



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

JANDERSON WILSON BLANSKI

PROTOCOLO PARA TROCA DE DADOS BASEADO EM RÁDIO
RECEPTOR REGENERATIVO

Salvador

2014

JANDERSON WILSON BLANSKI

**PROTOCOLO PARA TROCA DE DADOS BASEADO EM RÁDIO
RECEPTOR REGENERATIVO**

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

Orientador: Prof. Dr. FLÁVIO MORAIS DE ASSIS SILVA

Co-orientador: Prof. Dr. IURI MUNIZ PEPE

Salvador

2014

Sistema de Bibliotecas da UFBA

Blanski, Janderson Wilson.

Protocolo para troca de dados baseado em rádio receptor regenerativo / Janderson Wilson Blanski. - 2014.

96 f. : il.

Orientadores: Prof. Dr. Flávio Assis Silva; Prof. Dr. Iuri Muniz Pepe.

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

1. Rádio receptor regenerativo. 2. Protocolo. 3. Camada física. 4. Eficiência energética. 5. Redes de sensores sem fio. I. Morais de Assis Silva, Flávio. II. Universidade Federal da Bahia. Escola Politécnica. III. Universidade Federal da Bahia. Instituto de Matemática. IV. Título.

CDD - 553.282
CDU - 553.061.3

TERMO DE APROVAÇÃO

JANDERSON WILSON BLANSKI

PROTOCOLO PARA TROCA DE DADOS BASEADO EM RÁDIO RECEPTOR REGENERATIVO

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Mecatrônica, Universidade Federal da Bahia – UFBA, pela seguinte banca examinadora:

Prof. Dr. Flávio Morais de Assis Silva (Orientador)
Doutor em Informática (Dr.-Ing), Technische Universität Berlin, Alemanha
Professor do Departamento de Ciência da Computação/UFBA

Prof. Dr. Iuri Muniz Pepe (Co-orientador)
Doutor em Física Nuclear, Université Catholique de Louvain, U.C.L, Bélgica
Professor do Departamento de Física Geral/UFBA

Prof. Dr. Alírio Santos de Sá (Examinador PPGM)
Doutor em Ciência da Computação, Universidade Federal da Bahia
Professor do Departamento de Ciência da Computação/UFBA

Prof. Dr. Karcus Day Rosário de Assis (Examinador Externo)
Doutor em Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Campinas
Professor do Departamento de Engenharia Elétrica/UFBA

Salvador, 27 de março 2014

Dedico este trabalho para as pessoas que considero mais importante.

Ao meu filho Janderson.

A minha esposa Luciana.

A minha mãe Lucia.

Ao meu pai Blanski.

As minhas irmãs Gisele, Margarete, Luciene e Gislaine.

AGRADECIMENTOS

Algumas pessoas foram de fundamental importância para a realização deste trabalho.

Agradeço ao Prof. Dr. Flávio Assis Silva pela sua prestatividade, dedicação e apoio, que foram de fundamental importância para a conclusão do trabalho.

Agradeço ao Prof. Dr. Iuri Pepe pela sua consideração e flexibilidade, permitindo que o trabalho fosse realizado com autonomia e independência, proporcionando um excelente aprendizado e uma grande experiência pessoal profissional para a vida.

Agradeço a minha esposa Luciana e ao meu filho Janderson, pelo apoio, e pelo tempo que fiquei ausente para a realização deste trabalho.

Agradeço aos meus amigos Juan e Ivana, pelo apoio e pela consideração que foram muito importantes para a realização deste trabalho.

Agradeço ao meu amigo Eduardo Telmo por estar sempre presente quando solicitado.

Meus sinceros agradecimentos a todos.

RESUMO

Neste trabalho foi desenvolvido um protocolo de camada física, denominado URP, para transmissão de dados através de um canal sem fio para um módulo de comunicação baseado em receptor regenerativo, altamente eficiente em termos de consumo energético. Adicionalmente, foi desenvolvido um dispositivo de hardware, composto por um microcontrolador, módulos de transmissão e recepção e uma interface de interação humano-computador, em que o protocolo de comunicação foi implementado. O protocolo URP, em particular, incorpora soluções para problemas específicos que surgem pelo princípio de funcionamento dos receptores regenerativos, como alta sensibilidade a ruídos de rádio frequência e geração de dados aleatórios na saída do receptor, e uma solução para o problema do efeito captura, típico em sistemas de transmissão sem fio. Em função da alta eficiência energética dos receptores regenerativos, o sistema desenvolvido pode ser utilizado na construção de dispositivos para redes de sensores sem fio. O consumo de energia destes receptores é bastante inferior ao dos transceptores tipicamente usados nestas redes.

Palavras-chaves: Rádio receptor regenerativo, protocolo, camada física, eficiência energética, redes de sensores sem fio.

ABSTRACT

In this paper we developed a protocol physical layer, called URP, for transmitting data over a wireless channel to a communication module based on highly efficient regenerative receiver in terms of energy consumption. Additionally, we developed a hardware device composed of a microcontroller, transmission and reception modules and an interface for human-computer interaction, in which the communication protocol has been implemented. The URP protocol, in particular for solutions incorporating specific problems that arise at operating principle of regenerative receivers such as high sensitivity to radio-frequency noise and generating random data at the receiver output and solution to the problem of capture effect, typical in wireless transmission systems. Due to the high energy efficiency of regenerative receivers, the developed system can be used in the construction of devices to networks of wireless sensors. Energy consumption of these receptors is well below the transceivers typically used in these networks.

Key words: Radio regenerative receiver, protocol, physical layer, energy efficiency, wireless sensor networks.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1- Quadro de comunicação serial.....	22
Figura 2.2 – Técnicas de codificações de dados	24
Figura 2.3 - Estrutura RM-OSI (16).....	26
Figura 2.4 – Transferência de dados em camadas adjacentes (16).....	27
Figura 2.5 –Modelo de referência RM-OSI e o padrão IEEE 802.11 (18).....	30
Figura 2.6 – Quadro da camada física do IEEE 802.11 com modulação DSSS.....	31
Figura 2.7 - Quadro da subcamada MAC (18).....	31
Figura 2.8 – Campo do quadro de controle do MPDU (18)	32
Figura 2.9 - Efeito de captura.....	33
Figura 2.10 – Casos de capturas de quadros durante colisão (19).....	34
Figura 2.11 – Solução PCT para recuperação de dados no caso de colisão entre quadros..	35
Figura 2.12 – Codificação trinária Holtek.....	37
Figura 3.1- Diagrama interno do CC1101 (23)	40
Figura 3.2 - Forma de onda de corrente de transmissão e recepção do CC1101	41
Figura 3.3 –Modulação OOK	43
Figura 3.4 - Diagrama esquemático módulo transmissor (33).....	45
Figura 3.5 – Receptor Regenerativo	47
Figura 3.6 - Diagrama esquemático de um receptor regenerativo OOK (34).....	47
Figura 4.1 – Estrutura protocolo URP.....	50
Figura 4.2 – Estrutura do quadro PPDU do protocolo URP.....	51
Figura 4.3 – Quadro MPDU da camada MAC do protocolo URP	53
Figura 4.4 – Quadro completo do protocolo URP	54
Figura 5.1 – Módulo do rádio receptor regenerativo	56
Figura 5.2 - Modulo transmissor modulado em OOK.....	56
Figura 5.3 - Diagrama de bloco do <i>hardware</i> do dispositivo para teste do protocolo URP ..	56
Figura 5.4 – Diagrama esquemático da interface IHM.....	57
Figura 5.5 –Layout da placa de circuito impresso do protótipo da estação para teste do protocolo URP	58
Figura 5.6 – <i>hardware</i> Interface Homem Máquina	58
Figura 5.7 – Módulo transceptor montado com módulos de rádio receptor regenerativo e transmissor	59
Figura 5.8 – Cenário montado para teste do protocolo URP.....	60
Figura 6.1 – Preâmbulo – Mecanismo de sincronismo para porta serial	64
Figura 6.2 – Sincronismo do <i>byte</i> 0x55	65
Figura 6.3 – sequência de transmissão quadro IEEE 802.11(18)	67
Figura 6.4 – Percentual de quadros enviados com sucesso quando inserido sequência de <i>bytes</i> zero no quadro transmitido.....	69
Figura 6.5 – Quadro corrompido devido a sequência de <i>bits</i> zeros.....	70
Figura 7.1 – Gráfico da avaliação dos resultados do algoritmo para de recuperação de quadros colididos.	75
Figura 7.2 – Percentual de quadros codificados em <i>Manchester</i> transmitidos com sucesso ..	76
Figura 7.3 - Rádios receptores regenerativos testados.....	77
Figura 7.4 – Rádios Receptores: tempo para consumir a energia equivalente a uma bateria alcalina AA com a taxa de transmissão limitada a 5kbps	79
Figura 7.5 - Rádios Receptores: tempo para consumir a energia equivalente a uma bateria alcalina AA utilizando a taxa de transferência máxima.....	80
Figura 7.6 - Rádios Receptores: tempo para consumir a energia equivalente a uma bateria alcalina AA considerando o receptor ligado continuamente.....	81

Figura 7.7 – Rádios transmissores: tempo para consumir a energia equivalente a uma bateria alcalina AA com a taxa de transmissão limitada a 5kbps	84
Figura 7.8 - Rádios transmissores: tempo para consumir a energia equivalente a uma bateria alcalina AA utilizando a taxa de transferência máxima.....	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 6.1 – Quantidades de bytes de Preâmbulo perdidos durante o experimento.....	66
Tabela 7.1 – Avaliação da eficiência energética dos rádios receptores.....	78
Tabela 7.2 – Características dos rádios transmissores.....	82

LISTA DE TERMOS

<i>Baud Rate</i>	Taxa de transmissão em <i>bits</i> por segundo.
Circuito "quadrador"	Circuito eletrônico que converte uma forma de onda senoidal em quadrangular.
<i>Clock</i>	Trem de pulsos gerado ou derivado de um cristal.
Comunicação assíncrona	Comunicação que não necessita de um sinal específico para fazer o sincronismo.
Comunicação síncrona	Comunicação sincronizada por um sinal específico para sincronismo.
<i>Flag</i>	Variável que representa dois estados: falso ou verdadeiro.
Heteródino	Circuito receptor de rádio inventado por Armstrong
Kernel	Núcleo do sistema operacional responsável por gerenciar a execução das rotinas do sistema operacional.
Oscilador <i>Colpitts</i>	Circuito oscilador inventado em 1918 por Edwin H. Colpitts.
Oscilador <i>Hartley</i>	Circuito oscilador inventado em 1915 por Ralph Hartley.
Rádio transceptor	Dispositivo de comunicação composto de rádio transmissor e rádio receptor.
RAM	Memória de Acesso Randômico.
Ruído	Perturbações eletromagnéticas derivadas de outras fontes de rádios.
Sinal-ruído	Relação entre o sinal e o ruído de fundo.
Ultra portátil	Equipamento que pode ser transportado no bolso ou preso ao corpo.

SUMÁRIO

1	CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	16
1.1	CONTEXTO HISTÓRICO	16
1.2	OBJETIVO	18
1.3	JUSTIFICATIVA	18
1.4	ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	19
2	CAPÍTULO 2 – COMUNICAÇÃO EM CANAIS SEM FIO	21
2.1	COMUNICAÇÃO SERIAL UART	21
2.1.1	<i>Amostragem do sinal na porta UART</i>	22
2.1.2	<i>Detecção do quadro na comunicação serial assíncrona</i>	23
2.2	CODIFICAÇÃO DOS DADOS	23
2.2.1	<i>Codificação NRZ (Non Return to Zero) ou codificação binária</i>	23
2.2.2	<i>Codificação Manchester</i>	24
2.2.3	<i>Codificação Manchester diferencial</i>	24
2.3	O MODELO DE REFERÊNCIA OSI	25
2.3.1	<i>Subcamada (N)</i>	25
2.3.2	<i>Camada (N)</i>	25
2.3.3	<i>Entidade (N)</i>	25
2.3.4	<i>Protocolo (N)</i>	25
2.3.5	<i>Pares de entidades (N)</i>	26
2.3.6	<i>PCI (Informações de Controle de Protocolo)</i>	26
2.3.7	<i>Dados do usuário</i>	26
2.3.8	<i>PDU (Unidade de Dados de Protocolo)</i>	26
2.3.9	<i>SDU (Unidades de Dados de Serviços)</i>	26
2.3.10	<i>Camada de aplicação</i>	27
2.3.11	<i>Camada de apresentação</i>	27
2.3.12	<i>Camada de sessão</i>	27
2.3.13	<i>Camada de transporte</i>	27
2.3.14	<i>Camada de rede</i>	28
2.3.15	<i>Camada de enlace de dados</i>	28
2.3.16	<i>Camada física</i>	28
2.4	O PADRÃO IEEE 802.11	29
2.4.1	<i>Organização das camadas do padrão IEEE 802.11</i>	29
2.4.2	<i>Estrutura do quadro de dados do padrão IEEE 802.11</i>	29
2.5	RECUPERAÇÃO DE DADOS EM CASOS DE QUADROS COLIDIDOS	32
2.5.1	<i>Colisão entre quadros</i>	32

2.5.2	<i>Mecanismos para recuperação de quadros colididos</i>	34
2.6	MODULAÇÃO OOK – VULNERABILIDADE A RUÍDO DEVIDO A SEQUÊNCIAS LONGAS DE BITS ZERO.....	36
3	CAPÍTULO 3 – RECEPTORES REGENERATIVOS	39
3.1	EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DOS RECEPTORES	39
3.2	MODULAÇÃO POR CHAVEAMENTO DE AMPLITUDE (OOK)	42
3.2.1	<i>Eficiência energética da modulação OOK</i>	43
3.3	CIRCUITO TRANSMISSOR COM MODULAÇÃO OOK	44
3.4	O RÁDIO RECEPTOR REGENERATIVO	45
3.5	FUNCIONAMENTO DO RECEPTOR REGENERATIVO COM DEMODULAÇÃO OOK	46
4	CAPÍTULO 4 – O PROTOCOLO URP	49
4.1	DEFINIÇÃO DA ESTRUTURA DO PROTOCOLO URP	49
4.2	SUBCAMADA PMD	49
4.3	SUBCAMADA PLP (<i>PHYSICAL LAYER PROTOCOL</i>)	49
4.3.1	<i>Estrutura do quadro da camada PLP</i>	50
4.4	PROTOCOLO PARA A SUBCAMADA FÍSICA PLP.....	51
4.4.1	<i>Protocolo da subcamada PLP para a recepção do quadro</i>	51
4.4.2	<i>Protocolo da subcamada PLP para a transmissão do quadro</i>	52
4.5	CAMADA DE ENLACE DE DADOS – SUBCAMADA MAC	52
4.6	QUADRO DA CAMADA MAC	53
4.7	PROTOCOLO PARA A SUBCAMADA MAC	53
4.7.1	<i>Protocolo da subcamada MAC para a transmissão de quadros</i>	54
4.7.2	<i>Protocolo da subcamada MAC para a recepção de quadros</i>	54
4.8	O QUADRO COMPLETO DO PROTOCOLO URP PARA A TRANSMISSÃO	54
5	CAPÍTULO 5 – DESCRIÇÃO DA INFRAESTRUTURA UTILIZADA PARA REALIZAÇÃO DOS EXPERIMENTOS	55
5.1	MÓDULO DE RÁDIO UTILIZADO NO PROJETO.....	55
5.2	<i>HARDWARE</i> DE INTERFACE DO PROTOCOLO URP.....	55
5.2.1	<i>Fluxo dos dados no hardware</i>	59
5.3	SISTEMA OPERACIONAL UTILIZADO COM O PROTOCOLO URP	60
5.4	PROGRAMA PARA REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS DO PROTOCOLO	61
6	CAPÍTULO 6 – PROBLEMAS E SOLUÇÕES	63
6.1	DEFINIÇÃO DO PREÂMBULO PARA O PROTOCOLO URP	63
6.2	UTILIZAÇÃO DA ARQUITETURA <i>CROSS-LAYER</i>	66
6.3	PROBLEMA DA PERDA DE DADOS DEVIDO À COLISÃO ENTRE QUADROS	66
6.4	PROBLEMA DA CORRUPÇÃO DE DADOS DEVIDO A SEQUÊNCIAS DE <i>BITS</i> ZERO	69

7	CAPÍTULO 7 – AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO PROTOCOLO URP	73
7.1	METODOLOGIA PARA A REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS	73
7.2	DEMONSTRAÇÃO DO DESEMPENHO DO ALGORITMO PARA RECUPERAÇÃO DE QUADROS COLIDIDOS	73
7.3	RESULTADOS DA SOLUÇÃO PARA VULNERABILIDADE A INTERFERÊNCIAS	75
7.4	TESTE DE COMPATIBILIDADE DO PROTOCOLO URP.....	76
7.5	AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DOS RÁDIOS RECEPTORES	77
7.6	AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DOS TRANSMISSORES MODULADOS EM OOK	81
8	CAPÍTULO 8 – CONCLUSÃO	85
8.1	CONCLUSÃO	85
8.2	TRABALHOS FUTUROS	86

1 CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTO HISTÓRICO

Em 1914, Edwin Armstrong patenteou um circuito receptor de rádio de alta sensibilidade, denominado receptor regenerativo (1), desenvolvido com um único tubo de válvula tríodo termo iônica (inventada por Lee Forest (2) em 1912). O receptor regenerativo funcionava com a utilização de um amplificador sintonizado por um circuito tanque, que realimenta parte do sinal amplificado positivamente, ficando na iminência da oscilação. Esta realimentação positiva multiplicava o ganho original das válvulas por um fator de até 15000 vezes (1).

Naquele tempo, o ganho de tensão das válvulas era extremamente limitado, e o circuito do rádio existente, TRF (*Tuned Radio Frequency receiver*), necessitava de 5 a 6 válvulas para fazer a detecção e amplificação satisfatória do sinal de rádio, tornando o equipamento de rádio pesado e com alto custo (1), (3), (4). O receptor regenerativo foi uma revolução para os sistemas de rádio da época, pois permitia a construção de um receptor com boa sensibilidade utilizando apenas uma válvula e pouquíssimos componentes complementares.

Apesar do sucesso, o receptor regenerativo tinha alguns inconvenientes. Para fazer sintonia de um novo canal de rádio com intensidade de sinal diferente, era necessário que o operador reajustasse a malha de realimentação positiva do amplificador através de um potenciômetro, porque a curva de amplificação da válvula variava com o nível de tensão, interferindo na malha de realimentação. Outro grave problema era a instabilidade do circuito pelo fato de ele trabalhar na iminência da oscilação. Quando a realimentação era aumentada pelo operador, o circuito eventualmente oscilava. Como consequência, o receptor transmitia a frequência gerada pela oscilação através da antena de recepção, transformando-se em um potente transmissor, que causava interferência em outros equipamentos de rádio que estivessem ao alcance (1).

Com o objetivo de resolver estes problemas, Armstrong inventou o receptor heteródino em 1918 (4), que convertia as frequências recebidas pela antena em uma frequência fixa, denominada FI (**F**requência **I**ntermediária). A conversão de frequência era feita através do batimento de onda do sinal recebido com um sinal gerado por um oscilador local. A frequência fixa intermediária proporcionava uma amplificação com mais seletividade nas etapas posteriores, porque permitia a construção de amplificadores sintonizados com filtros fixos, que eram mais eficientes que os amplificadores com filtros ajustáveis para várias frequências (5). O receptor

heteródino resolveu os problemas de seletividade e instabilidade do receptor regenerativo, mas inicialmente teve pouca aceitação no mercado devido à complexidade de fabricação e alto custo. Em 1930, com a popularização e a consequente produção em massa do rádio, os custos das válvulas diminuíram, viabilizando a comercialização do receptor heteródino, que começou a substituir gradativamente o receptor regenerativo, e permaneceu como circuito padrão para receptores de rádio até os dias de hoje (4), (6). Com a viabilização dos receptores heteródinos, os receptores regenerativos tornaram-se obsoletos.

Recentemente, com a evolução da microeletrônica, o circuito regenerativo ressurgiu no mercado, motivado por dois importantes diferenciais em relação aos outros sistemas de rádio.

