L01. O microcontrolador PIC16F688 possui 14 pinos, opera numa faixa 2 V a 5.5 V, clock de 20 MHz, tem memória flash de 4096 palavras (cada palavra possui 14 bits), memória *Static Random Access Memory* (SRAM) e *Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory* (EEPROM) de 256 bytes (MICROCHIP, 2004). O NRF24L01³ é um transceptor de 2.4 GHz, baixo custo, baixo consumo de energia, opera a 1 ou 2 Mbps, 40 bits de endereçamento, 80 canais, transmissor e receptor *First In First Out* (FIFO) de 32 bytes .

OpenBeacon USB 1 e USB 2

Os *Openbeacons* USB 1 USB 2 são leitores com microcontroladores *ARM Cortex-M3* programáveis (AT91SM7 e LPC1343). O USB 1 funciona como um dispositivo USB podendo ser conectado diretamente ao computador e acessado via *HyperTerminal* (como o *minicom* por exemplo). O USB 2 assim como o USB 1 pode ser reprogramado via *Universal Serial Bus* (USB), nesse caso via micro USB, utilizando um *gcc toolchain*. O USB 2 permite carregar uma bateria externa através da entrada micro USB, possui uma interface bluetooth permitindo uma conexão wireless com o computador, 4 MB de memória flash para armazenamento de dados, um acelerômetro de 3 eixos para permitir detecção e orientação tridimensional, 3 botões que permitem uma interface simples com o usuário e 11 pinos para expansão.

EasyReader

O *Openbeacon* EasyReader é um leitor que possui um processador *ARM 32 bits* (AT91SAM7X), 2 interfaces RF *Openbeacon*, micro SD para armazenamento de dados, entrada *Ethernet* e 20 pinos para expansão.

2.3.3 Projetos derivados

Sputnik

O projeto Sputnik é um sistema para localização em tempo real dentro de construções usando a etiqueta *Openbeacon*.

³Informações retiradas do site da *Nordic Semiconductors*

A etiqueta *Openbeacon* é usada em combinação com 25 estações base (leitores) para facilitar a localização. As etiquetas transmitem quadros aleatoriamente com diferentes níveis de potência. Se o pacote for recebido por uma ou mais estações base é possível se ter uma ideia sobre a sua localização.

As estações base não exploram diferenças de tempo ou triangulação e sim apenas o nível do sinal para fazer o posicionamento.

Blinkenlights

O projeto blinkenlights foi realizado em Toronto onde um total de 960 janelas, divididas em duas construções separadas, deveriam ser iluminadas individualmente e conexões cabeadas precisavam ser evitadas devido a manutenção, o objetivo é que cada lâmpada funcionasse como um *pixel* para a formação de imagens. Para que isso fosse possível foram criados dois dispositivos:

- **Wireless Dimmer (WDMI):** Em cada lâmpada relevante da construção foi instalado um WDMI. O propósito era receber uma informação através da rede sem fio e desligar ou ligar a lâmpada através da técnica de controle de fase.

O WDMI foi feito com base em um Atmel ARM SAM7S como processador e um NRF24L01 *High Frequency* (HF) para comunicação RF.

- **Wireless Matrix Control Unit (WMCU):** O WMCU é um dispositivo feito com base em um processador *Atmel ARM SAM7X* feito para a instalação do *Blinkenlights*. Ele possui uma interface *Ethernet* em um lado e um *Openbeacon* RF do outro. Para a comunicação RF assim como no WDMI foi utilizado um NRF24L01 HF.

O WMCU tem uma lista interna de até 32 lâmpadas que pode controlar e possui a linha, a coluna e o endereço *Media Access Control* (MAC) do WDMI de cada uma delas. Quando um pacote *User Datagram Protocol* (UDP) contendo as informações da imagem a ser exibida é recebida pelo *firmware* a informação de cada pixel individual é dividida para cada lâmpada relevante para então ser extraída e em seguida transmitida em *broadcast* para todos os WDMI's.

Na instalação do Blinkenlights em Toronto cada um dos 36 andares foi instalado um WMCU conectado a rede *Ethernet* controlando 22 ou 30 lâmpadas. Para cada lâmpada foi instalado um WDMI configurado para um pixel em uma posição específica na matriz global assim o WDMI saberia quando piscar .

2.4 Sistemas Comerciais e os produtos da Nordic

Existem vários sistemas comerciais de RFID. Como foi visto até aqui o interesse do projeto recaí sobre RFID ativo. Baseando-se nos estudos do projeto *Openbeacon* (descrito anteriormente) foi averiguado que o transceptor utilizado nas etiquetas já não é mais fabricado, porém foram encontrados dois novo produtos que o substituíam o NRF24LE1 e o NRF51822.

2.4.1 NRF24LE1

O NRF24LE1 é um *System-on-Chip* (SoC), ou seja é um sistema completo com microcontrolador e o subsistema de RF. Ele possui como núcleo um transceptor de 2.4 GHz, uma *Central Processing Unit* (CPU) de 8-bits compatível com 8051, memória flash interna de 16 KB, um oscilador de 32 kHz e um baixo consumo de energia que permite que a bateria tenha uma vida útil de meses a anos.

2.4.2 NRF51822

O NRF51822 assim como o NRF24LE1 é um SoC, porém possui uma CPU de 32-bits (*ARM Cortex-M0*), memória flash de 256 kB além de 16 kB de memória *Random Access Memory* (RAM), transceptor de 2.4 GHz compatível com *bluetooth*, taxa de transmissão de até 2 Mbps, potência de transmissão de até 4 dBm. Devido a versatilidade o NRF51822 ele foi escolhido como potencial componente para o desenvolvimento da aplicação e foi estudado com detalhes neste trabalho

A Nordic comercializa placas de desenvolvimento para estes chips que facilitam a depuração e testes do sistema.

2.5 Aplicações do RFID ativo no esporte equestre

Alguns sistemas RFID de localização em tempo real tem sido usado no hipismo para melhorar a postura de atletas como é o caso do produto desenvolvido pela empresa *Integrated Equine Technologies*. Normalmente, instrutores e cavaleiros costumam avaliar seu desempenho treinando numa arena cercada por espelhos e assim, vendo a sua desenvoltura e a de seu cavalo ou trazendo um amigo para filmar a performance, porém o sistema desenvolvido pela empresa escolhe o melhor ângulo para ser filmado através de 2 câmeras motorizadas instaladas no estábulo que se guiam através de etiquetas presas no corpo do cavalo (SWEDBERG, 2007).

Em outro exemplo do RFID sendo usado para melhorar o desempenho de atletas no hipismo, tem-se um estudo feito pela *University College Dublin* onde foram usadas etiquetas RFID para verificar a postura de cavaleiros (novatos e experiente) durante as performances para coletar dados e assim ajudar a melhorar o desempenho dos atletas (PATTERSON et al., 2010).

2.6 Conclusões

Neste capítulo foram explorados conceitos e fundamentos que estão associados ao sistema de medição para hipismo. Em particular, alguns métodos de localização já consolidados foram apresentados. Inicialmente avaliou-se a possibilidade de utilizar um método simples de lateração para uma primeira implementação do sistema. O componente NRF51 da *Nordic* demonstrou ser uma opção interessante a ser investigada. Uma barreira poderia ser dotada de dois sensores com distância conhecida. Isto permitiria avaliar a distância de um cavalo e sua velocidade de aproximação. Sendo sensores miniatura, poderiam ser facilmente colocados no momento de treinamento ou de uma prova.

No capítulo seguinte será apresentado o estudo feito do componente escolhido para se utilizado no projeto bem como de seus kits de avaliação e de desenvolvimento.

3 *Estudo dos kits de avaliação e desenvolvimento do NRF51*

Este capítulo apresenta o estudo feito para a compreensão dos dispositivos utilizados neste trabalho. Inicialmente será apresentado o componente NRF51822 onde será detalhado a estrutura de sua CPU, o funcionamento do módulo de rádio e uma breve visão sobre outros periféricos que poderão vir a ser utilizados no sistema proposto. Na sequência serão vistos os kits de avaliação e desenvolvimento para o NRF51822 fornecidos pela *Nordic*. Em seguida será dada uma breve visão do sistema de desenvolvimento de software utilizado neste trabalho. Por fim, são descritos alguns protocolos de comunicação disponibilizados pela *Nordic*.

3.1 Estrutura do NRF51822

Como pode ser visto através da Figura 3.1 a estrutura do NRF51822 é composta basicamente por:

- uma *CPU ARM Cortex-M0*;
- uma memória flash de 256 kB e uma memória *RAM*;
- dois osciladores um de 32.768 kHz e outro 16 MHz;
- entradas e saídas para sinais analógicos e digitais;
- temporizadores e registradores;
- pinos de entrada e saída;
- fonte de alimentação;
- módulo de rádio o qual será o foco desse estudo que será descrito na seção 3.1.2;
- outros periféricos de suporte ao funcionamento.

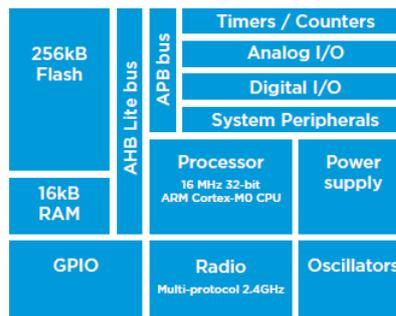


Figura 3.1: Diagrama em Blocos mostrando a estrutura do NRF51822 (NORDIC-SEMICONDUCTORS, 2013)

3.1.1 Cortex-M0

ARM Cortex-M é uma família de núcleos de processador com arquitetura RISC de 32-bit, principalmente usados em microcontroladores. Os núcleos que compõem a família são *Cortex-M0*, *Cortex-M1*, *Cortex-M3*, *Cortex-M4*. Os processadores da família *ARM Cortex-M* são compatíveis com os binários das versões anteriores, permitindo a reutilização de software e uma progressão contínua de um processador *Cortex-M* para outro (ARM, 2013).

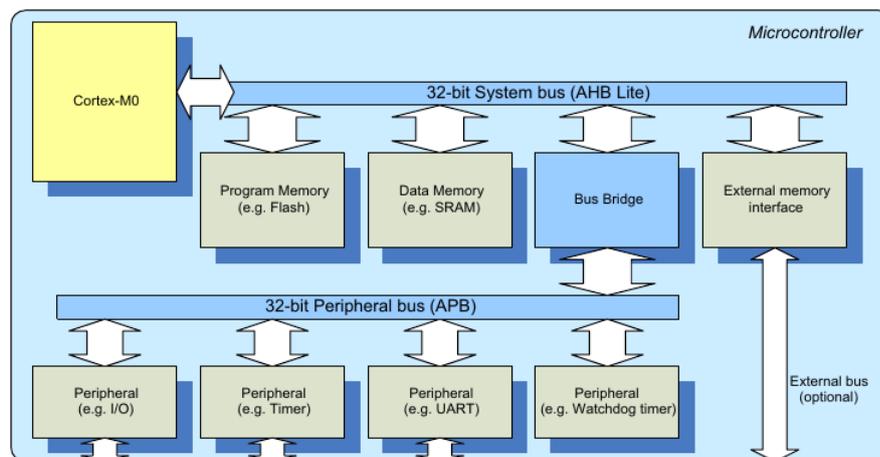


Figura 3.2: Diagrama em Blocos mostrando a estrutura de um microcontrolador com um núcleo *Cortex-M0* (YIU, 2011)

O *Cortex-M0* possui um sistema barramento de 32 bits com linhas de endereçamento de 32 bits o que resulta em um espaço de endereçamento de 4 GB. Os microcontroladores com um núcleo *Cortex-M0* utilizam dois sistemas de barramento que são o *Advanced High-performance Bus* (AHB) e o *Advanced Peripheral Bus* (APB) (Figuras 3.1 e 3.2). O *Cortex-M0* em si utiliza em sua estrutura interna apenas *AHB-Lite* como mostra a Figura 3.3. Além do *AHB-Lite* o *Cortex-M0* ainda é composto por: um núcleo de processamento; uma interface para depuração (*JTAG/Serial-Wire*); um subsistema de depuração; o barramento interno do sistema; o *WakeUp Interrupt Controller* (WIC) e o *Nested Vectored Interrupt Controller* (NVIC).

O núcleo de processamento é composto por: um banco de registradores; a Unidade Lógica e Aritimética (ULA); barramento e controle logico. O banco de registradores é composto por 16 registradores de 32-bits.

O NVIC aceita até 32 sinais de requisição para interrupção e uma interrupção não mascarável. O NVIC compara a prioridade entre as requisições de interrupção e nível de prioridade da interrupção atual assim interrupções aninhadas podem ser controladas automaticamente.

O WIC é uma unidade opcional que é usada em aplicações com baixo consumo de energia permitindo que o microcontrolador entre em um estado de espera onde a maior parte do processador é desativado (incluindo a unidade de processamento). Quando uma requisição de interrupção é detectada pelo WIC o núcleo de processamento e o NVIC são ativados para que eles possam tratar a requisição.

O subsistema de depuração consegue controlar controle de depuração, *breakpoints* e *watchpoints*. Quando ocorre um evento de depuração o subsistema de depuração coloca o núcleo de processamento em um estado de espera para que o desenvolvedor consiga observar o estado do processador naquele instante.

As unidade de interface *Joint Test Action Group* (JTAG) provê acesso as funcionalidades dos sistemas de barramento e depuração. O JTAG é um protocolo popular de comunicação que utiliza 5 pinos, esse protocolo é comumente utilizado para testes. Adicionalmente, também é fornecido o *serial wire*, que é protocolo mais recente que utiliza apenas dois fios embora consiga lidar com as mesmas funcionalidades de depuração que o JTAG.

O *AHB-Lite* provê um alto desempenho e é um barramento utilizado para fazer a conexão entre a CPU e o sistema de memória.

O APB, faz a conexão entre o *AHB-Lite* e os periféricos. Embora o *APB* assim como o *AHB-Lite* também possua 32 bits as linhas de endereçamento dos periféricos normalmente são menores que isso e o espaço de endereçamento dos periféricos é relativamente pequeno. Em alguns casos pode haver periféricos que necessitem de um alto desempenho e por isso estejam ligados diretamente ao *AHB-Lite*.

A memória do *Cortex-M0* é dividida em varia regiões, cada uma dessas regiões é recomendada para uma determinada utilização, conforme pode ser visto na Figura 3.4, isso faz com que o código escrito seja mais facilmente portado para diferentes microcontroladores com a mesma arquitetura.

