

**CESAR YUJI AKASAKA
WILLIAN GRACIANO VIEIRA DE AGUIAR**

**Localização de pessoas e objetos em ambientes internos utilizando radio
frequência**

São Paulo
2017

**CESAR YUJI AKASAKA
WILLIAN GRACIANO VIEIRA DE AGUIAR**

**Localização de pessoas e objetos em ambientes internos utilizando radio
frequência**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia.

São Paulo
2017

**CESAR YUJI AKASAKA
WILLIAN GRACIANO VIEIRA DE AGUIAR**

**Localização de pessoas e objetos em ambientes internos utilizando radio
frequência**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para
obtenção do título de Bacharel em
Engenharia.

Orientador: Prof. Dr. José Kleber
Cunha Pinho.

São Paulo
2017

RESUMO

Este trabalho de graduação apresenta o estudo que foi realizado para implementação de um sistema de localização para ambientes fechados, utilizando um sistema formado essencialmente pelos módulos transceiver de comunicação sem fio nRF24L01, nRF24L01+ e a placa microcontroladora Arduino UNO R3. São apresentadas as principais técnicas de localização para ambientes fechados, os principais métodos para se estimar a localização de um módulo móvel e as tecnologias mais relevantes. Estudos comparativos foram realizados e, são apresentados neste trabalho, para determinar qual a tecnologia mais adequada para os propósitos deste projeto. O dispositivo móvel a ser localizado consiste, de um módulo de comunicação nRF24L01+ acoplado ao atenuador de sinal(PE4302) e uma antena. Cada bloco fixo(roteador), é formado, por um nRF24L01 controlado por um Arduino, têm como tarefa identificar sua posição relativa ao dispositivo móvel e transmitir para o dispositivo central do sistema(coordenador). Por fim, utilizando as informações fornecidas pelos blocos fixos, o coordenador irá definir a posição do módulo móvel.

Palavras-chave: Sistemas de Localização, *nRF24L01+*, nRF24L01, Arduino

ABSTRACT

This undergraduate work presents a study carried out to develop a tracking system for indoor environments using a system consisting essentially of the wireless communication transceiver modules nRF24L01, nRF24L01+ and the Arduino UNO R3 microcontroller board. We present the main tracking techniques for indoor environments, the main methods to estimate the location of a mobile module and the most relevant technologies. Comparative studies were carried out and, presented in this work, to determine the most appropriate technology for the purpose of this project. The mobile device to be located consists of a communication module nRF24L01+ attached to the signal attenuator(PE4302) and an antenna. Each fixed block(router), formed by an nRF24L01 controlled by an Arduino, has the task of identifying its position relative to the mobile device and transmitting it to the central device of the system(coordinator). Finally, using the information provided by the fixed blocks, the coordinator will define the position of the mobile module.

Keywords: Tracking Systems, nRF24L01+, nRF24L01, Arduino

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	– (a) Reflexão e refração, (b) Difração e (c) Espalhamento.....	17
Figura 2	– Exemplificação da ocorrência de multipercursos.....	18
Figura 3	– Exemplo Genérico de um modelo utilizando Angle of Arrival.....	19
Figura 4	– Exemplo Genérico de um modelo utilizando Time of Arrival.....	20
Figura 5	– Exemplo Genérico de um modelo utilizando Time Difference of Arrival.....	20
Figura 6	– Exemplo Genérico de um modelo utilizando Received Signal Strength Indicator.....	21
Figura 7	– Determinação da posição de um objeto (T1) utilizando triangulação.....	22
Figura 8	– Determinação de um objeto (T1) utilizando trilateração.....	23
Figura 9	– Topologias de redes possíveis.....	24
Figura 10	– Funcionamento do protocolo Wi-Fi.....	26
Figura 11	– Funcionamento da tecnologia RFID.....	27
Figura 12	– Topologia do tipo estrela suportada pelo Enhanced ShockBurst.....	29
Figura 13	– Transação de pacotes Enhanced ShockBurst.....	30
Figura 14	– Árvore de objetivos.....	31
Figura 15	– Módulos nRF24L01 e nRF24L01+, respectivamente, da Nordic Semiconductor.....	41
Figura 16	– Atenuador PE4302.....	43
Figura 17	– Tabela verdade utilizada para nível de atenuação.....	44
Figura 18	– Arduino UNO R3.....	45
Figura 19	– Exemplo de Topologia de Rede Utilizando Protocolo Enhanced ShockBurst.....	47
Figura 20	– Circuito para prova de conceito.....	48
Figura 21	– Estrutura do modelo do sistema.....	53
Figura 22	– Estrutura do pacote de informações do módulo dispositivo fim	54
Figura 23	– Esquema da estrutura física do módulo dispositivo fim	55
Figura 24	– Estrutura do pacote de informações do módulo roteador	56

Figura 25	– Esquema da estrutura física do módulo roteador e coordenador	56
Figura 26	– Estrutura Analítica do Projeto (EAP).....	59
Figura 27	– Matriz de Riscos.....	60
Figura 28	– Diagrama de análise de risco.....	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Perdas de penetração em obstáculos em 2,4 GHz.....	16
Tabela 2	– Valores limites de emissão eletromagnética para faixas de frequência relevante.....	32
Tabela 3	– Relação entre requisitos de marketing e de engenharia.....	34
Tabela 4	– Comparativo entre as tecnologias relevantes.....	37
Tabela 5	– Análise de vantagens e desvantagens.....	38

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A1	Association 1
A2	Association 2
AOA	Angle Of Arrival
BLE	Bluetooth Low Energy
CE	Coordinator Enable
EAP	Estrutura Analítica do Projeto
GPS	Global Positioning System
ID	Identification
IEEE	Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
LE	Low Energy
LoS	Line of Sight
RF	Rádio Frequência
RFID	Radio Frequency Identification Device
RSSI	Received Signal Strength Indication
TDOA	Time Difference Of Arrival
TOA	Time Of Arrival
USB	Universal Serial Bus
WiFi	Wireless Fidelity

SUMÁRIO

1.	DEFINIÇÃO DO PROBLEMA	11
1.1	Especificação da necessidade	11
1.2	Visão geral	11
1.3	Objetivos	12
2.	SISTEMAS DE LOCALIZAÇÃO	14
2.1	Fundamentos da teoria de propagação de sinais	14
2.1.1	Caracterização do comportamento do canal rádio	14
2.1.1.1	Dependência com a distância	14
2.1.1.2	Variabilidade de larga escala	15
2.1.1.3	Variabilidade de pequena escala	15
2.1.2	Outros efeitos de propagação	15
2.1.2.1	Perda de penetração	15
2.1.2.2	Reflexão, refração, difração e espalhamento	16
2.1.2.3	Multipercursos	18
2.1.2.4	Efeito da umidade	18
2.2	Parâmetros utilizados para localização	19
2.2.1	AOA (Ângulo de incidência ou chegada)	19
2.2.2	TOA (Tempo de chegada)	19
2.2.3	TDOA (Diferença no tempo de chegada)	20
2.2.4	RSSI (Indicador de intensidade do sinal recebido)	20
2.3	Métodos de localização	22
2.3.1	Triangulação	22
2.3.2	Trilateração	22
2.3.3	Proximidade	23
2.4	Tecnologias relevantes	24
2.4.1	ZigBee	24
2.4.2	Bluetooth Low Energy (BLE)	24
2.4.3	WiFi	25
2.4.4	RFID	25
2.4.5	Enhanced ShockBurst	28
2.5	Árvore de objetivos	31

3.	REQUISITOS E RESTRIÇÕES	32
3.1	Requisitos	32
3.1.1	Requisitos de marketing	32
3.1.2	Requisitos de engenharia	33
3.1.3	Relação entre os requisitos de marketing e engenharia	34
3.2	Restrições	36
4.	DEFINIÇÃO DE UMA SOLUÇÃO	37
4.1	Tabela comparativa entre tecnologias	37
4.2	Análise de vantagens e desvantagens	38
5.	A TECNOLOGIA ESCOLHIDA	41
5.1	Dispositivos necessários para montagem do projeto	41
5.1.1	O módulo nRF24L01	41
5.1.1.2	Topologia de rede em Estrela	42
5.1.2	O atenuador PE4302	42
5.1.2.1	Interfaces disponíveis	45
5.1.3	A placa controladora Arduino UNO R3	46
5.1.3.1	O “cérebro” do Arduino	47
5.1.3.2	Comunicação USB da placa Arduino UNO	47
6.	PROVA DE CONCEITO	49
6.1	Código do módulo emissor	49
6.2	Código do módulo intermediador	50
6.3	Código do módulo receptor	52
7.	O PROJETO	53
7.1	Estrutura do sistema	53
7.2	Módulo Dispositivo Fim	54
7.3	Módulo Roteador	55
7.4	Módulo Coordenador	57
7.5	Configurações alternativas	58
8.	GERENCIAMENTO DO PROJETO	59
8.1	Estrutura Analítica do Projeto	59
8.2	Análise de riscos	60
9.	REFERÊNCIAS	62

1. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

1.1 Especificação da necessidade

À medida que instalações hospitalares vêm tornando-se maiores e mais complexas, com o objetivo de suprir de maneira cada vez mais eficiente as necessidades e demandas da sociedade, passa-se a buscar formas mais eficientes de controlar e gerenciar os recursos humanos dentro destes espaços.

Imagine que em determinada ala do complexo, toda uma equipe está realizando procedimentos e atendimentos que não possam ser interrompidos e em um mesmo momento surja uma situação de emergência. Identificar rapidamente que toda equipe está ocupada e, igualmente rapidamente, localizar um profissional ocioso em outra ala do complexo, capaz de suprir a necessidade emergencial, pode ser a diferença entre evitar ou não complicações mais graves a um paciente.

Para aumentar a produtividade, diminuir custos surge e aumentar a segurança dos pacientes em casos emergenciais, surge a necessidade de um sistema eficiente de monitoramento e gerenciamento, em tempo real, dos recursos humanos e físicos disponíveis.

1.2 Visão geral

Na última década, avanços tecnológicos e o desenvolvimento de dispositivos eletrônicos de baixo consumo energético e com capacidade de comunicação sem fio possibilitaram o surgimento de um novo campo de aplicações na área de mobilidade e rastreamento de pessoas e objetos. As redes compostas por vários sensores sem fio, atualmente, podem ser desenvolvidas com baixíssimo custo de implementação, aplicando-se diferentes técnicas. Diversas aplicações são possíveis, por exemplo, monitoramento ambiental, gerenciamento de suprimentos e pessoas, automação industrial e residencial, rastreamento e coleta de informações.

Entre os sistemas de localização existentes e disponíveis no mercado destacam-se o sistema denominado: Global Positioning System (GPS), que

consegue determinar com certa precisão a posição de um nó móvel através de uma rede de satélites, mas tem como limitação o funcionamento apenas em espaços externos. Outra tecnologia de destaque no momento faz utilização de portais com sensores RFID para identificar pessoas e objetos. Os tags, empregados nesta tecnologia, contém um chip detectável em uma certa região. Para pequenas distâncias existem, também, sistemas que utilizam ultrassom ou infravermelho, mas que necessitam que não existam obstáculos entre o objeto e o transmissor/receptor. Além de apresentar um custo de hardware mais elevado.

Ao considerar-se a proposta de localização de pessoas e objetos deve-se observar com cautela alguns aspectos importantes com relação à tecnologia empregada.

Portabilidade é um aspecto fundamental quando consideramos as necessidades de mobilidade e agilidade motora intrínsecas das funções dos usuários.

Custo sempre será um critério muito importante, mas para uma solução que propõe, entre seus pilares, a otimização de processos para, entre outros objetivos, a redução dos custos, não pode propor soluções financeiramente desvantajosas as empresas que venham adotar o sistema.

Sustentabilidade é um assunto que vem ganhando espaço, ano a ano, e em um projeto moderno, com foco principal na área de saúde, não pode oferecer riscos diretos ou indiretos aos usuários.

E, por último, temos de considerar a facilidade na operação. Visto que, as pessoas que irão lidar com os dados recebidos pelo sistema não serão especializadas na área da tecnologia, o projeto oferecerá softwares com interface amigável e intuitiva.

1.3 Objetivos

Para suprir essas necessidades apresentadas, o objetivo é integrar tecnologias de transmissão e recepção utilizando tecnologias, tais como RFID, ZigBee, WiFi e Bluetooth Low Energy, criando um sistema que possibilitaria a um usuário credenciado, em um terminal, localizar, selecionar e contatar membros de sua equipe de forma otimizada e em tempo real.

O sistema seria composto por nós fixos que ao comunicar-se com um nó móvel identificariam e transmitiriam a posição relativa do mesmo para um nó central, do sistema, que realizaria a triangulação da posição deste e disponibilizaria, em um terminal, as informações a um operador.

Em suma, a proposta é de projetar um sistema de monitoramento e gerenciamento de pessoas e objetos em um ambiente interno que tenha baixo custo de implementação e baixo consumo de energia.

2. SISTEMAS DE LOCALIZAÇÃO

2.1 Fundamentos da teoria de propagação de sinais

As ondas de radio frequência (RF) consistem em ondas eletromagnéticas com frequências na faixa de 30KHz a 400GHz (NALBADIAN, 1998). Diversos fenômenos interferem na propagação de sinais deste tipo. Sistemas de localização que utilizam ondas de rádio estão sujeitos a essas influências muitas vezes criando restrições a implementação do projeto proposto, por este motivo é necessária uma análise teórica da propagação de sinais.

2.1.1 Caracterização do comportamento do canal rádio

A propagação de ondas eletromagnéticas em ambientes fechados apresenta comportamentos estocásticos e nem sempre possíveis de serem caracterizados. Diversos efeitos afetam a propagação dessas ondas, sendo os principais: dependência com a distância, variabilidade de larga escala e variabilidade de pequena escala (NAJNUDEL, 2004).