O primeiro diferencial foi o baixo consumo de energia proporcionado pelas poucas etapas do circuito, o que torna o receptor regenerativo apropriado para dispositivos alimentados por bateria. O segundo diferencial foi a extrema simplicidade do circuito. É necessário apenas um transistor para se montar um receptor completo com alta sensibilidade (-105 dBm), viabilizando a tecnologia sem fio para aplicações de baixo custo. O baixo consumo de energia é potencializado pela modulação OOK (*On Off Keying*) (7), mais adequada para este tipo de receptor, que reduz o consumo de energia do transmissor em 50%. A combinação do receptor regenerativo com transmissor modulado em OOK possibilita a construção de rádios transceptores digital com alta eficiência energética.

Os circuitos regenerativos atuais, utilizados para comunicação digital, foram adaptados para sintonizar apenas uma frequência de rádio, eliminando a necessidade do reajuste da realimentação positiva pelo operador. Também foi adaptado um estágio de amplificação de RF (**R**ádio **F**requência) antes do circuito receptor regenerativo. Desta forma, a realimentação positiva da etapa regenerativa pode ser ajustada para trabalhar com ganhos menores, ficando distante do ponto de oscilação, proporcionando um circuito mais estável.

Apesar do grande potencial para utilização em sistemas alimentados por baterias, o receptor regenerativo ressurgiu no mercado para atender a uma demanda de comunicação sem fio para produtos com baixo custo, como sistemas de segurança e controles remotos. Por causa disto, o protocolo de comunicação da camada física, desenvolvida para este tipo de receptor, permite apenas o envio de dados não estruturados, como envio de senhas para sistemas de segurança ou envio de códigos para controle remoto. A falta de um protocolo de comunicação, que propicie a transmissão de sequências estruturadas de dados, de forma transparente e

confiável, dificulta a aplicação prática dos rádios receptores regenerativos em sistemas computacionais mais complexos.

1.2 OBJETIVO

Este trabalho descreve um protocolo de comunicação situado na camada física do modelo de referência OSI, batizado de protocolo URP (**P**rotocolo **R**ádio **U**ART), que possibilitou a construção de um transceptor com a utilização de um rádio receptor regenerativo e de um transmissor com modulação OOK, conectados diretamente à saída da porta UART disponível na maioria dos microcontroladores comerciais, ou na porta USB (*Universal Serial Bus*) através de um conversor “serial – USB”. Este protocolo proporcionou um enlace de dados transparente e confiável, para envio e recebimento de sequências estruturadas de dados genéricos. O transceptor construído obteve uma alta eficiência energética, consumindo apenas 0,16mW no modo de recepção de dados e 6,31mW para transmissão de um sinal com intensidade de 0dBm (1mW).

1.3 JUSTIFICATIVA

A característica peculiar dos receptores regenerativos de obter um alto ganho de tensão em uma única etapa de amplificação possibilita a elaboração de circuitos extremamente simples. Este benefício tem estimulado vários pesquisadores a desenvolverem receptores de rádio regenerativos com baixíssimo consumo de energia, na ordem de μW . Este baixo consumo de energia é possibilitado pela reduzida quantidade de componentes necessários para a montagem do mesmo. Conforme demonstrado na seção 7.5, os receptores regenerativos podem prolongar a vida de sistemas alimentados por baterias de forma significativa, como, por exemplo: o rádio receptor regenerativo utilizado neste trabalho (8) tem um consumo de energia 370 vezes menor que o transceptor CC2420 (9), que é utilizado na fabricação de nós sensores sem fio. Isto significa que, se um dispositivo transceptor baseado no CC2420 levar um ano para descarregar uma bateria, considerando apenas a energia gasta pelo receptor, o transceptor desenvolvido neste trabalho, baseado em rádio receptor regenerativo, levaria 370 anos para descarregar a mesma bateria.

Os receptores regenerativos podem atender a uma demanda crescente no mercado para receptores com baixo consumo de energia, como redes de sensores sem fios, em que os nós sensores são alimentados por baterias. Estes dispositivos necessitam de alta eficiência energética para proporcionar o aumento da vida útil da rede.

Contrastando com este cenário, poucos trabalhos têm sido feitos com o propósito de desenvolver um enlace de dados estruturado, que possibilite uma conexão transparente do rádio receptor regenerativo com os sistemas computacionais.

O protocolo, desenvolvido neste trabalho, propiciou a conexão de módulos de receptores regenerativos diretamente nas portas seriais USB disponíveis nos computadores e nas portas seriais UART disponíveis na maioria dos microcontroladores, facilitando a aplicação dos receptores regenerativos em sistemas computacionais.

O protocolo URP foi elaborado com mecanismos para identificação de colisão, recuperação de dados em caso de colisão entre quadros e codificação do sinal em código *Manchester*, que diminui a vulnerabilidade do rádio a ruídos, proporcionando um enlace de dados transparente e confiável.

1.4 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está organizada da seguinte forma:

O Capítulo 2 descreve aspectos relacionados a protocolos de comunicação, abordando os assuntos necessários para a descrição do desenvolvimento do protocolo URP. O Capítulo 3 descreve aspectos relacionados ao *hardware* do receptor regenerativo. O capítulo 4 descreve o protocolo URP. O Capítulo 5 descreve o *hardware*, o *firmware*, e os programas aplicados para a realização dos ensaios experimentais com o protocolo URP. O capítulo 6 descreve as soluções para os problemas encontrados durante o desenvolvimento do protocolo. O capítulo 7 descreve a metodologia aplicada para a realização dos ensaios experimentais para avaliação das soluções e os resultados dos experimentos, que demonstram o comportamento do sistema com as soluções aplicadas. O capítulo 8 descreve a conclusão do trabalho, destacando as contribuições e possíveis trabalhos futuros.

2 CAPÍTULO 2 – COMUNICAÇÃO EM CANAIS SEM FIO

Neste capítulo será feita uma breve revisão sobre protocolos de comunicação abordando os assuntos necessários para a compreensão dos capítulos seguintes, que se referem ao desenvolvimento do protocolo URP.

O capítulo está organizado da seguinte forma. Na seção 2.1 será descrita a comunicação serial UART, que será utilizada para fazer a conexão entre os sistemas computacionais e o rádio receptor regenerativo. Na seção 2.2, serão descritas algumas técnicas de codificação de dados. Na seção 2.3 será descrito o modelo de referência RM-OSI. Na seção 2.4 serão descritas algumas definições do padrão IEEE 802.11. Na seção 2.5 serão descritas soluções para o problema da recuperação de dados no caso de colisão entre quadros com efeito de captura. Na seção 2.6 serão descritas algumas soluções para o problema da vulnerabilidade a interferências eletromagnéticas durante a transferência de sequências de bits com valor zero, quando são representados pelo desligamento da portadora na modulação OOK.

2.1 COMUNICAÇÃO SERIAL UART

Para o desenvolvimento do *hardware* utilizado nos testes do protocolo URP, a porta de comunicação UART (**U**niversal **A**synchronous **R**eceiver **T**ransmitter), presente na maioria dos microcontroladores, foi usada para modular diretamente a amplitude da portadora, através de um módulo transmissor com modulação OOK. O padrão para comunicação serial foi estabelecido pela ITU (**I**nternational **T**elecommunication **U**nion) pelas normas V.24 ou EIA RS-232 (10), que definem as características físicas do canal de comunicação serial e o protocolo de comunicação.

Segundo estas normas, a porta UART pode ser configurada para comunicação síncrona ou assíncrona. Na comunicação síncrona, são necessárias duas linhas de transmissão para criar o enlace de dados. Uma delas transporta os dados e a outra transporta o *clock* (trem de pulsos) de sincronismo necessário para a leitura dos dados no tempo correto. A comunicação síncrona não foi utilizada neste trabalho, por necessitar de duas conexões físicas, o que resultaria na necessidade de dois canais de rádio transmitindo ao mesmo tempo.

No modo de comunicação assíncrono, os dados são transferidos a uma determinada taxa, que deve ser configurada igualmente nas interfaces das estações de transmissão e recepção. Algumas taxas padrões são 9600, 14400, 19200, 28800, 57600 e 115200 bps. Os dados são

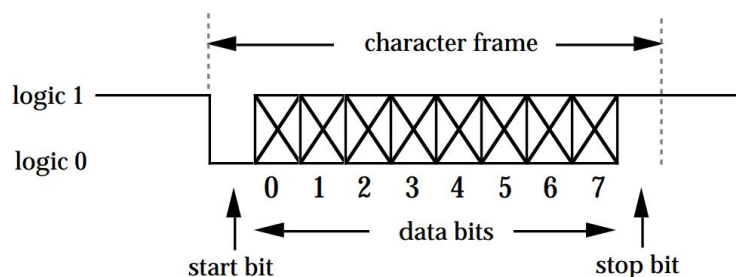


Figura 2.1- Quadro de comunicação serial

encapsulados em um quadro com um *byte* de dados com 8 *bits* (256 combinações) e 2 *bits* de controle, que são o *start bit* e o *stop bit* (Figura 2.1). A porta UART pode ser configurada no modo de verificação de paridade, em que o *hardware* utiliza o oitavo *bit* dos dados para verificar automaticamente a paridade do quadro como forma de verificação de erros. Esta opção raramente é usada pelo fato de diminuir a quantidade de bits dos dados de oito para sete bits, reduzindo pela metade o tamanho de combinações dos dados (de 256 para 128 combinações). Os quadros com 10 *bits* (8 *bits* de dados e 2 *bits* de controle) são fragmentados e enviados *bit a bit* pela saída RX da porta serial conforme a velocidade programada. A Figura 2.1 mostra um quadro da porta serial com a seguinte configuração: modo assíncrono, sem paridade com um *stop bit*.

Para conectar a porta serial diretamente ao módulo de rádio, os níveis de tensão e impedância entre os dois dispositivos devem ser compatíveis. Os níveis de tensão dos microcontroladores podem variar de acordo com o fabricante, sendo que as tensões comumente encontradas são 5V e 3,3V. Os módulos de rádio devem ser compatíveis com a tensão de trabalho do microcontrolador escolhido.

2.1.1 Amostragem do sinal na porta UART

Uma das vantagens de se usar a porta serial para se fazer a comunicação com os módulos de rádio é o fato de a amostragem do sinal para a leitura dos níveis de tensão dos pulsos, equivalente aos *bits* de informação, serem feitas pelo *hardware* da porta serial, sem a necessidade de processamento pelo microcontrolador. A amostragem do sinal é feita de acordo com a taxa de transferência (*Baud Rate*) configurada. Por exemplo, se a taxa de transferência for programada para a velocidade de 9600 bps, a cada segundo passarão 9600 *bits* pelo canal de comunicação. Então, o período de um *bit* será de 104,16 μ s. Para a leitura de um pulso são necessárias, pelo menos, três amostragens (11), o que resulta num período de amostragem de 34,86 μ s, que equivale a uma frequência de amostragem de 28,686KHz. Sem o uso da porta serial seria necessário gerar interrupções no microcontrolador, com a mesma frequência da taxa de

amostragem. Isto representaria um consumo de recursos computacionais elevado para microcontrolador com baixo poder de processamento. Com o uso da porta serial, a taxa de interrupção para a mesma taxa de transferência (9600 bps) é reduzida para apenas 1KHz, representando um consumo de processamento computacional quase trinta vezes menor em relação a uma conexão direta com as portas do microcontrolador. Isto permite que os recursos computacionais do microcontrolador sejam aplicados para outras funções, viabilizando aplicações mais complexas para o conjunto transceptor – microcontrolador.

2.1.2 Detecção do quadro na comunicação serial assíncrona

O protocolo de enlace de dados da comunicação serial UART foi projetado originalmente para redes cabeadas com no mínimo duas conexões físicas Rx e Tx. Para se fazer a leitura do trem de pulsos de um quadro de dados, o *hardware* do receptor da porta serial deve detectar o início do quadro marcado pelo *start bit* e, então, fazer a leitura dos *bits* consecutivos na mesma velocidade configurada no transmissor. Na rede cabeada, o nível de tensão da linha de comunicação deve permanecer com nível lógico “um” (nível de tensão alto) na ausência de transmissão de dados. Desta forma, quando chega um quadro de dados, o circuito receptor da porta serial detecta a transição de “um” (estado inicial da linha) para “zero” (*start bit*). Quando o *start bit* é detectado, a UART aguarda a metade do período de um *bit* e verifica novamente se a linha ainda está em nível baixo, para confirmar se é realmente um *start bit*. Confirmado o *start bit*, a UART faz a leitura dos oito *bits* de dados com intervalos de tempo de um *bit*, e verifica se o nono *bit* está em nível alto. Se estiver, significa que houve um *stop bit*, e os *bits* lidos são agrupados em um *byte* e enviados para o *buffer* da porta serial. Após isto, a UART aguarda uma nova transição de “um” para “zero” para iniciar a leitura de um novo quadro.

2.2 CODIFICAÇÃO DOS DADOS

A codificação dos dados é uma técnica utilizada para embutir nos dados a serem transmitidos determinadas características exigidas pelo canal físico de comunicação, como, por exemplo: fazer o transporte do *clock* do transmissor do sinal para que o receptor possa sincronizar os relógios e detectar o início do quadro; eliminar o nível DC do sinal de comunicação e evitar longas sequências de “zeros” ou “uns”. A seguir serão comentados alguns tipos de codificação.

2.2.1 Codificação NRZ (*Non Return to Zero*) ou codificação binária

Este tipo de codificação é considerado um dos mais simples, porque não é inserida nenhuma informação adicional no sinal. O nível lógico “um” é representado pelo nível de tensão

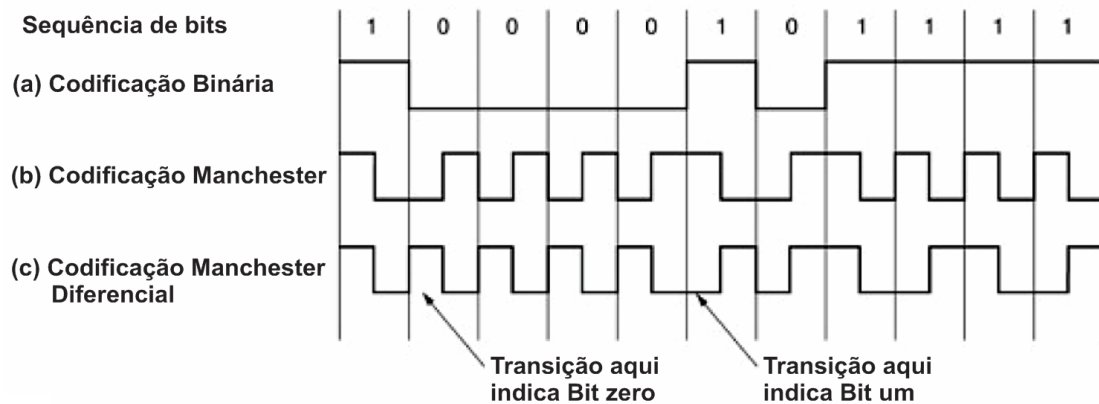


Figura 2.2 – Técnicas de codificações de dados

alto, e o nível lógico “zero” é representado pelo nível de tensão baixo, ou vice versa (Figura 2.2 - a). Uma das vantagens da NRZ é o aproveitamento integral da taxa de transferência do canal de comunicação. Um exemplo de aplicação da codificação NRZ é o padrão IEEE 802.11 (7,12) que utiliza esta codificação para redes sem fio.

2.2.2 Codificação *Manchester*

Na codificação Manchester, o *bit* lógico “um” é representado pelos valores “um” e “zero”, e o bit lógico zero é representado pelos valores “zero” e “um” (Figura 2.2 - b).

As vantagens da codificação *Manchester* são: manter o nível DC do sinal igual a zero; transmitir o *clock* do dispositivo de origem junto com o sinal; permitir a detecção de portadora do sinal; detectar imediatamente a corrupção de dados pela verificação de níveis não permitidos, que são dois “zeros” consecutivos “00” ou dois “uns” consecutivos “11” (7,12,13). Um exemplo de aplicação da codificação *Manchester* é o padrão IEEE 802.3, que utiliza esta codificação para redes cabeadas.

2.2.3 Codificação *Manchester* diferencial

É uma variação da codificação *Manchester* na qual o valor lógico do *bit* é indicado pela transição do início do *bit*. Se houver transição no início do *bit*, o nível lógico do *bit* é “zero”. Se não houver transição, o nível lógico do *bit* é “um” (Figura 2.2 - c). A vantagem da codificação *Manchester* diferencial é em relação à ausência de polaridade da conexão dos cabos. Neste tipo de codificação, se a polaridade dos cabos for invertida, a comunicação continua funcionando normalmente.

2.3 O MODELO DE REFERÊNCIA OSI

A estruturação do protocolo URP segue o modelo de referência RM-OSI (*Reference Model Open System Interconnection*). Nesta seção será visto um sucinto resumo sobre este modelo.

Em 1977, a organização internacional de padronização ISO criou o comitê (SC16) com o objetivo de elaborar um sistema de interconexão aberto, denominado RM-OSI (Interconexão de Sistemas Abertos), para permitir a comunicação entre sistemas heterogêneos (14). O modelo RM-OSI adotou o conceito desenvolvido por Charles Bachman (15), que dividia as funções de comunicação semelhantes em sete camadas, de forma que uma determinada camada interage somente com a camada inferior e disponibiliza os recursos para a camada superior. O RM-OSI se tornou uma referência teórica amplamente utilizada para desenvolvimento e estudos de protocolos de redes (16).

Na sequência serão descritas as definições de alguns termos do RM-OSI utilizados nesta dissertação:

2.3.1 Subcamada (N)

É um elemento de divisão hierárquica do sistema RM-OSI que interage diretamente apenas com elementos no lado superior ou no lado inferior desta divisão.

2.3.2 Camada (N)

É uma subdivisão da arquitetura RM-OSI, constituído por subcamadas do mesmo valor (N). O RM-OSI definiu sete camadas (Figura 2.3): camada Física; camada de Enlace de Dados; camada de Rede; camada de Transporte; camada de Sessão; camada de Apresentação e camada de Aplicação;

2.3.3 Entidade (N)

É um elemento ativo de uma camada N que interage diretamente com os elementos das camadas superiores ou inferiores a esta camada. É definida por um conjunto único de regras, incluindo informações de formatos e controle, e realiza um conjunto definido de funções (16).

2.3.4 Protocolo (N)

É um conjunto de regras e formatos (semântico e sintático), que determina o comportamento da comunicação de entidades (N).

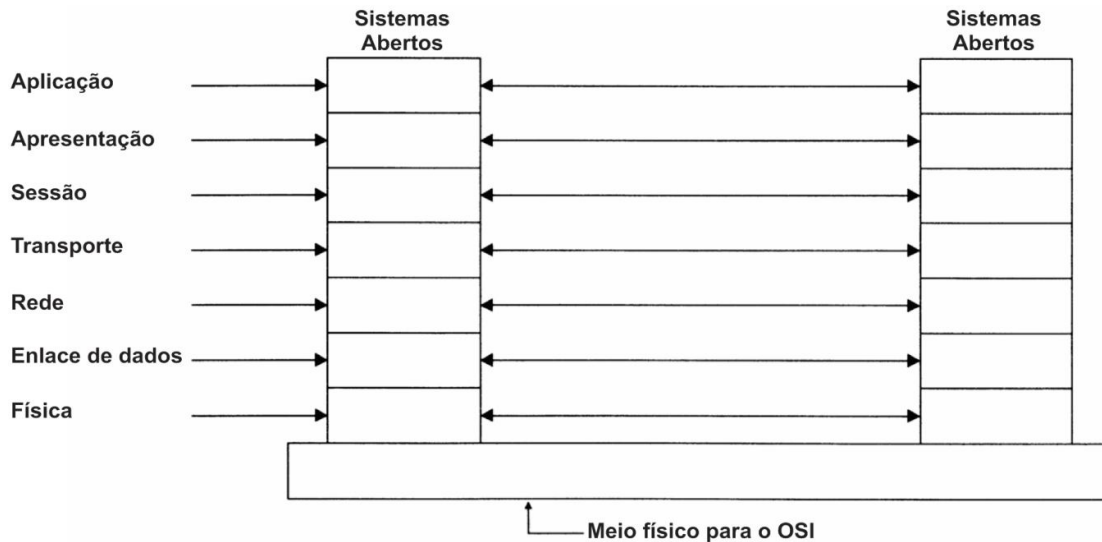


Figura 2.3 - Estrutura RM-OSI (16)

2.3.5 Pares de entidades (N)

São entidades que pertencem a um mesmo tipo de camada (N).