- **Code Region:** possui 512 MB de espaço e seu uso primário é o armazenamento do código

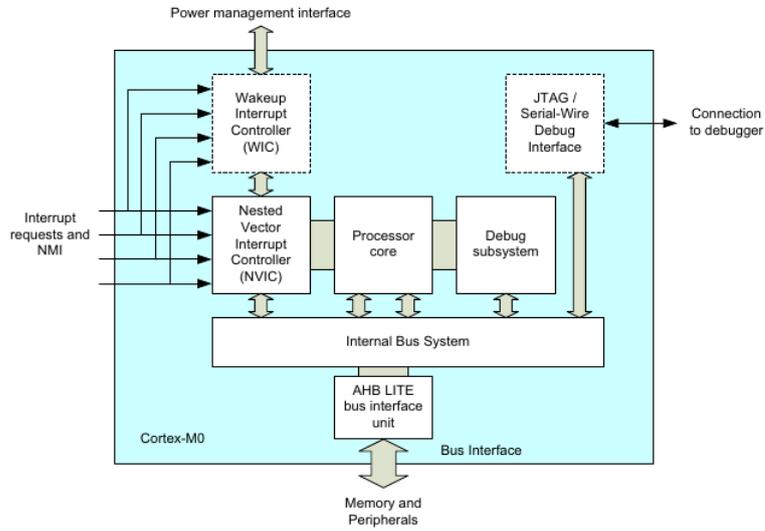


Figura 3.3: Diagrama em Blocos mostrando a estrutura do *Cortex-M0* (YIU, 2011)

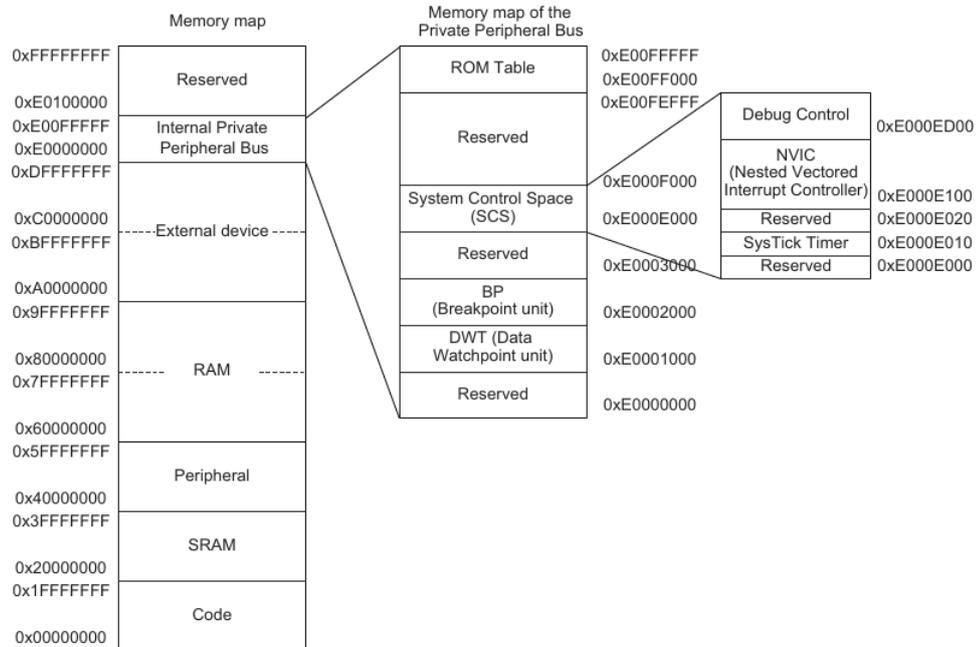


Figura 3.4: Mapa de memória mostrando as regiões do *Cortex-M0* (YIU, 2011)

porém caso seja necessário também pode vir a armazenar informação.

- **SRAM Region:** é usada para armazenar informação, porém caso necessário também pode ser utilizada para armazenar código.
- **Peripheral Region:** possui 512 MB de espaço e é usada primariamente pelos periféricos, também pode vir a ser utilizada para armazenamento de informação, porém ao contrario da *SRAM Region* e *Code Region* não pode armazenar um código executável.
- **RAM Region:** assim como a *SRAM Region* ela também é usada para armazenar informação e caso necessário armazenar código. Essa área é dividida em dois blocos de 512 MB.
- **Device Region:** assim como a *RAM Region* possui dois blocos 512 MB e é usada pelos periféricos, entradas e saídas. A *Device Region* não aceita códigos executáveis porém pode ser usado para armazenamento de informação.
- **Internal Private Peripheral Bus:** possui um espaço de 1 MB e é usado pelos periféricos internos do processador como os controles de interrupção e componentes de *debug*.
- **Reserved Memory Space:** Essa área possui 511 MB de espaço e é reservada para os fabricantes decidirem como será usada.

Embora o *Cortex-M0* tenha um mapa de memória pré-definido ele é bastante flexível permitindo que os fabricantes de microcontroladores configurem seus próprios mapas de memória como é caso por exemplo da *Nordic* com o NRF51822, como mostra a Figura 3.5, que utiliza um mapa de memória otimizado para seu funcionamento porém não divergindo do mapa pré-definido do *Cortex-M0* como visto na Figura 3.4 (YIU, 2011) .

3.1.2 Descrição do módulo de rádio

O módulo de rádio é a parte principal do componente para este projeto já que é o responsável por toda a parte de transmissão e recepção de pacotes, ou seja ele é o responsável pela comunicação entre os componentes. O módulo de rádio porém é uma parte um pouco complexa deste componente por isso ela será dividida nas seguintes seções: o formato dos pacotes, a forma de endereçamento e o transceptor.

Formato dos pacotes

Como pode ser visto através da Figura 3.7 existe um protocolo de transmissão que é implementado em máquina e sua configuração é feita diretamente na memória do *chip*. O quadro

- **CRC:** esse campo serve para verificação de erros durante a transmissão e é adicionado automaticamente ao pacote.

Como observado o pacote fica armazenado na memória *RAM* do componente. A variável **PACKETPTR** é um ponteiro para a área de memória onde o pacote está armazenado, porém como pode ser visto através da Figura 3.7 a informação que fica armazenada é referente aos campos **S0**, **S1**, **Length** e **Payload** pois os campos **Preamble**, **Address** e **CRC** são adicionados automaticamente ao pacote no momento da transmissão.

O tamanho máximo do pacote é definido pelo registrador **MAXLEN** (Figura 3.7) porém independentemente do valor especificado para esse registrador o tamanho dos campos **S0**, **S1**, **Length** e **Payload** combinados não podem ultrapassar 255 bytes. Os campos **S0**, **S1** e **Length** podem ser omitidos.

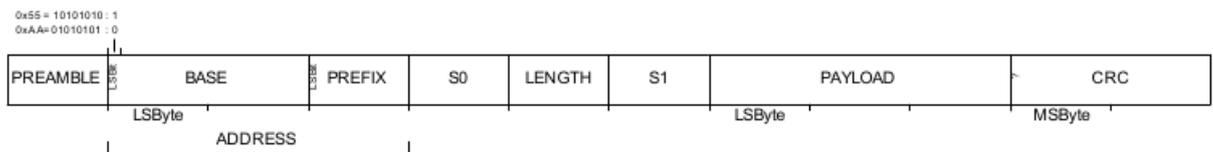


Figura 3.6: Formato do quadro transmitido pelo NRF51822 (NORDIC-SEMICONDUCTORS, 2013)

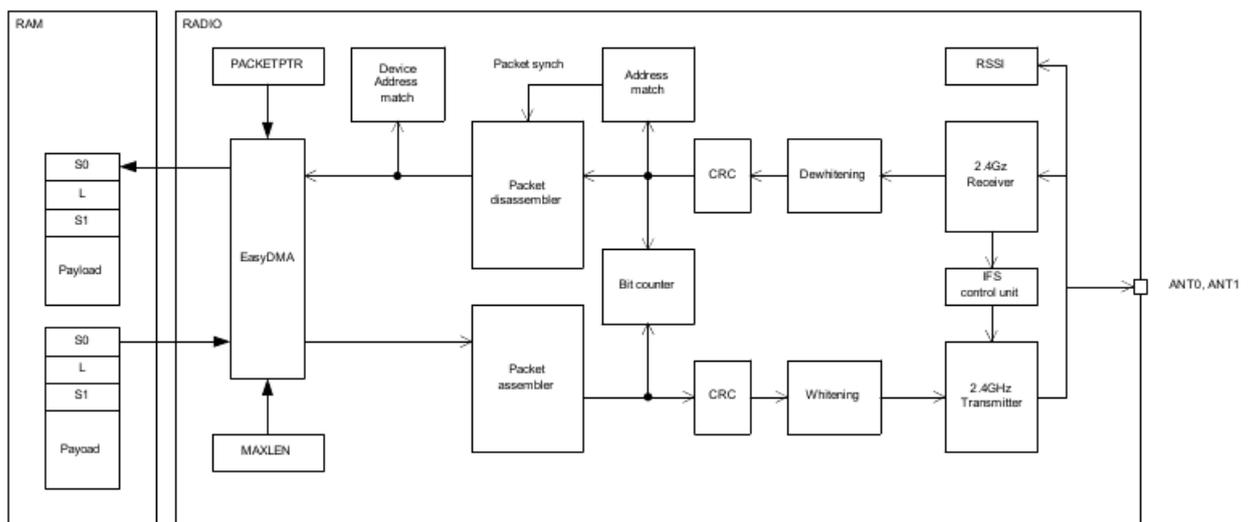


Figura 3.7: Diagrama em Blocos do módulo de rádio do NRF51822 (NORDIC-SEMICONDUCTORS, 2013)

Endereçamento

O protocolo básico de transmissão do NRF51822 envia os pacotes em *broadcast* e o receptor decide de quem recebera ou não os pacotes. O modo como o NRF51822 cria os endereços e os armazena na memória será descrito com base na Figura 3.8.

- **Base:** são dois registradores, **Base0** e **Base1**, de 32 bits que funcionam como um SSID informando a identificação da rede.
- **Prefix:** são dois registradores, **Prefix0** e **Prefix1**, de 4 bytes que informam a identificação da rede do dispositivo dentro da rede.
- **APn:** são referências aos bytes dos registradores **Prefix0** e **Prefix1**. Eles vão de 0 a 7 sendo que 0 a 3 pertencem ao **Prefix0** e 4 a 7 pertencem ao **Prefix1** o AP esta diretamente relacionado com uma **Base** então dependendo do AP escolhido sera utilizada a **Base0** ou **Base1**. Somente o **AP0** utiliza a **Base0**, todos os demais **AP's** utilizam a **Base1**.
- **TXAddress:** é um conjunto de três bits que referenciam um AP diretamente e é essa variável que define qual endereço o dispositivo irá utilizar quando estiver transmitindo.
- **RXAddress:** é um registrador de 8 bits que define de quais endereços o dispositivo aceita receber pacotes.
- **ADn:** são os bits do **RXAddress** cada um deles faz referência a um **AP**, sendo que quando estão setados com o valor 1 eles aceitam receber pacotes do endereço referenciado pelo seu **AP** equivalente.
- **DAB:** é um vetor de 8 posições onde cada posição armazena os 32 bits menos relevantes (**Base**) dos endereços do qual o dispositivo aceita receber pacotes. Os endereços armazenados no **DAB** são definidos pelos **AD's** habilitados.
- **DAP:** é um vetor de 8 posições onde cada posição armazena os 16 bits mais relevantes (**Prefix**) dos endereços do qual o dispositivo aceita receber pacotes. Os endereços armazenados no **DAP** são definidos pelos **AD's** habilitados. As posições **DAB** e o **DAP** são correspondentes.
- **DACNF:** é o registrador responsável por habilitar e desabilitar os endereços de transmissão e recepção.

Supondo que tenhamos um programa com as seguintes especificações:

```

BASE0      = 0xBADA5501UL ;
BASE1      = 0xBADA5502UL ;
PREFIX0    = 0xA1A2A3A4UL ;
PREFIX1    = 0xB1B2B3B4UL ;
TXADDRESS  = 0x00 ;
RXADDRESS  = 0x82 ;

```

A partir dessas informações conseguimos determinar que o programa irá usar o endereço 0xBADA5501A4 para transmitir e poderá receber dos endereços 0xBADA5502A3 e 0xBADA5502B1. O registrador **TXADDRESS** está sendo setado para utilizar o valor de **AP0** que é o primeiro byte do **PREFIX0** e este é o único que utiliza **BASE0**. O registrador **RXADDRESS** por sua vez está sendo setado para utilizar os de **AP1** e **AP7** que utilizam **BASE1**.

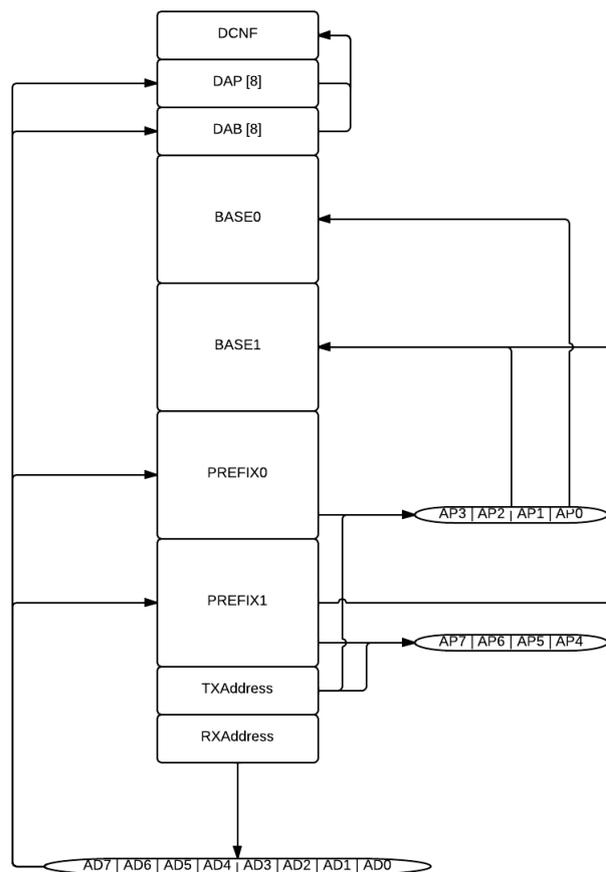


Figura 3.8: Diagrama em Blocos mostrando como são criados os endereços no NRF51822

Transceiver:

O transceptor do NRF51822 pode receber pacotes de até 8 dispositivos, porém ou ele transmite ou recebe informação, para trocar de modo de funcionamento do transceptor ele deve ser primeiramente desabilitado. A Figura 3.9 mostra o funcionamento do transceptor do NRF51822 o qual não implementa nenhum tipo de sincronismo entre o dispositivo transmissor e o receptor, existem alguns protocolos mais complexos fornecidos pela *Nordic* que implementam essa entre outras funcionalidades esse protocolos podem ser vistos na Seção 3.4.