2.1.1.1 Dependência com a distância

Qualquer sinal tem seu nível de potência atenuado à medida que se propaga. Este fato se dá, devido ao espalhamento do sinal no espaço, reduzindo a sua densidade de potência. No caso de um sinal se propagando no espaço livre (sem obstruções ou reflexões), esta atenuação tem uma relação quadrática com a distância percorrida pelo sinal. Em ambientes em que o relevo e a morfologia (ou obstáculos, como móveis, no caso de ambientes fechados) obstruem o caminho do sinal que está se propagando, esta atenuação em relação à distância acentua-se podendo atingir uma dependência com a quarta ou quinta potência com a distância (NAJNUDEL, 2004).

2.1.1.2 Variabilidade de larga escala

A variabilidade de larga escala, também conhecida como efeito de sombreamento, está associada a flutuações do nível de potência do sinal em torno do seu valor médio, em razão das características do relevo e da morfologia do ambiente. Esta variabilidade é bem modelada por uma distribuição log-normal (ou distribuição Gaussiana, se utilizada escala logarítmica) (NAJNUDEL, 2004).

2.1.1.3 Variabilidade de pequena escala

A variabilidade de pequena escala é causada por raios provenientes de um transmissor que chegam ao receptor por caminhos diferentes (efeito de multipercurso). Estes diferentes caminhos implicam que os sinais cheguem ao receptor com amplitudes e fases diferentes. A fase dos raios é mais sensível a pequenos deslocamentos quanto maior a frequência do sinal transmitido. Este fenômeno também é chamado de desvanecimento (ou fading, que é descrito como a flutuação instantânea do nível de sinal). Nas faixas de 2,4 e 5,2 GHz, em que o comprimento de onda é próximo de 1 cm, pequenos deslocamentos no transmissor ou no receptor podem levar a uma configuração tal que cause profundos desvanecimentos no sinal recebido. Ao mesmo tempo, a duração destes desvanecimentos é muito curta, diferentemente dos desvanecimentos de larga escala (NAJNUDEL, 2004).

2.1.2 Outros efeitos de propagação

2.1.2.1 Perda de penetração

As perdas de penetração dependem, entre outros fatores, do comprimento de onda do sinal incidente, da natureza do material do obstáculo, suas dimensões e posicionamento. Obstáculos sólidos metálicos refletem grande parte do sinal incidente, impedindo a propagação através deste. Já obstáculos sólidos de madeira, plástico ou tijolos refletem uma parte do sinal e permitem que uma parcela seja transmitida através. Por sua vez, água e

objetos úmidos tendem a absorver uma grande parte do sinal incidente (NAJNUDEL, 2004). A tabela 1 apresenta valores em decibéis (dB) de perda de penetração medidos pelo European COST 231 para os obstáculos mais comuns em ambientes fechados. Os valores apresentados foram obtidos para frequência de 2,4 GHz.

Tabela 1 – Perdas de penetração em obstáculos em 2,4 GHz.

Obstáculo	Perda adicional [dB]
Espaço livre	0
Janela (tinta não metálica)	3
Janela (tinta metálica)	5 a 8
Parede fina (madeira sem verniz)	5 a 8
Parede média (madeira sem verniz)	10
Parede espessa (aprox. 15 cm)	15 a 20
Parede muito espessa (aprox. 30 cm)	20 a 25
Piso / Teto espesso	15 a 20
Piso / Teto muito espesso	20 a 25

2.1.2.2 Reflexão, refração, difração e espalhamento

Em ambientes fechados, é comum que o sinal que está se propagando tenha que atravessar obstáculos como paredes, móveis, portas ou até pessoas. Os modelos de propagação mais simples desconsideram essas obstruções ao admitir que sempre haja visada direta entre os pontos de comunicação. Entretanto, ao encontrar um obstáculo, a propagação do sinal pode ser afetada das seguintes formas:

Reflexão – ocorre quando uma onda eletromagnética incide sobre um objeto de dimensões muito maiores do que o comprimento de onda do sinal incidente. Este efeito pode implicar em uma reflexão da onda para diferentes direções e em uma atenuação na potência do sinal, no caso de uma parte deste conseguir atravessar o obstáculo.

Refração – ocorre quando uma onda atravessa um meio de densidade diferente do meio em que se propagava. Por exemplo, quando uma onda que está se propagando no ar incide sobre a água ou uma superfície de vidro, a

direção da onda incidente muda. Uma parte do sinal é refletida e outra é refratada, continuando o percurso através do obstáculo, mas em uma direção diferente.

Difração – ocorre quando o percurso de uma onda é obstruído por um obstáculo de superfície irregular ou pela extremidade de um obstáculo. A difração depende fortemente da frequência da onda que está se propagando, em razão da obstrução do elipsoide de Fresnel (NAJNUDEL, 2004). Em sinais de alta frequência, a difração pode inviabilizar uma transmissão entre dois pontos. Entretanto, este efeito é muito útil para sinais de frequência mais baixa, como as faixas de celulares, pois, de acordo com o princípio de Huygen (TEORIA DE PROPAGAÇÃO, 2010), cada ponto numa frente de onda se comporta como uma fonte isolada, dessa forma, haverá a formação de ondas secundárias atrás do obstáculo, mesmo que não haja linha de visada entre o transmissor e o receptor. Isso pode explicar como em ambientes fechados mesmo que um usuário não veja o outro eles mesmo assim podem se comunicar.

Espalhamento – ocorre quando uma onda eletromagnética incide sobre um objeto cujo tamanho é muito pequeno em relação ao comprimento de onda do sinal incidente. Este efeito obedece aos mesmos princípios físicos da difração espalhando a energia do sinal do transmissor em muitas direções. A figura 1 ilustra estes fenômenos de propagação.

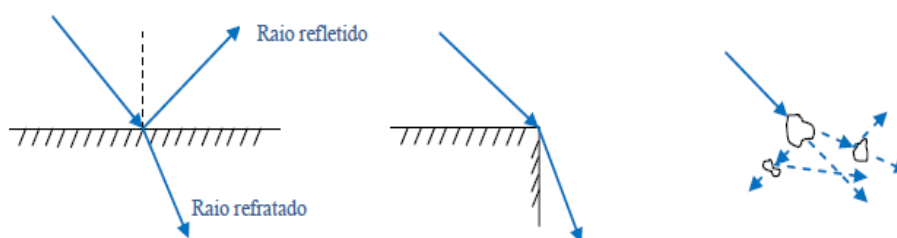


Figura 1 – (a) Reflexão e refração, (b) Difração e (c) Espalhamento.

Fonte: Najnudel (2004)

2.1.2.3 Multipercursos

O efeito de multipercurso, ilustrado na figura 2 é causado pelos fenômenos de reflexão, difração e espalhamento. Estes fenômenos fazem com que um sinal atinja um destino por diferentes caminhos, além do percurso em visada direta (LoS – Line of Sight), quando este existe. A interseção destes raios faz com que o sinal em um

Raio refletido Raio refratado dado ponto no espaço seja composto pelos diversos sinais, de modo construtivo, isto é, aumentando o nível de potência do sinal, ou de modo destrutivo, diminuindo o nível de potência do sinal (NAJNUDEL, 2004).

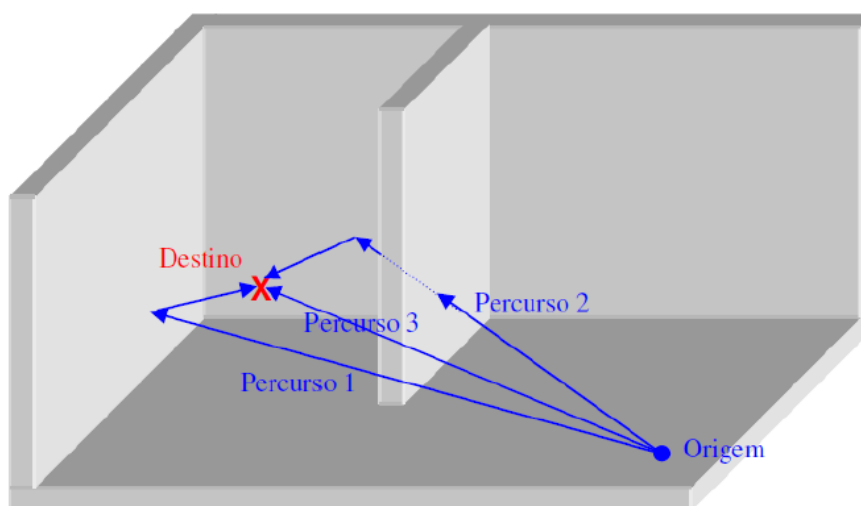


Figura 2 – Exemplificação da ocorrência de multipercursos.

Fonte: Najnudel (2004)

2.1.2.4 Efeito da umidade

Perdas adicionais podem ocorrer em ambientes onde as paredes estão muito úmidas, devido principalmente à maior reflexão do sinal. Em (MICHAEL, 1999) é demonstrado que a perda de penetração em paredes ou pisos úmidos aumenta em aproximadamente 10% em relação aos mesmos secos.

2.2 Parâmetros Utilizados para Localização

Nesta seção são apresentados os quatro principais parâmetros utilizados para estimar posição em um sistema de localização.

2.2.1 AOA (Ângulo de Incidência ou Chegada)

O método AoA utiliza antenas direcionais para determinar de que direção está vindo um determinado sinal. É possível determinar a posição de um dispositivo móvel, se houver duas ou mais antenas fixas, para detectar um sinal. (ZEIMPEKIS; GIAGLIS; LEKAKOS, 2002).

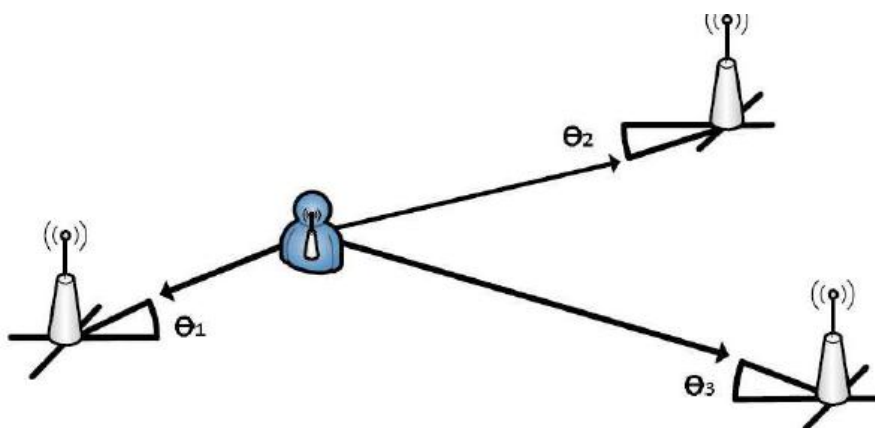


Figura 3 - Exemplo Genérico de um modelo utilizando Angle of Arrival.

2.2.2 TOA (Tempo de Chegada)

A técnica TOA é utilizada para se medir o tempo de chegada de um sinal emitido por um transmissor a um receptor. Há dois tipos de abordagens desta técnica. Na primeira delas, um transmissor envia sinais para vários receptores e estes informam o instante de chegada do sinal para uma central. E, numa segunda abordagem vários transmissores enviam sinais para um receptor. Neste caso os transmissores devem estar sincronizados e pode haver perdas de informação.

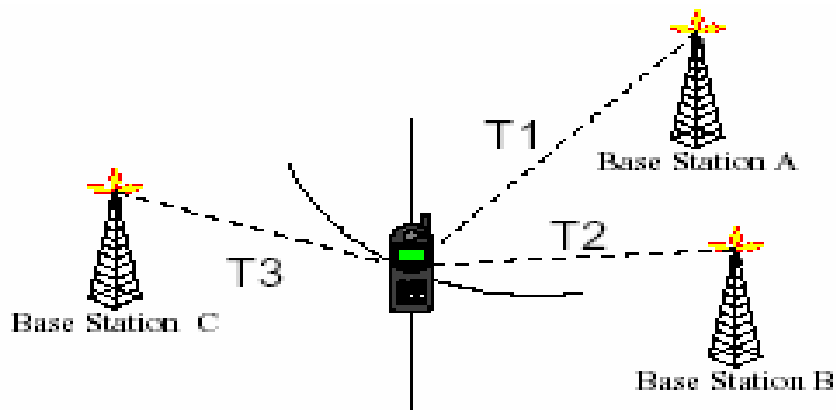


Figura 4 - Exemplo Genérico de um modelo utilizando Time of Arrival.

2.2.3 TDOA (Diferença no Tempo de Chegada)

Esta técnica é um aprimoramento da técnica anterior, visto que, neste caso o problema da sincronização e da perda de informações é resolvido, pois o transmissor envia dois ou mais sinais com destinos diferentes. Quando os sinais chegam aos receptores é determinada a diferença de tempo entre eles. Para medir esse parâmetro é utilizado um transdutor ultrassônico.