2.3.6 PCI (Informações de Controle de Protocolo)

São as informações trocadas entre (N)-entidades para coordenar sua operação conjunta. Estas informações (Figura 2.4) são transportadas nos campos dos cabeçalhos de controle das entidades das respectivas camadas N (16).

2.3.7 Dados do usuário

São os dados transferidos entre as entidades N em nome das entidades (N + 1) para as quais as entidades N são prestadoras de serviços (16).

2.3.8 PDU (Unidade de Dados de Protocolo)

Unidade de dados especificados em um protocolo de uma camada N (Figura 2.4), que consiste no agrupamento da PCI (informações de controle) da camada N e dados de usuário (16).

2.3.9 SDU (Unidades de Dados de Serviços)

Representa uma quantidade de informação que é preservada quando transferidas entre os pares de entidades N (Figura 2.4), e que não é interpretada por estas entidades (16).

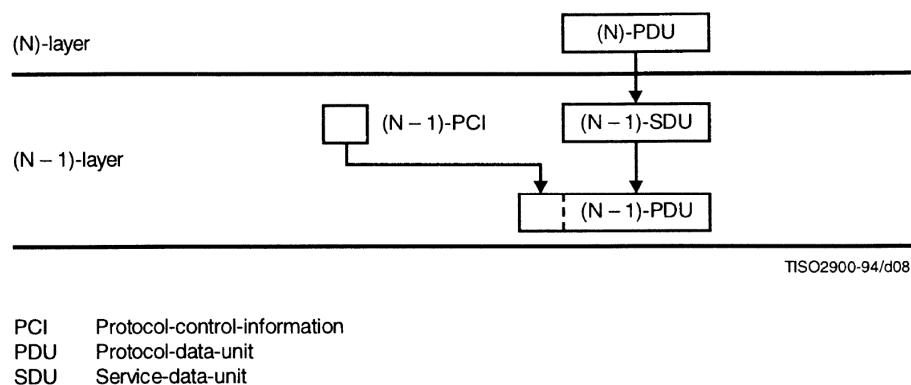


Figura 2.4 – Transferência de dados em camadas adjacentes (16)

2.3.10 Camada de aplicação

É um conjunto de protocolos de comunicação comuns para as aplicações, como por exemplo: protocolo para transferência de arquivos (14).

2.3.11 Camada de apresentação

O propósito da camada de apresentação é fornecer um conjunto de serviços que podem ser selecionados pela camada de aplicação para poder representar o significado dos dados trocados, assegurando que estas informações sejam preservadas durante as transferências, independentemente das sintaxes utilizadas.

2.3.12 Camada de sessão

A finalidade da camada de sessão é dar apoio nas interações entre um par de entidades de apresentação. Para fazer isso, a camada de sessão fornece serviços que são classificados em duas categorias.

a) Fazer a associação e dissociação entre um par de entidades de apresentação. Isso é chamado de serviço de administração de sessão.

b) Fazer o controle de troca de dados, delimitando e sincronizando as operações de dados entre um par de entidades de apresentação.

Para implementar a transferência de dados entre as entidades de apresentação, a camada de sessão contrata os serviços fornecidos pela camada de transporte.

2.3.13 Camada de transporte

O objetivo da camada de transporte é fornecer um serviço de transporte de dados transparente, eficaz e confiável entre um par de entidades de seção. Uma das suas funções é fazer controle fim a fim das mensagens quando necessário, verificando se o destino recebeu a mensagem e reenviando quando preciso, caso a mesma tenha sido extraviada.

2.3.14 Camada de rede

A camada de rede fornece um conjunto de serviços para a troca de dados entre duas entidades da camada de transporte sobre uma conexão de rede. A camada de rede é responsável pelo roteamento das mensagens, evitando que a camada de transporte seja responsável por esta atribuição.

2.3.15 Camada de enlace de dados

O propósito da camada de enlace é fornecer os meios funcionais e de procedimento para estabelecer, manter e liberar enlace de dados entre as entidades da camada de rede. Uma conexão de enlace de dados pode ser feita sobre uma ou várias conexões físicas. A camada de enlace de dados também é responsável pelo controle de acesso ao meio, que permite o compartilhamento de um canal entre vários dispositivos, administrando as colisões entre as mensagens.

2.3.16 Camada física

Existem diversos tipos de meios físicos para a transmissão dos dados (canal bruto), como rádio frequência, eletricidade, som, luz. As particularidades de cada tipo de meio introduzem perturbações, atrasos, e distorções no canal de informação. Na camada física são registradas as definições do meio físico utilizado para formar o canal de comunicação que interliga dois ou mais dispositivos. A camada física tem a função de administrar a transmissão dos dados *bit a bit* através do meio de conexão, adequando o sinal de comunicação de acordo com estes meios, tornando-os um canal transparente e confiável. A camada física fornece os meios mecânicos, elétricos e de procedimentos funcionais para ativar, manter e desativar conexões físicas entre um par de entidades da camada de enlace de dados. Algumas das funções da camada física são: efetuar a conexão física entre dois dispositivos; encapsular os dados em quadros PSDU (unidade de dados da camada física); inserir as informações de controle necessárias ao *hardware*; informar erros ou eventos ocorridos na camada física (16).

2.4 O PADRÃO IEEE 802.11

Nesta seção serão descritas algumas definições do padrão IEEE 802.11. Estas definições serão utilizadas nos próximos tópicos, que discutem soluções para o problema de recuperação de dados no caso de colisão entre quadros com efeito de captura.

Em junho de 1997, a IEEE (*Institute of **E**lectronic and **E**lectrical **E**ngineers*) lançou o padrão IEEE 802.11, que definia a camada física e camada de enlace de dados para conexão de internet sem fio WLAN (***W**ireless **L**ocal **A**rea **N**etworks*) (17). Na sequência serão descritas a estrutura básica do padrão IEEE802.11 e a estrutura de um dos quadros deste padrão.

2.4.1 Organização das camadas do padrão IEEE 802.11

O padrão IEEE802.11 foi baseado no RM-OSI. A Figura 2.6 ilustra o modelo de referência OSI e o padrão IEEE 802.11. O padrão IEEE802.11 se concentra na camada física e na camada de enlace do RM-OSI, que é subdividida em duas subcamadas: PMD (***P**hysical **M**edium **D**ependent*) e PLCP (***P**hysical **L**ayer **C**onvergence **P**rocedure*). Na sequência será feita uma breve descrição destas subcamadas (18).

2.4.1.1 PMD (***P**hysical **M**edium **D**ependent*)

Esta subcamada é dependente do método de modulação utilizado. Sua principal função é receber os quadros vindos da camada PLCP e enviar para o *hardware* do transceptor, que faz a modulação e transmissão das informações para outras estações, e receber os quadros vindos de outras estações, através do *hardware* do transceptor, e enviar estes quadros para a camada PLCP.

2.4.1.2 PLCP (***P**hysical **L**ayer **C**onvergence **P**rocedure*)

Esta camada independe do tipo de modulação utilizado. Sua função principal é fazer a conexão entre a subcamada MAC (***M**edium **A**ccess **C**ontrol*) e a subcamada PMD. Ela encapsula os quadros provenientes da subcamada MAC e envia estes dados para a subcamada física PMD e vice versa.

2.4.2 Estrutura do quadro de dados do padrão IEEE 802.11

O Padrão IEEE 802.11 descreve três diferentes classes de quadros: quadros para dados, quadros para controle e quadros para gerenciamento. Na sequência será descrita a estrutura do quadro de dados da subcamada PLCP (Figura 2.6) denominado PPDU (***P**hysical **P**rotocolo **D**ata*

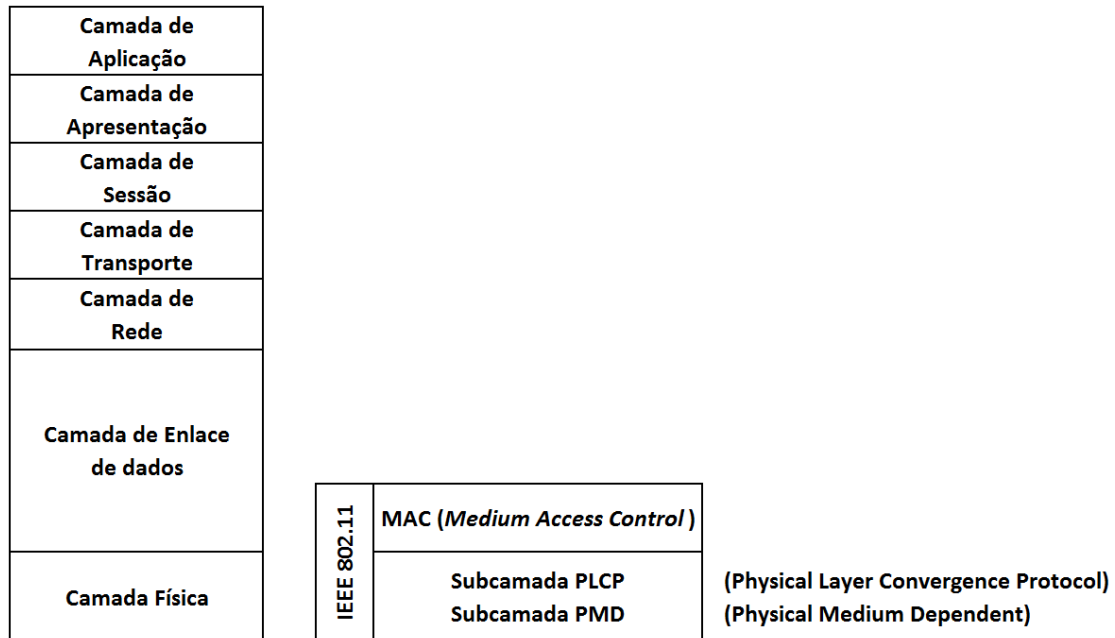


Figura 2.5 –Modelo de referência RM-OSI e o padrão IEEE 802.11 (18)

Unit) e a estrutura do quadro da subcamada MAC, denominado MPDU (**MAC Protocolo Data Unit**).

O quadro PPDU divide-se em Preâmbulo PLCP, Cabeçalho PLCP e campo de dados PSDU (**Physical Service Data Unit**). O campo de Preâmbulo PLCP do quadro PPDU é necessário para estabilização do *hardware* do receptor de rádio frequência e sincronização do quadro pela camada física. O Preâmbulo varia de acordo com a técnica de modulação utilizada.

O campo SFD (**Start Frame Delimiter**) é a marca de início do quadro PLCP (*Start byte*) e sempre contém o código binário "1111001110100000". O cabeçalho do PLCP contém informações utilizadas pela camada física para poder efetuar a transmissão, como velocidade de transmissão e tamanho do campo PSDU. O campo PSDU contém o quadro encapsulado vindo da subcamada MAC, que é o MPDU (**MAC Protocolo Data Unit**) (18).

Na sequência segue a descrição do quadro de dados MPDU vindo da camada MAC (Figura 2.7).

O quadro MPDU divide-se em *Frame Control*, *Duration/ID*, *Address1*, *Address2*, *Address3*, *Sequence Control*, *Address4*, *QoS Control*, *MSDU* e *FCS*.

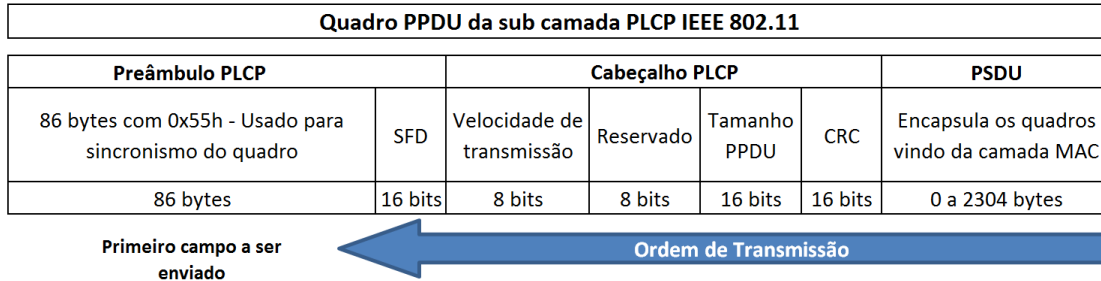


Figura 2.6 – Quadro da camada física do IEEE 802.11 com modulação DSSS.

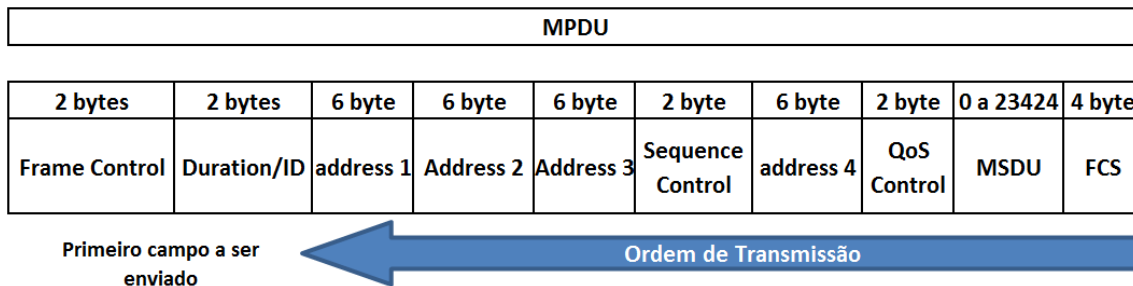


Figura 2.7 - Quadro da subcamada MAC (18)

O campo *Frame Control* é composto pelo “sub quadro” mostrado na Figura 2.8, com os seguintes subcampos: *Protocol Version*, que indica a versão do protocolo usado; *Type*, que indica se é dado, controle ou gerenciamento; *Subtype*, que indica qual o sub tipo do quadro; *To DS*, *From DS*, que indicam se os dados estão indo ou vindo do sistema de distribuição entre nós; *More Fragments*, que indica se há mais fragmentos; *Retry*, que indica se é uma retransmissão; *Power Management*, que é usado pela estação base para colocar o receptor no estado de espera; *More Data*, que indica se há mais quadros no transmissor para o receptor; *Protected Frame*, que indica se os dados foram criptografados; e *Order*, que indica se os dados devem ser processados estritamente em ordem. O segundo campo do quadro MPDU denominado *Duration/ID* indica o tempo em que a transmissão do quadro irá ocupar o canal. Os campos de endereços 1 e 2 contêm o endereço de origem e destino, e os campos de endereços 3 e 4 contêm o endereço utilizado pelas estações bases de origem e destino para o tráfego entre nós. O campo *Sequence Control* permite que os fragmentos sejam numerados. O *QoS Control* é um campo de 16 bits, dividido em 5 subcampos, que contém informações de controle de acesso ao meio, que varia conforme o tipo do quadro. O

B0	B1	B2	B3	B4	B7	B8	B9	B10	B11	B12	B13	B14	B15
Protocol Version	Type		Subtype		To DS	From DS	More Frag	Retry	Pwr Mgt	More Data	Protected Frame	Order	
Bits : 2	2		4		1	1	1	1	1	1	1	1	

Figura 2.8 – Campo do quadro de controle do MPDU (18)

campo MSDU encapsula os dados a serem transmitidos e o campo FCS (*Frame Check Sequence*) contém o CRC (*Cyclic Redundancy Code*), utilizado para a verificação da validade do quadro.

2.5 RECUPERAÇÃO DE DADOS EM CASOS DE QUADROS COLIDIDOS

A perda de dados em caso de colisão entre quadros transmitidos é um problema característico de redes sem fio e pode acontecer quando ocorre o “Efeito de Captura” (*Capture Effect*), que é a capacidade encontrada em alguns receptores de rádio de conseguir demodular um quadro intacto, mesmo sofrendo interferência de outro sinal mais fraco [50]. Por exemplo: supondo um cenário composto por um receptor “R” e duas estações transmissoras “ T_A ” e “ T_B ” com a mesma potência de transmissão (Figura 2.9). Supondo que o receptor “R” está recebendo um quadro “a” da estação “ T_A ” que está localizada mais distante do receptor e durante a transmissão do quadro “a”, a outra estação “ T_B ”, que está localizada mais perto do receptor “R”, comece a transmitir um quadro “b”.

Neste caso, o sinal do quadro “b” chegará com maior intensidade em “R”, devido à proximidade de “ T_B ” a “R”. Nesta situação, o quadro “a” será corrompido porque o seu sinal será sobreposto pelo sinal do quadro “b”, mas o quadro “b” poderá ser recebido intacto pelo receptor “R”, porque o seu sinal vai chegar com maior intensidade no receptor “R”, podendo ocorrer o efeito de captura. Neste contexto, mesmo que o quadro “b” seja demodulado intacto pelo *hardware* do receptor, a camada física do receptor “R” não conseguirá detectar o quadro “b”, porque ela já estará processando o recebimento dos dados (SDU) do primeiro quadro “a”, e o *start byte* de “b” será tratado como dado do quadro “a” [50].

2.5.1 Colisão entre quadros

A colisão entre quadros em redes sem fio ocorre quando dois ou mais dispositivos que operam na mesma frequência de rádio transmitem quadros ao mesmo tempo. Neste trabalho serão utilizados os casos de colisão descritos em [51], para descrever os efeitos das colisões entre

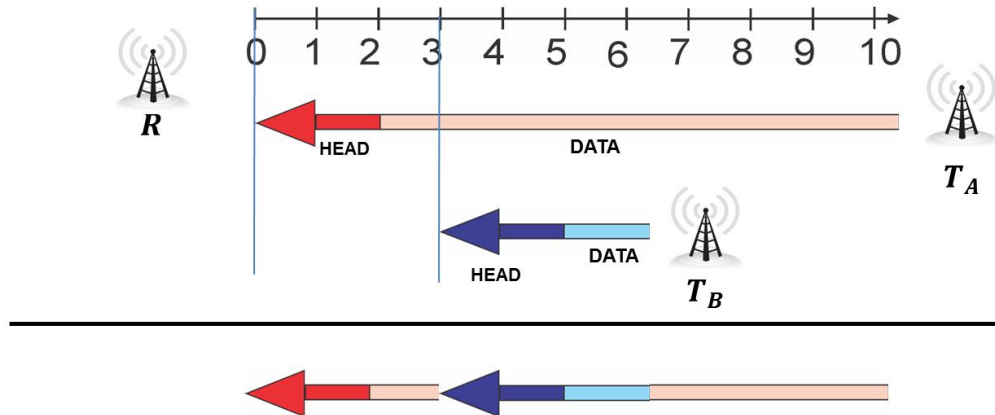


Figura 2.9 - Efeito de captura

quadros. Segundo [51], o efeito de captura (*Capture Effect*) pode ocorrer em quatro tipos de colisões diferentes, representadas na Figura 2.10. Para ilustrar as colisões, foi convencionado que o quadro de cor vermelha possui um sinal de rádio com maior intensidade, e representa o quadro a ser capturado pelo efeito de captura, e o quadro de cor alaranjada possui um sinal de rádio com menor intensidade, e representa o sinal de interferência. A diferença de tempo entre o início dos quadros colididos é representado por Δt .

- No caso “a”, o quadro a ser capturado (vermelho) surgiu antes da interferência. Segundo os experimentos de [51], para este caso, independentemente do tempo Δt , o quadro com sinal de maior intensidade é demodulado e detectado pela camada física do receptor normalmente.
- No caso “b”, o quadro a ser capturado é enviado durante o preâmbulo de uma interferência. A depender da diferença de intensidade entre o sinal do quadro e a interferência, se o quadro for demodulado corretamente pelo rádio receptor, o protocolo da subcamada PMD consegue receber o quadro normalmente.
- No caso “c”, o quadro com maior intensidade é enviado durante o recebimento dos dados do “quadro interferência” pelo receptor. Neste caso, mesmo se o quadro for demodulado corretamente pelo rádio receptor, o quadro não é detectado pelo protocolo PMD porque é confundido com os dados da interferência.
- O Caso “d” representa a combinação do caso “a” com o caso “c”, onde os dois quadros com sinal de maior intensidade são recebidos normalmente, porque o receptor não consegue detectar o início do quadro de interferência e fica livre para fazer a aquisição dos quadros com maior energia.