Transmissão: O modo de transmissão é habilitado através da variável **TXEN** ver máquina de estado, Figura 3.9, a qual assume o valor 1 quando ativada e 0 quando desativada. Após habilitado a recepção é necessário esperar um certo período de tempo para que o modo seja iniciado (**TXRU**), após iniciado o transceptor espera a chegada de um pacote para transmitir (**TXIDLE**). Assim que exista um pacote ele começa a transmiti-lo (**TX**). Terminada a transmissão ele volta a esperar um pacote para transmissão ou é desabilitado. No caso de uma nova transmissão deve haver um intervalo de no mínimo de alguns micro segundos. Esse período é definido pelo fabricante na variável **TIFS** e depende da taxa de transmissão utilizada.

Recepção: O modo de recepção é habilitado através da variável **RXEN** (Figura 3.9) a qual assume o valor 1 quando ativada e 0 quando desativada. Após habilitado a recepção é necessário esperar um certo período para que o modo seja iniciado (**RXRU**), após iniciado o transceptor espera a chegada de um pacote (**RXIDLE**), assim que ele começa receber o pacote **RX** ele verifica o campo **Address** para saber se ele está habilitado a receber pacotes daquele transmissor (isso é feito através dos registradores **DAP** e **DAB**) caso ele não esteja habilitado o pacote é descartado. Terminada a recepção ele volta a esperar um pacote ou é desabilitado.

RSSI

O módulo de rádio implementa um mecanismo de *RSSI* que tem como objetivo medir a potência do sinal recebido. Esse mecanismo é ativado através da *task* **RSSISTART** o valor obtido por essa medição fica armazenado no registrador *RSSISAMPLE*. O período de amostragem para a obtenção do valor é definido pelo valor do *RSSI_{PERIOD}* que para o NRF51822 é de 8.8 μ s. Para que o valor obtido seja válido é necessário que o modo de recepção esteja habilitado e a recepção do pacote já tenha sido iniciada.

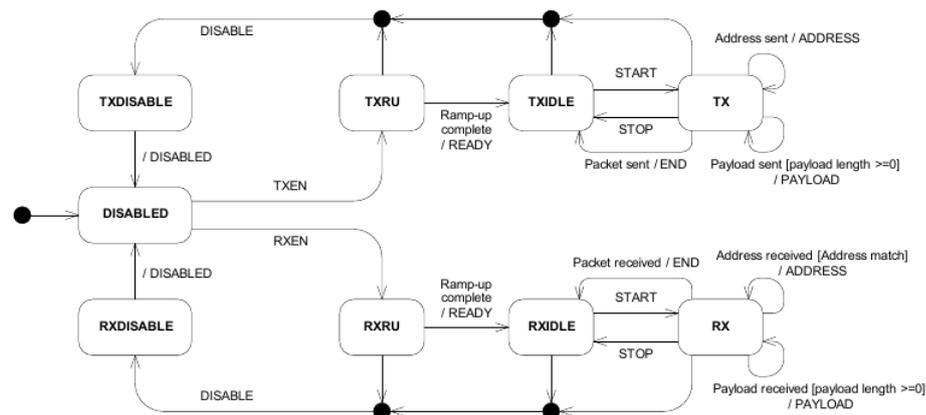


Figura 3.9: Diagrama de Fluxo mostrando o funcionamento do transceptor NRF51822 (NORDIC-SEMICONDUCTORS, 2013)

3.1.3 Outros periféricos

O foco deste trabalho se encontra no módulo de rádio, porém o NRF51822 é um componente muito versátil possuindo uma grande gama de outros módulos. Dentre os vários periféricos do NRF51822 existem alguns que se destacam pela possibilidade de utilização na aplicação proposta inicialmente. Entre eles estão:

Real Time Counter (RTC)

O módulo RTC utiliza baixa frequência por isso quando ele for ativado o oscilador de 16 MHz precisa estar desativado.

A frequência de incremento inicialmente é de 32.768 kHz porém ela pode ser alterada através do registrador **PRESCALER** da equação $f_{rtc} = \frac{32.768kHz}{PRESCALER+1}$.

O módulo RTC possui também eventos de **TICK**, **OVERFLOW** entre outros.

O evento **OVERFLOW** ocorre quando o registrador **COUNTER**, o qual é responsável por armazenar o valor da contagem do RTC, ultrapassa o seu valor máximo e passa de 0xFFFFFFFF para 0x000000.

O evento **TICK**, é feito para utilização de RTOS (*Real Time Operational System*), e permite fontes de interrupção sem a necessidade de usar o *ARM SysTick*. O evento **TICK** também permite que o RTOS continue ativado mesmo com a CPU utilizando o mínimo de processamento.

Uma das possíveis utilizações do RTC dentro do sistema proposto seria a marcação do tempo do cavaleiro durante o percurso cronometrando o tempo entre os obstáculos.

Watchdog Timer (WDT)

O módulo WDT é um contador regressivo que gera um evento de **TIMEOUT** quando seu valor chega a zero. Quando iniciado o WDT carrega o valor especificado no registrador CRV o qual também será quando o WDT recarregar em seu registrador que será usado como contador.

O período do **TIMEOUT** é dado pela equação $\frac{CRV+1}{32768}$ [s]. O valor 32768 é referente ao *clock* pois quando o WDT for iniciado ele ativará automaticamente o oscilador de 32.768 kHz.

Uma das possibilidades de utilização do WDT é utiliza-lo como um método de para correção de erros no sistema que mandaria um sinal a cada um certo período de tempo pré-determinado desativando o WDT. Caso um erro acontecesse no sistema impedindo que esse sinal fosse enviado o WDT ativaría alguma medida de correção.

Sensor de Temperatura:

O sensor de temperatura mede a temperatura do silício, temperatura interna, do NRF51822.

O processo de medição deve ser iniciado pela *task* **START** e seu término é anunciado pelo registrador **DATARDY**, o qual deve assumir o valor 1 quando o processo terminar, o resultado do processo fica armazenado no registrador **TEMP**. No entanto para obter-se o valor da temperatura em célsius deve-se dividir o valor obtido por 4 .

O processo de medição ocorre uma única vez o que significa que quando se deseja fazer uma nova medição a *task* **START** deve ser iniciada novamente.

SPI

O SPI mestre prove uma interface de comunicação simples com a CPU, ele é composto por um registrador **TXD** e **RXD** que são responsáveis pela transmissão e recepção dos dados respectivamente. Estes registradores possuem dois *buffers* cada um, o que prove um fluxo de dados com um certo grau de continuidade. O SPI escravo por sua vez deve ser selecionado e controlado pelos pinos de entrada e saída (GPIO).

Two Wired Interface (TWI)

O TWI mestre é compatível com o padrão I²C, o qual opera a 100 kHz e 400 kHz. Diferentemente da SPI os registradores RXD e TXD do TWI possuem apenas um *buffer* cada. O TWI mestre pode comandar até três TWI escravos.

Universal Asynchronous Receiver/Transmitter (UART)

A UART utiliza os registradores **TXD** e **RXD** para transmitir e receber dados diretamente. A UART também possui suporte a: operação full-duplex, controle de autenticação de fluxo e geração e confirmação de paridade.

A UART, o TWI e a SPI dividem registradores e outros recursos com outros periféricos por isso é necessário que para ativar um dos periféricos citados é necessário que os periféricos com os quais eles dividem recursos estejam desativados.

Tanto a UART quanto o TWI e a SPI podem vir a ser utilizados dentro do sistema proposto como um meio de comunicação entre o *middleware* e o leitor ou uma comunicação simples entre um computador e um leitor para visualização de informações.

Outros

Existem outros periféricos que embora não venham a ser utilizados no sistema proposto podem vir a ser utilizados em outros projetos entre eles temos: QDEC (*Quadrature Decoder*); ADC (*Analog to Digital Converter*); RGN (*Randon Number Generator*).

3.2 Kits e sistema utilizados do NRF51822

A *Nordic* oferece dois kits diferentes para o NRF51822: o kit de avaliação e o kit de desenvolvimento.

O kit de avaliação é composto por duas placas: a PCA10000 e a PCA10001. A PCA10000 é um *dongle* composto basicamente pelo NRF51822, pelo chip *Segger OB* para a programação e por uma porta USB que serve tanto para alimentação quanto para comunicação com algum dispositivo. A PCA10001 que é um é um sistema mínimo para o desenvolvimento do NRF51822, provendo assim como a PCA10000 um *Segger OB*, pinos de acesso ao NRF51822 entre outros.

O Kit de desenvolvimento é composto por quatro placas: a PCA10000, a PCA10004, a PCA10005 e o *J-Link Lite Cortex-M9*. A PCA10004 e PCA10005 diferentemente da PCA10000 possuem apenas o NRF51822 e proveem um acesso a seus pinos. A única diferença entre a PCA10004 e PCA10005 é a antena sendo que a PCA10004 tem a antena no PCB e a PCA10005 possui uma conexão para uma antena externa. O *J-Link Lite Cortex-M9* é utilizado como programador e depurador para a PCA10004 e PCA10005.

3.2.1 PCA10000

A placa PCA10000 é um *dongle*, dispositivo externo conectado a um computador, utilizado para restringir o uso de um determinado programa, utilizado para o desenvolvimento do NRF51822. Esta placa como pode ser visto na Figura 3.10 consiste de: uma porta USB que além de servir como fonte de alimentação também pode vir a ser utilizada como comunicação com um outro dispositivo, o chip *Segger OB* que funciona como programador, *debugger* e faz comunicação entre a USB e o NRF51822. Ela também possui 2 osciladores um de 32.768 kHz e outro 16 MHz e um *led* RGB.

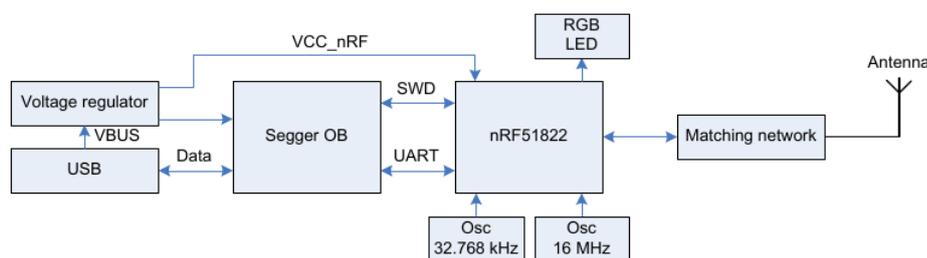


Figura 3.10: Diagrama em Blocos da placa PCA10000 (NORDIC-SEMICONDUCTORS, 2013)

3.2.2 PCA10001

A placa PCA10001 é um sistema mínimo para o desenvolvimento do NRF51822. Esta placa, como pode ser visto na Figura 3.11, é similar a PCA10000 porém com algumas adições que são: a possibilidade de se usar uma bateria como fonte de alimentação, três botões sendo um para *reset* e dois para ações programadas no software, três *leds* sendo um para informação do estado da placa, *on/off*, e dois para ações programadas no software e pinos para expansão ligados diretamente ao NRF51822.

3.2.3 PCA10004 e PCA10005

As placas PCA10005 e PCA10004 foram desenvolvidas para serem utilizadas como módulos pela placa mãe NRFgo embora também possam ser utilizadas independente desta. A PCA10004 e PCA10005 são compostas, com forme a Figura 3.12, por: dois osciladores sendo um de 32.768 kHz e outro de 16 MHz, um conector Serial Wire Debug (SWD) que serve para a programação e depuração através do *J-Link Lite Cortex-M9*, contatos para a medição da corrente (CSM), conectores ligados diretamente aos pinos do NRF51822, e uma antena. A única

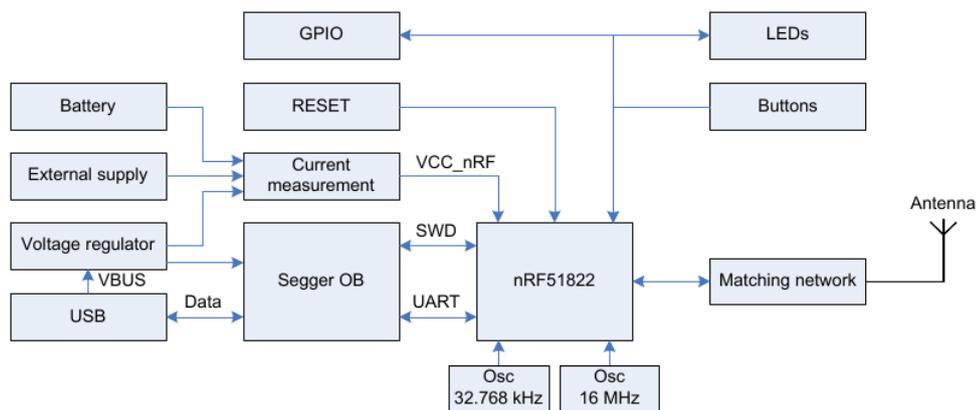


Figura 3.11: Diagrama em Blocos da placa PCA10001 (NORDIC-SEMICONDUCTORS, 2013)

diferença entre a PCA10005 e a PCA10004 se dá por conta da antena, sendo que a PCA10004 possui uma antena no PCB e a PCA10005 possui uma conexão para uma antena externa.

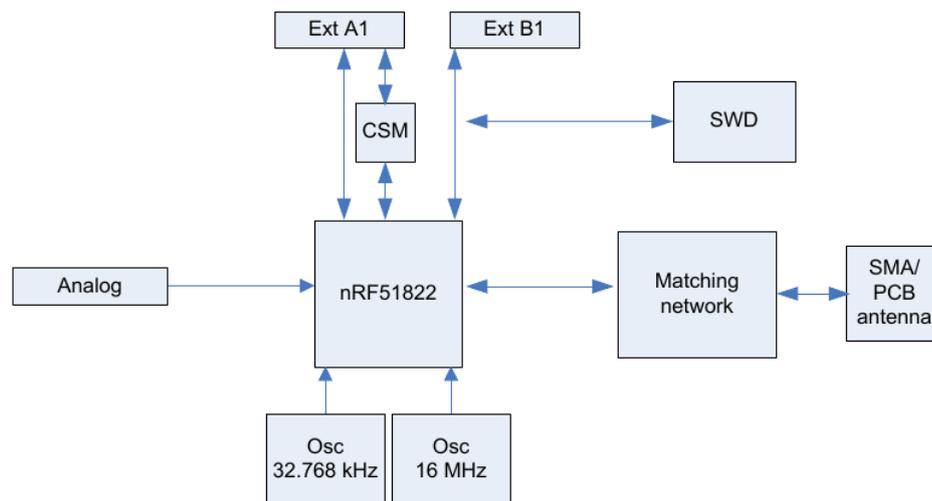


Figura 3.12: Diagrama em Blocos das placas PCA10004 e PCA10005 (NORDIC-SEMICONDUCTORS, 2013)

3.3 O sistema de desenvolvimento

O *µvision* é uma *Integrated Development Environment* (IDE) desenvolvida pela empresa Keil, a IDE vem integrada com um compilador proprietário da Keil e um depurador também proprietário. O *µvision* é compatível com uma vasta quantidade de fabricantes de microcontroladores, principalmente, ARM além disso a IDE automatiza vários processos deixando mais simples o desenvolvimento como exemplo disso temos o compilador que é configurado automaticamente. Quando se cria um novo projeto na IDE ela exibe uma janela exibindo o fabricante e o modelo do microcontrolador para o qual se deseja desenvolver, a partir dessa rápida seleção

o compilador, o depurador, e programador flash já são configurados fazendo com que o usuário se preocupe em sua maior parte do tempo apenas com programação. Embora os dispositivos da *Nordic* não sejam compatíveis com o *µvision* a princípio a *Nordic* disponibiliza um programa que adiciona seus componentes as bibliotecas da *IDE*.