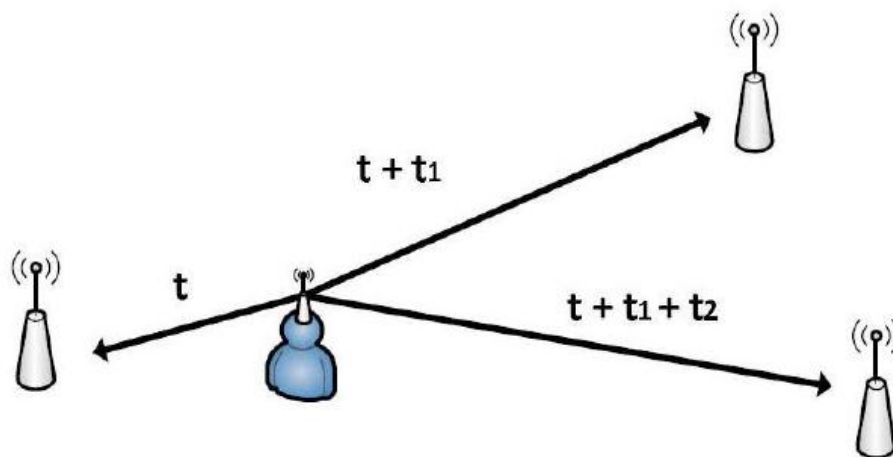


Figura 5 - Exemplo Genérico de um modelo utilizando Time Difference of Arrival.

2.2.4 RSSI (Indicador de Intensidade do Sinal Recebido)

Este método determina a distância entre um transmissor e um objeto através da perda de percurso que o sinal sofre pelo meio físico. Considerando que as potências transmitidas (emissor) e recebidas (receptor) são conhecidas,

é possível determinar a atenuação do sinal subtraindo-se a potência recebida da potência transmitida.

Para este método é necessário caracterizar o decaimento da potência com a distância “d” para cada ambiente de propagação. Em ambientes externos temos a seguinte relação entre potência e distância:

$$P_r \propto \frac{1}{d^2} \quad (1)$$

Já para ambientes internos, a relação é a seguinte:

$$p_r = \frac{P_{(d_0)}}{(d / d_0)^n} \quad (2)$$

Onde P_r é a potência recebida à distância “d” do transmissor. $P(d_0)$ é a potência recebida à distância “d0” e “n” é um parâmetro, de 2 a 6, que depende das características do ambiente, sendo necessário determinar esse valor experimentalmente.

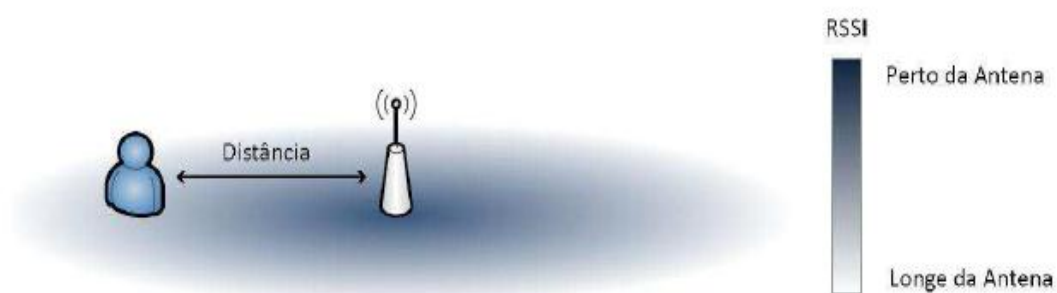


Figura 6 - Exemplo Genérico de um modelo utilizando Received Signal Strength Indicator.

2.3 Métodos de Localização

Nesta seção são apresentados métodos, relevantes para este projeto, capaz de fornecer uma estimativa da posição de um nó móvel, em um sistema de localização, a partir da medição de um ou mais parâmetros da seção anterior.

2.3.1 Triangulação

Este método baseia-se nas propriedades do triângulo. Na aplicação deste método à prática, cada vértice do triângulo seria um transceptor com sua posição conhecida e escolhida no ambiente. Utilizando a magnitude AOA e as distâncias entre os pontos fixos é possível determinar a posição do objeto (CHUAN-CHIN PU et al., 2011).

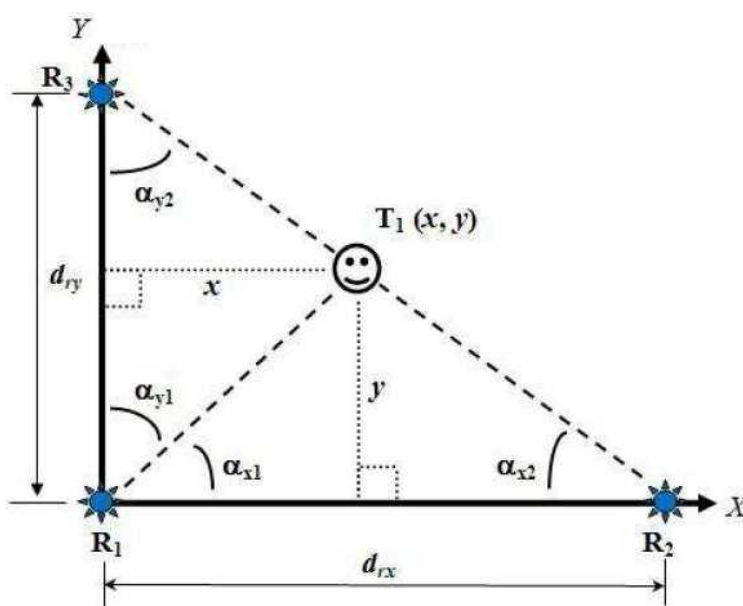


Figura 7 - Determinação da posição de um objeto (T1) utilizando triangulação.

Fonte: (CHUAN-CHIN PU et al., 2011).

2.3.2 Trilateração

Para se localizar um elemento pelo método da trilateração, são necessários 3 transceptores. Utilizando o parâmetro RSSI, cada um deles calcula a distância que está do objeto. Dadas as distâncias calculadas, a

técnica é aplicada da seguinte maneira: traçam-se três circunferências em torno de cada transceptor e, no ponto de intersecção delas será a posição do elemento procurado.

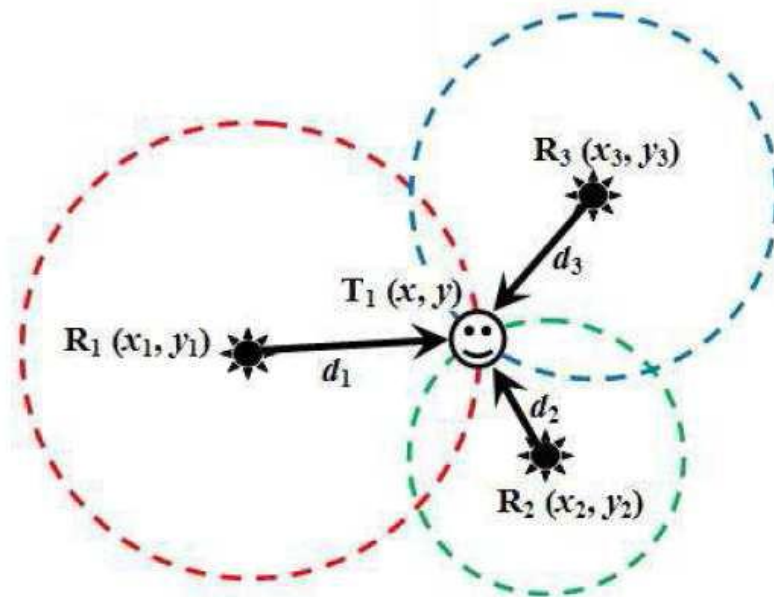


Figura 8 - Determinação de um objeto (T1) utilizando trilateração.

Fonte: (CHUAN-CHIN PU et al., 2011).

2.3.3 Proximidade

Esta técnica obtém a localização por meio da proximidade do nó de posição desconhecida com os nós de referência em posições pré-definidas. Utiliza detecção por contato físico ou detecção por sensores sem fio. Trata-se da técnica mais simples para sistemas de localização por não necessitar de hardware exclusivo nem algoritmos complexos para inferência de posição. Contudo, necessita da instalação de uma infraestrutura com grande número de nós de referência, implicando geralmente, em elevada necessidade de manutenção (JUNIOR, 2011).

2.4 Tecnologias Relevantes

2.4.1 ZigBee

O protocolo ZigBee respeita as regras estabelecidas pelo padrão IEEE 802.15.4 e trabalha nas faixas de UHF (868/915/2450MHz) e utiliza baixa potência de saída (~23dBm). Basicamente, foi criado para atender a necessidade de comunicação entre dispositivos de controle e sensores.

Existem 3 unidades que formam uma rede ZigBee: o coordenador, o roteador e o nó móvel(ou dispositivo final). Cada um pode assumir um papel, dependendo da topologia adotada no projeto.

Pode-se utilizar 3 tipos de topologias quando se trabalha com o ZigBee. São eles:

- Árvore (Cluster Tree): Há uma hierarquia e o coordenador assume o papel de nó mestre para a troca de informação entre os nós Roteador e Dispositivo final;
- Estrela(Star): é composta de um nó coordenador, e quantos nós de dispositivos finais forem necessários;
- Malha(Mesh): a rede se auto organiza para otimizar o tráfego de dados, ou seja, todos os nós conseguem se comunicar e trocar dados entre eles e com a central (coordenador).

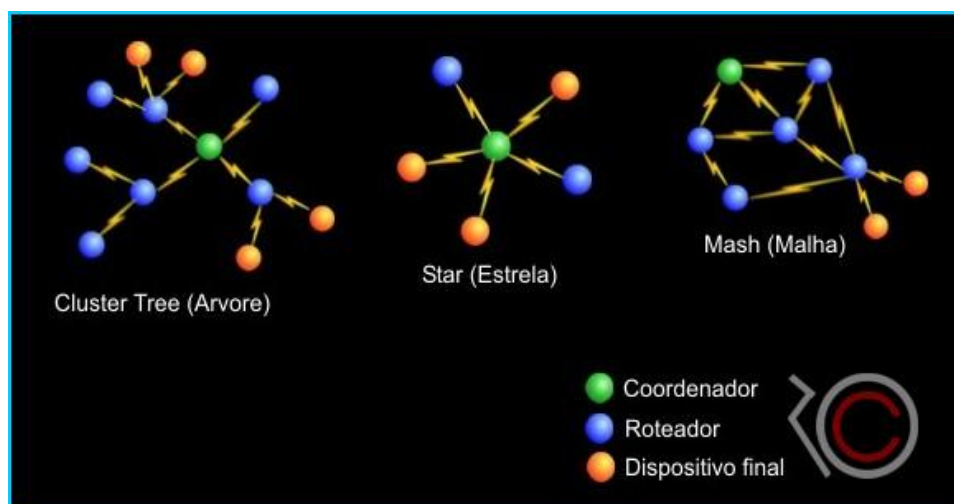


Figura 9 – Topologias de redes possíveis

Fonte: Arquivo da tag: rfd¹

¹ Disponível em:< <https://niltonfelipe.wordpress.com/tag/rfd/>>

Dentre as vantagens do ZigBee, podemos citar o fato de que existe a possibilidade de comunicação entre dois ou mais ZigBee's da mesma rede, podendo alcançar centenas de dispositivos trocando/retransmitindo dados entre si. Também, para gerenciar os dados recebidos/transmitidos, é preciso apenas de um software instalado num dispositivo para que se possa ter acesso às informações coletadas.

A diferença entre o protocolo ZigBee e os protocolos Wi-fi e Bluetooth clássico é o consumo de energia que o primeiro demanda para seu funcionamento, o que faz com que a instalação destes dispositivos seja muito facilitada, já que não são necessárias instalações elétricas próximas ao ZigBee. Porém, devido a isso, seu alcance é menor.

2.4.2 Bluetooth Low Energy (BLE)

Conhecido também como Bluetooth Smart, Bluetooth 4.0 e iBeacon(Apple), o BLE foi projetado com o objetivo de consumir o mínimo de energia possível no processo de transferência de dados. Mesmo assim, o alcance de seu sinal supera o do Bluetooth clássico.

A faixa de operação deste protocolo é de 2.4GHz-2.4835GHz, a mesma utilizada pelo Bluetooth clássico, porém, com um sistema de modulação mais simples.

Sistemas operacionais que suportam tal tecnologia, são eles: iOS, Android, Windows Phone, Blackberry, OS X, Linux e Windows 8.

Como vantagem em relação às outras tecnologias podem-se citar a resistência às altas temperaturas (125 °C) e, assim como o ZigBee, possui baixo custo de implementação. Por isso, o BLE é muito utilizado para automação residencial, sensores de exercício, dispositivos médicos sem fio, georreferenciamento no varejo, pagamentos móveis, entre outros.

2.4.3 Wi-Fi

Wireless Fidelity, mais conhecido como Wi-Fi, é um protocolo de comunicação digital através do qual aparelhos conseguem se comunicar entre

si sem a necessidade de cabos. A troca de informação utilizando o protocolo Wi-Fi pode ser resumida em 3 fases:

- Fase 1: é o momento em que a informação é preparada para a transmissão; é codificada; transformada em quadros.
- Fase 2: a informação é transmitida através do ar.
- Fase 3: a informação é recebida, decodificada e então utilizada.