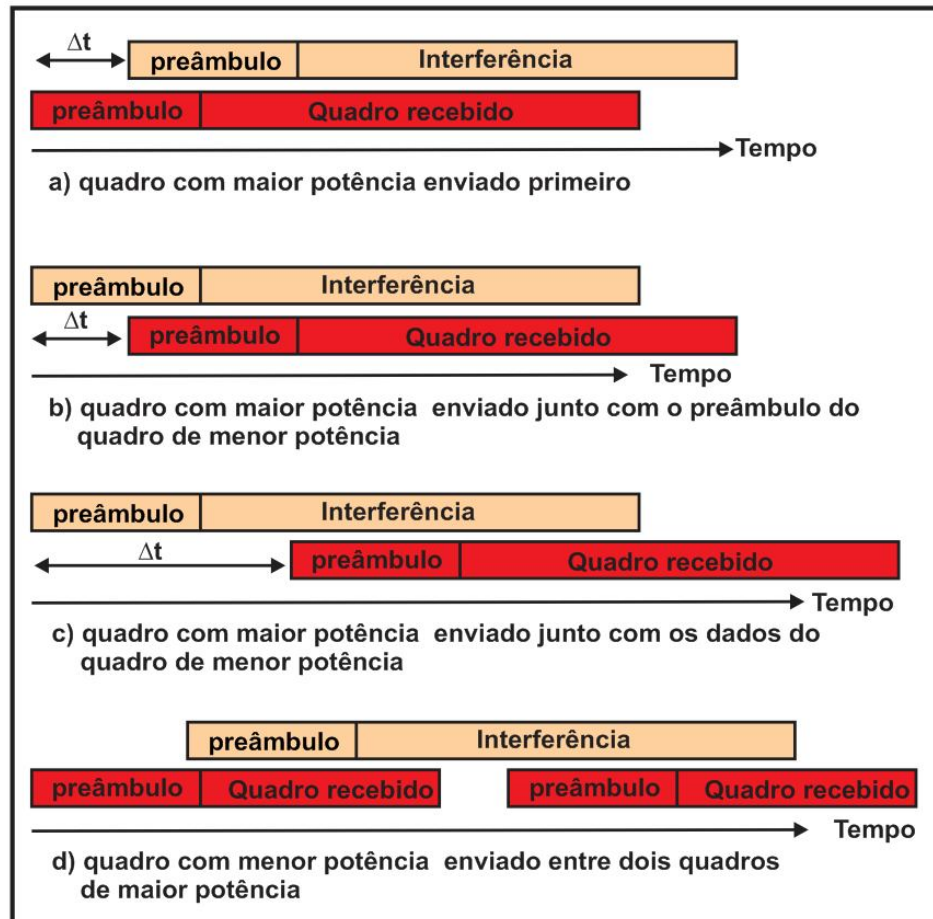


Figura 2.10 – Casos de capturas de quadros durante colisão (19)

É na colisão tipo "C" que se concentram os trabalhos para a recuperação de dados em caso de colisão.

2.5.2 Mecanismos para recuperação de quadros colididos

Na literatura podem ser encontrados vários trabalhos que descrevem meios para a recuperação de quadros colididos. Na sequência serão descritas três soluções para este problema, de K. Whitehouse et al. (20), Jan Boer, da Lucent Technologies (21) e Kouichi Mitsuura (22).

A solução proposta por K. Whitehouse et al. (20) consiste na implementação de um algoritmo para a camada física que faça a verificação constante da chegada de um novo quadro durante a recepção de um quadro. Esta verificação consiste na busca de um preâmbulo e cabeçalho nos dados do quadro que está sendo recebido. Durante esta busca, se for encontrado

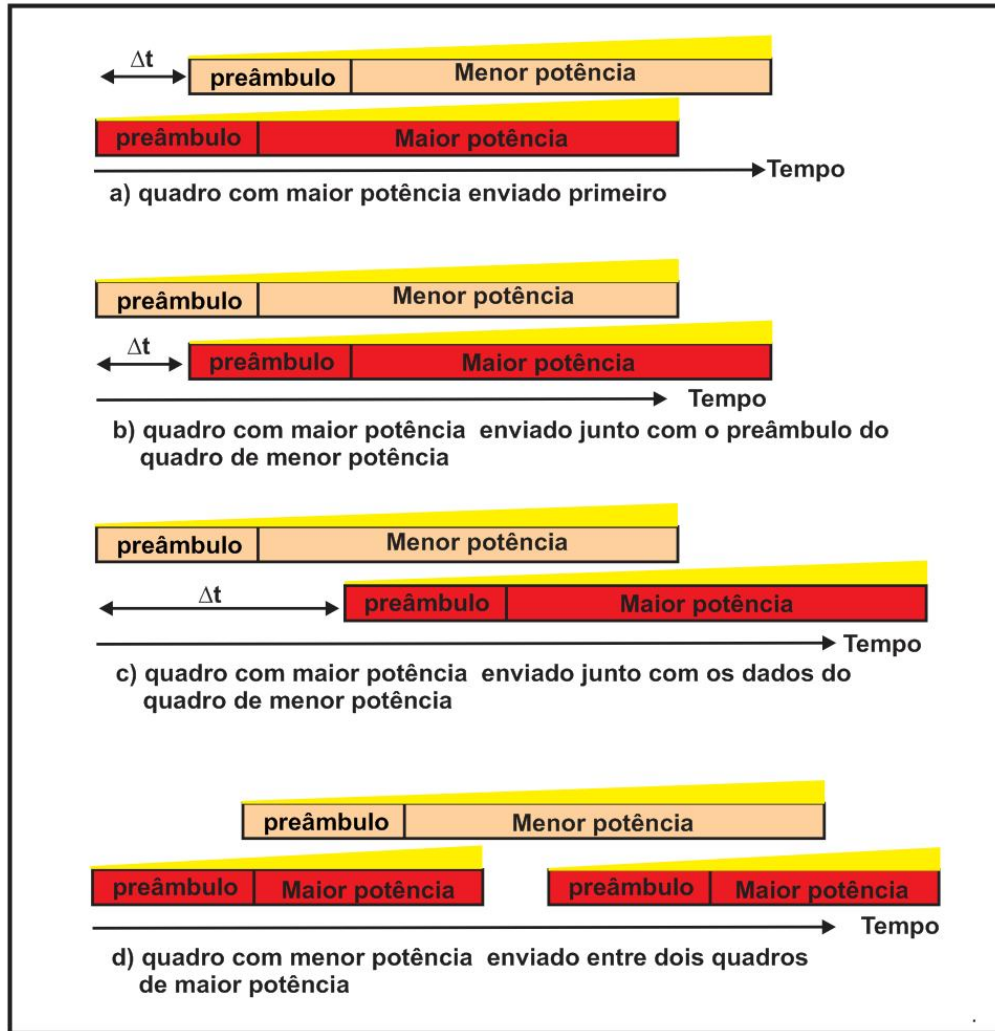


Figura 2.11 – Solução PCT para recuperação de dados no caso de colisão entre quadros

um preâmbulo e um cabeçalho de um novo quadro, a recepção do quadro anterior é cancelada e dá-se início à recepção do novo quadro.

A solução de Jan Boer (21) foi patenteada pela Lucent Technologie e implementada nas camadas físicas da IEEE 802.11 e IEEE 802.15.4, nos produtos da Lucent. A Lucent possibilita nos seus produtos um modo de operação chamado MIM (*Message In Message*). Neste modo de funcionamento, a camada física monitora a ocorrência de um determinado acréscimo na energia do sinal recebido. Se este acréscimo de energia for detectado, o protocolo PMD cancela a recepção do quadro atual e inicia a recepção do novo quadro.

Outra solução para a recuperação de quadros colididos foi proposta por Kouichi Mitsuura (22), denominada de PCT (*Power Control during Transmission*). O PCT consiste no aumento progressivo da energia de transmissão do início ao fim de um quadro. Como pode ser observado na Figura 2.11, em todos os quatro modelos de colisão (a,b,c,d), o primeiro quadro transmitido sempre será privilegiado pelo algoritmo PCT, induzindo a sua captura. Isto minimiza o problema da detecção do quadro pela camada física no caso de uma colisão, porque, se o quadro capturado pelo efeito de captura for o primeiro, o mecanismo de detecção de início de quadro da camada física será engatilhado em função dele, ignorando o segundo quadro (interferência). Desta forma, o quadro será carregado com sucesso.

2.6 MODULAÇÃO OOK – VULNERABILIDADE A RUÍDO DEVIDO A SEQUÊNCIAS LONGAS DE BITS ZERO

Conforme já foi descrito no capítulo 2, os receptores regenerativos utilizados neste trabalho utilizam modulação OOK. A modulação OOK transmite a informação lógica ligando ou desligando a portadora de RF. Para efeito de estudo será convencionalizado que o nível lógico “1” (um) será representado pelo nível de tensão alto e pela presença da portadora de RF, e o nível lógico “0” será representado pelo nível de tensão zero e pela ausência de portadora de RF.

Um dos problemas típicos da modulação OOK é a sensibilidade a ruídos durante a transmissão do nível lógico representado pela ausência da portadora. Na ausência da portadora, o receptor de rádio fica susceptível à captação de ruídos causados por outras fontes de RF. Este problema é agravado quando acontecem sequências longas de *bits* consecutivos, que desligam a portadora por mais tempo. Quando isto ocorre, o circuito de controle automático de ganho do rádio receptor aumenta o ganho do amplificador de RF para compensar a diminuição do sinal, tornando o sistema sensível à captação de ruídos.

Algumas soluções da literatura para minimizar este problema consistem na codificação do sinal para mudar a representação de um determinado nível lógico pela ausência da portadora. Uma das soluções adotadas comercialmente para a resolução deste problema é a codificação *Manchester*. Diversos rádios, como o CC1101 (23), e CC1000 (24), disponibilizam o recurso opcional da codificação *Manchester* quando utilizada a modulação OOK. A codificação *Manchester* representa um determinado nível lógico por dois níveis de tensão. Desta forma, a sequência máxima de níveis de tensão “zero”, representada pela ausência da portadora, fica limitada à largura de dois *bits* lógicos, evitando que a portadora do sinal transmitido fique desligada por um período prolongado, diminuindo a probabilidade de captação de ruídos.

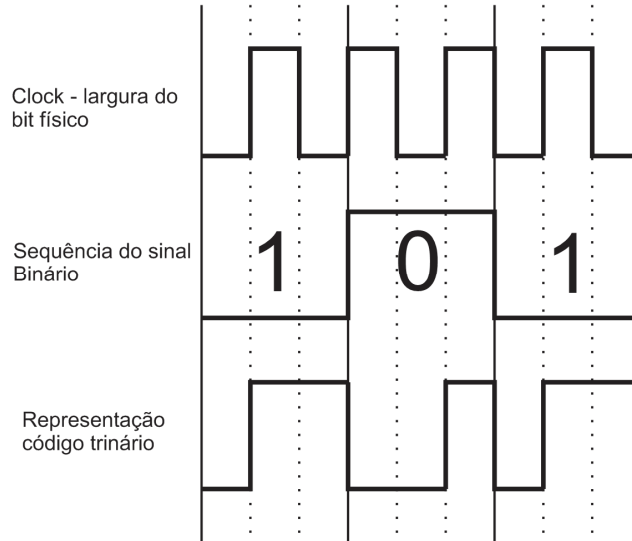


Figura 2.12 – Codificação trinária Holtek

A codificação *Manchester* diferencial também tem a propriedade de limitar a sequência de *bits* “zero” nos dados codificados. Embora ainda não tenha sido utilizada para este propósito, é uma possível solução que foi levada em consideração para a resolução deste problema.

Outra solução proposta foi implementada pelo fabricante de rádios Holtek (25), que utiliza uma codificação trinária para representar os níveis lógicos binários. Na codificação trinária da Holtek, a largura de um *bit* (Figura 2.12) corresponde ao período do *clock*. O nível lógico “zero” tem a largura de três *bits* físicos, e é representado por três níveis de tensão (“zero”, “zero”, “um”), e o nível lógico “um” tem a largura de três *bits* físicos, e é representado por três níveis de tensão (“zero”, “um”, “um”).

A codificação trinária tem a vantagem de permitir a detecção da portadora do sinal com precisão, devido à combinação dos três *bits* que representam um determinado nível lógico (zero ou um). Se, durante a aquisição de um quadro pelo rádio receptor, for detectada uma combinação de um *bit* lógico diferente da definida, a camada física saberá que os dados estão corrompidos, ou saberá que o quadro adquirido é falso (foi gerado por ruído), podendo descartar imediatamente o quadro que está sendo carregado e voltar ao modo de busca de identificadores de início de novos quadros. Mas a codificação trinária tem uma desvantagem: a taxa de transferência do canal é diminuída para um terço da taxa de transferência real do canal de comunicação.

3 CAPÍTULO 3 – RECEPTORES REGENERATIVOS

Neste capítulo será feita uma revisão abordando aspectos relacionados ao *hardware* utilizado no projeto. Na seção 3.1 serão descritos aspectos sobre a eficiência energética dos transceptores. Na seção 3.2 será descrita sucintamente a modulação por chaveamento de amplitude OOK (**O**n **O**ff **K**eying), utilizada no rádio receptor regenerativo deste trabalho. Na seção 3.3 serão descritos aspectos do rádio transmissor com modulação OOK, utilizada com o rádio receptor regenerativo. Na seção 3.4 será explicado em detalhes o funcionamento do circuito do receptor regenerativo modulado em OOK, destacando as características do receptor regenerativo que influenciaram no desenvolvimento do protocolo URP.

3.1 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DOS RECEPTORES

Os modernos transceptores digitais encapsulados em um único chip (*single chip transceiver*) proporcionam uma série de recursos ao projetista da rede, como: frequência de recepção e transmissão configurável; canais de comunicação configurável; largura dos canais configuráveis; espaçamento entre as frequências dos canais configuráveis; potência de transmissão configurável e várias técnicas modernas de modulação no mesmo dispositivo, como, DSSS (**D**irect **S**equence **S**pread **S**pectrum) e FHSS (**F**requency **H**opping **S**pread **S**pectrum) (17). Esta flexibilidade é conseguida por causa das arquiteturas digitais utilizadas, que são semelhantes na maioria dos transceptores digitais *single chip*, como, por exemplo, no CC1101 (23), CC2420 (IEEE80.15.4) (9), CC1000 (24), CC3000 (IEEE802.11) (26).

A Figura 3.1 ilustra a arquitetura digital do CC1101. Estas arquiteturas digitais são baseadas em blocos de circuitos digitais complementados por blocos de circuitos analógicos. No caso do CC1101, a arquitetura digital é composta por: sintetizador de frequência; ADCs (**C**onversores **A**nalógicos **D**igitais); DSP (**P**rocessador de **S**inal **D**igital); memórias internas para armazenar os dados recebidos ou transmitidos; LNA (**L**ow **N**oise **A**mplifier) que são amplificadores analógicos de RF (**R**ádio **F**requência) de baixo ruído, e PA (**P**ower **A**mplifier) que são amplificadores de potência de RF. Nestes dispositivos, a modulação e a demodulação do sinal são feitas pelo DSP, representados na Figura 3.1 pelos blocos *Modulator* e *Demodulator*.

Normalmente, estes transceptores tem um microcontrolador embarcado que contém, no seu *firmware*, o protocolo completo de comunicação correspondente a camada física do modelo de

referência OSI, e em alguns casos, contém todas as camadas do protocolo, inclusive, os relativos às camadas de rede e de aplicação, como é o caso do CC3000 (IEEE 802.11) (27).

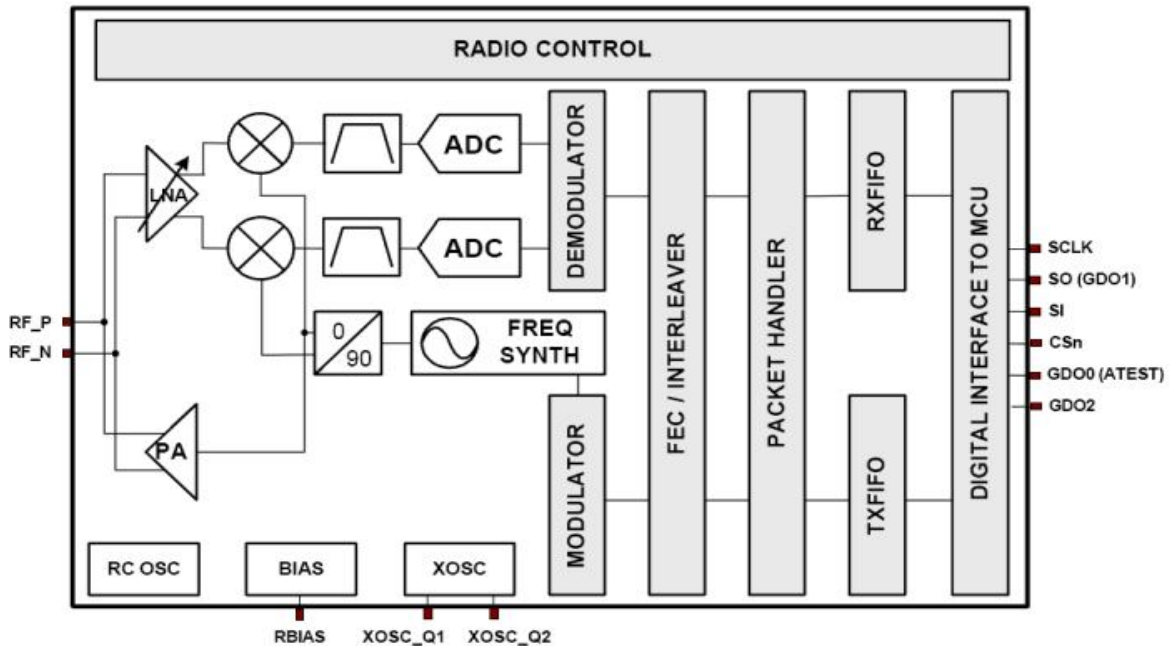


Figura 3.1- Diagrama interno do CC1101 (23)

Cada bloco interno dos transceptores digitais tem um custo em relação ao consumo de energia. Na maioria destes transceptores, como no CC1101, os blocos internos podem ser desligados ou ligados para economizar energia. Mas, quando uma operação de comunicação está sendo feita, todos os blocos relativos à respectiva operação devem ser ligados. Por exemplo, no CC1101, quando uma operação de transmissão ou recepção é executada, o sintetizador de frequência deve permanecer ligado por 0,76 ms (Figura 3.2) antes de executar a respectiva operação. A Figura 3.2 ilustra o consumo de corrente do CC1101 nos seguintes modos de operação: modo IDLE (modo de espera), no qual o transceptor consome uma corrente de 1,42 mA e apenas o circuito oscilador e os reguladores de tensão estão ligados; modo CA, com um consumo de corrente de 8,2 mA, no qual somente o sintetizador de frequência está ligado; modo Rx, com um consumo de 17,6 mA, no qual o circuito receptor está ligado; e modo Tx, com um consumo de 33mA, no qual o circuito transmissor esta ligado. Como pode ser observado, apenas o bloco do sintetizador de frequência do CC1101 consome uma corrente de 8,2 mA, que equivale a uma potência de 24,6mW, e o mesmo permanece ligado durante toda a operação de transmissão ou recepção. Os recursos oferecidos pelos modernos transceptores digitais tem um custo alto em relação ao consumo de energia.

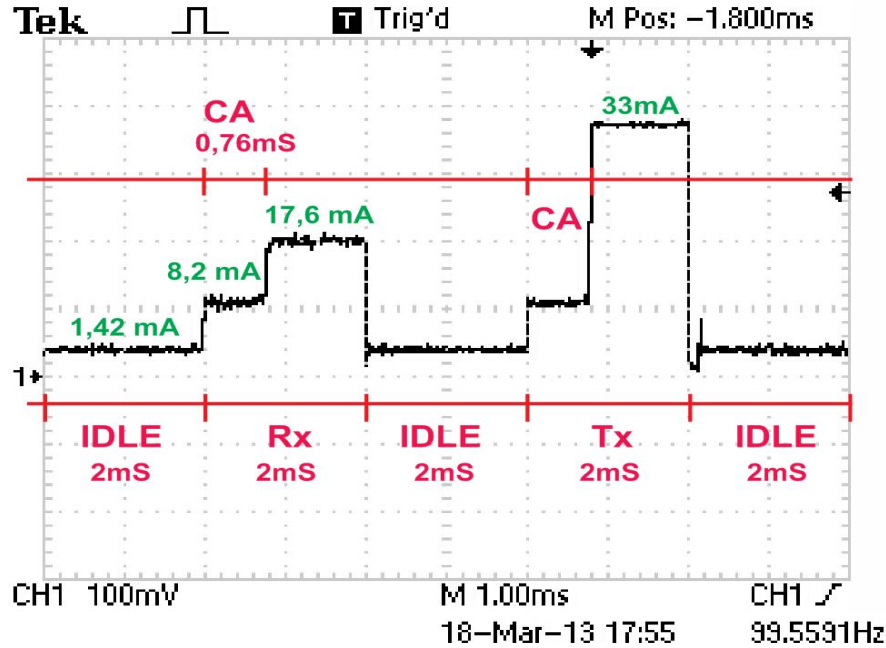


Figura 3.2 - Forma de onda de corrente de transmissão e recepção do CC1101

oferecidos pelos modernos transceptores digitais tem um custo alto em relação ao consumo de energia.