3.4 Softwares e bibliotecas disponibilizadas pela *Nordic*

A *Nordic* disponibiliza alguns protocolos para facilitar o desenvolvimento de aplicações com os seu produtos. Entre os protocolos disponibilizados pela *Nordic* estão: o *Enhanced Shock Burst* (ESB) e o *Gazell Link Layer* e uma implementação do *Bluetooth*. Em adição aos protocolos a *Nordic* também disponibiliza alguns softwares de demonstração para exemplificar a utilização dos protocolos, esses softwares podem ser obtido no site da *Nordic* ou no seu repositório no *GitHub*¹.

Enhanced Shock Burst

Enhanced Shock Burst é um protocolo básico comunicação com suporte comunicação bidirecional, armazenamento de reconhecimento de pacotes e retransmissão automática de pacotes perdidos. A implementação do *ESB* no NRF51822 permite comunicação do mesmo com a família NRF24LXX.

O *EBS* implementa um tratamento automático da transação de pacotes para facilitar a implementação de um conexão bidirecional confiável. A transação é uma troca de pacotes entre dois transceptores, sendo que um dos transceptores age como transmissor primário (PTX) enquanto o outro age como receptor primário (PRX).

Gazell Link Layer

O *Gazell Link Layer* é um protocolo feito para estabelecer conexões sem fio entre um *host* e até 8 dispositivos através de uma rede com topologia estrela como mostra a Figura 3.13. O protocolo foi projetado de modo que minimizasse o consumo de energia.

O *Gazell* tira vantagem do fato de que uma das extremidades da comunicação pode estar "sempre ligada", afim de minimizar o consumo de energia de dispositivos sensíveis a potência, *power-sensitive devices*, na outra extremidade. Além disso o *Gazell* tem um sofisticado, mas

¹<https://github.com/NordicSemiconductor>

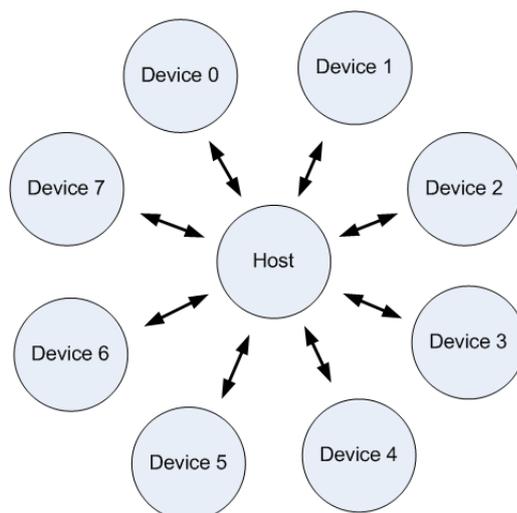


Figura 3.13: Rede sem fio usando o protocolo Gazell em uma topologia estrela (NORDIC-SEMICONDUCTORS, 2013)

de fácil utilização, esquema de sincronização e chaveamento do canal que dá robustez à interferência e boas propriedades de coexistência de rede sem fio enquanto ainda permite o alto rendimento e baixa latência.

3.5 Conclusão

Neste capítulo foram vistos a estrutura e o funcionamento dos dispositivos e sistemas que serão utilizados neste trabalho.

Devido a natureza deste projeto foi dado um enfoque maior no módulo de rádio do NRF51822 pois será o componente fundamental para a implementação da aplicação proposta. A forma de controle de potência de transmissão e leitura do *RSSI* foi particularmente estudada pois pretende-se utilizá-lo pra fazer a lateração na aplicação.

Um dos pontos observados no estudo foi a necessidade de adaptar o uso do kit de desenvolvimento para que possa funcionar sem a placa mãe que não foi adquirida da *Nordic* devido ao custo. O uso do mesmo é necessário devido ao fato que o mesmo apresenta antena externa que permitirá obter melhores resultados na distância de transmissão.

Os protocolos fornecidos pela *Nordic* são interessantes para a rápida construção de aplicações. Um estudo comparativo e a avaliação dos mesmos, com detalhes, pode ser um interessante trabalho a ser desenvolvido.

De forma geral pode-se dizer que o NRF51822 parece ser uma excelente opção para implementação de RFID ativo e de outras aplicações sem fio que exijam baixo custo, baixo consumo e reduzido

tamanho.

Dado o esforço para a familiarização com os dispositivos e sistemas estudados, foi decido limitar o trabalho a uma avaliação das placas adquiridas no que tange a sua utilização em uma aplicação de localização baseada em lateração. Esta avaliação é apresentada no capítulo seguinte.

4 Experimentos de Avaliação

Este capítulo é dedicado a descrever os experimentos realizados no sentido de avaliar a viabilidade do componente da NRF51 da *Nordic* em sistemas de medição e localização.

Inicialmente o módulo de rádio foi testado para verificar se o mesmo estava funcionando conforme o esperado. Na sequência este módulo é avaliado no sentido de verificar se é consistente o suficiente para ser utilizado em um procedimento de lateração. Neste sentido, é realizado um levantamento de curvas de potência recebida em função da distância, da potência transmitida e para diferentes taxas de transmissão. Da mesma forma é avaliada a quantidade de pacotes perdidos para ver até qual distância é viável fazer transmissões confiáveis. Finalmente, é avaliada a potência consumida para verificar se o dispositivo teria uma vida útil considerável. Para os testes foram utilizadas as placas PCA10000, PCA10001 e PCA10005 descritas anteriormente.

4.1 Experimento 1 - Teste básico de comunicação

Objetivo do Experimento: Esse experimento foi feito para averiguar se as placas, PCA10000 e PCA10001, estavam funcionando corretamente. Para isso foi utilizado um programa de exemplo disponibilizado pela *Nordic*, *Led Radio example*¹.

Procedimento: Ambas as placas foram conectadas a um notebook através da USB. O notebook estava executando o *Windows* e o sistema de desenvolvimento da *Nordic*. Este sistema, conforme mostrado no capítulo anterior, permite o desenvolvimento integrado dos programas, a carga dos programas nas placas e a visualização do terminal conectado a USB. Desta forma, quando um programa quer mostrar/receber dados para/do usuário ele o faz através da *UART*. A placa PCA10000 não possui nenhuma interface a não ser a USB e o rádio. A PCA10001 possui *LEDs* e botões para interação.

¹O código utilizado pode ser obtido através do endereço:
<https://github.com/finnurtorfa/nrf51/tree/master/lib/nrf51sdk/Nordic/nrf51822/Board>

O programa C de teste tem como função pegar o caractere 0 ou 1 através da *UART* da PCA10000 e esta transmitir o caractere para a PCA10001 a qual acendera um *led* respectivo. O fluxograma na Figura 4.1 apresenta o funcionamento do procedimento mais detalhadamente.

A velocidade configurada para a transmissão de dados via rádio foi de 2 Mbps com potência de transmissão configurada em 0 dBm. A distância entre placas foi de cerca de 50cm.

Análise dos resultados: O resultado do teste foi positivo, ou seja, o sistema funcionou prontamente. Ao ser teclado um caractere no terminal via notebook o LED acendeu na outra placa. Apesar de simples, o programa de teste foi usado como base para modificações e elaboração dos demais experimentos. Um esforço teve que ser demandado para compreensão do controle do módulo do rádio a partir do programa C, o que somente foi possível com o estudo que havia sido realizado anteriormente.

4.2 Experimento 2 - Levantamento de curva da Potência recebida pela Distância

Objetivo do Experimento: O intuito desse experimento foi o de verificar viabilidade da utilização do dispositivo de *RSSI* disponível no NRF51822 para fazer uma estimativa da distância de um transmissor a um receptor. Usando a distância medida seria possível estimar outros parâmetros tais como localização (via triangulação), velocidade de aproximação e de afastamento em relação a um transmissor.

Inclui-se como objetivo do experimento identificar o impacto do uso de antena em PCB e externa e também a identificação de impactos de outras fontes de transmissão em 2.4 Ghz. Possíveis correlações das leituras com as taxas de transmissão e com o tamanho de pacotes também serão objetivos do experimento.

Procedimento: Foi utilizado o procedimento apresentado no fluxograma da Figura 4.2 no qual foram transmitidos pacotes com 1 e 240 bytes com uma potência de 0 dBm. À obtenção dos valores para a montagem das curvas foi feita uma média da potência recebida a cada 10 cm em uma distância de 2 m. Foram utilizadas 20 amostras para o cálculo da média de cada ponto nas curvas. Os testes foram repetidos para taxas de transmissão de 250 kbps, 1 Mbps e 2 Mbps.

Para comparar as leituras com um valor de referência foi calculado um valor esperado. A curva com os valores esperados foi feita com base na fórmula de Friis: $P_r = P_t \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2 G_t G_r$.

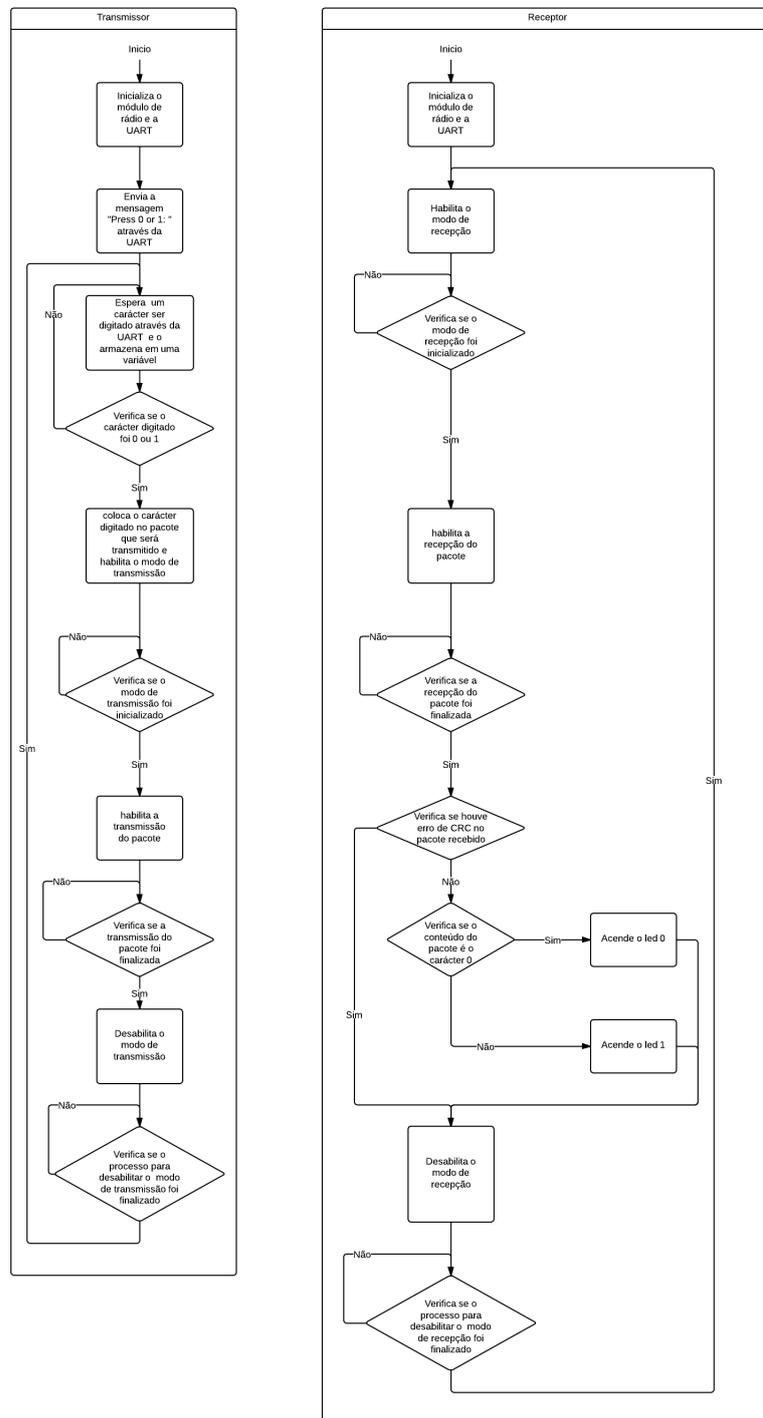


Figura 4.1: Fluxograma mostrando o funcionamento do procedimento utilizado para testar o funcionamento das placas.

Sendo P_r a potência recebida, P_t a potência transmitida, λ o comprimento de onda, d a distância entre as antena transmissora e receptora, G_t o ganho da antena transmissora e G_r o ganho da antena receptora. Os valores do ganho da antena transmissora e o ganho da antena receptora, G_t e G_r respectivamente, não foram fornecidos pelo fabricante.

Para calcular o valor de G_t e G_r as variáveis d e P_r foram substituídas pelos valores 10 cm e -45 dBm respectivamente, tais valores foram utilizados tendo como base os resultados obtidos da transmissão a 2 Mb com pacotes de 240 bytes, Figura 4.4, pois foram os valores com a menor oscilação durante as medições. Para calcular o valor da potência recebida em 0 foi utilizado $d = 2$ cm pois a fórmula de Friis não é válida para $d = 0$.

Observe que os valores esperados computados da forma acima pode ser discutível. Não é o objetivo deste trabalho propor a melhor forma de levantar o valor esperado. De qualquer forma, em uma aplicação real faz sentido realizar uma calibração para cada sensor dentro do contexto de seu ambiente de utilização. Note-se também que na computação acima não está sendo considerado ruídos e reflexões de sinal.