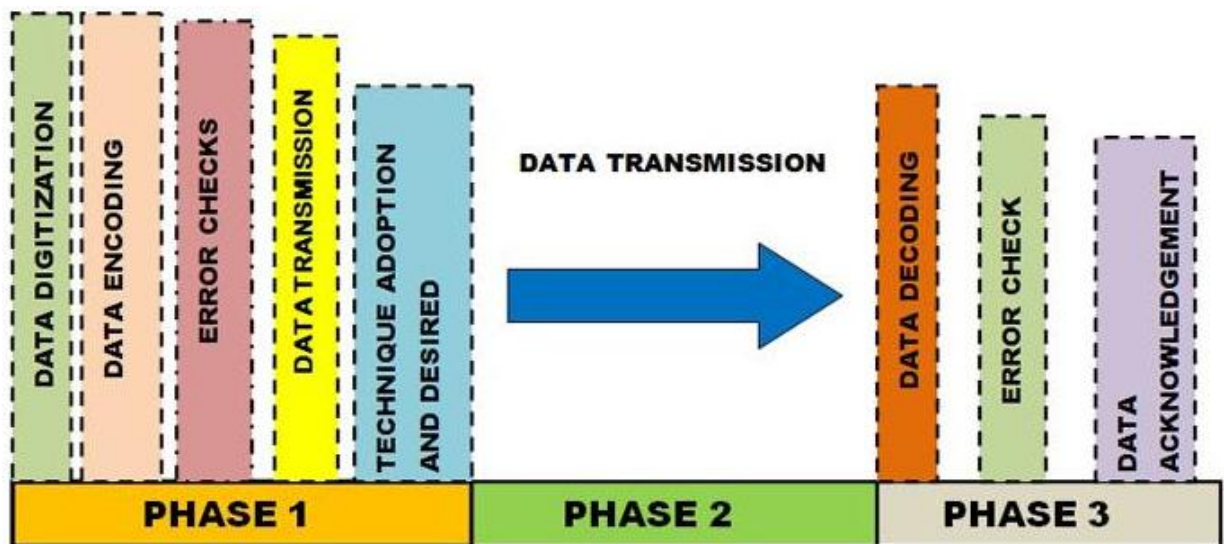


Figura 10 - Funcionamento do protocolo Wi-Fi

Fonte: EngineersGarage²

Apesar de ser um protocolo robusto, necessita de hardware com alto consumo de energia e alto custo de implementação.

2.4.4 RFID

A tecnologia RFID (identificação por radiofrequência) utiliza um método de operação que envolve, normalmente, um transponder (etiqueta ou tag de RF), e um leitor. Funciona da seguinte forma: a leitora transmite um sinal não modulado para o tag ou transceptor presente numa determinada região, cuja área pode ser maior ou menor de acordo com a potência e o tipo de antena utilizado, que por sua vez retifica o sinal de RF, e polariza uma memória (onde

² Disponível em: < <http://www.engineersgarage.com/articles/what-is-wifi-technology> >

estão gravadas todas as informações desejadas) e reenvia o sinal, já modulado para a antena da leitora.

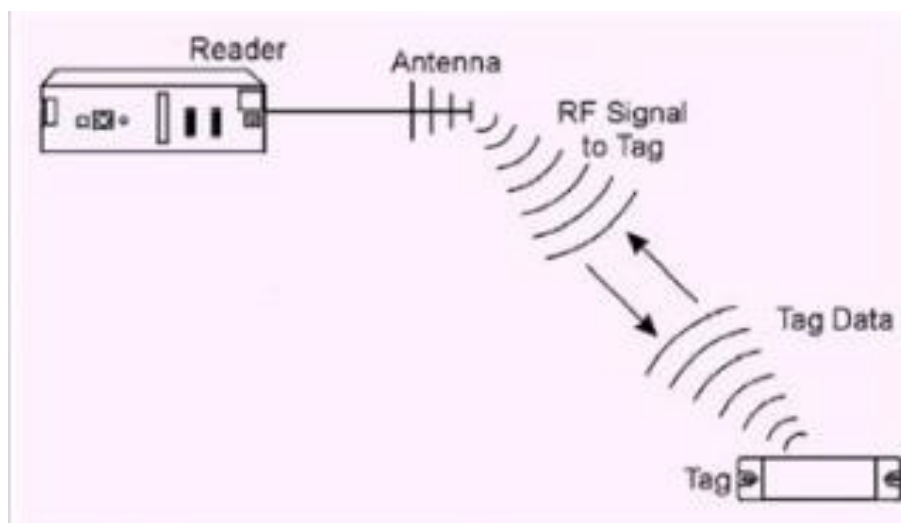


Figura 11 - Funcionamento da tecnologia RFID

Fonte: University of Nebraska³

O sistema de RFID é muito utilizado atualmente. Citemos alguns exemplos: pagamento via celular, portais de pedágio, controle de estoque, rastreamento de cargas, sistemas antifurto, rastreamento de animais, entre outros.

Comparado às tecnologias anteriormente apresentadas, o custo de implementação desta tecnologia é de médio para alto. Porém, em certos casos este é o único método que atenderia as necessidades de forma mais rápida e eficiente.

2.4.5 Enhanced ShockBurst™

Também conhecido como ESB, o protocolo Enhanced ShockBurst suporta a comunicação bi-direcional de pacotes, incluindo pacotes de buffer, pacotes de acknowledgement e retransmissão automática de pacotes perdidos. Este protocolo foi incorporado em hardware nos dispositivos da série nRF24Lxx da empresa Nordic Semiconductor.

³ Disponível em: < <http://slideplayer.com/slide/5161275/> >

Dentre suas vantagens, está o fato do hardware ser de baixo custo, suportar um sistema com a topologia do tipo estrela e transmissão de dados bi-direcional entre receptores e transmissores.

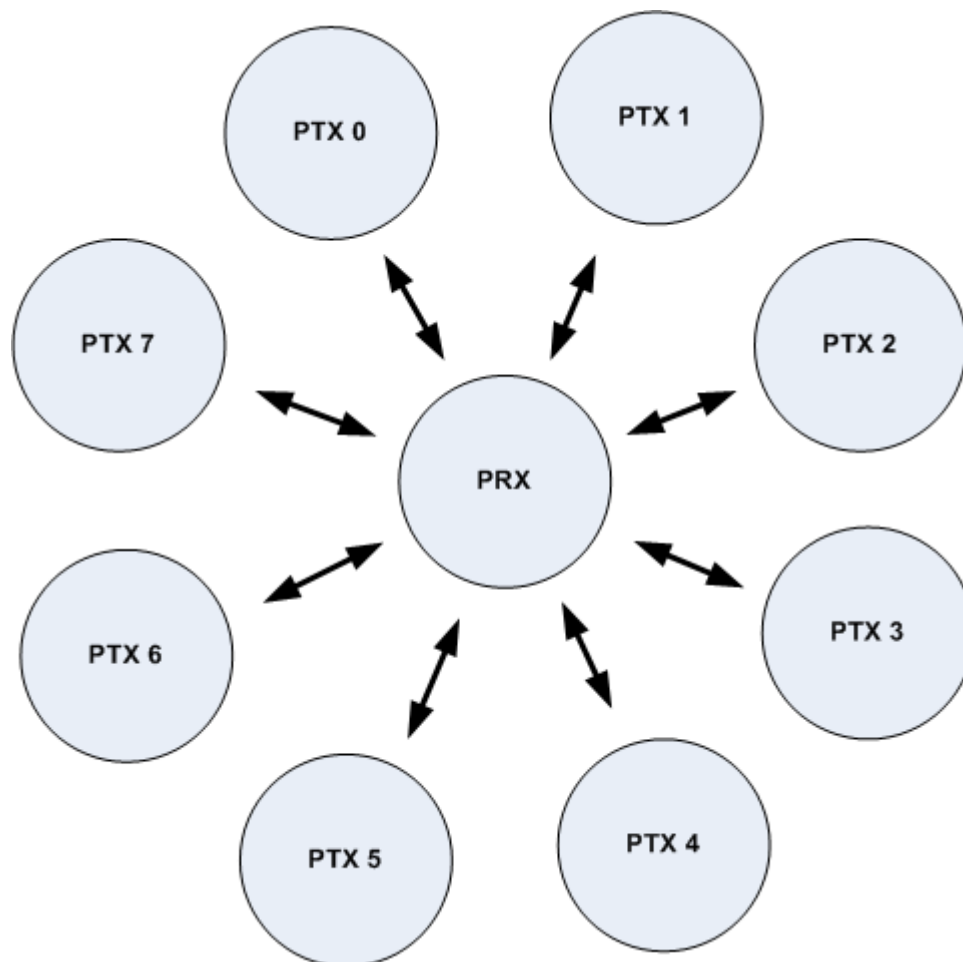


Figura 12 – Topologia do tipo estrela suportada pelo Enhanced ShockBurst

Fonte: Página da Nord Semiconductor⁴

⁴ Disponível em: <https://devzone.nordicsemi.com/documentation/nrf51/4.2.0/html/group__esb__users__guide.html>

A transação de pacotes é iniciada pela transmissão de um pacote do PTX(Primary Transmitter) e envia para o PRX(Primary Receiver). O processo é finalizado com sucesso quando o PTX recebe um pacote de acknowledgement do PRX.

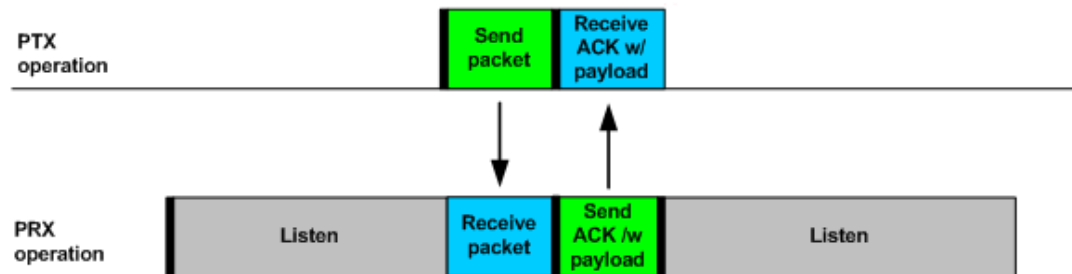


Figura 13 – Transação de pacotes Enhanced ShockBurst

Fonte: Página da Nord Semiconductor⁵

⁵ Disponível em: <https://devzone.nordicsemi.com/documentation/nrf51/4.2.0/html/group__esb__users__guide.html>

2.5 Árvore de Objetivos

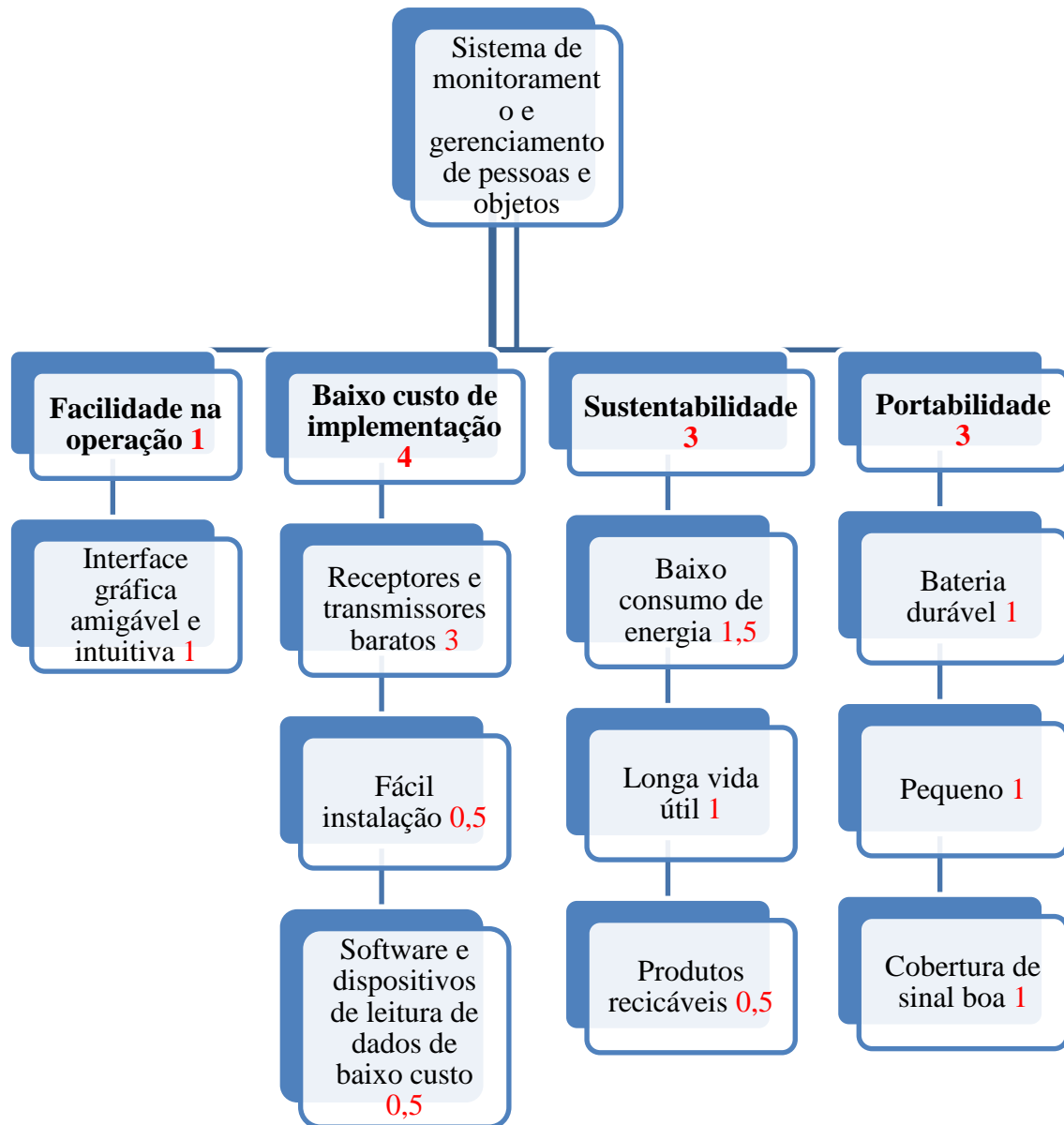


Figura 14 – Árvore de objetivos.

1. Os pesos ou importâncias de cada quesito estão em vermelho.
2. O primeiro item de cada segmento tem peso igual ao total dos demais itens do segmento.

3. REQUISITOS E RESTRIÇÕES

3.1 Requisitos

3.1.1 Requisitos de marketing

São requisitos de marketing: toda característica ou especificação, não necessariamente técnica, que impacta o desempenho de mercado do projeto a ser desenvolvido. A seguir pode-se observar os requisitos de marketing pertinentes a este projeto.