Contrastando com os transceptores digitais *single chip*, a vantagem dos receptores regenerativos é justamente permitir a construção de um receptor de rádio com a menor quantidade de componentes. Esta característica torna o receptor regenerativo mais atrativo, em relação aos outros tipos de receptores, para desenvolvimento de dispositivos com baixo consumo de energia.

Com a demanda crescente para sistemas de comunicação sem fio alimentados por bateria, vários autores publicaram trabalhos baseados no circuito receptor regenerativo buscando alta eficiência energética. Além da vantagem de poder construir receptores com poucos componentes, permitindo a diminuição do consumo de energia do circuito, estes autores utilizaram várias técnicas para diminuir ainda mais o consumo de energia, como, por exemplo: em (28) os autores desenvolveram um receptor regenerativo que opera com uma tensão de alimentação baixíssima, de 0,6V, trabalhando na iminência da barreira de potencial do semiconductor. Isto permitiu reduzir ainda mais o consumo de energia do rádio transceptor, conseguindo um consumo de apenas $180 \mu W$ no modo de recepção e $160 \mu W$ para transmitir um sinal com intensidade de -

17dBm; em (29) os autores reduziram o *duty cycle* (ciclo de trabalho) da modulação do sinal, que se traduziu na redução da largura (período) do bit de nível lógico 1, representado na modulação OOK pela ligação da portadora de rádio frequência. Desta forma, eles conseguiram reduzir o tanto o custo de recepção quanto o de transmissão de um transceptor baseado em receptor regenerativo, conseguindo um consumo de $10 \mu W$ no modo de recepção e $30 \mu W$ para transmitir um sinal com intensidade de -11dBm. Com estas e outras técnicas, vários autores conseguiram desenvolver receptores com excelentes resultados em relação ao custo de energia, quando comparados com os transceptores digitais *single chip*. Os resultados destes trabalhos são mostrados na seção 7.5.

Apesar do grande potencial para aplicações em sistemas que necessitam de alta eficiência energética, pouco tem sido feito em relação ao protocolo de comunicação necessário para a utilização dos rádios receptores regenerativos para transferência de sequências de dados estruturados em quadros. Uma das contribuições desta dissertação foi disponibilizar um protocolo de camada física, denominado de Protocolo Rádio UART (Protocolo URP), que permite a transferência de sequências de dados estruturados, de forma transparente e confiável, com a utilização dos rádios receptores regenerativos. O protocolo URP possibilita a montagem de transceptores de rádio para comunicação digital utilizando os rádios receptores regenerativos e os rádios transmissores modulados em OOK conectados diretamente a uma porta serial UART, disponíveis na maioria dos microcontroladores e conectados a uma porta USB, disponíveis na maioria dos computadores. Para a construção dos transceptores com o protocolo URP não há necessidade de hardware adicional, com a exceção de um conversor USB-Serial quando for usada a porta USB.

3.2 MODULAÇÃO POR CHAVEAMENTO DE AMPLITUDE (OOK)

A modulação das ondas de rádio permite a inserção dos dados a serem transmitidos na frequência portadora através da modificação de alguma de suas características. Nos rádios receptores regenerativos utilizados neste trabalho, a modulação utilizada foi modulação por chaveamento de amplitude OOK (*On Off Keying*) (12) (30). Na modulação OOK (Figura 3.3), os dados digitais $b(t)$ são inseridos através da variação da amplitude da portadora $c(t)$ resultando no sinal $s(t)$ (Equação 1).

$$s(t) = b(t)c(t)$$

$$b(t) = \begin{cases} A_p, & \text{Binário 1} \\ 0, & \text{Binário 0} \end{cases} \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

t = tempo;

$s(t)$ = sinal de saída;

$b(t)$ = dados digitais binários;

$c(t)$ = portadora do sinal;

A_p = Amplitude máxima do sinal;

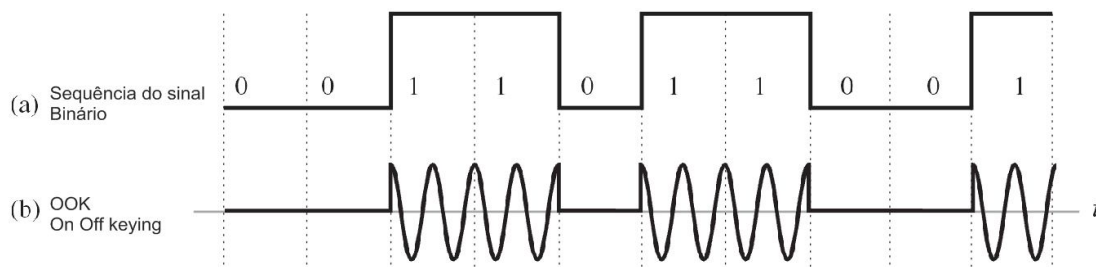


Figura 3.3 –Modulação OOK

3.2.1 Eficiência energética da modulação OOK

A energia do pulso retangular é dada pela equação abaixo (7):

$$E_j = \frac{A_p^2 \times T_p}{R_L} \quad (\text{Equação 2})$$

onde:

E_j = Energia do pulso [Joules]

T_p = tempo de duração do pulso [segundos]

R_L = Resistência ôhmica do circuito

A_p = Amplitude do pulso [Volts]

A energia média dos pulsos no trem de pulso é dada pela seguinte equação:

$$\bar{E} = \sum_{i=1}^n E_i P_i \quad (\text{Equação 3})$$

onde:

E = Energia do pulso [*Joules*]

\bar{E} = Energia média do pulso [*Joules*]

P = Probabilidade de ocorrência do pulso

Pela Equação 3, pode-se observar que a energia média do pulso que representa o *bit* de informação na modulação OOK depende da probabilidade de ocorrência do pulso. Pela aleatoriedade dos dados, e por ser um sinal binário que pode assumir dois estados (zero, um), assume-se que a probabilidade de ocorrer cada um dos valores "zero" e "um" é de 50% (7,31). Então, a energia média para a transferência de dados é dividida por dois. A característica de se ter uma potência de transmissão reduzida em 50% em relação aos outros tipos de modulação torna a modulação OOK adequada para aplicações alimentadas por baterias.

3.3 CIRCUITO TRANSMISSOR COM MODULAÇÃO OOK

Para fazer a transmissão de um sinal para o rádio receptor regenerativo com demodulação OOK, é necessária a utilização de um rádio transmissor modulado em OOK. Como pode ser observado na Figura 3.4, o circuito básico de um rádio transmissor OOK é extremamente simples. O circuito ilustrado foi baseado num oscilador *Colpitts* com a frequência de oscilação estabilizada por um ressonador cerâmico. O circuito básico pode ser montado com apenas um transistor, um ressonador cerâmico e alguns componentes passivos, resultando em um produto de baixo custo e baixo consumo energético. Um dos pontos críticos da confecção do transmissor OOK é o ajuste da frequência do oscilador *Colpitts*, que deve ficar próxima da frequência do ressonador cerâmico.

O oscilador *Colpitts* é uma derivação de um oscilador *Hartley*, que se baseia em um circuito ressonante tanque LC (indutivo capacitivo), que é realimentado positivamente através de uma derivação capacitiva na malha base-emissor do transistor (32). No circuito tanque LC, quando o mesmo opera na frequência de ressonância f_r , existe uma troca de energia que ocorre naturalmente entre o capacitor e o indutor. Esta troca de energia ocorre de maneira equilibrada de forma que a energia armazenada no capacitor $C_{equivalente}$ é transferida para o indutor

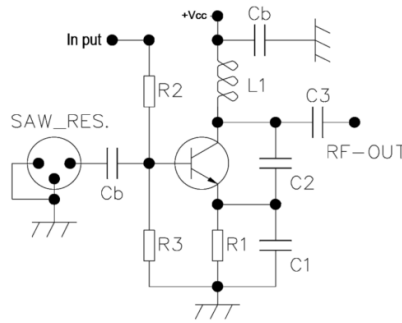


Figura 3.4 - Diagrama esquemático módulo transmissor (33)

$L_{equivalente}$ e vice versa. Para que a troca de energia seja equilibrada, as impedâncias do capacitor e do indutor, na frequência de ressonância, são iguais (Equação 4).

Desprezando as capacitâncias e indutâncias parasitas da placa e do transistor, a frequência de ressonância do oscilador *Colpitts* é dada pela Equação 5 (33), onde L_1 , C_1 e C_2 são os indutores e capacitores do circuito da Figura 3.4.

$$\frac{1}{2\pi f_r C_{equivalente}} = 2\pi f_r L_{equivalente} \quad \text{(Equação 4)}$$

$$f_r = \frac{1}{2\pi \times \sqrt{L_1 \times \frac{C_1 \times C_2}{C_1 + C_2}}} \quad \text{(Equação 5)}$$

Em alguns casos, o indutor L_1 é confeccionado com uma trilha na placa de circuito impresso, e, para ajustar a frequência de ressonância do circuito tanque, o valor do indutor é calibrado com corte a laser.

3.4 O RÁDIO RECEPTOR REGENERATIVO

O receptor regenerativo é um receptor de rádio baseado em um amplificador fracamente realimentado positivamente, de forma a ficar na iminência da oscilação (Figura 3.5). A realimentação é feita em um circuito tanque LC (C_{12} , L_1) sintonizado na frequência a ser captada, permitindo a realimentação somente desta frequência. O sinal de rádio frequência (RF) é captado pela antena (E_1) e inserido na base transistor (Q_1). O sinal é amplificado pelo transistor e uma

fração do sinal amplificado é realimentada positivamente. A fração do sinal realimentado é amplificada novamente formando um *loop* de realimentações, que possibilita um alto ganho para o sinal sintonizado, em uma única etapa de amplificação (1).

3.5 FUNCIONAMENTO DO RECEPTOR REGENERATIVO COM DEMODULAÇÃO OOK

Conforme a Figura 3.6 ilustra, o circuito básico do módulo de recepção regenerativo é composto pela antena, um filtro passa faixa composto pelos componentes C12, C10, C11 e L3, um pré-amplificador de RF (Q2), um circuito receptor regenerativo formado basicamente por Q1 e componentes passivos, um filtro passa baixa, constituído por R10 e C2, um amplificador de sinal (U1B), e um circuito Quadrador, composto por U1A.

O sinal de RF entra no circuito pela antena, atravessa o filtro passa faixa (C12, C10, C11, L3), sintonizado na frequência da portadora, onde é feita uma pré-filtragem do sinal, eliminando frequências indesejáveis. Em seguida, o sinal vai para o primeiro estágio de amplificação de RF, formado basicamente pelo transistor Q2 na configuração de emissor comum. Na sequência, o sinal segue para o segundo estágio de amplificação e filtragem, que é realizado pelo receptor regenerativo.

Quando o sinal amplificado sai do receptor regenerativo, ele vai para o circuito demodulador OOK, que é formado por um circuito passa baixa (R10, C2), um amplificador, constituído pelo amplificador operacional (U1B), e um circuito Quadrador, constituído pelo amplificador operacional (U1A). O circuito Quadrador tem a função de saturar o sinal, deixando-o com o aspecto quadrado de um trem de pulsos. O circuito demodulador OOK é formado por um circuito comparador, que compara o sinal de entrada com um nível DC de 2,5V, gerando o trem de pulsos na saída. Uma característica importante dos receptores regenerativos, levada em consideração para a elaboração do protocolo URP, é a geração de um trem de pulsos aleatório na saída do circuito demodulador, quando não há sinal sintonizado. Este ruído é causado pelo método de demodulação utilizado (OOK), que, devido ao seu princípio de funcionamento (sinal ligado-desligado), demodula o ruído de fundo do sinal de RF quando o mesmo varia a sua intensidade na entrada do amplificador de RF.

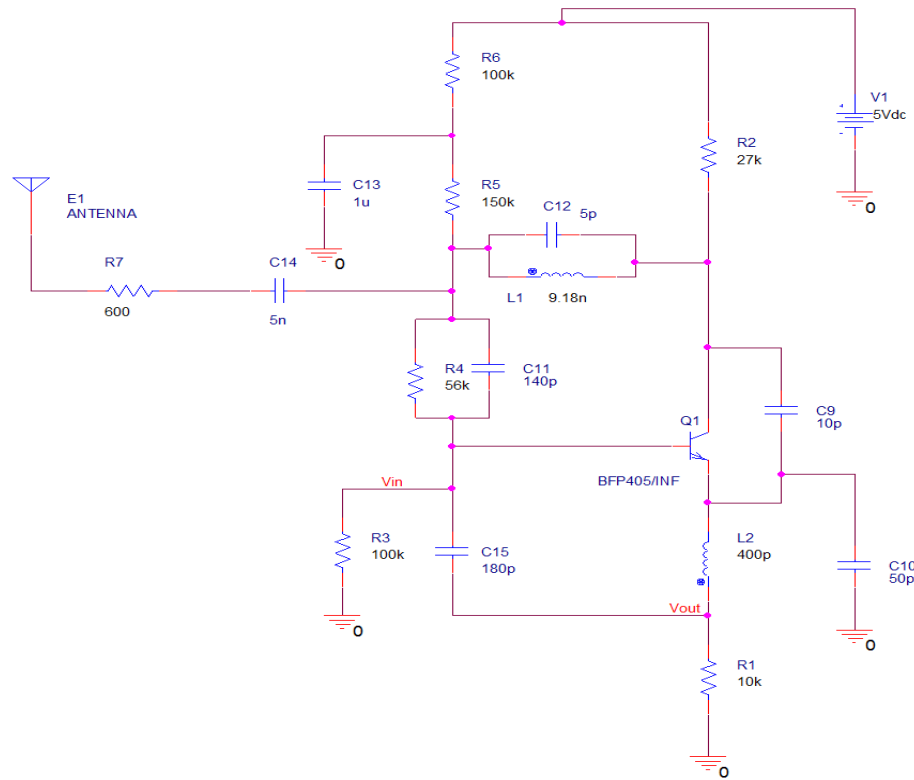


Figura 3.5 – Receptor Regenerativo

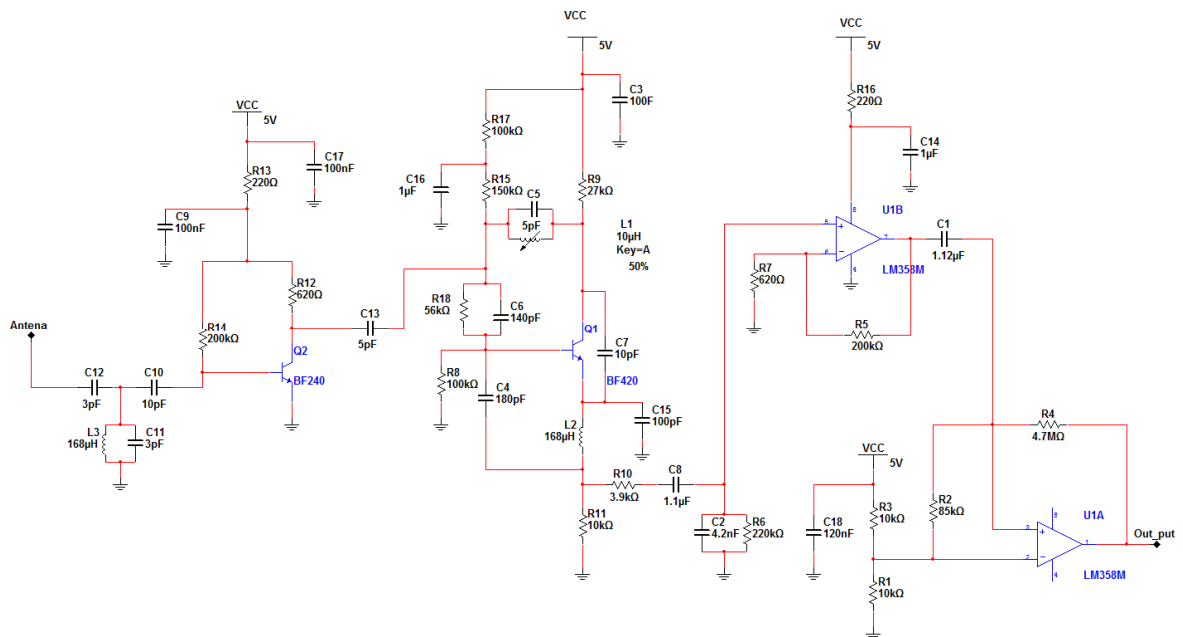


Figura 3.6 - Diagrama esquemático de um receptor regenerativo OOK (34)

4 CAPÍTULO 4 – O PROTOCOLO URP

Neste capítulo é descrito o protocolo URP. O Capítulo está organizado da seguinte forma: Na seção 4.1 foi descrita a estrutura do protocolo URP, baseada no modelo de referência RM-OSI. Na sequência foram descritas as funções das camadas e subcamadas da estrutura do protocolo, a formatação de cada quadro das respectivas subcamadas, e o protocolo de comunicação das respectivas subcamadas.

4.1 DEFINIÇÃO DA ESTRUTURA DO PROTOCOLO URP

A estrutura do protocolo URP foi baseada no modelo de referência RM-OSI (16). A Figura 4.1 mostra as camadas do protocolo URP.

O protocolo URP concentrou-se na camada física do modelo de referência RM-OSI, sendo dividido em duas subcamadas: a subcamada PLP (*Physical Layer Protocol*) e a subcamada PMD (*Physical Medium Dependent*). Estas subcamadas são descritas a seguir.

4.2 SUBCAMADA PMD

A subcamada PMD (*Physical Medium Dependent*) é executada pelo *hardware* da porta serial UART, e pelo *hardware* do rádio receptor regenerativo e rádio transmissor OOK, executando as seguintes funções. Divide o *byte* recebido em *bits*. Acrescenta os *flags* de controles *start bit* e *stop bit* (Figura 2.1). Envia os *bits* do quadro de dados pela saída Tx da porta serial. Detecta e faz a leitura dos quadros de dados que são recebidos pela entrada Rx da porta serial. Executa a modulação e demodulação OOK. Transmite e recebe as informações via RF. Informa a subcamada superior quando chega um *byte* pela entrada Rx da porta serial.

4.3 SUBCAMADA PLP (*PHYSICAL LAYER PROTOCOL*)

As funções disponibilizadas por esta subcamada são: receber o quadro da subcamada superior; informar a subcamada superior se está livre para receber um quadro; enviar um quadro recebido para a subcamada superior; encapsular os dados da subcamada superior MAC (seção 4.5), em um quadro PPDU, acrescentando os campos preâmbulo *start byte*, *stop byte*, CRC de 16 *bits*; fazer o controle de fluxo enviando o quadro *byte* por *byte* para a subcamada PMD; codificar os dados em codificação *Manchester*; avisar a camada superior quando um quadro estiver sendo enviado.