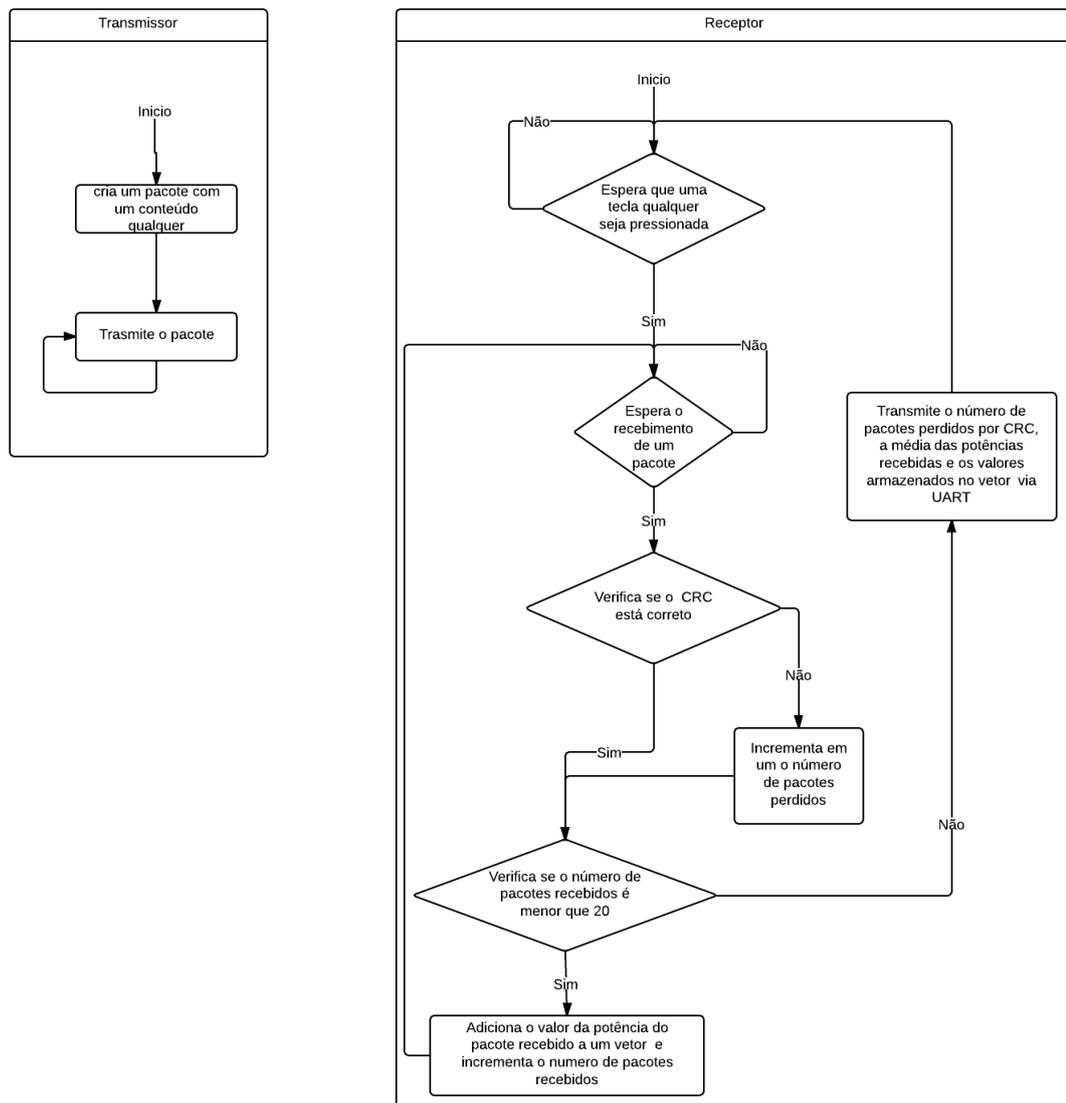


Figura 4.2: Fluxograma mostrando o funcionamento do procedimento utilizado para obter os valores para a criação das curvas

Análise dos resultados:

Parte 1 - Uso de transmissor e receptor com antena no PCB: A primeira parte do teste foi feito utilizando a placa PCA10001 como transmissor e a placa PCA10000 como receptor. Os resultados são mostrados nas Figuras 4.3 e 4.4.

Para entender o motivo dos valores oscilarem de tal maneira devemos ainda levar em conta

que o ambiente no qual foram feitos os testes havia uma grande quantidade de dispositivos trabalhando na mesma faixa frequência das placas e não havia nenhum tipo de proteção disponível.

Pode-se identificar que os resultados mais próximos dos valores esperados são àqueles com taxa de transmissão de 1 Mbps e com pacotes de de 240 bytes. Este último pode estar associado a forma como o módulo de rádio faz a computação do RSSI. Já a questão de melhor comportamento com taxas maiores é uma questão em aberto. Sabe-se que para a aplicação da fórmula de Friss, quanto maior a taxa de transmissão maior a variação do comprimento de onda em torno do comprimento da onda portadora o que traria maior imprecisão na aplicação da fórmula.

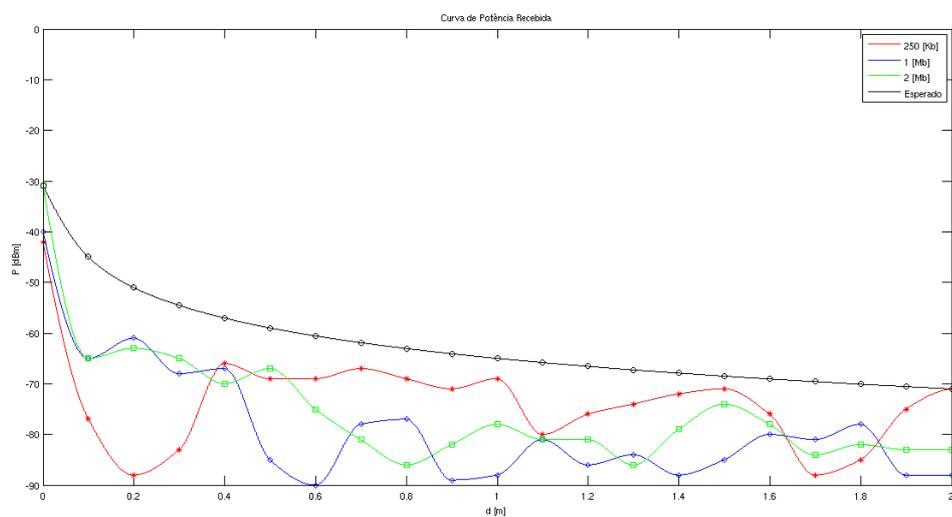


Figura 4.3: Curvas da potência recebida nas três taxas de transmissão possíveis com pacotes de 1 byte.

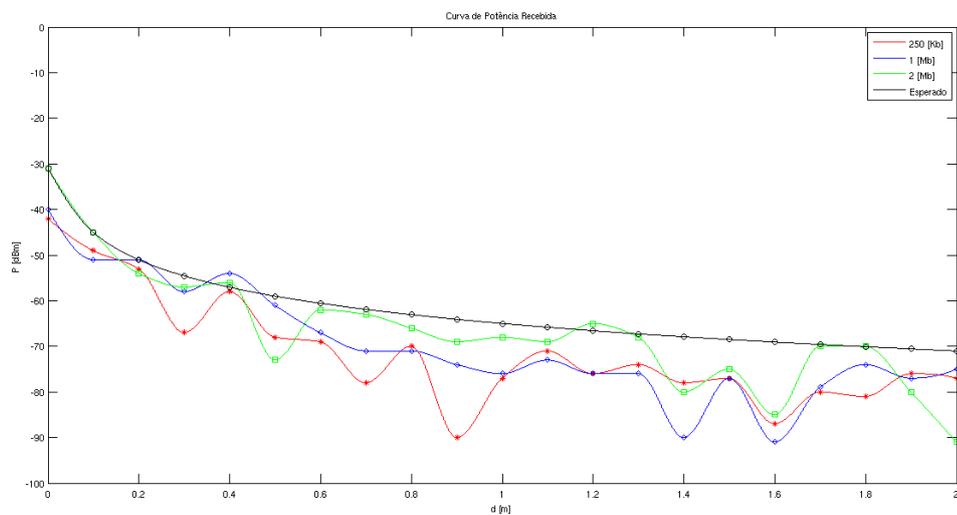


Figura 4.4: Curvas da potência recebida nas três taxas de transmissão possíveis com pacotes de 240 bytes.

Parte 2 - Introdução de ruído: A segunda parte do teste foi feito utilizando a placa PCA10001 como transmissor que se encontra a uma distancia X , onde X varia de 0 a 2 metros, da placa PCA10000 como receptor e um *Access Point* (AP) transmitindo um arquivo para o computador no qual a placa PCA10000 estava conectada (Figura 4.5). Seu objetivo era verificar se as transmissões dos AP's estavam ocasionando as oscilações vistas nas Figuras 4.3 e 4.4 o que é confirmado através das Figuras 4.6 e 4.7.

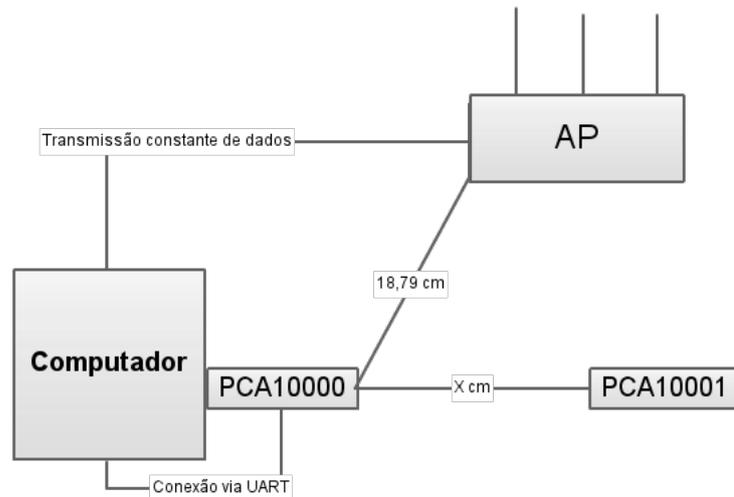


Figura 4.5: Cenário demonstrando como foi realizada a segunda parte do Experimento 2.

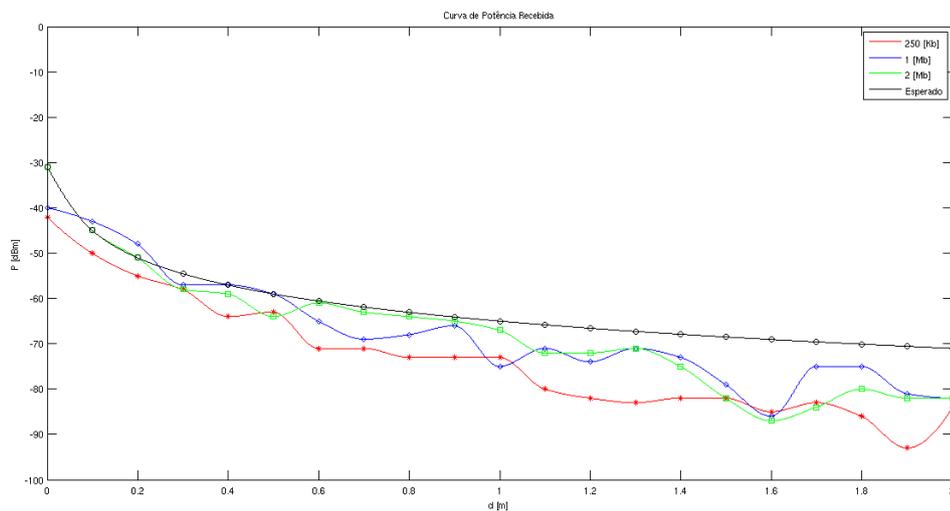


Figura 4.6: Curvas da potência recebida nas três taxas de transmissão possíveis com pacotes de 1 byte com introdução de ruído.

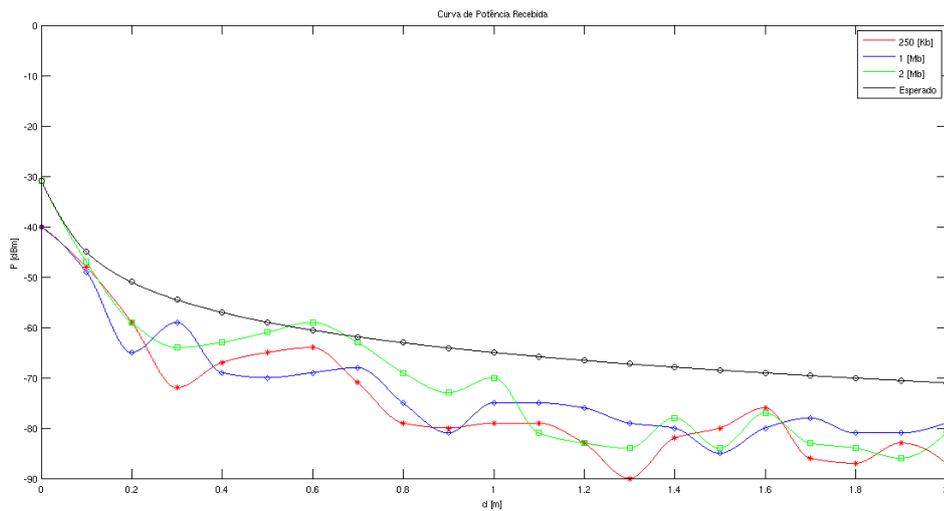


Figura 4.7: Curvas da potência recebida nas três taxas de transmissão possíveis com pacotes de 240 bytes com introdução de ruído

Parte 3 - Transmissor com antena externa: A terceira parte do teste foi feito utilizando a placa PCA10005 como transmissor e a placa PCA10000 como receptor. Seu objetivo era verificar se haveria uma melhora dos resultados obtidos com uma antena em PCB. Note-se que somente a placa PCA10005 possui antena externa. No momento dos testes não havia sido comprado módulos adicionais com antena externa.

A leitura obtidas se mostraram um pouco instáveis, porém não houve um ambiente isolado para que os teste fossem realizados, sendo que ambiente utilizado para a realização dos teste possuía diversas redes *Wi-Fi* operando na mesma frequência do NR51822.