1. Facilidade na operação.
 - A interface destinada ao usuário, para operação do sistema, deve ser simples.
2. Baixo custo de implementação.
 - Dispositivos e equipamentos de baixo custo.
 - Software de baixo custo.
 - Baixo custo de instalação e manutenção.
3. Sistema sustentável.
 - Baixo consumo de energia.
 - Longa vida útil.
 - O sistema deve estar de acordo com todos os níveis seguros de emissão eletromagnéticos exigidos pela Anatel, de acordo com a tabela abaixo.

Tabela 2 - Valores limites de emissão eletromagnética para faixas de frequência relevante.

Radiofrequência Fundamental	Intensidade de Campo da Radiofrequência Fundamental (milivolt por metro)	Intensidade de Campo de Harmônicos (microvolt por metro)
902-907,5 MHz	50	500
915-928 MHz	50	500
2.400-2.483,5 MHz	50	500

5.725-5.875 MHz	50	500
24,00-24,25 GHz	250	2.500

4. Alta portabilidade dos módulos móveis da rede.
 - Alta capacidade de armazenamento de energia.
 - Pequeno.
 - Boa precisão na localização dos nós móveis (1 a 5 metros).

3.1.2 Requisitos de engenharia

São requisitos de engenharia toda característica ou especificação técnica que impacta o desempenho, funcionalidade, disponibilidade e confiabilidade do projeto a ser desenvolvido. A seguir pode-se observar os requisitos de engenharia pertinentes a este projeto, separados por categoria.

1. Desempenho:
 - O sistema tem que ser capaz de detectar todos os nós móveis da rede no ambiente interno definido independentemente da posição do nó.
 - O sistema deve ter precisão de tal que respeite a divisão de ambientes.
2. Funcionalidade:
 - O sistema deve ser capaz de detectar e localizar pessoas e objetos dentro da área interna de atuação.
 - Os dados de localização das pessoas e objetos devem estar disponíveis em tempo real para um usuário autorizado.
3. Disponibilidade:
 - O sistema deve manter-se operacional 24 horas por dia, 365 dias por ano (Obs.: Exceto em períodos de manutenção ou cargas).
4. Energia:
 - Os dispositivos móveis devem ter grande autonomia energética, portanto, baixo consumo energético.
5. Ambiental:
 - O sistema deve funcionar numa faixa de temperatura entre 5°C e 50°C.
 - Os dispositivos móveis devem ter longa vida útil.
6. Econômico:

- O sistema deve apresentar custos, total e relativo, competitivos.
7. Saúde e Segurança:
- Os níveis de radiação eletromagnética devem ficar dentro dos padrões regulamentados.

3.1.3 Relação entre os requisitos de marketing e engenharia

Tabela 3 – Relação entre requisitos de marketing e de engenharia

Requisitos de Marketing	Requisitos de Engenharia	Justificativa
4	O sistema tem que ser capaz de detectar e se comunicar todos os nós moveis da rede no ambiente interno definido independente da posição do nó	Utilizando uma rede com topologia adequada, conseguimos superar a existência de obstáculos que possam bloquear parcialmente o sinal de algum nó fixo.
4	O sistema deve ter precisão de tal que respeite a divisão de ambientes.	Utilizando métodos adequados à tecnologia escolhida, podemos contornar imprecisões geradas pelos efeitos de propagação de sinais.
2-5	O sistema deve ser capaz de detectar e localizar pessoas e objetos dentro da área interna de atuação	Efetuar um mapeamento detalhado de espectro no ambiente permite o projeto de uma rede livre de sombras de sinal.
4	Os dados de localização das pessoas e objetos devem estar disponíveis em tempo real para um usuário autorizado	Um software, capaz de rodar em qualquer terminal do tipo PC e conectado à rede do sistema, deve apresentar, de forma simples, a localização de todos os nós móveis do sistema.

2-4	O sistema deve manter-se operacional 24 horas por dia, 365 dias por ano (Obs.: Exceto em períodos de manutenção ou cargas).	Uma manutenção preventiva contínua e um sistema de segurança contra queda de energia, utilizando baterias recarregáveis internas aos equipamentos, mantém o sistema operando permanentemente.
3-4	Os dispositivos móveis devem ter grande autonomia energética.	A adoção de uma tecnologia adequada e que garanta um baixo consumo de energia contribui diretamente para que os equipamentos ganhem em autonomia com uma bateria interna relativamente pequena.
3	O sistema deve funcionar numa faixa de temperatura entre 5°C e 50°C	Os componentes utilizados devem ter em suas especificações as exigências de segurança necessárias para implementação de um sistema com as características exigidas.
3	Os dispositivos móveis devem possuir baterias recarregáveis	A escolha de equipamentos com baixo consumo de energia, permite a utilização de pequenas baterias recarregáveis e ao mesmo tempo garantir grande autonomia.
2	O sistema deve apresentar custo total e relativo competitivo.	A tecnologia utilizada deve comportar as exigências técnicas, mas também garantir um custo competitivo.
3	Os níveis de radiação eletromagnética devem ficar dentro dos padrões regulamentados.	Todos os componentes utilizados devem trabalhar dentro das normas de segurança nacionais de emissão eletromagnética.

3.2 Restrições

As restrições relevantes para este projeto dizem respeito à propagação dos sinais eletromagnéticos, abordados na seção 2.

4. DEFINIÇÃO DE UMA SOLUÇÃO

Para definir uma solução adequada a proposta, aos requisitos e restrições, nesta seção, analisaremos comparativamente as tecnologias relevantes mencionadas anteriormente.

4.1 Comparação entre as tecnologias relevantes

Tabela 4 - Comparativo entre as tecnologias relevantes

Classificação / Tecnologia	Bluetooth LE	Zigbee	WiFi	RFID	Enhanced ShockBurst
Alcance Máximo	280 metros	100 metros	300 metros	10 metros ¹	1000 metros
Potência Consumida	0,1 W	0,5 W	1,5 W	0,3 W	0,04 W
Taxa de Transferência de Informação	723 kbps	250 kbps 40 kbps 20 kbps	11 Mbps 54 Mbps	2 Mbps ²	2 Mbps
Eficiência (Potência consumida/Bit Transmitido)	0.153 μ W/bit	185.9 μ W/bit	0.00525 μ W/bit	- ⁴	292.9 μ W/bit
Imunidade a Ruído e Interferências	Alta	Alta	Alta	Baixa	Alta
Frequência de Operação	2,4 GHz	868 MHz 915 MHz 2,4 GHz	2,4 GHz 5 GHz	100-500 kHz 10-15 MHz 868 e 915 MHz 2,4 e 5,8 GHz	2,4 GHz
Latência	~ 2,5 ms	~ 20 ms	~ 1,5 ms	~ 18 ms	~1,0 ms

Número de Nós	80	Até 65.000	64 por Acess Point	Sem limitação relevante	Sem limitação relevante
Topologias de Rede	Malha ³	Malha	Malha		
	Estrela	Estrela	Estrela	Estrela	Estrela
	Árvore	Árvore	Árvore		
Custo Relativo	Intermediário	Baixo	Alto	Baixo	Baixo

1. Alcance de tags passivos.
2. Taxa de transferência para frequência de 2,4 GHz.
3. Uma aplicação pode ser instalada no dispositivo Bluetooth Low Energy para habilitar o uso de topologia.
4. Informação não disponível.

4.2 Análise de vantagens e desvantagens

Após analisar a tabela de comparação entre as tecnologias, podemos descartar a utilização de um sistema puramente composto pela tecnologia RFID, já que esta não permite o desenvolvimento de uma rede completa de localização. Optaremos por utilizar esta tecnologia para atender eventuais pontos do projeto que exijam uma abordagem mais simplista e de baixíssimo custo. Portanto, a partir da tabela de comparação entre as tecnologias, criamos a tabela de forças e fraquezas abaixo, atribuindo pesos às características técnicas a partir da análise dos requisitos de marketing e engenharia previamente analisados.

Tabela 5 – Análise de vantagens e desvantagens

Tecnologia	Vantagens	Desvantagens
Enhanced ShockBurst	Alcance ++ Potencia Consumida +++++ Eficiência ++ Imunidade a Ruído e Interferências + +	Número de Nós - - Latência ¹ - - Topologias de Rede -

	Custo Relativo + +	
	Taxa de Transferência de Informação +	
	Alcance +++++	Número de Nós - -
	Potencia Consumida +++++	Taxa de Transferência de Informação -
Bluetooth LE	Eficiência ¹ +	Topologias de Rede -
	Imunidade a Ruído e Interferências + +	Custo Relativo - -
	Latência + +	
	Alcance ++	Taxa de Transferência de Informação -
	Potencia Consumida ++	Latência ¹ - -
Zigbee	Imunidade a Ruído e Interferências ++	Eficiência -
	Topologias de Rede +	Custo Relativo - - -
	Número de Nós ++	
	Alcance +++++	
	Eficiência ++	
	Imunidade a Ruído e Interferências ++	Número de Nós - -
WiFi	Latência ¹ ++	Custo Relativo - - - -
	Topologias de Rede +	Potencia Consumida - - - -
	Taxa de Transferência de Informação ++	

1. Diferença de tempo entre a recepção de um sinal, pelo dispositivo, e sua resposta a este sinal.

Resultados:

$$\text{Enhanced ShockBurst} = 2 + 5 + 2 + 2 + 2 + 1 + 1 - 2 - 2 - 1 = 10 \quad (1)$$

$$\text{Bluetooth LE} = 4 + 4 + 1 + 2 + 2 - 2 - 1 - 1 - 2 = 7 \quad (2)$$

$$\text{Zigbee} = 2 + 2 + 2 + 1 + 2 + 4 - 1 - 2 - 1 = 9 \quad (3)$$

$$\text{WiFi} = 4 + 2 + 2 + 2 + 1 + 1 - 2 - 4 - 4 = 2 \quad (4)$$

Conforme a análise anterior, concluímos que a melhor forma para implementação do sistema é através da utilização de módulos que utilizam o protocolo de comunicação Enhanced ShockBurst.

5. TECNOLOGIA ESCOLHIDA

O protocolo Enhanced ShockBurst™ possibilita a implementação de sistemas de comunicação sem fio que possuam consumo de potência baixíssimo, além de comunicação de alta performance combinado com microcontroladores de baixo custo. Suas características possibilitam significantes aumentos na eficiência de potência para sistemas de comunicação tanto bi-direcionais quanto uni-direcionais.

5.1 Dispositivos necessários para montagem do projeto

5.1.1 O módulo nRF24L01

Para este projeto optou-se pela utilização dos módulos nRF24L01 e nRF24L01+ da Nordic Semiconductor. A figura 15 apresenta os módulos utilizados. Estes módulos apresentam baixo custo e programação simples.

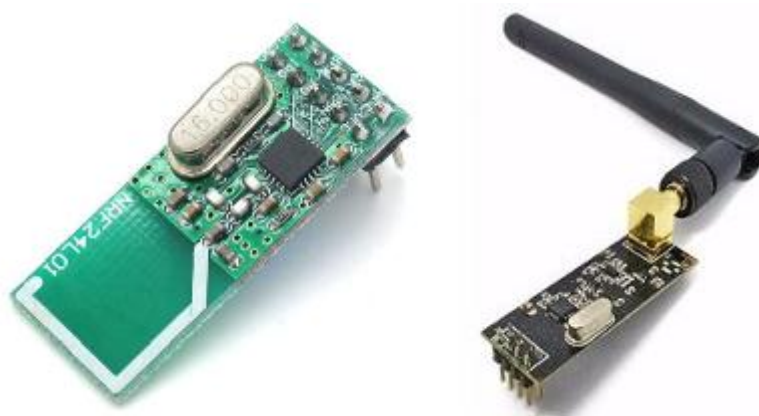


Figura 15 - Módulos nRF24L01 e nRF24L01+, respectivamente, da Nordic Semiconductor

Fonte: Google⁶

As características destes módulos, mais relevantes, para o nosso projeto, são:

- Frequência de operação: 2,4 ~ 2,5GHz;

⁶ Disponível em:< http://mlb-s1-p.mlstatic.com/536221-MLB20747780223_062016-Y.jpg>

- Utilizam o protocolo de comunicação Enhanced ShockBurst;
- Taxa máxima de transferência: 2Mbps;
- Corrente no modo de espera: 900nA;
- São módulos transceiver, ou seja, podem enviar e receber dados no mesmo chip;
- No modo receptor, conseguem se comunicar com até 6 transmissores simultaneamente;
- Até 125 canais RF(1Mbps);
- Alcance: até 100m(nRF24L01 com antena impressa) e até 1km(nRF24L01+ com antena externa);

Para este projeto, foi necessária a aquisição do módulo nRF24L01+ por conta da possibilidade de se utilizar antena externa, recurso inexistente na versão anterior do módulo e que será essencial para a implementação do projeto. E, para efeito de redução de custo, adotou-se a versão mais antiga para os blocos fixos(roteadores), os quais são muito mais numerosos. Os módulos se comunicam entre si e possuem características muito semelhantes.