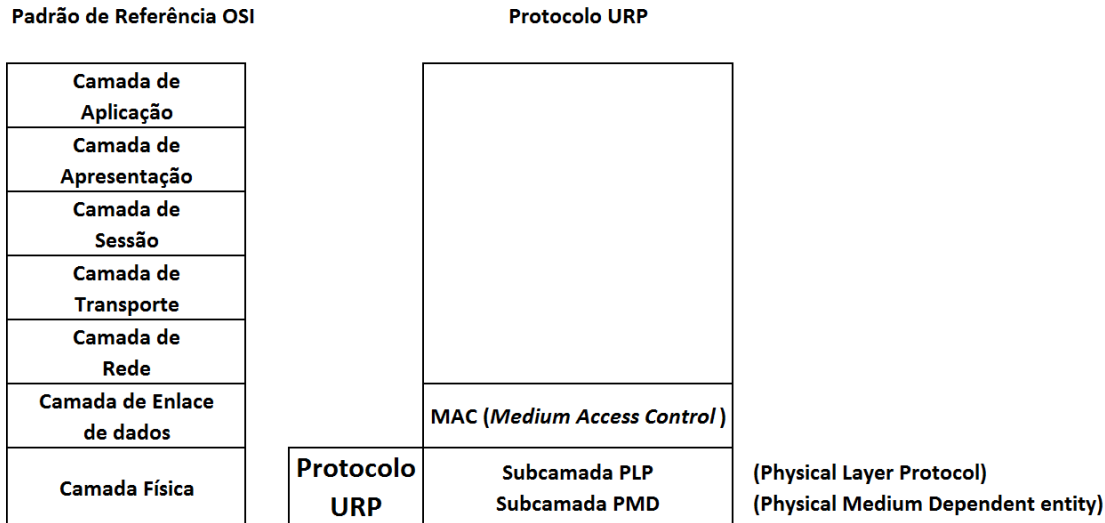


Figura 4.1 – Estrutura protocolo URP

4.3.1 Estrutura do quadro da camada PLP

A estrutura dos campos do quadro do protocolo URP possui campos semelhantes à de outros protocolos para redes sem fio, como por exemplo, a do padrão IEEE 802.11 (18). A ordem dos campos foi modificada para atender o algoritmo de recuperação de quadros colididos, descrito na seção 6.3, e alguns campos foram simplificados. Os campos do quadro da subcamada PLP (Figura 4.2) são descritos a seguir:

- Preâmbulo: campo de oito *bytes* com valor 0x55 mais um campo de um *byte* com valor 0xFF. (ver seção 6.1.)
- *Start Byte*: Campo de um *byte* com valor 0xFE. A função deste campo é identificar o início da parte do quadro com informações úteis. Ele serve de gatilho para a subcamada PLP para iniciar a verificação dos próximos campos de controle.
- PSDU (*Physical Service Data Unit*): campo de tamanho variável que armazena o quadro da camada MAC.
- CRC: Campo de dois *bytes* utilizado para a verificação de erros no quadro. O polinômio gerador usado para o cálculo do CRC foi o CRC-16-IBM ($x^{16} + x^{15} + x^2 + 1$) (13).
- *Stop Byte*: Campo de um *byte* utilizado para a identificação do final do quadro.

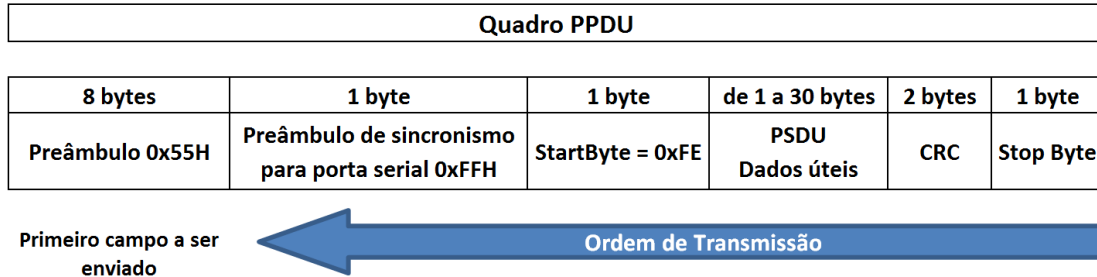


Figura 4.2 – Estrutura do quadro PDU do protocolo URP

4.4 PROTOCOLO PARA A SUBCAMADA FÍSICA PLP

A descrição do protocolo para a subcamada PLP foi dividida em duas partes: protocolo para transmissão de dados e protocolo para recepção de dados, conforme a descrição a seguir.

4.4.1 Protocolo da subcamada PLP para a recepção do quadro

Para a elaboração do protocolo de recepção de quadro da camada PLP, foram consideradas as seguintes condições:

- a. Os campos do quadro do protocolo URP devem ser dispostos na ordem mostrada na Figura 4.4.
- b. O *buffer* de entrada dos quadros deve ser rotatório, e o seu tamanho deve ser no mínimo igual ao tamanho máximo do quadro sem o preâmbulo, acrescido de uma unidade.

O algoritmo para a camada PLP é descrito a seguir:

- a. Se a codificação *Manchester* estiver habilitada, cada *byte* recebido pela porta serial deve ser decodificada de acordo com esta codificação.
- b. Todos os *bytes* que chegam pela porta serial, vindos do rádio receptor regenerativo, independentemente de serem válidos ou não, devem ser inseridos, na mesma ordem de chegada, no *buffer* rotatório de entrada.
- c. Todas as vezes que um *byte* for inserido no *buffer*, deve ser verificado se o mesmo coincide com o *stop byte*.
- d. Se o *byte* que acabou de entrar coincidir com o *stop byte*, deverá ser verificado se os campos de tamanho dos dados, *start byte* e endereços são válidos. Se forem válidos, deverá ser feita a validação de possível quadro pelo cálculo do CRC (Figura 4.4).

- e. Se o CRC for válido, o quadro deverá ser copiado, sem os campos de CRC, *start byte* e *stop byte*, para a lista de quadros validados.
- f. Se for confirmada a chegada de um quadro na lista de quadros validados, a camada superior deverá ser avisada.

4.4.2 Protocolo da subcamada PLP para a transmissão do quadro

- a. Se a rotina de transmissão estiver ocupada enviando um quadro, a subcamada superior deve ser avisada através de um *flag*.
- b. Se um quadro, vindo da subcamada MAC, for recebido, devem ser inseridos os campos de *stop byte*, *start byte* e o CRC.
- c. Se a codificação *Manchester* estiver habilitada, o quadro deve ser codificado em *Manchester*.
- d. Um preâmbulo de 8 *bytes* com o valor hexadecimal 0x55 seguido de 1 *byte* com valor hexadecimal 0xFF deve ser enviado *byte a byte* pela saída Tx da serial, na ordem indicada na Figura 4.4.
- e. O quadro deve ser enviado *byte a byte* pela saída Tx da serial, na ordem indicada na Figura 4.4.
- f. Após a finalização do envio do quadro, as rotinas da subcamada superior devem ser avisadas que a rotina de transmissão está livre para transmitir outro quadro.

4.5 CAMADA DE ENLACE DE DADOS – SUBCAMADA MAC

O escopo deste trabalho limitou-se ao desenvolvimento da camada física para a conexão do receptor regenerativo diretamente conectado a uma porta serial. Entretanto, para possibilitar a realização dos ensaios experimentais do protocolo URP, foi desenvolvido um protocolo simples de controle de acesso ao meio (MAC - ***Medium Access Control***), baseado no protocolo *ALOHA* (35) (36).

O protocolo *ALOHA* foi escolhido por consumir poucos recursos computacionais, sendo indicado para microcontroladores de pequeno porte, tendo um desempenho satisfatório para redes com baixo tráfego de informações e com estruturas de quadros reduzidas. As desvantagens do *ALOHA* são o baixo rendimento do canal (13) e uma alta probabilidade de colisão, principalmente em redes com alta taxa de tráfego de dados e com protocolos com quadros extensos.

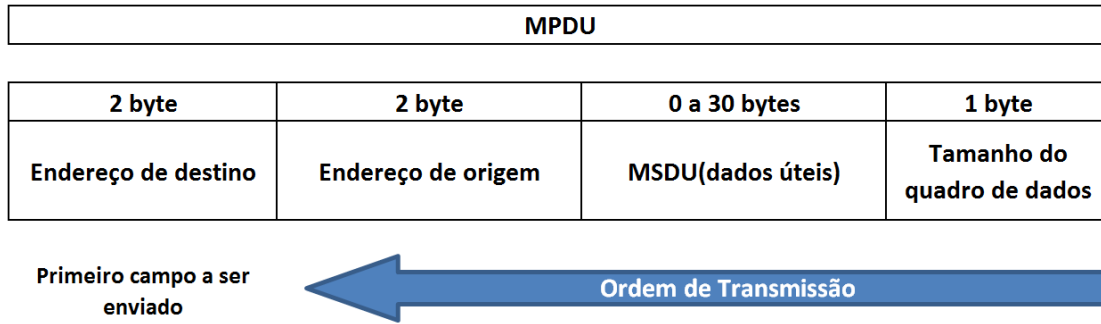


Figura 4.3 – Quadro MPDU da camada MAC do protocolo URP

4.6 QUADRO DA CAMADA MAC

A estrutura do quadro da camada MAC para o protocolo URP é semelhante a outros protocolos para redes sem fio, como o IEEE 802.11. No entanto, a quantidade de campos foi reduzida ao máximo, sendo mantidos apenas os campos essenciais para o funcionamento do protocolo. A redução do quadro foi necessária para tornar o protocolo URP compatível com microcontroladores de pequeno porte, com baixa capacidade de memória, com até 64 *bytes* de RAM. A ordem dos campos também foi modificada em função da solução utilizada para o problema da perda de dados devido à colisão entre quadros, descrita na seção 6.3. A Figura 4.3 mostra a estrutura do quadro MPDU (*Mac Protocol Data Unit*) do protocolo URP.

Os campos do quadro da subcamada MAC são os seguintes:

- Endereço de destino: campo de dois *bytes* com o endereço de destino do quadro.
- Endereço de origem: campo de dois *bytes* com o endereço de origem do quadro. MSDU (*Mac Service Data Unit*): é um campo com tamanho variável onde é encapsulado os dados vindo da camada superior.
- Tamanho do quadro: campo de um *byte* que informa o tamanho do campo de dados.

O endereçamento no protocolo URP é configurado de forma manual, onde o usuário define um endereço de 2 bytes para cada dispositivo da rede.

4.7 PROTOCOLO PARA A SUBCAMADA MAC

Conforme descrito no tópico 4.5, para testar o protocolo da camada física, foi necessário desenvolver um protocolo para a subcamada MAC (Controle de **A**cesso ao **M**eio). O protocolo MAC utilizado se divide em duas partes, transmissão e recepção, com as seguintes definições:

Quadro completo do protocolo URP								
PPDU - camada PLP								
			MPDU - camada MAC					
preâmbulo= 8x 0x55H	preâmbulo de sincronismo UART 0xFFH	StartByte= 0xFE	Endereço de destino	Endereço de origem	MSDU(dados úteis)	Tamanho do quadro de dados	CRC	Stop Byte= 0xFEH
8 bytes	1 byte	1 byte	2 byte	2 byte	0 a 30 bytes	1 byte	2 bytes	1 byte

Figura 4.4 – Quadro completo do protocolo URP

4.7.1 Protocolo da subcamada MAC para a transmissão de quadros

- Se tiver quadros para enviar, envie, passando-o para subcamada inferior.
- Se o receptor não confirmar o recebimento do quadro em um determinado tempo, espere por um tempo aleatório e tente enviar novamente.
- Se já tentou um número determinado de vezes, aborte a transmissão e avise que o quadro não foi enviado.
- Se receber a confirmação do envio, avise a camada superior que o quadro foi enviado com sucesso.

4.7.2 Protocolo da subcamada MAC para a recepção de quadros

- Se receber um quadro, envie uma resposta de confirmação de recebimento para o dispositivo que enviou a mensagem e avise as camadas superiores que um quadro foi recebido.

4.8 O QUADRO COMPLETO DO PROTOCOLO URP PARA A TRANSMISSÃO

Seguindo o modelo de referência RM-OSI, o quadro de dados passa pelas subcamadas MAC e PLP, agregando os campos de controle de cada subcamada, sendo transmitido com os campos mostrados na Figura 4.4.

5 CAPÍTULO 5 – DESCRIÇÃO DA INFRAESTRUTURA UTILIZADA PARA REALIZAÇÃO DOS EXPERIMENTOS

Neste capítulo, serão descritos os componentes de *hardware*, o *firmware*, e o programa utilizados para a realização dos ensaios experimentais com o protocolo URP.

5.1 MÓDULO DE RÁDIO UTILIZADO NO PROJETO

O módulo receptor de rádio regenerativo OOK utilizado no projeto foi selecionado levando em consideração critérios como: eficiência energética; sensibilidade de recepção; taxa de transferência e viabilidade econômica. Foram pré-selecionados e analisados sete modelos de rádios de seis fabricantes diferentes. O rádio selecionado foi o modelo da Figura 5.1 (8), com as seguintes características: taxa de transferência de até 10kbps; tensão de alimentação de 2,3 a 3,3V; consumo de corrente de 70 μ A (quando alimentado com 2,3V). O transmissor de rádio modulado em OOK utilizado é mostrado na Figura 5.2 (37). Este transmissor tem as seguintes características: taxa de transferência de 10kbps; tensão de alimentação de 3V a 12V; corrente de transmissão de 4,2mA (quando alimentado com 3V) e potência do sinal de saída de 3dBm (quando alimentado com 3V).

5.2 HARDWARE DE INTERFACE DO PROTOCOLO URP

Para a realização de testes experimentais com o protocolo URP, foi desenvolvido o dispositivo representado pelo diagrama de bloco na Figura 5.3, composto por uma IHM (Interface Homem Máquina) e um rádio transceptor.

A interface IHM foi montada com um microcontrolador MPC89E515 da Megawin, com núcleo (core) 8051, (com 64Kb de memória de programa, 1,2KB de memória RAM e um *clock* de 22,1184MHz), um *display* de cristal líquido (16x2), um teclado e memória *flash* para salvar as configurações do protocolo. O diagrama esquemático da interface é apresentado na Figura 5.4.

A placa de circuito impresso para a montagem do *hardware* foi desenvolvida utilizando-se a ferramenta computacional CAD *Altium Design* (38), levando em consideração aspectos de compatibilidade eletromagnética (39) para possibilitar um bom desempenho do circuito na frequência de 22,1184 MHz, que é a frequência de trabalho do microcontrolador. O projeto final da placa de circuito ficou com o aspecto mostrado na Figura 5.5.

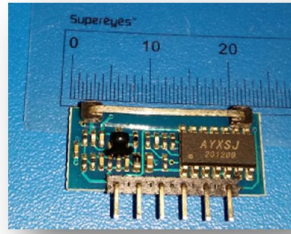


Figura 5.1 – Módulo do rádio receptor regenerativo

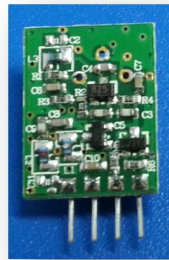


Figura 5.2 - Modulo transmissor modulado em OOK

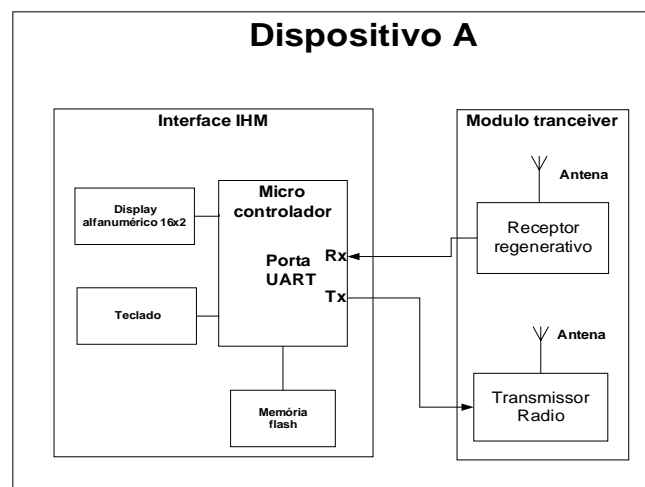


Figura 5.3 - Diagrama de bloco do *hardware* do dispositivo para teste do protocolo URP

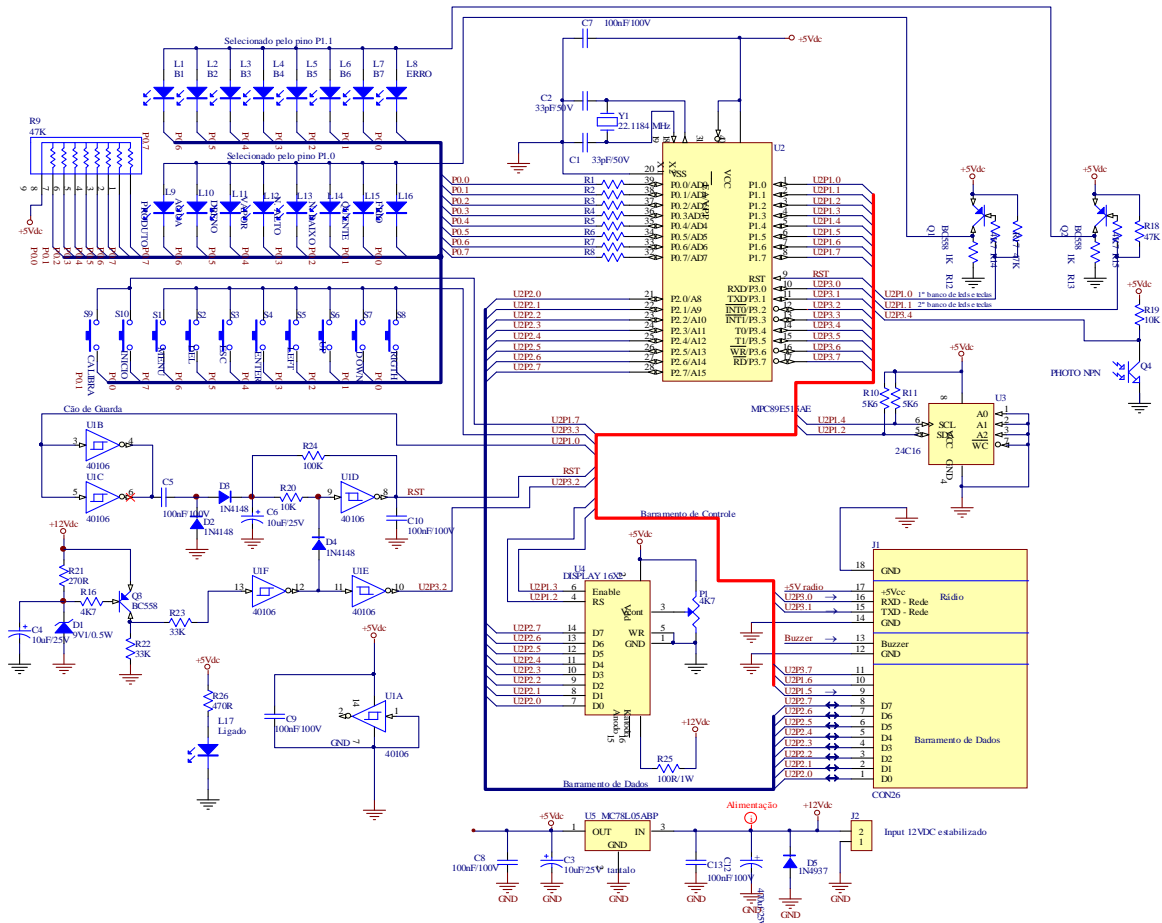


Figura 5.4 – Diagrama esquemático da interface IHM

A placa de circuito impresso foi confeccionada em fibra de vidro dupla face, com furos metalizados para garantir uma boa fixação dos componentes. A placa montada ficou com o aspecto mostrado na Figura 5.6.

Para a comunicação com o módulo transceptor foi usada a porta serial UART do microcontrolador (Figura 5.3).

O módulo transceptor já montado é mostrado na Figura 5.7. A saída Tx da porta serial foi conectada diretamente à entrada analógica do transmissor do rádio OOK de 433,22MHz, e a entrada Rx foi conectada diretamente à saída analógica do módulo receptor do rádio.