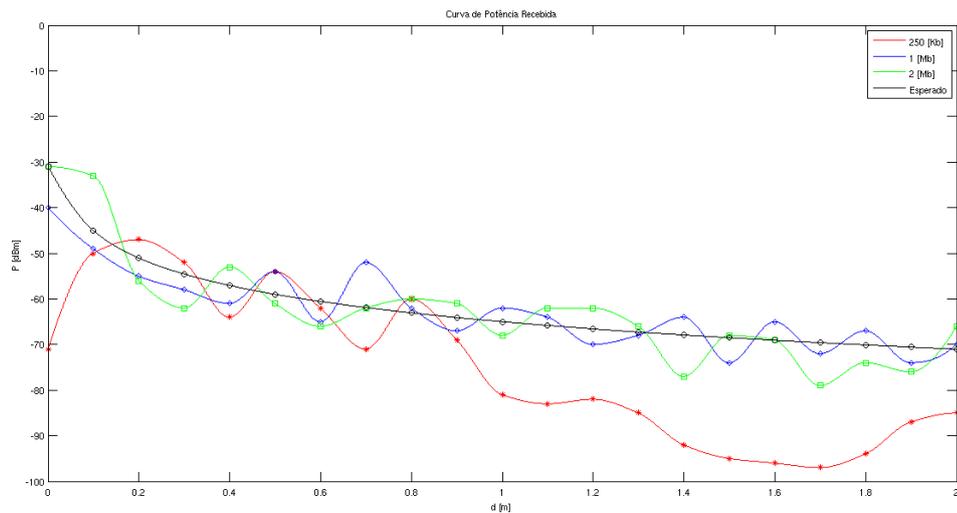


Figura 4.8: Curvas da potência recebida nas três taxas de transmissão possíveis com pacotes de 1 byte utilizando a PCA10005.

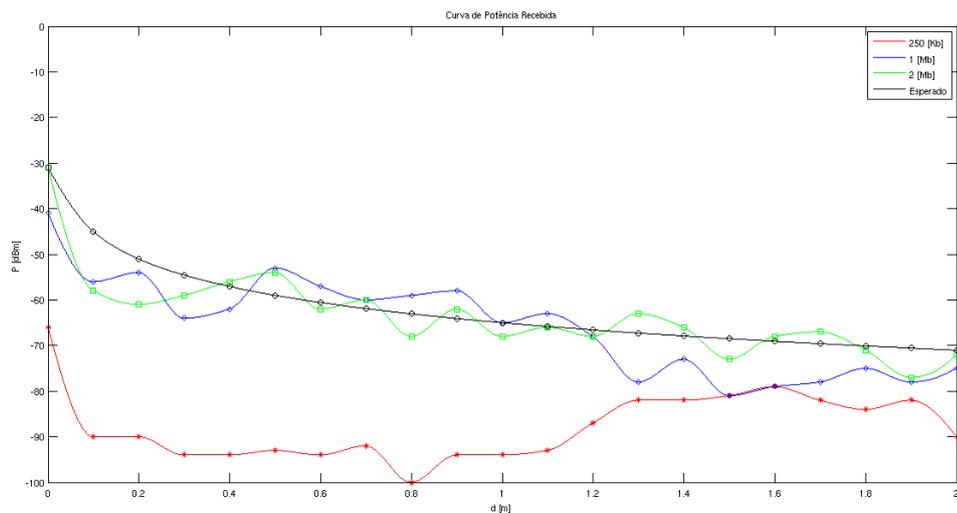


Figura 4.9: Curvas da potência recebida nas três taxas de transmissão possíveis com pacotes de 240 bytes utilizando a PCA10005.

Como pode ser observado através das Figuras 4.3 a 4.9 o módulo de *RSSI* obteve melhores resultados quando utilizada uma antena externa ainda que apresente uma certa instabilidade. Os melhores resultados continuam nos pacotes de 240 bytes e, aparentemente as taxas de 1 Mbps e 2 Mbps apresentam resultados similares e superiores às transmissões de 250 Kbps.

4.3 Experimento 3 - Quantidade de erros durante a transmissão e controle da potência de transmissão

Objetivo do Experimento: Esse experimento visa verificar a quantidade de pacotes perdidos em função da distância. Foram usadas as potências de 0 dBm e -20 dBm sendo estas a maior e menor potência de transmissão aconselhadas pelo fabricante.

Dois aspectos são analisados no experimento:

- a contabilização do número de pacotes recebidos mas descartados por erro de CRC em 1000 pacotes recebidos;
- a contabilização do número total pacotes perdidos de o qual leva em conta os pacotes perdidos devido a erro no CRC e que possam ter não sido recebidos ou ainda que possam ter chegado fora da ordem.

Procedimento: O procedimento é mostrado no fluxograma da Figura 4.10 onde a variável **packet** é um ponteiro para **PACKETPTR** e o registrador **CRCSTATUS** assume o valor 1 quando o *CRC* é válido. O vetor **vet_packet** tem como função armazenar os pacotes recebidos. A variável **cont** por sua vez serve como um índice para indicar em qual posição do vetor **vet_packet** o conteúdo do pacote deve ser armazenado além de ser utilizada para verificar quantos pacotes foram perdidos. A variável **perdidos_crc** por fim como objetivo unicamente informar quantos pacotes foram perdidos devido a erros de *CRC*.

A potência de transmissão pode ser alterada através da variável **NRF_RADIO->TXPOWER** utilizando os valores definidos por **RADIO_TXPOWER_TXPOWER_XdBm** onde X pode assumir os valores **Pos4, 0** e **NegY** onde Y pode assumir valores de 4 a 20 em passos de 4. Para realizar o procedimento foram utilizadas as placas PCA10000 como receptora e PCA10001 como transmissora.

Análise dos resultados: Os resultados obtidos podem ser vistos através das Figuras 4.11 a 4.14.

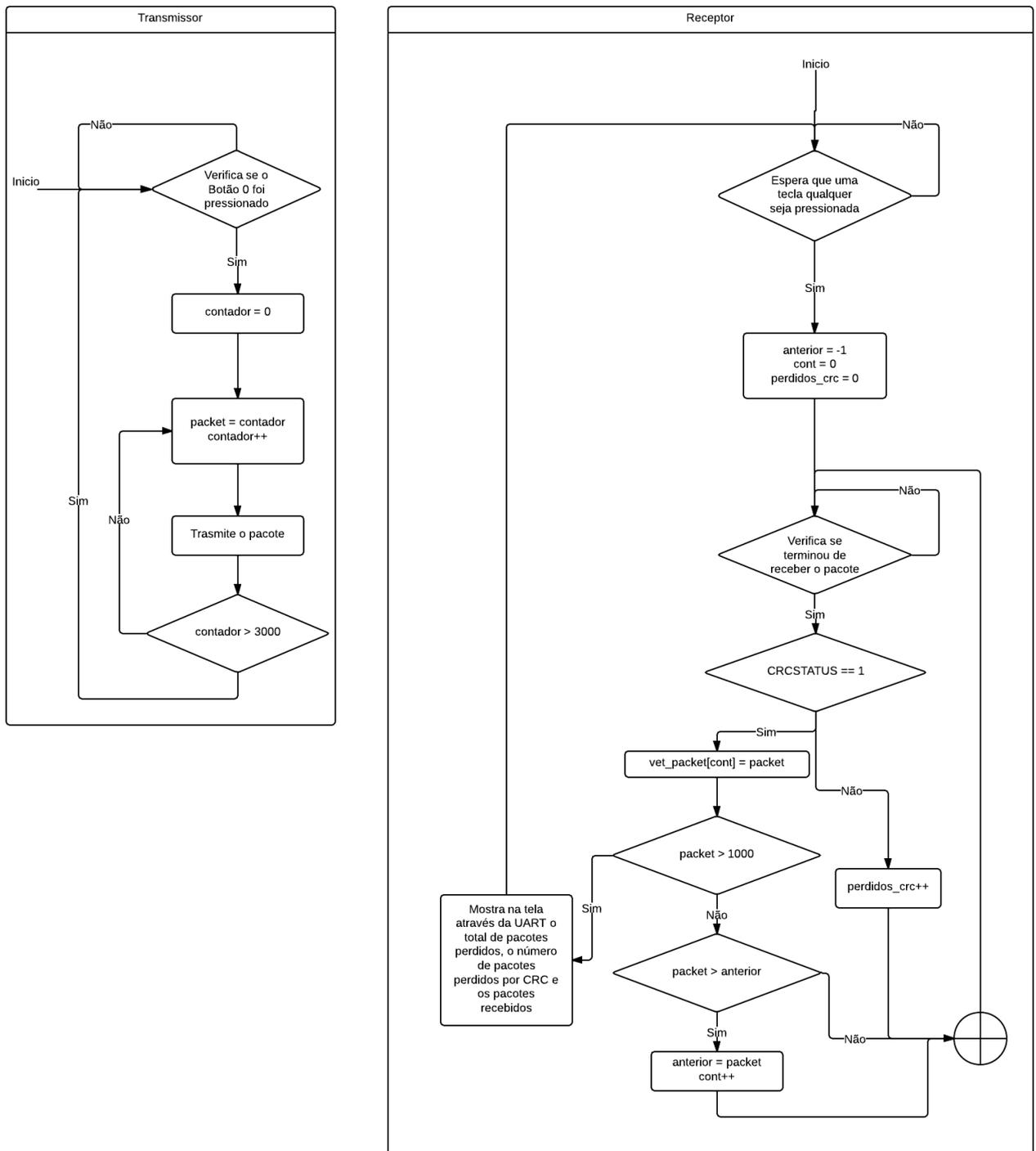


Figura 4.10: Procedimento para verificar a quantidade de pacotes perdidos

4.3 Experimento 3 - Quantidade de erros durante a transmissão e controle da potência de transmissão

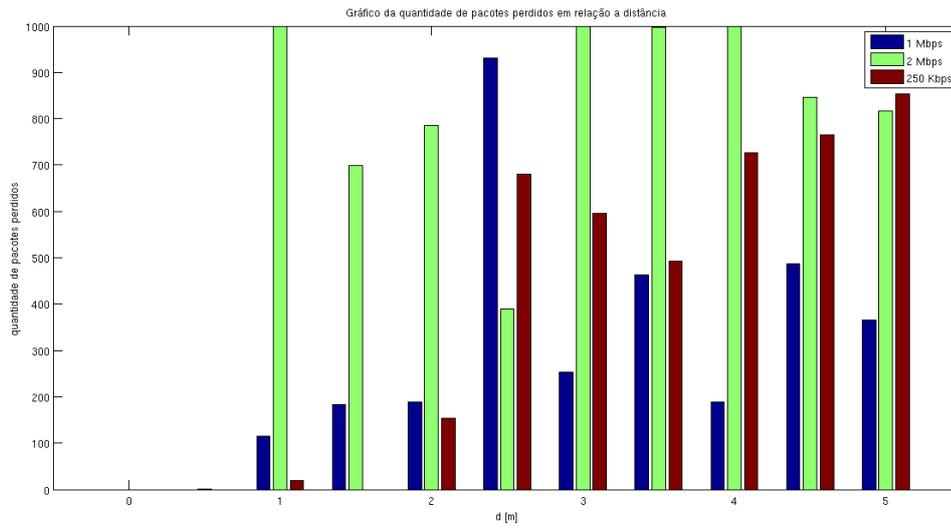


Figura 4.11: Pacotes perdidos com a potência de transmissão em 0 dBm.

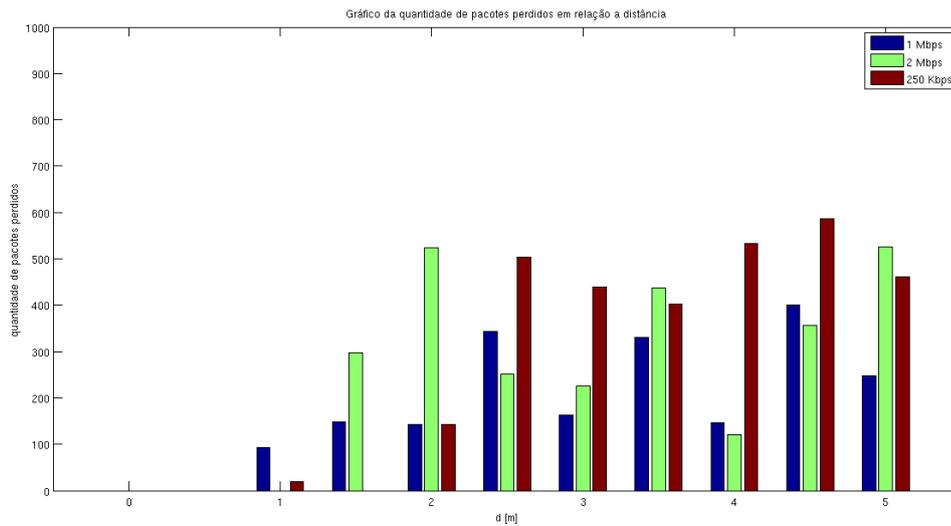


Figura 4.12: Pacotes perdidos por erro de crc com a potência de transmissão em 0 dBm.

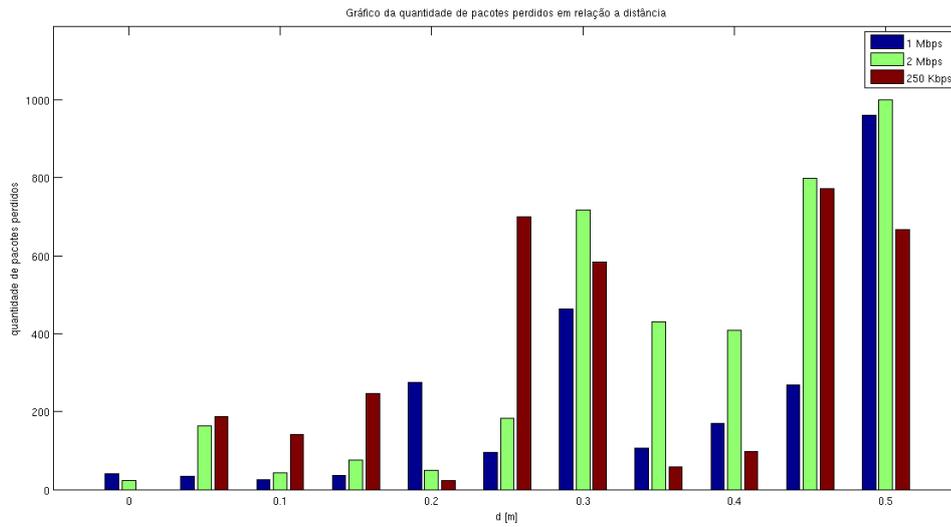


Figura 4.13: Pacotes perdidos com a potência de transmissão em -20 dBm.