5.1.1.2 Topologia de rede em Estrela

Como já mencionado anteriormente, os módulos nRF24LXX conseguem, em modo receptor, receberem dados de até 06(seis) transmissores simultaneamente. Isto é, pode-se unificar a comunicação em uma configuração de estrela (ou teia) de modo que, qualquer módulo integrante da rede possa fornecer ou adquirir dados de qualquer outro membro:

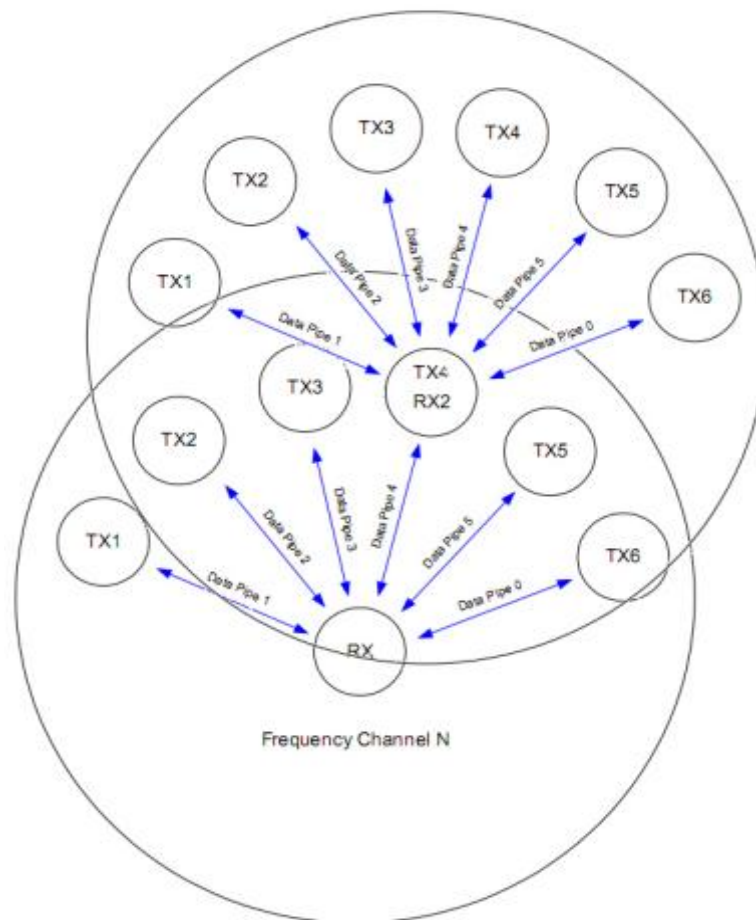


Figura 19 – Exemplo de Topologia de Rede Utilizando Protocolo Enhanced ShockBurst

Fonte: ElecFreaks⁷

⁷ Disponível em: < https://www.elec Freaks.com/wiki/index.php?title=2.4G_Wireless_nRF24L01p >

5.1.2 O atenuador PE4302

Outro componente essencial neste projeto é o atenuador digital de 6-bits da Peregrine Semiconductor (PE4302). Será responsável por realizar a atenuação gradual da potência enviada aos roteadores, pelo dispositivo móvel, para que assim seja criada uma relação entre potência recebida e a distância entre o dispositivo móvel e cada roteador.

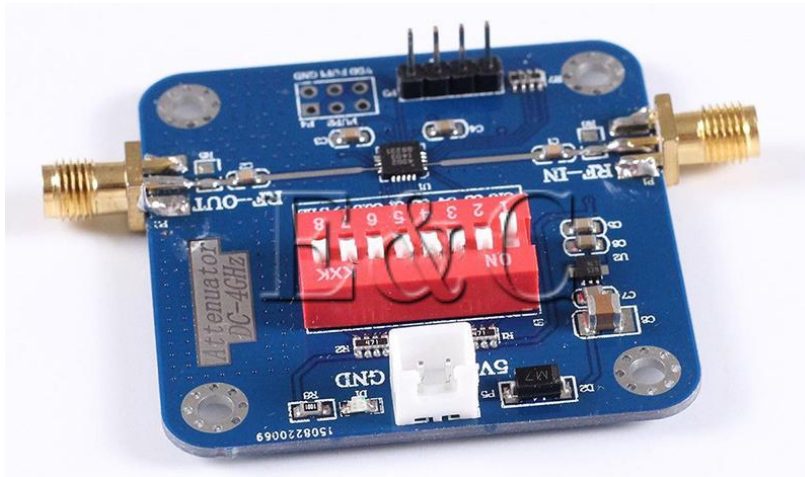


Figura 16 – Atenuador PE4302

Fonte: Google⁸

Suas principais características são:

- Impedância: 50 Ohm;
- Atenuação ajustável(6-bits): até 31,5dB em intervalos de 0,5dB;
- Interface serial/paralela;
- Baixo consumo de energia: 3V;

⁸ Disponível em: < <http://g01.a.alicdn.com/kf/HTB1Cd92JFXXXXbHXXXXq6xXFXXA/PE4302-Digital-RF-Atenuador-de-Passo-M&oacut;dule-Alta-Linearidade-0-5dB-50-ohm-RF-DSA.jpg> >

5.1.2.1 Interfaces disponíveis

Pode-se utilizar tanto a interface serial quanto a paralela para se controlar o PE4302. Observe a tabela abaixo:

P/S	C16	C8	C4	C2	C1	C0.5	Attenuation State
0	0	0	0	0	0	0	Reference Loss
0	0	0	0	0	0	1	0.5 dB
0	0	0	0	0	1	0	1 dB
0	0	0	0	1	0	0	2 dB
0	0	0	1	0	0	0	4 dB
0	0	1	0	0	0	0	8 dB
0	1	0	0	0	0	0	16 dB
0	1	1	1	1	1	1	31.5 dB

Figura 17 – Tabela verdade utilizada para nível de atenuação
(note que não estão contemplados todas as combinações de bits C0.5 – C16)

Fonte: Peregrine Semiconductor⁹

Observe que, o bit P/S define qual interface será selecionada(paralela ou serial, sendo P/S=1 interface serial e P/S=0 interface paralela). E, que o nível de atenuação é definido de acordo com a combinação dos 6bits(C0.5 – C16).

Em nosso módulo atenuador possuímos input serial, portanto iremos trabalhar com a interface serial.

⁹ Disponível em:< <http://www.psemi.com/pdf/datasheets/pe4302ds.pdf>>

5.1.3 A placa controladora Arduino UNO R3

A escolha deste dispositivo se deu pelo baixo custo, pelas inúmeras referências que se encontra na internet e, principalmente, pela simplificação na implementação do projeto(conectividade USB e facilidade em programar).

Este dispositivo será o responsável por controlar a forma de agir de cada bloco participante do projeto(coordenador, roteador ou dispositivo móvel). Portanto, o comportamento de cada bloco será regido de acordo com as informações que serão em cada placa.



Figura 18 – Arduino UNO R3

Fonte: HobbyTronics¹⁰

Principais características:

- Microcontrolador Atmega328;
- Pode ser alimentado, tanto pela porta USB(ligado a um computador) quanto por uma fonte(5v ~ 7v);
- Consegue fornecer alimentação de 3.3v ou 5v;
- Possui 14 pinos digitais I/O e 6 pinos analógicos de Input;

¹⁰ Disponível em:< <http://www.hobbytronics.co.uk/image/cache/data/arduino/arduino-uno-r3-500x500.jpg>>

5.1.3.1 Comunicação USB da placa Arduino UNO

Como interface USB para comunicação com o computador, há na placa um microcontrolador Atmega16U2. Este microcontrolador é o responsável pela forma transparente como funciona a placa Arduino UNO, possibilitando o upload do código binário gerado após a compilação do programa feito pelo usuário.

Nesse microcontrolador também estão conectados dois leds (TX, RX), controlados pelo software do microcontrolador, que indicam o envio e recepção de dados da placa para o computador. Esse microcontrolador possui um cristal externo de 16 MHz. É interessante notar a conexão entre este microcontrolador com o ATMEGA328, onde é feita pelo canal serial desses microcontroladores. Outro ponto interessante que facilita o uso da placa Arduino é a conexão do pino 13 do ATMEGA16U2 ao circuito de RESET do ATMEGA328, possibilitando a entrada no modo bootloader automaticamente quando é pressionado o botão Upload no software.

5.1.3.2 O “cérebro” do Arduino

O componente principal da placa Arduino UNO é o microcontrolador ATMEGA328, um dispositivo de 8 bits da família AVR com arquitetura RISC avançada e com encapsulamento DIP28. Ele conta com 32 KB de Flash (mas 512 Bytes são utilizados pro bootloader), 2 KB de RAM e 1 KB de EEPROM.

A placa Arduino UNO possui 14 pinos que podem ser usados como entrada ou saída digitais. Estes pinos operam em 5 V, onde cada pino pode fornecer ou receber uma corrente máxima de 40 mA. Cada pino possui resistor de pull-up interno que pode ser habilitado por software. Alguns desses pinos possuem funções especiais:

PWM : 3,5,6,9,10 e 11 podem ser usados como saídas PWM de 8 bits.

Comunicação serial: 0 e 1 podem ser utilizados para comunicação serial.

Deve-se observar que estes pinos são ligados ao microcontrolador responsável pela comunicação USB com o PC;

Interrupção externa: 2 e 3 . Estes pinos podem ser configurados para gerar uma interrupção externa.

6. PROVA DE CONCEITO

Inicialmente propomos um modelo extremamente simplificado do sistema onde temos três módulos, um primeiro configurado como emissor, um segundo configurado como intermediador, ou roteador, e um terceiro configurado como receptor, ou dispositivo fim. Estes, portanto, comunicam-se através de uma rede, simulando a estrutura básica de comunicação que será aplicada no sistema final.

A figura 20 descreve a configuração de hardware utilizada para pelos três módulos mencionados.

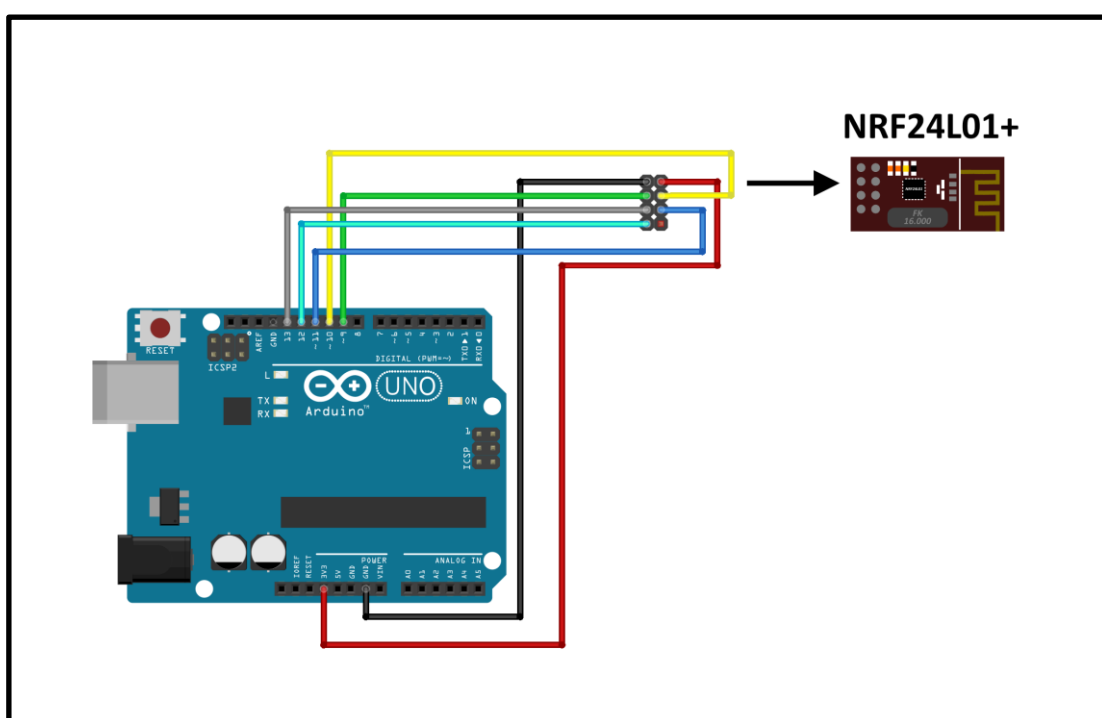


Figura 20 – Circuito para Prova de Conceito

Para que fosse possível visualizar a conexão estabelecida, foram inseridos comandos que interagem com duas interfaces gráficas, através da conexão USB da placa Arduino com um computador, permitindo selecionar um valor a ser transmitido pelo emissor, em uma primeira tela, e observar este mesmo valor ser apresentado em uma segunda tela pelo receptor, após o intermédio do roteador.

Já os trechos de código abaixo ilustram a utilização da biblioteca RF24 para aplicar, de forma mais simples e intuitiva, as configurações de cada módulo, além de estabelecer os canais de comunicação entre dos mesmos.

Cada um destes códigos é composto de dois núcleos distintos. Um núcleo de configuração, compreendido entre as chaves do comando `void setup() {}`, que contém todos comandos de configuração da placa Arduino UNO e do módulo nRF24L01+. E, também, um núcleo de execução que, ao executar continuamente o laço descrito entre as chaves do comando `void loop() {}`, descreve as ações que serão tomadas pelos componentes a fim de estabelecer cada canal de comunicação.