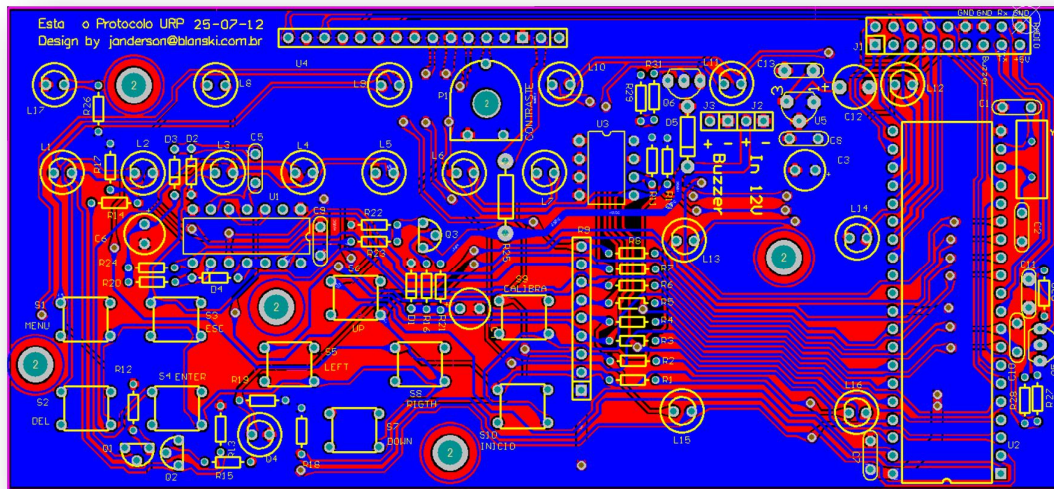


Figura 5.5 –Layout da placa de circuito impresso do protótipo da estação para teste do protocolo URP

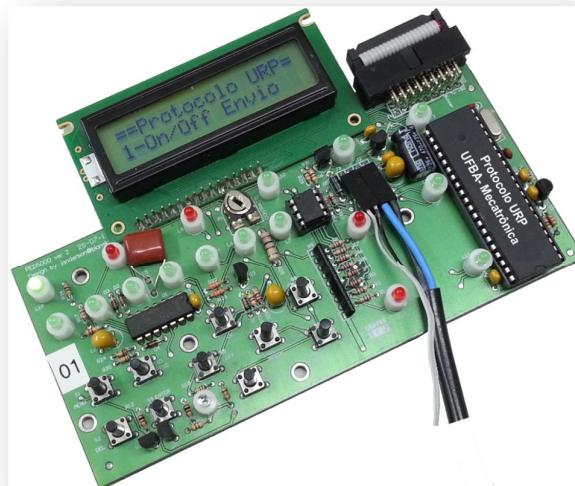


Figura 5.6 – *hardware* Interface Homem Máquina

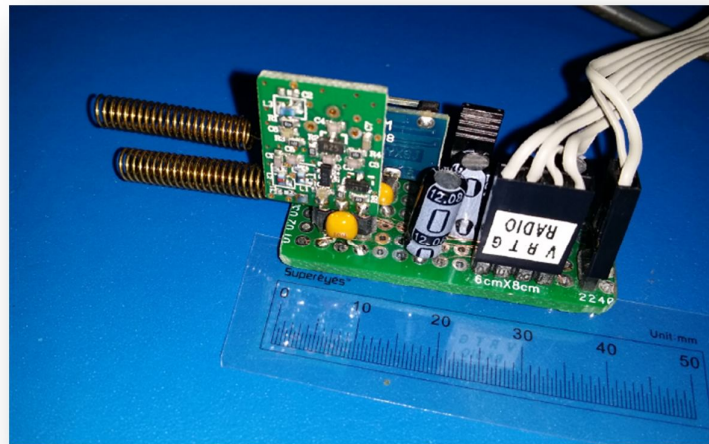


Figura 5.7 – Módulo transceptor montado com módulos de rádio receptor regenerativo e transmissor

5.2.1 Fluxo dos dados no *hardware*

A Figura 5.8 mostra o diagrama de bloco de dois dispositivos, A e B, utilizados para os experimentos com o protocolo URP. Os dados podem ser configurados através do teclado e visualizados no *display* de cristal líquido. O fluxo de dados no diagrama de bloco segue o seguinte trajeto: o microcontrolador “A” envia os *bytes* a serem transmitidos para o *hardware* da porta serial “A”. A porta serial encapsula o dado em um quadro com um *byte* (oito *bits*) de tamanho, acrescentando os *bits* de controle *start bit* e *stop bit* (Figura 2.1), e envia este quadro para o módulo transmissor do rádio, *bit a bit*, com a velocidade de transmissão que foi previamente configurada para a porta serial. Para *bits* com valor lógico um, o *hardware* da porta serial coloca a saída Tx em nível alto (5V). Para *bits* com valor lógico zero, o *hardware* da porta serial coloca Tx em nível baixo (0V). O módulo transmissor modulado em OOK é um simples oscilador, que é ligado quando é aplicado um nível de 5V em sua entrada, e desligado quando é aplicado um nível de zero volts (ver Figura 3.3). O circuito oscilador do transmissor de rádio gera um sinal de RF que é enviado pela antena e captado pelo módulo receptor de rádio regenerativo, que demodula o sinal, gerando um trem de pulso com o mesmo formato dos dados recebidos. Este trem de pulsos é aplicado na entrada Rx da porta serial do dispositivo B, que faz a detecção do quadro, retira os *bits* de controle e disponibiliza o byte de dado recebido em um registrador interno do microcontrolador.

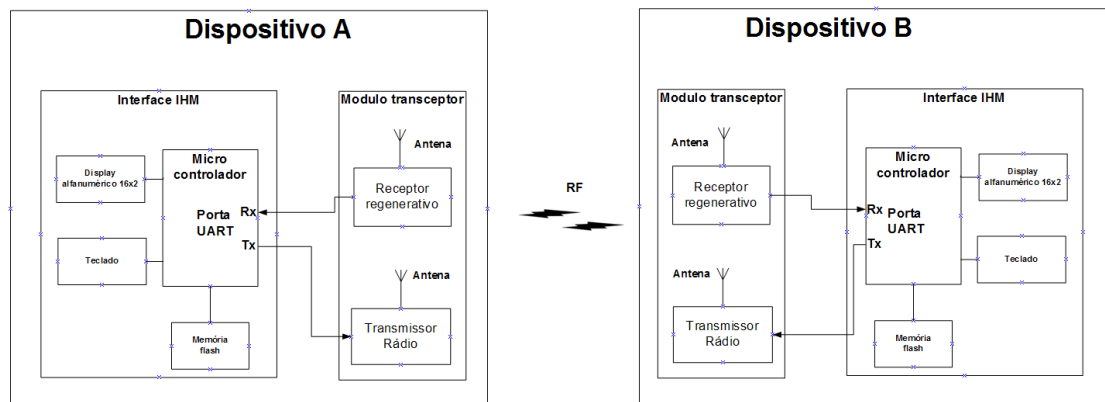


Figura 5.8 – Cenário montado para teste do protocolo URP

5.3 SISTEMA OPERACIONAL UTILIZADO COM O PROTOCOLO URP

Para executar o protocolo URP em um código embarcado no 8051 foi necessário o uso de um RTOS (*Real Time Operating System*) multitarefas, que possibilitasse a execução de linhas de programas em paralelo (*threads*). Na sequência será feita uma descrição sucinta do processo de execução do protocolo pelo núcleo (*kernel*) do sistema para possibilitar uma visão geral da forma como o protocolo foi implementado.

Um RTOS é um sistema operacional que permite gerenciar os recursos do processador para a execução de rotinas em tempo real (40). Para poupar memória optou-se por usar uma máquina de estados para gerenciar as execuções das rotinas. Uma interrupção é quando um evento, externo ou interno, solicita a execução de um código ao microcontrolador e o mesmo interrompe a tarefa ou código que está sendo executado, para executar outro código que está localizado em outro endereço de memória, e quando finaliza a execução da rotina de interrupção, retorna para a execução da tarefa anterior, continuando exatamente de onde parou (40). O núcleo de processamento do 8051, assim como na maioria dos microcontroladores, possui dispositivos internos que podem gerar vários tipos de interrupções (41). O *TIMER* do microcontrolador é um dispositivo de *hardware* interno que pode ser programado para gerar interrupções periódicas com uma determinada frequência.

Para a execução do protocolo URP, foram utilizadas as seguintes interrupções e fluxo:

- Interrupção do *timer_0*: utilizada para executar as rotinas da subcamada PLP (*Physical Layer Protocol*) e MAC.
- Interrupção da porta serial: utilizada para executar as *threads* da subcamada PMD (*Physical*

Medium Dependent)

- Interrupções do *timer_1*: utilizada para executar as *threads* de temporização do sistema.
- Fluxo principal: foi utilizado para executar as *threads* de menu e teclado da interface homem-máquina.

O uso das interrupções permitiu que as *threads* implementadas pudessem ser executadas virtualmente ao mesmo tempo, possibilitando que as camadas do protocolo URP trabalhassem em segundo plano. Por exemplo: no microcontrolador com 128 *bytes* de RAM foi possível executar uma *threads* de supervisão de transmissão ao mesmo tempo em que o menu de configuração era acessado, e também executar em paralelo todas as linhas de execução (*threads*) necessárias para movimentar as rotinas das subcamadas do protocolo URP.

5.4 PROGRAMA PARA REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS DO PROTOCOLO

Para testar as subcamadas PLP e PMD do protocolo URP, foi padronizado um cenário com os dispositivos "A" e "B" descritos na seção 5.2. O cenário ficou com o aspecto mostrado na Figura 5.8. Para testar o envio e recebimento de quadros, foi elaborado um programa que transmite periodicamente um quadro do módulo "A" para o módulo "B", aguardando a resposta de confirmação do recebimento do quadro enviado. A cada transmissão e recebimento, o programa conta os quadros recebidos e perdidos, emitindo posteriormente um relatório do percentual de mensagens enviadas com sucesso. O programa também armazena todos os dados recebidos em um *buffer* para posterior análise. O programa de testes foi elaborado com um menu de configurações onde os parâmetros do protocolo podem ser alterados para permitir o estudo da influência destes parâmetros no desempenho da comunicação. A seguir são descritos os parâmetros que podem ser alterados pelo menu de configuração:

- a. Liga envio do quadro: liga ou desliga a *thread* de envio de quadros de teste. Se ligada, a rotina envia quadros pelo rádio transmissor conforme a configuração salva na memória *flash*, descrita nos itens a seguir.
- b. Monitor de transmissão: executa o programa de monitoração dos quadros transmitidos e recebidos, mostrando um relatório em tempo real dos quadros enviados, quadros perdidos e percentuais de quadros transmitidos com sucesso.
- c. Endereço local: edita o endereço do dispositivo atual.
- d. Endereço de destino: edita o endereço para o qual os quadros de testes são enviados.
- e. Período de envio [ms]: edita o período de envio dos quadros.

- f. *Baud Rate*: edita a frequência da taxa de transmissão da porta serial em Kbps.
- g. Tempo entre RxTx: edita o tempo de guarda entre uma recepção e o envio da resposta, para que o dispositivo que enviou o quadro tenha tempo para recuperar a sensibilidade do rádio receptor.
- h. Tamanho do quadro: edita a quantidade de *bytes* de dados enviados no quadro de teste.
- i. Tamanho do Preâmbulo: edita a quantidade de *bytes* do preâmbulo.
- j. Define Dados: O campo de dados do quadro é preenchido com os caracteres definidos neste sub menu, com a quantidade de *bytes* configurada no sub menu tamanho do quadro. Os tipos de dados disponíveis são: a) 0xFF, 0xFF, 0xFF (hexadecimal), que tem a função de avaliar a influência do nível DC do quadro no rádio receptor; b) 00, 00, 00, que tem a função de testar a imunidade a ruído quando ocorre o envio dos *bits* de nível zero; c) 55 55 55 (hexadecimal), que tem a função de testar a imunidade a ruído do rádio receptor quando a sequência de *bits* alternados entre zeros e uns (10101010) é enviada; d) 1, 2, 3, 4, 5... n, que tem a função de simular o envio de dados aleatórios.
- k. Define tipo do Preâmbulo: edita o tipo de caractere enviado como preâmbulo, disponibilizando os seguintes tipos: a) 0xFF, 0xFF, 0xFF (hexadecimal); b) 55, 55, 55 (hexadecimal); c) 0xF0, 0xF0, 0xF0 (hexadecimal). Os caracteres configurados têm a função de avaliar o sincronismo do quadro, quando recebidos pelo *hardware* da porta serial, em função da mudança do preâmbulo.
- l. On Codificação *Manchester*: liga ou desliga a codificação *Manchester* do quadro enviado e recebido.
- m. Quantidade de quadros: define a quantidade de quadros que serão enviados durante um ensaio, podendo variar de 1 a 10000 quadros.
- n. Quantidade de ensaios: define a quantidade de ensaios a serem executadas, podendo variar de 1 a 100 ensaios. Após o último ensaio, o experimento é interrompido e um alarme sonoro é emitido.
- o. Visualizar totalizadores: permite a visualização dos resultados de cada ensaio mostrando o total de quadros transmitidos e recebidos com sucesso.
- p. Zerar totalizadores: zera todos os totalizadores salvos na memória *flash* do dispositivo.

6 CAPÍTULO 6 – PROBLEMAS E SOLUÇÕES

Este capítulo descreve os principais problemas e as soluções propostas durante o desenvolvimento do protocolo URP. Na seção 6.1 foi descrito como foi definido o preâmbulo para o protocolo URP, necessário para a adaptação da porta serial ao rádio receptor regenerativo. A seção 6.2 descreve a utilização da arquitetura *cross-layer* na subcamada PLP para a diminuição do consumo de energia. A seção 6.3 descreve o problema da perda de dados devido à colisão com efeito de captura. A seção 6.4 descreve o problema da corrupção de dados devido a sequências de bits representadas pelo desligamento da portadora.

6.1 DEFINIÇÃO DO PREÂMBULO PARA O PROTOCOLO URP

O preâmbulo é uma sequência de *bytes* que tem a função de preparar o *hardware* para receber a parte do quadro contendo as informações úteis. No protocolo URP, a porta UART foi adaptada para fazer a conexão do microcontrolador com o rádio receptor regenerativo. A conexão com o receptor regenerativo tem algumas particularidades que diferem da conexão via cabo (10), utilizado na porta UART. Para resolver estas diferenças, o preâmbulo exerceu um papel importante, que será descrito a seguir.

A conexão via cabo da porta UART é caracterizada pela ausência de ruído e por estar em nível lógico um (tensão de 5V) na ausência de transmissão de quadros.

Para fazer a conexão com o rádio receptor regenerativo e transmissor com modulação OOK, a porta serial foi configurada para o modo assíncrono, sem paridade, com um stop bit. Conforme visto no tópico 2.1.2, a presença do nível 1 na entrada Rx da porta serial é necessária para que o *hardware* consiga detectar o *start bit*, que tem nível zero e indica o início do quadro de 10 *bits* (Figura 2.1).

De acordo com a lógica da porta serial, após o tempo equivalente ao período de 9 *bits*, o *hardware* aguarda uma transição de “um” para zero, que indica o início de um *start bit* de um novo quadro. Quando esta transição é detectada, o *hardware* aguarda a metade do período de 1 *bit* e faz a amostragem do sinal para confirmar se realmente está ocorrendo o *start bit* com nível lógico zero. Se estiver ocorrendo, o *hardware* identifica que está ocorrendo o início da transmissão de um quadro e faz a amostragem dos 8 *bits* consecutivos, que corresponde ao *byte* de dados. Para finalizar, o *stop bit* é verificado. O *stop bit* deve estar com nível lógico 1 para que o *byte* de dados seja validado e salvo. Caso contrário, o quadro é descartado.

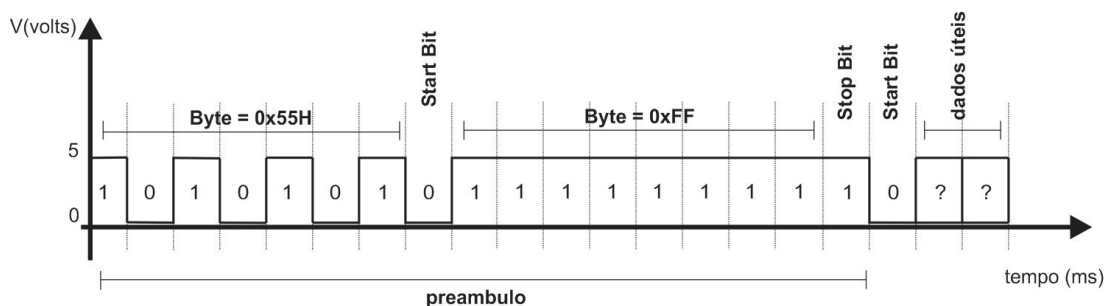


Figura 6.1 – Preâmbulo – Mecanismo de sincronismo para porta serial

Quando a conexão via RF é utilizada, um trem de pulso aleatório é gerado na saída do receptor regenerativo, fazendo com que a porta UART não consiga detectar o *start bit* do início do quadro, porque a linha de transmissão não permanece em nível alto pelo tempo mínimo de um quadro, necessário para o início da sincronização. Para resolver este problema, foi necessária a aplicação de um preâmbulo. Para a definição do preâmbulo foram levados em consideração dois objetivos. O primeiro objetivo foi proporcionar o tempo mínimo de um quadro com a linha em nível um (tensão de 5V), para que a porta serial conseguisse detectar o início do quadro. Para isto foi inserido um *byte* com o valor 0xFF (11111111b) (Figura 6.1) no final do preâmbulo. O segundo objetivo foi enviar um trem de pulsos pelo tempo necessário para estabilizar o circuito do receptor regenerativo antes de enviar as informações úteis.

Conforme descrito na seção 3.4, o alto ganho de tensão do receptor regenerativo é proporcionado por uma realimentação positiva que deixa o circuito na iminência da oscilação. Uma das características deste circuito é o fato de o ganho de tensão aumentar gradativamente quando o sinal é sintonizado devido à natureza ressonante do circuito.

A depender da intensidade do sinal no início da sintonização, se o ganho do receptor ainda não atingiu um valor mínimo necessário para a recepção dos dados úteis, poderá ocorrer a corrupção dos dados devido à relação sinal-ruído baixa. Para evitar este problema, é preciso enviar um preâmbulo por um determinado tempo, até que o circuito receptor regenerativo atinja um ganho suficiente para uma recepção do sinal estável. Para a definição deste tempo foram realizados testes experimentais com uma quantidade conhecida de *bytes* de preâmbulo com o valor 0x55 (01010101). Este valor foi escolhido por três motivos:

- a. O nível DC do quadro com o dado 0x55 é igual à metade da amplitude do sinal. Isto evita que o sinal seja bloqueado pelos acoplamentos capacitivos do circuito formados por C1 e C8 (Figura 3.6).

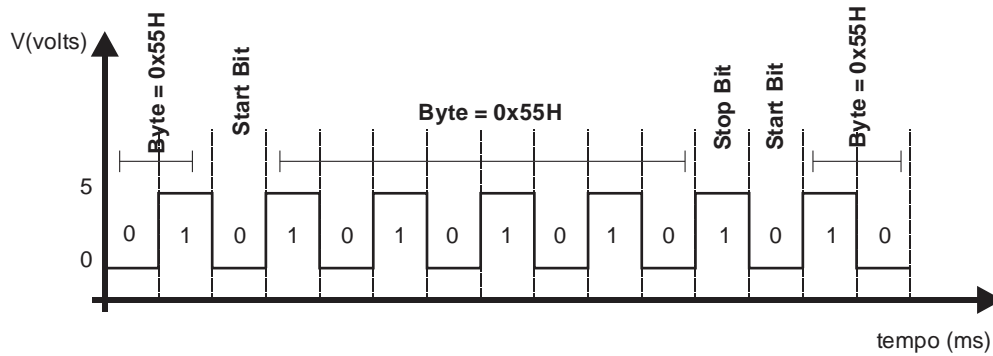


Figura 6.2 – Sincronismo do *byte* 0x55

- b. O quadro composto pelo número 0x55 proporciona uma detecção confiável pelo *hardware* da porta serial para todos os *bytes* do preâmbulo transmitidos. Esta detecção é proporcionada pelo seguinte mecanismo: para qualquer transição de “um” para “zero” (Figura 6.2) que o *hardware* possa detectar como o início de um quadro (*start bit*), depois de 9 *bits*, haverá um *stop bit* com nível “zero”, fazendo com que o quadro com valor 0x55 seja validado e recebido pelo *hardware* da porta serial.
- c. O quadro composto pelo número 0x55 limita o período em que a portadora fica desligada (*bit* “zero”) ao menor tempo possível, equivalente ao período de um *bit*, diminuindo a possibilidade da captação de ruídos nestes períodos.

Para a definição da quantidade de *bytes* do preâmbulo, foi realizado um experimento com o envio de quadros com uma sequência de vinte *bytes* 0x55 mais um *byte* 0xFF. Após cada envio foram contados quantos *bytes* 0x55 foram recebidos pelo *buffer* do microcontrolador. Para verificar a relação entre intensidade do sinal e o tempo de estabilização do circuito, o teste foi realizado transmitindo um sinal com potência de 10 dBm, com cinco distâncias diferentes, entre o transmissor e o receptor. Para cada distância, o teste foi repetido 50 vezes. O resultado é mostrado na Tabela 6.1. A quantidade de *bytes* de preâmbulos perdidos variou com a distância da transmissão. Isto já era esperado, porque o tempo que o circuito regenerativo precisa para estabilizar o ganho depende da intensidade do sinal, que, por sua vez, diminui com a distância.