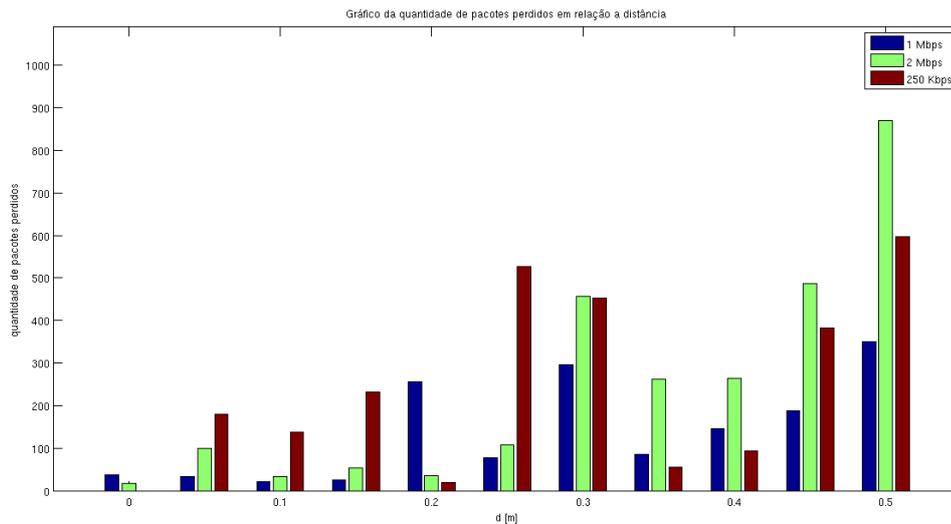


Figura 4.14: Pacotes perdidos por erro de crc com a potência de transmissão em -20 dBm.

Como pode ser observado através das Figuras 4.11, 4.12, 4.13 e 4.14 houve uma grande perda de pacotes, sendo em sua maioria devido a erro de CRC o qual provavelmente se deve interferência das redes *Wi-Fi*, embora não se tenha um ambiente isolado para que se possa confirmar. A potência de -20 dBm mostrou ter um alcance muito inferior a 0 dbm não chegando a 1 m. Entretanto, os experimentos evidenciam que os melhores resultados foram obtidos com a taxa de 1 Mbps com uma potência de 0 dBm. Nesta taxa, a 5 m de distância, tem-se perdas em torno de 25% dos pacotes a 0 dbm. Pode-se esperar um comportamento superior no caso de uso de placas transmissoras e receptoras com antenas externas.

4.4 Experimento 4 - Consumo de energia

Objetivo do Experimento: Esse experimento tem como objetivo verificar o consumo de energia do NRF51822.

Procedimento: Para este experimento foi usada a placa PCA10005 pois a mesma possui contato para a medição da corrente facilitando os testes. Os resultados das medições no entanto são dados em volts, para a obtenção da corrente no equipamento deve ser usada a fórmula: $I_{in} = \frac{V_{out}}{100}^2$. Para os testes foi usado o procedimento descrito na Figura 4.2 variando a taxa e potência de transmissão, os pacotes transmitidos tinham 240 bytes. Para verificar a tensão, Figura 4.16 a 4.20, foi utilizado um osciloscópio conectado aos contatos localizados em K1 e com o *jumper* de K2 posicionado nos pinos 2 e 3 (ver Figura 4.15).

Serão apresentados os resultados obtidos a partir do osciloscópio apenas para a taxa de transmissão de 1 Mbps devido a mesma ter apresentado uma melhor estabilidade no experimento anterior. Os resultados obtidos para a outras taxa de transmissão podem ser vistas no anexo.

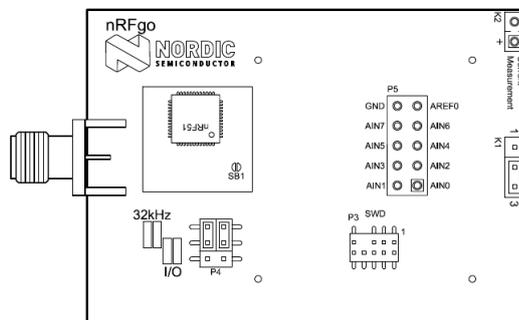


Figura 4.15: Placa PCA10005

²Essa formula é fornecida pela *Nordic* no manual do kit de desenvolvimento

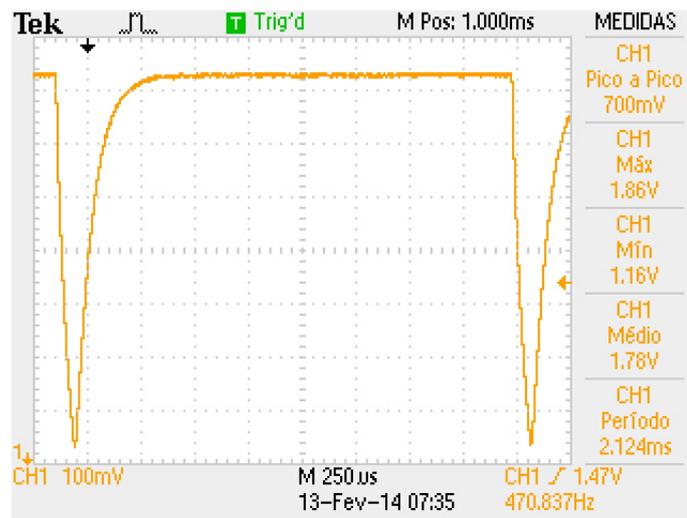


Figura 4.16: Medição do consumo de energia transmitindo pacotes a uma taxa de 1 Mb com 4 dBm de potência

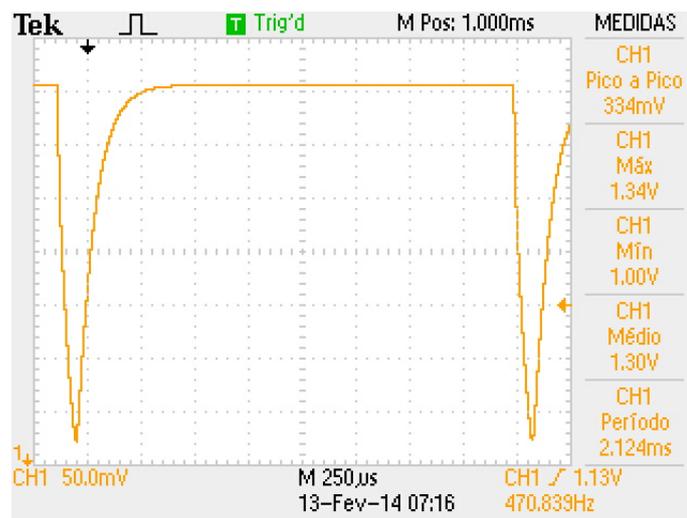


Figura 4.17: Medição do consumo de energia transmitindo pacotes a uma taxa de 1 Mb com 0 dBm de potência

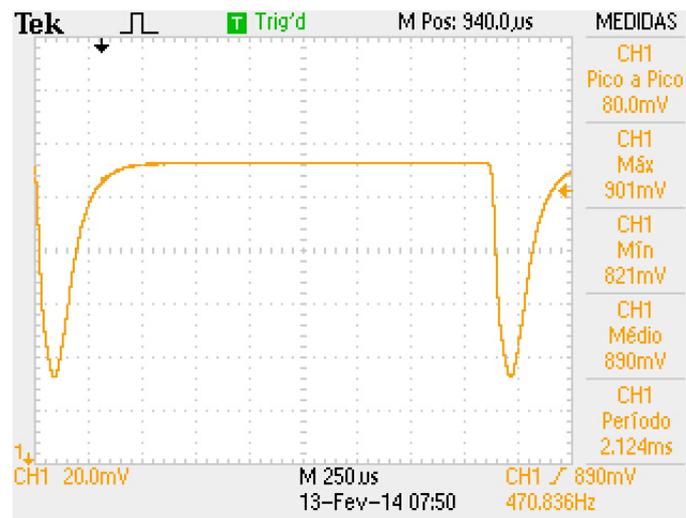


Figura 4.18: Medição do consumo de energia transmitindo pacotes a uma taxa de 1 Mb com -20 dBm de potência



Figura 4.19: Medição do consumo de energia recebendo pacotes a uma taxa de 1 Mb

Foi realizado ainda um teste do consumo de energia com um módulo de rádio desativado. Para isso o módulo de rádio foi desativado setando a variável **NRF->POWER** em 0 e um *loop* infinito calculando a sequencia de Fibonacci.



Figura 4.20: Medição do consumo de energia com o módulo de rádio desativado

Para o calcular a potência média foi utilizada a fórmula: $P_m = \frac{1}{T} \sum_{n=0}^T V(n)I(n)ts$. Onde $V(n)$ e $I(n)$ são os valores de tensão e corrente respectivamente no instante n , ts é o intervalo de tempo entre as amostras e T é o período de amostragem.

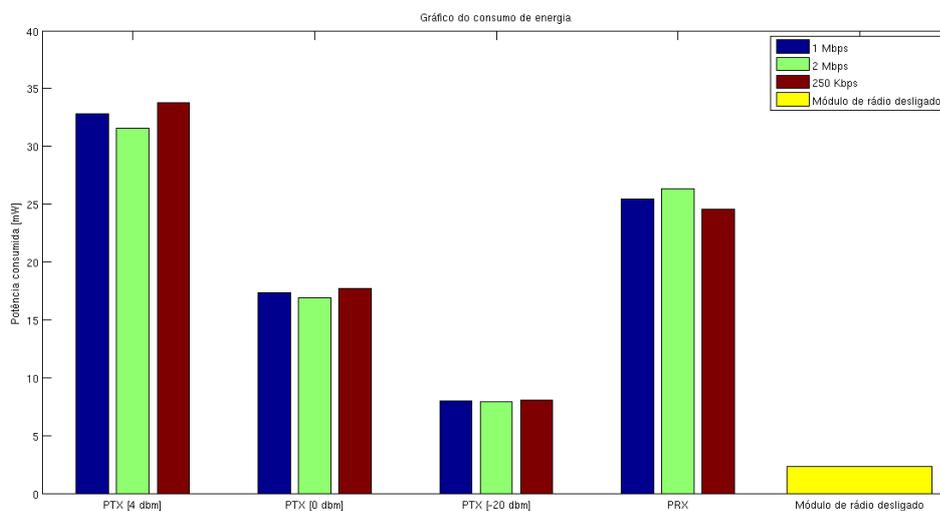


Figura 4.21: Gráfico mostrando um comparativo do consumo de energia em todas os casos testados.

Análise dos resultados: Como pode ser observado através da Figura 4.21 o consumo do NRF51822 é realmente baixo porém o fabricante não fornece informações com as quais possa se fazer um comparativo do resultados. Para aplicações de baixo consumo de energia deve se evitar a utilizar a potência de 4 dBm para transmissão já que o consumo de energia quase dobra em relação a 0 dBm e ganho na potência de transmissão não é muito significativo. A variação

do consumo de energia entre as taxas de transmissões é quase desprezível.

4.5 Conclusão

Neste capítulo foram feitos alguns testes com os kits disponíveis da *Nordic* para averiguar se seria viável para a aplicação desejada. Os resultados obtidos mostram que o NRF51822 é versátil e tem um baixo consumo de energia.

De forma geral os melhores resultados foram obtidos usando a taxa de 1Mbps a qual demonstrou uma maior estabilidade. A taxa de 0 dBm se mostrou a melhor opção para a aplicação sendo que obteve-se um alcance muito superior a -20 dBm e um consumo de energia muito inferior a 4 dBm. O experimento verificando a perda de pacotes mostrou a necessidade de um estudo adicional sobre o mesmo com um ambiente com uma menor quantidade de redes interferidos para uma conclusão mais apurada. Ainda assim o uso de dispositivos baseados em NRF51 para a medição de parâmetros do tipo distância entre objetos e parâmetros derivados tais como velocidade e aceleração merece estudo adicional. Possivelmente deve ser usado algum método matemático adicional para filtragem de informação. Fica claro também que qualquer aplicação que se utilize do sistema de rádio e necessite de confiabilidade de transmissão, deverá se utilizar de um protocolo de comunicação adicional.

No capítulo que se segue serão apresentadas as conclusões do trabalho.

5 *Conclusões*

Neste capítulo são apresentadas as conclusões do trabalho. Inicialmente é realizada uma primeira análise de preenchimento de requisitos do NRF51 no que se refere ao projeto de medição no qual se pretende aplicá-lo. Na sequência apresenta-se as conclusões finais e finaliza-se com as perspectivas de trabalho futuro.

5.1 **Análise de preenchimento de requisitos usando o NRF51**

Identificação do cavaleiro: o NRF51 preenche esta necessidade pelo fato de poder armazenar dados de identificação na memória. Uma questão é se esta identificação necessita estar em flash, EEPROM ou RAM. Em princípio a identificação pode ser armazenada em flash mas teria que ser realizado durante a programação do módulo. Maior flexibilidade poderia ser obtida com acréscimo de uma EEPROM externa.

Passagem do Cavaleiro sobre a barreira: usando o critério de pacote com maior potência e considerando que dois sensores estariam instalados sobre uma barreira é perfeitamente possível identificar o momento da passagem do cavaleiro. Uma questão é a geração de um *timestamp* associado ao recebimento do pacote, supondo que o sensor do cavaleiro recebe pacotes (beacons) dos sensores sobre as barreiras. É necessário que os sensores dos cavaleiros possuam um relógio se possível sincronizado com uma base de tempo global.

Velocidade e aceleração na aproximação: em função das medições de potência x distância realizadas neste trabalho, principalmente àquelas em que o kit com antena foi utilizado, leva a uma conclusão que é possível extrair estas informações do sistema. A taxa de transmissão de 1 Mbps é a recomendada devido a mesma ter demonstrado uma maior estabilidade durante os testes realizados. Existe sim imprecisões na estimativa da distância mas se for considerado que o interesse não é a mediação de uma distância em particular mas sim uma sequência de estimativas de distância no tempo parece ser possível aplicar algum tratamento matemático,

para prever a velocidade de aproximação. Trata-se de um trabalho específico que pode ser desenvolvido no futuro.

Altura do salto: possivelmente um hardware de sensores adicional deve ser usado para capturar esta informação. O uso combinado com sensor ultrassom instalado no solo entre as barreiras poderia ser uma possibilidade a ser estudada. O uso destes sensores poderia ser de forma híbrida com o sistema de rádio e poderia inclusive ser usado para apoio a localização usando outras técnicas tais como o AoA, TDoA ou ToA.

Trajectoria do cavaleiro: Um sistema de auto localização das barreiras tendo como um ponto de referência com posição conhecida (ancoramento em um ponto com leitura de GPS) seria o ponto inicial para que se possa reconstruir as trajetórias de um cavaleiro sobre a área de treinamento. Um protocolo adicional teria que ser concebido neste sentido.

Detecção do Passo do Galope: uma aplicação adicional dos sensores baseados em NRF51 poderia ser a detecção do passo correto do cavalo (uso sincronizado das patas). Um sensor adicional deve ser concebido.

5.2 Conclusões Finais

Os objetivos iniciais colocados para o trabalho foram atingidos. Um estudo aprofundado dos dispositivos baseados na família NRF51 da *Nordic* foi realizado uma avaliação da relação potência recebida versus distância, perda de pacotes em função da distância e o consumo de energia. A taxa de transmissão que apresentou melhores resultados foi 1 Mbps.