6.1 Código do módulo emissor

```
// Programa : NRF24L01 Emissor

#include <RF24.h>

// Armazena caractere digitado na serial
char valor[1];

// Armazena os dados enviados
int dados;
int tentativas;

// Variável de controle de transmissão
bool transm;

// Inicializa o NRF24L01 nos pinos 9 (CE) e 10 (CS) do Arduino Uno
RF24 radio(9,10);

// Define o endereço para comunicacao entre os modulos
const uint64_t enderecos1 = 0xF0F0F0F0E1;
const uint64_t enderecos2 = 0xF0F0F0F0D2;

void setup()
{
    // Inicializa a serial
    Serial.begin(57600);
    Serial.println("Digite 1 ou 2 e pressione ENVIAR...");

    //Inicializa transmissor
    radio.begin();

    // Entra em modo de transmissao
    radio.openWritingPipe(enderecos2);
    radio.openReadingPipe(1,enderecos1);

    // Sai do modo de recepcao
    radio.stopListening();
}

void loop()
{
    // Le o caractere digitado na serial
    if (Serial.available() > 0)
    {
```

```

    valor[0] = Serial.read();
}
// Envia 1 via radio caso seja digitado o valor 1
if (valor[0] == '1')
{
    Serial.println("Enviado : 1");
    dados = 1;
    transm = false;
    while(!transm)
    {
        transm = radio.write(&dados, sizeof(int));
    }
    Serial.println("Transmitido.");
    Serial.println("");
    valor[0] = 0;
    Serial.println("Digite 1 ou 2 e pressione ENVIAR...");
}

// Envia 2 via radio caso seja digitado o valor 2
if (valor[0] == '2')
{
    Serial.println("Enviado : 2");
    dados = 2;
    transm = false;
    while(!transm)
    {
        transm = radio.write(&dados, sizeof(int));
    }
    Serial.println("Transmitido.");
    Serial.println("");
    valor[0] = 0;
    Serial.println("Digite 1 ou 2 e pressione ENVIAR...");
}
}

```

6.2 Código do módulo intermediador

```

// Programa : NRF24L01 Intermediador

#include <RF24.h>

// Armazena os dados recebidos
int dados;
int tentativas;
int recebidos[1];

// Variaveis de status
bool recebido;
bool transmitido;
bool disponivel;

// Inicializa o NRF24L01 nos pinos 9 (CE) e 10 (CS) do Arduino Uno
RF24 radio(9,10);

// Define o endereco para comunicacao entre os modulos
const uint64_t enderecos1 = 0xF0F0F0F0E1;
const uint64_t enderecos2 = 0xF0F0F0F0D2;

void setup()

```

```

{
    // Inicializa a serial
    Serial.begin(57600);

    dados = 0;
    recebido = false;
    transmitido = false;

    //Inicializa transmissor
    radio.begin();

    //Configuracao dos pipes
    radio.openWritingPipe(enderecos1);
    radio.openReadingPipe(1,enderecos2);

    // Entra em modo de recepcao
    radio.startListening();

    // Mensagem inicial
    Serial.println("Aguardando dados...");
}

void loop()
{
    // Verifica sinal de radio
    if (radio.available())
    {
        Serial.println("Recebendo...");
        radio.read(recebidos, sizeof(int));
        if (recebidos[0] != 0)
        {
            recebido = true;
        }
        Serial.print("Recebido: ");
        Serial.println(recebidos[0]);
        Serial.println("");
    }

    dados = recebidos[0];
    recebidos[0] = 0;

    // Verifica se existe informacao a ser enviada
    if(dados != 0)
    {
        // Sai do modo de recepcao
        radio.stopListening();

        Serial.print("Transmitindo: ");
        Serial.println(dados);
        transmitido = false;
        if(!transmitido)
        {
            transmitido = radio.write(&dados, sizeof(int));
        }
        Serial.println("Transmitido.");
        Serial.println("");

        // Entra em modo de recepcao
        radio.startListening();
        Serial.println("Aguardando dados...");
    }
}

```

```

    dados = 0;
    recebido = false;
}

```

6.3 Código do módulo receptor

```

// Programa : NRF24L01 Receptor

#include "RF24.h"

// Armazena os dados recebidos
int recebidos[1];

boolean done;

// Inicializa o NRF24L01 nos pinos 9 (CE) e 10 (CS) do Arduino Uno
RF24 radio(9,10);

// Define o endereço para comunicacao entre os modulos
const uint64_t enderecos1 = 0xF0F0F0F0E1;
const uint64_t enderecos2 = 0xF0F0F0F0D2;

void setup()
{
    // Inicializa a serial
    Serial.begin(57600);

    //Inicializa transmissor
    radio.begin();

    // Entra em modo de recepcao
    radio.openReadingPipe(1,enderecos1);
    radio.startListening();

    // Mensagem inicial
    Serial.println("Aguardando dados...");
}
void (* Reset)(void)=0;

void loop()
{
    // Verifica sinal de radio
    if (radio.available())
    {
        Serial.println("Recebendo...");
        recebidos[0] = 0;
        done = false;
        radio.read(recebidos, sizeof(int));
        if (recebidos[0] != 0)
        {
            Serial.print("Recebido: ");
            Serial.println(recebidos[0]);
        }
        Serial.println("");
        delay(20);
        Reset();
    }
}

```

7. O PROJETO

7.1 Estrutura do sistema

O modelo proposto para o sistema, apresentado na figura 21, é composto por um total de cinco módulos, sendo eles: um módulo coordenador, três módulos roteadores e um módulo dispositivo fim.

A proposta consiste em dispormos todos os módulos em um ambiente fechado, onde os três módulos roteadores serão capazes de reconhecer a presença do módulo dispositivo fim e fornecer sua posição relativa ao módulo coordenador. Este, a partir das informações recebidas, será capaz de triangular a posição do módulo dispositivo fim no ambiente.

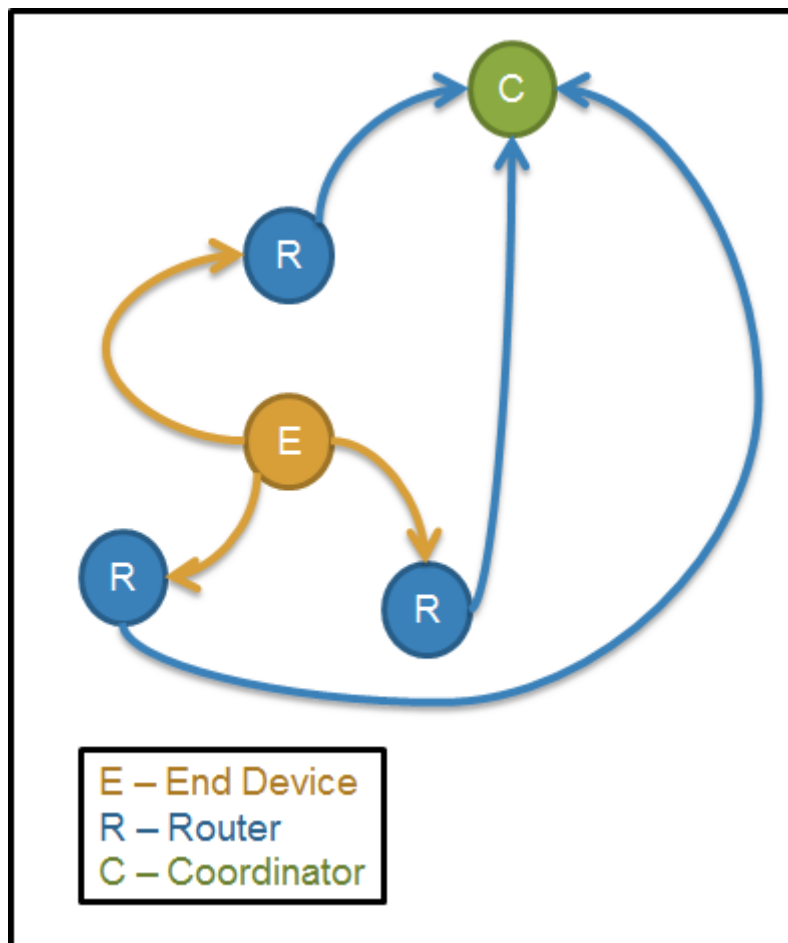


Figura 21 – Estrutura do modelo do sistema

7.2 Módulo Dispositivo Fim

O módulo dispositivo fim é alimentado por uma bateria e, portanto, é livre para ser movido pelo ambiente. Este trabalha sempre como um emissor, efetuando ciclos com um número N de transmissões, para os módulos roteadores.

Em cada ciclo, o módulo transmitirá com incrementos crescentes de potência (0,5 decibéis), um pacote de informações contendo o código identificador do módulo, o código identificador do nível de potência de transmissão e o código identificador do ciclo de transmissão. Este pacote é definido no código como um número inteiro, de sete posições, estruturado conforme exemplo da figura 22.



Figura 22 – Estrutura do pacote de informações do módulo dispositivo fim

Neste modelo, o código identificador do nível de potência terá sessenta e quatro valores distintos, sendo um para cada variação de 0,5 decibéis na potência do sinal transmitido.

A caracterização física do módulo dispositivo fim dá-se conforme a figura 23. Nesta é possível verificar uma placa Arduino UNO controlando, via conexão serial, dois módulos distintos e interconectados entre si.

O módulo nRF24L01+ , controlado pela placa Arduino, gera o sinal de rádio frequência que será transmitido e fornece-o, via conexão coaxial, para um módulo atenuador PE4302.

Por sua vez, o módulo atenuador PE4302 aplica o nível de atenuação, especificado pela placa Arduino, ao sinal recebido do módulo nRF24L01+ e aplica-o a antena acoplada.

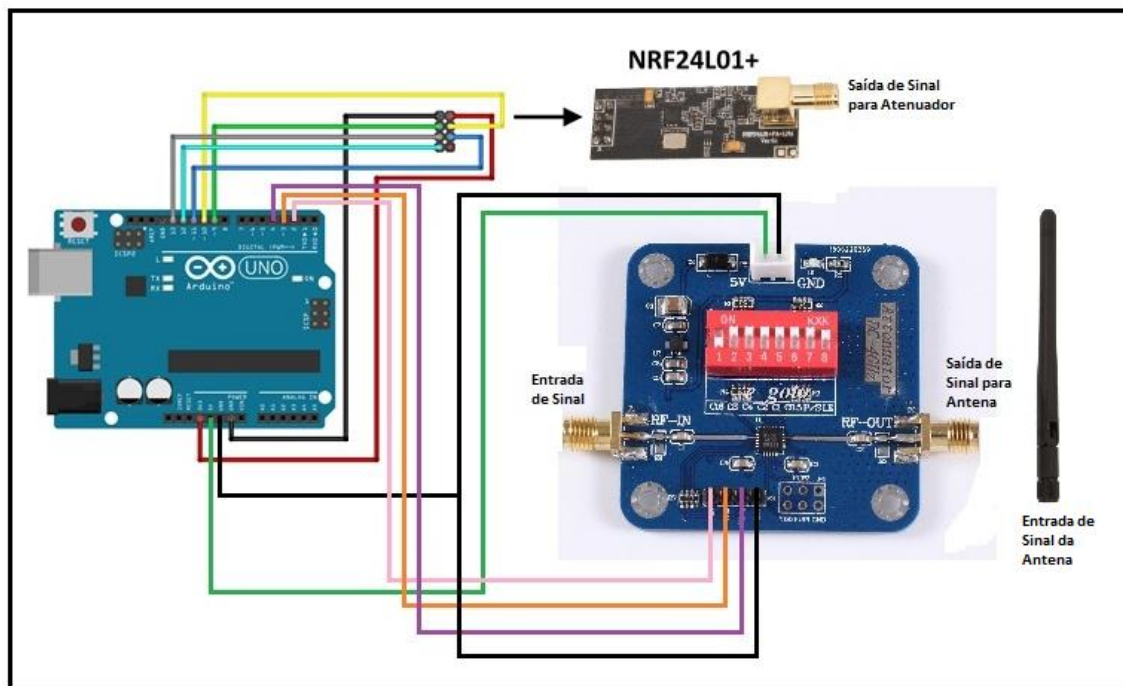


Figura 23 – Esquema da estrutura física do módulo dispositivo fim

7.3 Módulo Roteador

O módulo roteador é fixo e, consequentemente, alimentado por uma fonte conectada à rede elétrica. Este trabalha como receptor e transmissor. Inicialmente, permanece em modo de recepção armazenando pacotes recebidos, do módulo dispositivo fim, até que dois pacotes recebidos consecutivamente satisfaçam, simultaneamente, todos os seguintes critérios:

- Possuam códigos identificadores de módulo idênticos
- Possuam códigos identificadores de nível de potência não consecutivos
- Possuam códigos identificadores de ciclo consecutivos

Uma vez que as condições anteriores são satisfeitas, o módulo roteador tem seu modo de operação alterado para transmissão e, assim, passa a enviar as informações adquiridas ao módulo coordenador.

Nesta etapa o módulo roteador gera seu próprio pacote de informações contendo seu próprio código de identificação e o pacote recebido do módulo dispositivo fim. Este pacote é definido no código como um número inteiro, de dez posições, estruturado conforme exemplo da figura 24.

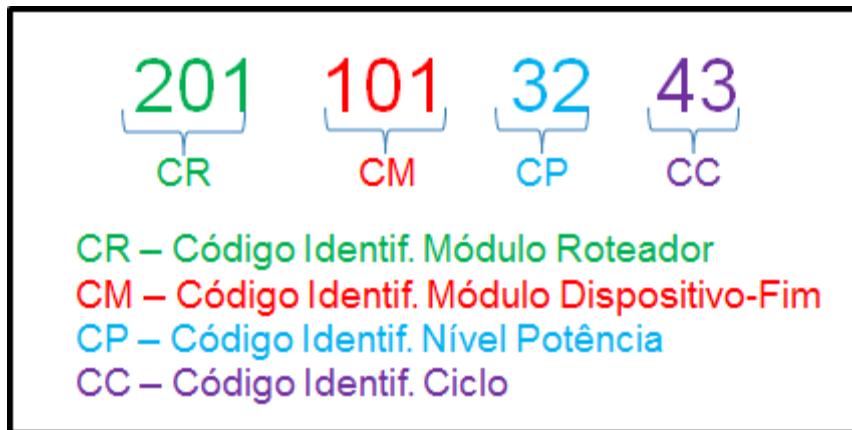


Figura 24 – Estrutura do pacote de informações do módulo roteador

A caracterização física do módulo roteador dá-se conforme a figura 25. Nesta é possível verificar uma placa Arduino UNO controlando, via conexão serial, apenas um módulo transceptor nRF24L01+.

Por sua vez, o módulo nRF24L01+ , controlado pela placa Arduino, é responsável por receber e transmitir sinais de rádio frequência contendo os pacotes definidos anteriormente.

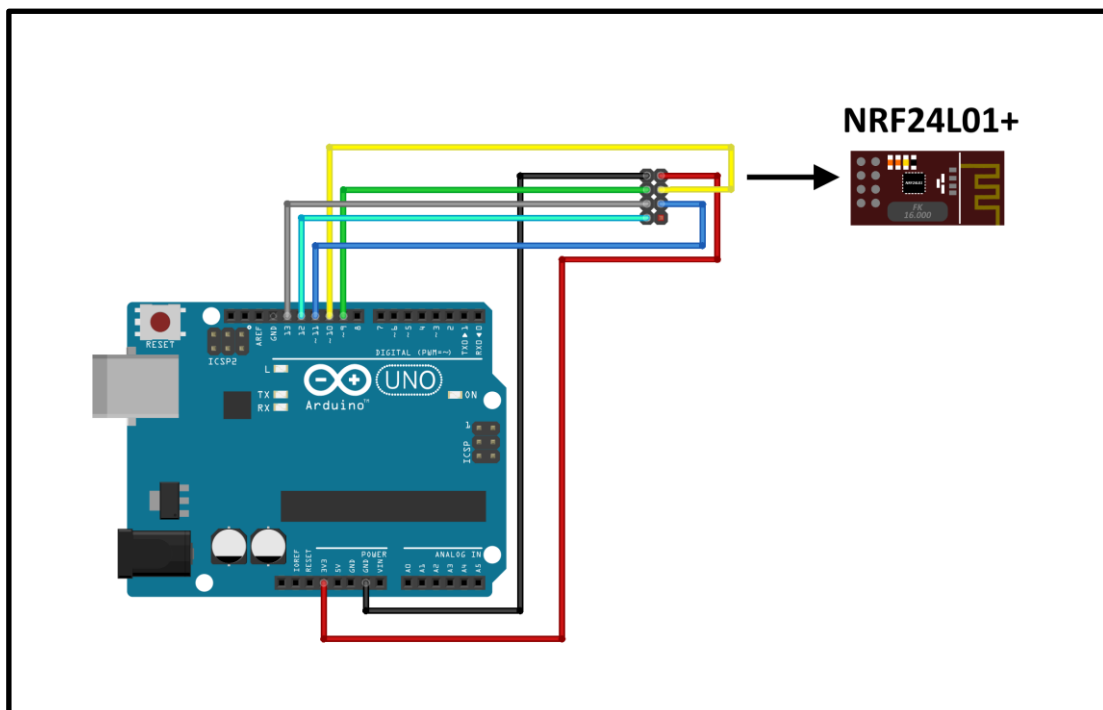


Figura 25 – Esquema da estrutura física do módulo roteador e coordenador

7.4 Módulo Coordenador

O módulo coordenador também é fixo e, no entanto, é alimentado por uma conexão USB com um computador. Este trabalha apenas como receptor, armazenando em três conjuntos de duas matrizes os pacotes recebidos dos módulos roteadores.

Este método de armazenagem mostra-se necessário para lidar com a limitação de memória da placa Arduino UNO. Assim, podemos descartar o código de identificação dos roteadores e armazenar, em matrizes específicas para cada roteador, somente os pacotes originalmente fornecidos pelo módulo dispositivo fim. Também, graças à utilização de matrizes, podemos fazer uso dos índices de linhas e colunas para substituir a armazenagem de código de ciclo e código de identificação de dispositivo fim, respectivamente. Consequentemente, apenas os códigos identificadores de nível de potência precisam ser armazenados nas células das matrizes.

Já ao utilizar um par de matrizes para cada roteador, podemos estar constantemente descartando pacotes antigos com facilidade.

Sendo assim, uma vez de posse dos pacotes fornecidos pelos roteadores, o coordenador busca, nas três matrizes, por pacotes que atendam os seguintes critérios simultaneamente:

- Possuam códigos identificadores de módulo idênticos
- Possuam códigos identificadores de ciclo idênticos

Ou seja, o algoritmo está sempre verificando, nas três matrizes que possuem registros no momento, se existem células, com mesmos índices, preenchidas.

Na sequência, o coordenador faz uso de duas tabelas, previamente cadastradas, para alimentar o algoritmo de triangulação com os dados necessários.

A primeira tabela, armazenada em uma matriz, deve conter as coordenadas dos roteadores, que para este modelo é inserida manualmente no código conforme posicionamento dos módulos roteadores no ambiente em questão.

A segunda tabela, também armazenada em uma matriz, deve conter os códigos de nível de potência possíveis associados a unidades médias de distância previamente levantadas em testes.

Finalmente, o coordenador faz uso da conexão USB para exibir na tela do computador, via interface gráfica do próprio Arduino UNO, as coordenadas e o código identificador do módulo dispositivo fim localizado.

A caracterização física do módulo roteador dá-se, também, conforme a figura 22. Nesta é possível verificar uma placa Arduino UNO controlando, via conexão serial, apenas um módulo transceptor nRF24L01+.

Por sua vez, o módulo nRF24L01+ , controlado pela placa Arduino, é responsável por receber sinais de rádio frequência contendo os pacotes dos módulos roteadores, definidos anteriormente.

7.5 Configurações alternativas

O mesmo sistema poderia ser concebido a partir de outras configurações. Alterando-se, por exemplo, a lógica de transmissão contínua de sinais, em várias faixas de potência, para que esta seja feita pelos módulos roteadores.

Esta configuração implicaria em ganhos significativos na autonomia dos módulos móveis, já que estes operariam predominantemente em modo de recepção. Por outro lado, teríamos maior nível de complexidade nas operações dos módulos roteadores, que passariam a atuar ativamente na localização dos módulos móveis. Demandando, assim, maior capacidade de processamento e memória.

Outro aspecto relevante que pode ser reconfigurado, impactando o alcance do sistema como um todo, é a topologia de rede. Nesta configuração, baseada em conexões ponto-a-ponto entre os módulos transmissores e receptores, o módulo coordenador deve estar localizado sob o alcance de transmissão de todos os módulos roteadores.

Portanto, se aplicada uma camada de software, simulando uma rede em malha, a dependência de localização do módulo coordenador deixa de existir. Mas implica em maior demanda por processamento e memória nos controladores.

8. GERENCIAMENTO DO PROJETO

8.1 Estrutura Analítica do Projeto (EAP)

Na figura abaixo podemos ver um esboço das principais etapas e atividades do projeto a partir de agora.

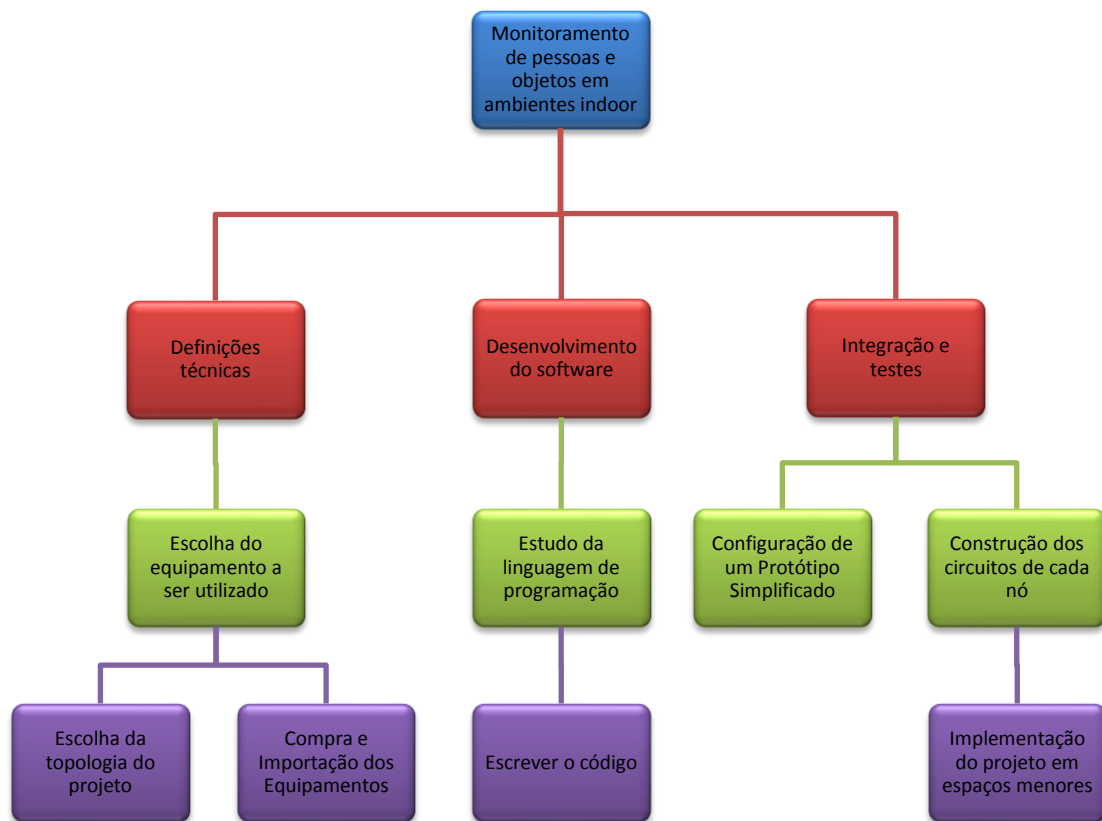


Figura 26 - Estrutura Analítica do Projeto (EAP).

8.2 Análise de riscos

Nesta seção utilizaremos a matriz de risco, da figura abaixo, para efetuar uma primeira análise de risco do projeto.

PROBABILIDADE	Frequente (5)	5D	5C	5B	5 ^a
	Provável (4)	4D	4C	4B	4 ^a
	Alto (3)	3D	3C	3B	3 ^a
	Médio (2)	2D	2C	2B	2 ^a
	Baixo (1)	1D	1C	1B	1 ^a
		Baixo (D)	Médio (C)	Alto(B)	Muito Alto(A)
IMPACTO					

Figura 27 - Matriz de Riscos.

A tabela abaixo classifica as principais etapas do projeto quanto há probabilidade de acontecer e quanto ao impacto para o projeto, dessa forma podemos atuar com maior precisão em atividades mais importantes para o projeto.

Processos	Risco
Escolha do equipamento a ser utilizado	1D
Escolha da topologia do projeto	2B
Compra e importação dos equipamentos	3A
Estudo da linguagem de programação	1B
Escrita do código	2A
Configuração de um protótipo simplificado	2C
Construção dos circuitos de cada nó	2A
Implementação do projeto em espaços menores	2A

Figura 28 - Diagrama de análise de risco

Para as três etapas de maior risco propusemos soluções conforme descrito abaixo:

- Compra e importação dos equipamentos

Como forma de contornar um eventual entrave no projeto, iniciaremos o desenvolvimento utilizando módulos transceptores que já possuímos e, uma vez que os equipamentos definitivos estejam disponíveis, portaremos as configurações para estes, efetuando eventuais modificações necessárias.

- Desenvolvimento do software do nó coordenador

Esta etapa envolve o estudo da linguagem de programação escolhida e a escrita do código. A solução proposta para eventuais dificuldades nesta etapa é a utilização de estruturas de código open source em áreas mais críticas que tomariam maior tempo para desenvolvimento.

- Construção dos circuitos de cada nó do sistema

Nesta etapa sensível, a proposta para solucionar eventuais atrasos consiste de duas frentes: a compra de componentes reserva para testes no decorrer do desenvolvimento e montagem e a simulação previa dos circuitos em software simulador.

9. REFERÊNCIAS

BAUMANN, C. **Tips for selecting a Media Access Controller for ZigBee** *Industrial Control Designline: TechOnline Community*. Disponível em: <<http://www.industrialcontroldesignline.com/192300912;jsessionid=QL0APY Y5BZ5A0QSNDLQCKIKCJUNN2JVN?printableArticle=true>> Acesso em: 10 maio 2015.

PRODUCT SPECIFICATION Pe4302. Disponível em: <<http://www.psemi.com/pdf/datasheets/pe4302ds.pdf>> Acesso em: 27 Julho 2017

nRF24L01+ Single Chip 2.4GHz Transceiver Product Specification v1.0. Disponível em: <https://www.sparkfun.com/datasheets/Wireless/Nordic/nRF24L01P_Product_Specification_1_0.pdf> Acesso em: 27 Julho 2017

ARDUINO UNO. Disponível em: <<https://www.embarcados.com.br/arduino-uno/>> Acesso em: 27 Julho 2017

Chuan-Chin Pu, Chuan-Hsian Pu and Hoon-Jae Lee (2011). **Indoor Location Tracking Using Received Signal Strength Indicator, Emerging Communications for Wireless Sensor Networks**, Anna Foerster and Alexander Foerster (Ed.), ISBN: 978-953-307-082-7, InTech, DOI: 10.5772/10518.

GUEDES, L. **Sistema de localização e orientação para deficientes visuais.** 2013. 93f.. Dissertação(Graduação em Engenharia de Sistemas Eletrônicos) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

NAJNUDEL, M. **Estudo de propagação em ambientes fechados para o planejamento de WLANs**, Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO DE JANEIRO, Rio de Janeiro, RJ, 2004

SANT'ANA, A. R. **Sistema de detecção de colisão entre veículos utilizando GPS e ZigBee**, Trabalho de Conclusão de Curso(Pós-Graduação em Ciência da Computação) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, Minas Gerais, 2014.

THONET, Gilles. **ZigBee WiFi Coexistence**. [S.l.], 2008.