É importante reforçar que os testes realizados mostraram um grande potencial do módulo NRF51 ficando, entretanto eles demonstram que a estimativa de parâmetros tais como distância entre objetos, velocidade e aceleração necessita de tratamento matemático adicional bem como a necessidade de adaptação de sensores ao seu contexto de aplicação. A medição da velocidade poderia ser feita através da distância entre o atleta e a próxima barreira dividida pelo tempo decorrido entre a passagem pela barreira anterior e sua posição atual. Existem alguns periféricos do NRF51822 que podem vir a ser utilizados para essa medição de tempo, como por exemplo o RTC. Não pode ser descartada a utilização de sensores adicionais, tal como ultrassom para obter melhor precisão nos resultados do posicionamento. Outra possibilidade é o estudo sobre a utilização de outros métodos para determinar o posicionamento tal como: o AoA (*Angle of*

Arrival) ou o ToA (*Time of Arrival*) combinados com o RSSI.

O sistema se mostra promissor para função qual foi pensado tendo inclusive a possibilidade de expansão para uma coleta de dados mais ampla fornecendo uma maior quantidade de informações sobre o desempenho do atleta que as opções disponíveis atualmente no mercado. Apesar de o sistema ser inicialmente ter sido pensado para a modalidade de salto ele pode vir a ser utilizado em outras modalidades.

5.3 Trabalhos Futuros

São vários os trabalhos que podem se seguir, alguns deles são:

1. o desenvolvimento do sistema de medição e treinamento para hipismo, inspiração deste trabalho;
2. estudo de método matemático para estimativa de distância, velocidade e aceleração baseada em RSSI;
3. estudo de algoritmo de localização de um conjunto de sensores tendo ancoragem em um nodo ajustado com GPS.

ANEXO A – *Imagens do Experimento 4 - Consumo de energia*

Neste anexo são apresentadas telas adicionais capturadas no experimento 4 relativo a avaliação do consumo de energia.

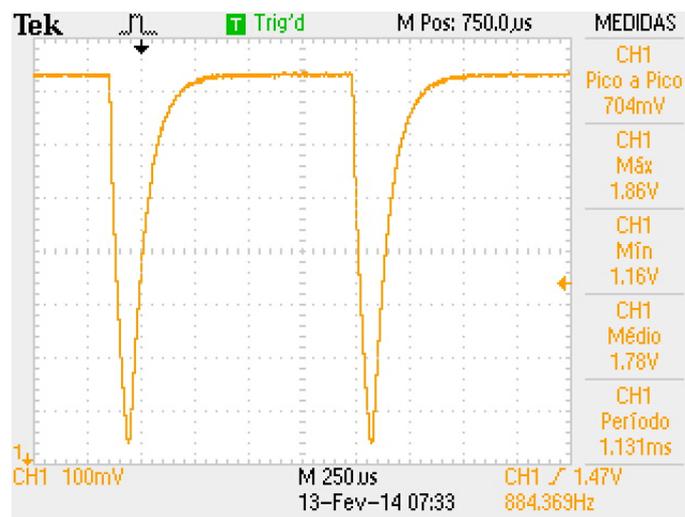


Figura A.1: Medição do consumo de energia transmitindo pacotes a uma taxa de 2 Mb com 4 dBm de potência

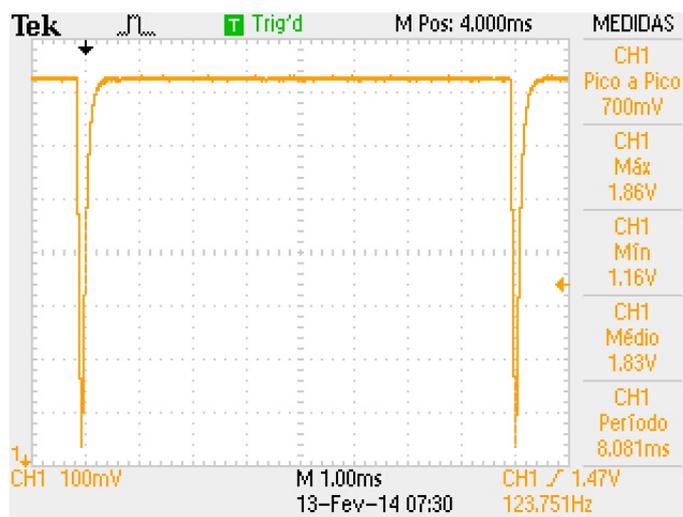


Figura A.2: Medição do consumo de energia transmitindo pacotes a uma taxa de 250 Kb com 4 dBm de potência

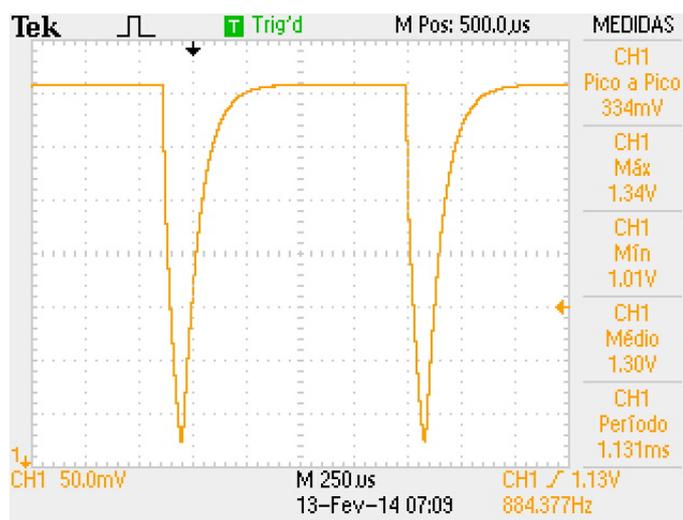


Figura A.3: Medição do consumo de energia transmitindo pacotes a uma taxa de 2 Mb com 0 dBm de potência

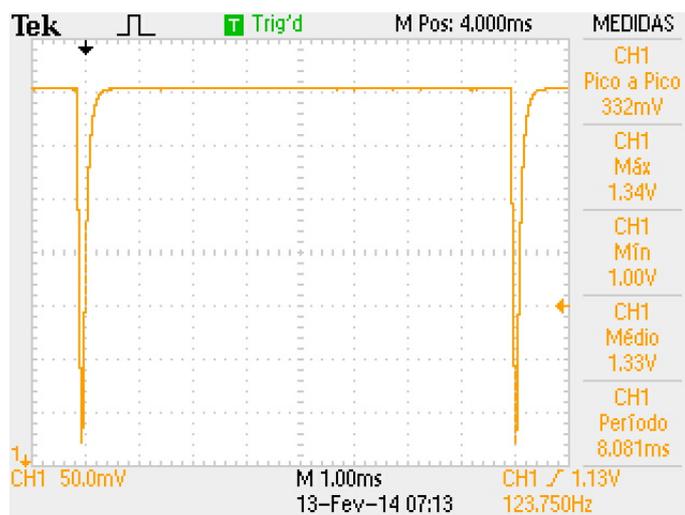


Figura A.4: Medição do consumo de energia transmitindo pacotes a uma taxa de 250 Kb com 0 dBm de potência

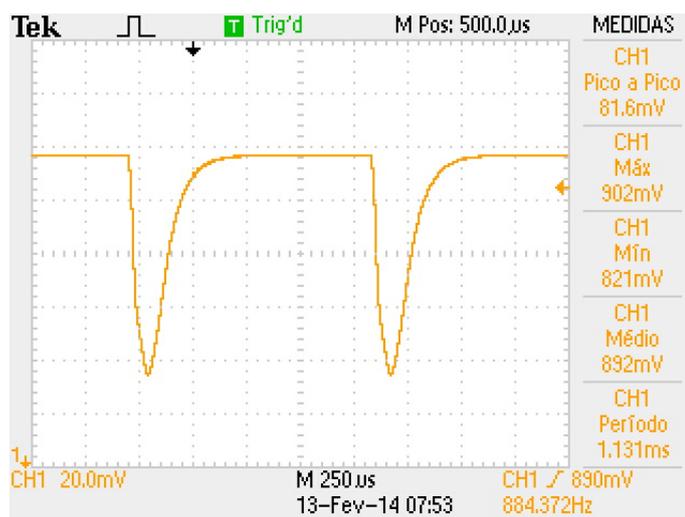


Figura A.5: Medição do consumo de energia transmitindo pacotes a uma taxa de 2 Mb com -20 dBm de potência

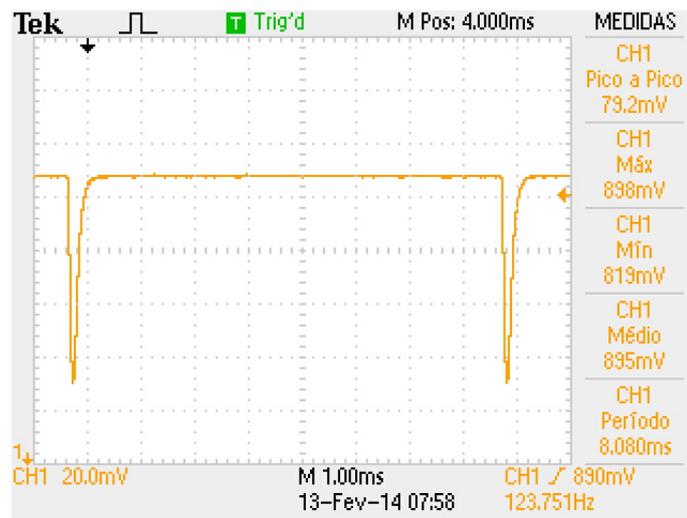


Figura A.6: Medição do consumo de energia transmitindo pacotes a uma taxa de 250 Kb com -20 dBm de potência

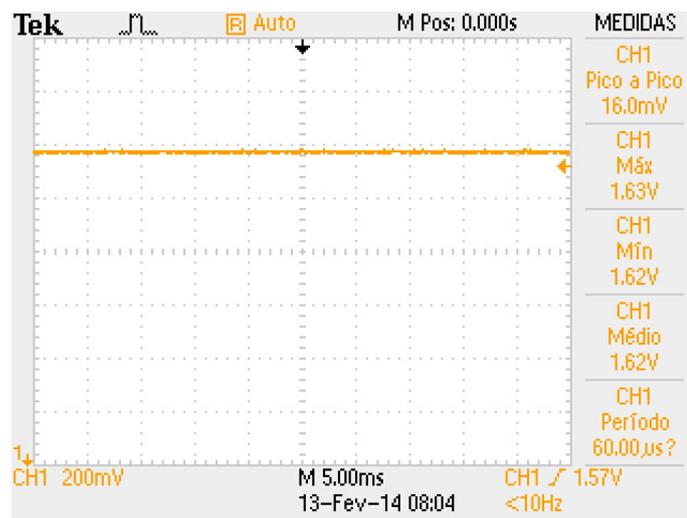


Figura A.7: Medição do consumo de energia recebendo pacotes a uma taxa de 2 Mb

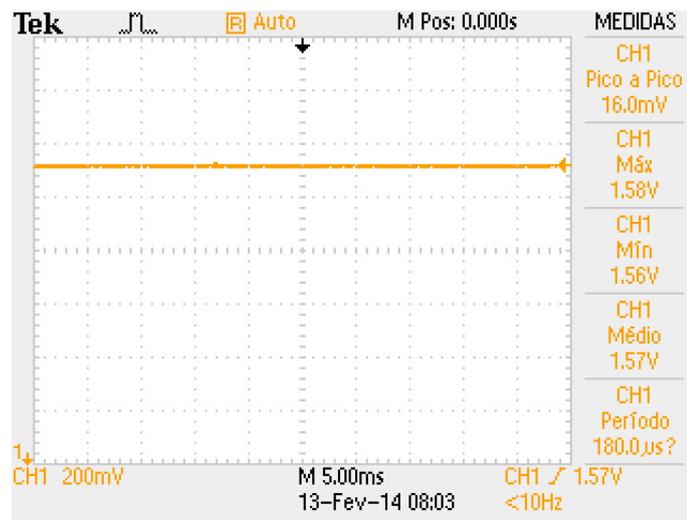


Figura A.8: Medição do consumo de energia recebendo pacotes a uma taxa de 250 Kb

Referências Bibliográficas

- ABREU, P. et al. Real-time wireless location and tracking system with motion pattern detection. *InTech, Robot localization and map building*, p. 467–492, 2010.
- ARM. *The Architecture for the Digital World*. 2013. Disponível em: <<http://www.arm.com/>>.
- BISATTO, A. P.; PERES, A. Localização de estação sem fio utilizando trilateração. *X Salão de Iniciação Científica e Trabalhos Acadêmicos*, 2009.
- BOUET, M.; SANTOS, A. L. dos. Rfid tags: Positioning principles and localization techniques. In: IEEE. *Wireless Days, 2008. WD'08. 1st IFIP*. [S.l.], 2008. p. 1–5.
- GREFF, P. de A.; DONIAK, P. M. H. *Especificação de um Sistema para Monitoramento*. 2009.
- HANSEN, W.-R.; GILLERT, F. *RFID for the Optimization of Business Processes*. [S.l.]: Wiley, 2008.
- HUNT, V. D.; PUGLIA, A.; PUGLIA, M. *RFID: a guide to radio frequency identification*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2007.
- JONES, E. C.; CHUNG, C. A. *RFID in logistics: a practical introduction*. [S.l.]: CRC press, 2010.
- MICROCHIP. *Pic16F688 Data Sheet*. [S.l.], 2004. Disponível em: <<http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/41203b.pdf>>.
- NORDIC-SEMICONDUCTORS. *Ultra Low Power Wireless Solutions*. 2013. Disponível em: <<http://www.nordicsemi.com/>>.
- OPENBEACON. *OpenBeacon Active RFID Project*. 2013. Disponível em: <<http://www.openbeacon.org/>>.
- PATTERSON, M. et al. Quantifying show jumping horse rider expertise using imus. In: IEEE. *Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), 2010 Annual International Conference of the IEEE*. [S.l.], 2010. p. 684–687.
- PAZ, S. M.; CUGNASCA, C. E.; SARAIVA, A. O sistema de posicionamento global (gps) e suas aplicações. *Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP-Departamento de Engenharia de Computação e Sistemas Digitais*, 1997.
- PEREIRA, P. J. G. et al. Real time locating system based on active rfid. 2011.
- SWEDBERG, C. *RFID-Guided Video System Gives Equestrians Their Best Shot*. Agosto 2007. Disponível em: <<http://www.rfidjournal.com/articles/view?3583/>>.

TEIXEIRA, V. M. M. Sistema de localização híbrido para apoio à navegação de cegos no campus da utad. 2010.

THOMPSON, D. R. *RFID Technical Tutorial*. 2006.

YIU, J. *The Definitive Guide to ARM® Cortex®-M0*. [S.l.]: Newnes, 2011.