O fato de que o aumento da quantidade de *bytes* de preâmbulo diminui a eficiência do canal de comunicação foi levado em consideração para a determinação do tamanho do preâmbulo. Considerando que foram perdidos até “quatro” *bytes* de preâmbulo devido ao tempo de estabilização do receptor regenerativo, foi definida a quantidade de “oito” *bytes* 0x55 mais

Tabela 6.1 – Quantidades de bytes de Preâmbulo perdidos durante o experimento

	2 metros	25 metros	50 metros	75 metros	100 metros
Média (com 95% de certeza)	0,46 ± 0,14	1,48 ± 0,14	2,52 ± 0,14	3,44 ± 0,14	3,38 ± 0,14
Desvio padrão	0,50	0,49	0,50	0,50	0,49

“um” *byte* 0xFFh como preâmbulo, dando uma margem de segurança de aproximadamente 100% em relação ao tempo máximo que o receptor regenerativo precisou para se estabilizar.

6.2 UTILIZAÇÃO DA ARQUITETURA *CROSS-LAYER*

O modelo de referência RM-OSI define uma arquitetura em camadas modulares onde a troca de informações entre camadas não adjacentes, ou acesso direto a informações de outras camadas não é permitido. A arquitetura *cross-layer* consiste na violação das regras do modelo de referência utilizado em função da otimização do protocolo para determinadas aplicações. O uso do *cross-layer* é comum em protocolos desenvolvidos para sistemas com alta eficiência energética utilizados em redes de sensores sem fio, onde a separação das funções da rede em camadas dificulta o controle geral do consumo de energia.

No protocolo URP a arquitetura *cross-layer* foi utilizada na subcamada PLP, que viola as regras do RM-OSI fazendo o acesso não permitido aos campos de endereço que estão no quadro da subcamada MAC encapsulados como dados de subcamada PLP. O acesso aos endereços possibilitou que a subcamada PLP pudesse descartar os quadros com endereços inválidos antes de calcular o CRC, evitando o consumo de energia com estes cálculos.

6.3 PROBLEMA DA PERDA DE DADOS DEVIDO À COLISÃO ENTRE QUADROS

Durante os experimentos foi observado que estavam ocorrendo perdas de quadros quando acontecia uma colisão entre quadros com “Efeito de Captura” (*Capture Effect*), descrito na seção 2.5. Foi observado também que este mesmo problema ocorria quando os dados aleatórios, gerados na saída do demodulador do rádio receptor (seção 3.5), eram confundidos com um quadro, e a rotina de recepção iniciava o procedimento de leitura dos *bytes* do “quadro falso”. Se chegasse algum quadro real no decorrer deste procedimento, este quadro real era perdido, porque a rotina de recepção na subcamada PLP já estava ocupada recebendo o campo de dados do “quadro falso”.

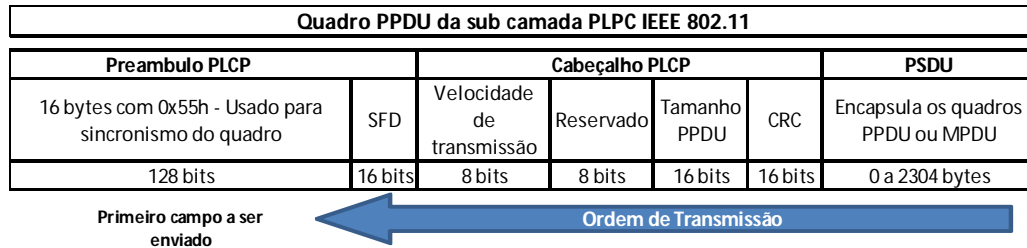


Figura 6.3 – sequência de transmissão quadro IEEE 802.11(18)

No capítulo 2 foram apresentadas três soluções para a recuperação de dados no caso de colisão de quadros com efeito de captura. A solução de Jan Boer (21) consiste na utilização de um mecanismo denominado MIM (*Message In Message*), em que é feita uma busca constante por um preâmbulo com acréscimo de energia durante a aquisição de um quadro. No entanto, esta solução exige a utilização de um *hardware* específico para a detecção do acréscimo de energia, dificultando sua aplicação em sistemas de rádios genéricos, que não possuam este recurso de *hardware*. Além disto, o acréscimo do circuito adicional aumentaria o consumo de energia do rádio, desfavorecendo a principal vantagem do receptor regenerativo: a eficiência energética. A solução proposta por Kouichi Mitsuura (22), denominada de PCT (*Power Control during Transmission*), funciona com eficiência para todos os casos de colisão descritos na seção 2.5. Entretanto, a solução exige que o controle de potência de transmissão seja feito em função do acréscimo de energia, sendo necessário transmitir o sinal com uma potência maior do que a necessária para alcançar o destino. Isto provoca um aumento desnecessário do consumo de energia da rede. O PCT também requer um *hardware* específico para poder ser implantado, dificultando a sua aplicação para rádios receptores regenerativos genéricos.

A solução mais adequada ao protocolo URP foi a proposta de K. Whitehouse et al. (20). Conforme comentado na seção 2.5.2, esta solução consiste na busca contínua de um novo quadro durante a aquisição de um quadro.

A vantagem desta solução é não precisar de um *hardware* específico para a sua implantação. No entanto, segundo o próprio autor, esta solução tem um problema: pode causar a perda de quadros se for detectado erroneamente um quadro dentro de outro quadro. Se isto ocorrer, o protocolo irá descartar o quadro real e passará a fazer a aquisição do quadro falso.

A solução proposta por este trabalho corrigiu este problema introduzindo um protocolo capaz de fazer a detecção e validação em cascata de n quadros, durante qualquer estágio da captura de um quadro anterior, sem descartar o quadro anterior, sem descartar os quadros novos,

e sem acumular consumos de recursos do sistema. Isto foi conseguido com a implementação de três mudanças em relação aos protocolos tradicionais da camada física descritas a seguir.

A primeira foi uma alteração na ordem dos campos do quadro da camada física, colocando as informações necessárias para a validação do quadro em localizações estratégicas para atender o algoritmo que faz a detecção do quadro.

A segunda mudança foi na forma de armazenar o quadro no *buffer*. Na camada física de outras redes sem fio, como na IEEE802.11, cada campo do quadro é reconhecido em tempo real para depois ser memorizado no *buffer*. Na solução proposta, cada byte que sai do demodulador, inclusive os dados aleatórios gerados pelo rádio receptor regenerativo, são armazenados em um *buffer* rotatório, e os dados são analisados somente depois de armazenados.

A terceira mudança foi uma alteração no ponto de detecção do quadro pelo algoritmo da subcamada PLP. Nos protocolos tradicionais, como, por exemplo, no IEEE 802.11, o primeiro campo a ser identificado é o SFD (*Start Frame Delimiter*), que marca o início do quadro, sendo o primeiro campo a ser transmitido após o preâmbulo. Na sequência vem o cabeçalho com informações para a validação do quadro, e, por último, os dados encapsulados no campo PSDU (Figura 6.3).

Para fazer a aquisição dos dados, os algoritmos de recepção, como o IEEE802.11, fazem a contagem dos *bytes* de dados que estão sendo adquiridos, de acordo com a quantidade especificada no campo "Tamanho PDU". Esta sequência de aquisição tem uma desvantagem: quando o início de quadro é detectado por meio da identificação do campo SFD, e o cabeçalho é carregado, não é possível fazer a validação do quadro através do CRC, porque os dados ainda não foram recebidos. A etapa de validação dos dados fica pendente até que todo o campo de dados seja recebido, e, se houvesse outra detecção de um possível quadro no meio dos dados do primeiro quadro, o processo de validação deste novo quadro também ficaria pendente. Se houvesse a detecção de *n* quadros, haveria *n* pendências de quadros para validação, tornando o algoritmo complexo, e gerando acúmulo de consumo de recursos computacionais do sistema.

A solução proposta neste trabalho resolve este problema mudando o ponto de detecção do início do quadro, com o campo "*start byte*", para o fim do quadro, com o campo "*stop byte*". Com o algoritmo proposto, o problema do empilhamento de pendências de validação de quadros não acontece, porque, quando o quadro é detectado, ele já se encontra inserido completamente na memória, permitindo sua validação imediata. Se houver outro quadro iniciando no meio da recepção do primeiro, devido a uma colisão entre quadros, ele será naturalmente colocado no

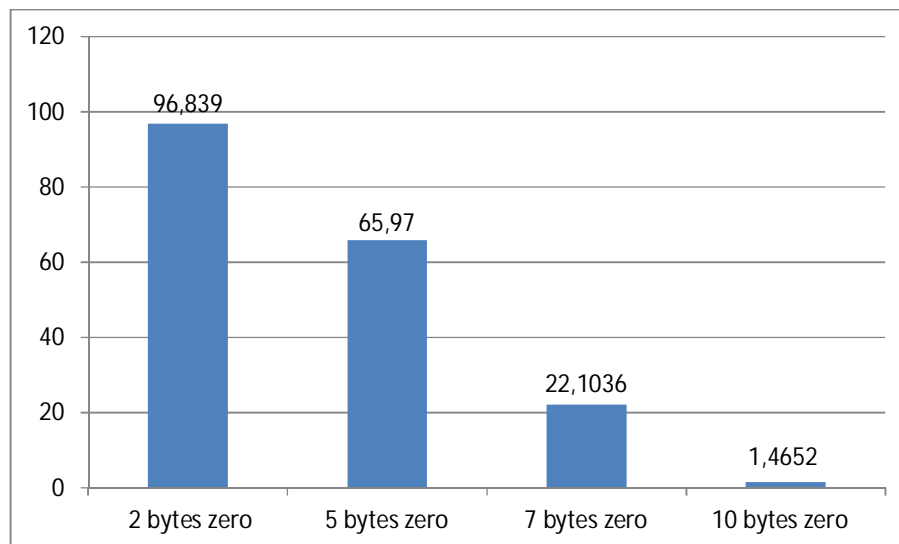


Figura 6.4 – Percentual de quadros enviados com sucesso quando inserido sequência de *bytes* zero no quadro transmitido

buffer, detectado e validado. Na seção 7.2 é apresentada uma avaliação de desempenho da solução aplicada através de ensaios experimentais com um sistema real.

A solução proposta para a recuperação de dados em caso de colisão tem uma limitação: se um quadro válido for encapsulado dentro dos dados de outro quadro válido, os dois quadros serão detectados e validados, e os dois quadros vão ser processados independentemente, ou seja, o quadro embutido vai ser tratado e encaminhado como um quadro independente. Esta limitação não deve causar problemas, porque, para que isto ocorra, o próprio quadro embutido deverá ter um endereço válido, fazendo com que o mesmo seja encaminhado para o destino correto. No entanto, o projetista da rede deverá levar esta limitação em consideração na utilização do protocolo URP.

6.4 PROBLEMA DA CORRUPÇÃO DE DADOS DEVIDO A SEQUÊNCIAS DE *BITS* ZERO

Durante os experimentos com o protocolo URP foi observado que, em um ambiente ruidoso, quando um quadro de dados chegava corrompido na camada PLP, os *bits* corrompidos coincidiam com sequências de *bits* zero contidas no campo de dados do quadro. Para estudar o comportamento do receptor durante a transmissão de *bits* zero, foram realizados experimentos com envios de quadros contendo sequências de *bytes* zero, nas quantidades de três, cinco, sete e

preâmbulo								S	Start Byte	CRC	Dados					endereço destino	endereço origem	Stop Byte		
55	55	55	55	55	55	55	55	FF	0xAA	FB	C3	00	00	04	00	00	0A	01	02	AA

Figura 6.5 – Quadro corrompido devido a sequência de *bits* zeros

vinte *bytes* por quadro. Para cada uma destas quantidades, foram realizados 50 ensaios com o envio de 10000 quadros em cada ensaio.

Os resultados dos ensaios são apresentados na Figura 6.4. Nos resultados pode ser observado que a taxa de erro aumentou com o aumento da quantidade de *bytes* zero no quadro. Com dois *bytes* zero por quadro, a taxa de quadros transmitidos com sucesso foi em média 96,84% \pm 0,30% com 95% de certeza e desvio padrão de 1,09%. Com cinco *bytes* zero por quadro, a taxa de quadros transmitidos com sucesso diminuiu para 65,97% \pm 0,82% com 95% de certeza e desvio padrão de 2,96%. Com sete *bytes* zero por quadro, a taxa de quadros transmitidos com sucesso foi de apenas 22,10% \pm 0,97% com 95% de certeza e desvio padrão de 3,5%. Para quadros com 10 *bytes* zero, apenas 1,47% \pm 0,19% com 95% de certeza e desvio padrão de 0,18% foram enviados com sucesso, tornando inviável a aplicação do protocolo, em ambientes ruidosos, sem a solução aplicada.

Este comportamento pode ser explicado pelo princípio de funcionamento da modulação OOK, que opera ligando a portadora de RF para o envio de *bits* com nível lógico “um”, e desligando para o envio de *bits* com nível lógico “zero” (ver seção 2.6). Quando o sinal de RF é interrompido por um curto espaço de tempo, conforme visto na seção 3.4, o rádio receptor regenerativo mantém a sintonia com a portadora, ignorando outros sinais. Porém, quanto mais tempo a portadora ficar desligada, maior a probabilidade de o receptor captar ruídos (perturbações eletromagnéticas), pois sua sensibilidade aumenta rapidamente para outros sinais na ausência de um sinal sintonizado. A depender da intensidade do ruído, o tempo de alguns *bits* com a portadora desligada já é suficiente para que o rádio receptor regenerativo consiga captar ruídos. Quando isto ocorre, os *bits* zero são trocados por *bits* um, causando a corrupção dos dados do quadro. Na Figura 6.5 é mostrado um quadro corrompido durante o envio de uma sequência de *bits* zero. Neste caso, o dado original era composto por uma sequência de 5 *bytes* zeros, e apenas 1 *bit* foi alterado, corrompendo todo o quadro.

Uma das formas de se resolver o problema causado pela ausência da portadora durante o envio de *bits* zero seria minimizar ao máximo o período em que a portadora fica desligada, limitando a quantidade de *bits* zero enviados sequencialmente.

Conforme comentado na seção 2.6, existem algumas soluções disponíveis na literatura para amenizar o problema. A solução proposta pela Holtek (25) foi especificamente projetada para a utilização com rádios receptores regenerativos, mas não foi adotada no protocolo URP por causa da diminuição da taxa de transferência do canal para um terço do valor nominal, causada pela codificação trinária.

A codificação *Manchester* diferencial tem a propriedade de permitir a inversão da polaridade dos cabos de comunicação sem prejudicar o funcionamento da comunicação. No entanto, esta codificação consome mais recursos computacionais que a tradicional codificação *Manchester*, e a vantagem de permitir a inversão da polaridade dos cabos perde o sentido em comunicação sem fio. Por estes motivos ela foi descartada como opção para o protocolo URP. A solução adotada para o protocolo URP foi a codificação em código *Manchester*, por ser uma solução já utilizada para modulação OOK em outros tipos de receptores com demoduladores digitais baseados no princípio heteródino (42), como, por exemplo, no CC1101 (23) e no CC1000 (24). Com o uso da codificação *Manchester*, a sequência consecutiva de *bits* com nível lógico “zero”, que no protocolo URP é transmitida com o desligamento da portadora de RF, ficou reduzida ao período correspondente a “dois” *bits* do quadro transmitido (Figura 2.2).

A desvantagem da codificação *Manchester* é a diminuição da taxa de transferência para 50% do valor nominal do canal de comunicação. Por este motivo, a codificação *Manchester* foi disponibilizada no protocolo URP como um recurso opcional, devendo ser aplicada somente em ambientes ruidosos, onde o índice de retransmissão de quadros for significativo. O desempenho do protocolo com a solução aplicada é discutido na seção 7.3.

7 CAPÍTULO 7 – AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO PROTOCOLO URP

Neste capítulo, será descrita inicialmente a metodologia aplicada para a realização dos ensaios experimentais para avaliação das soluções. Na sequência serão discutidos os resultados dos experimentos que demonstram o comportamento do sistema com as soluções aplicadas.

7.1 METODOLOGIA PARA A REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS

Para demonstrar o comportamento do sistema foi aplicada a seguinte metodologia durante os ensaios experimentais:

- a. Foi padronizado um *hardware* para a realização dos ensaios experimentais do protocolo URP, descrito no capítulo 5. Este padrão foi mantido inalterado durante todos os ensaios realizados.
- b. Os testes experimentais foram baseados em transmissões e recebimento de quadros, contabilizando a quantidade de quadros transmitidos com sucesso ou a quantidade de quadros perdidos.
- c. Todas as transmissões foram realizadas com a potência do sinal de saída do transmissor configurada para 3 dBm (2 mW), salvo especificação contrária na descrição do experimento.
- d. A distância entre os dispositivos foi padronizada em 3 metros, salvo especificação contrária na descrição do experimento.
- e. Os experimentos foram realizados com a taxa de transmissão de 5kbps, salvo especificação contrária na descrição do experimento.
- f. Foram propostas soluções para os problemas encontrados. Para cada solução proposta, foram realizados testes experimentais antes e depois da aplicação da solução, comparando os resultados.

7.2 DEMONSTRAÇÃO DO DESEMPENHO DO ALGORITMO PARA RECUPERAÇÃO DE QUADROS COLIDIDOS

A demonstração do comportamento do algoritmo para recuperação de quadros colididos foi realizada de duas formas. A primeira foi baseada em uma comparação entre a quantidade de quadros perdidos pelo protocolo durante a transmissão de dados em um ambiente ruidoso. Este primeiro ensaio teve o objetivo de mensurar a quantidade de quadros perdidos devido à detecção

de “quadros falsos” gerados pelo ruído digital em forma de trem de pulso aleatório, característico dos receptores regenerativos (ver seção 3.5).

Para fazer esta comparação foram realizados 50 ensaios com a solução aplicada, e 50 ensaios sem a solução aplicada, sendo que, em cada ensaio, foram enviados 10000 quadros do dispositivo “A” para “B” (Figura 5.8), onde um quadro foi enviado a cada 0,2 segundos e cada quadro continha 10 *bytes* de dados compostos pelo número hexadecimal 0x55. O experimento completo durou aproximadamente 54 horas.

Como a detecção de quadros falsos está relacionada com a geração de dados aleatórios pelo rádio receptor regenerativo, o resultado deste experimento dependeu do ruído de fundo de perturbações eletromagnéticas presente no ambiente. Levando isto em consideração, o experimento foi realizado em um ambiente industrial com presença significativa de ruído de fundo de RF, que foi evidenciado pela geração constante de dados aleatórios pelo rádio receptor regenerativo.

Os resultados dos ensaios são mostrados na Figura 7.1. A média percentual de quadros perdidos, quando utilizado um protocolo com mecanismo de detecção de quadros semelhante ao IEEE802.11, sem a solução aplicada, foi de $1,553\% \pm 0,102\%$ com 95% de certeza e desvio padrão de 0,369%. Para o protocolo URP (com a solução aplicada), a média percentual de quadros perdidos ficou em $0,016\% \pm 0,005\%$ com 95% de certeza e desvio padrão de 0,019%, demonstrando que a solução obteve um desempenho satisfatório. Convém ressaltar que o índice de 0,016% de quadros perdidos com a solução aplicada provavelmente foi causado por perturbações e interferências geradas pelo ambiente industrial no qual o experimento foi realizado.

A segunda forma de avaliação foi elaborada com o objetivo de mensurar a eficiência do algoritmo URP em relação à recuperação de quadros no caso de colisão com efeito de captura (*Capture Effect*). Com este propósito, foram realizados experimentos enviando quadros intencionalmente interrompidos no campo de dados, seguidos de quadros completos, simulando o resultado de uma colisão entre quadros. Os quadros utilizados para a simulação de colisão foram baseados nos casos de colisão descritos por J. Lee et al. (19). Ver seção 2.5.2.

Neste experimento foram realizados 50 ensaios, onde, em cada ensaio foram enviados 10000 quadros que simulavam os quadros colididos de acordo com a situação “C” da Figura 2.10, sendo enviado um quadro a cada 0,2 segundo. O ensaio foi realizado num ambiente com pouca

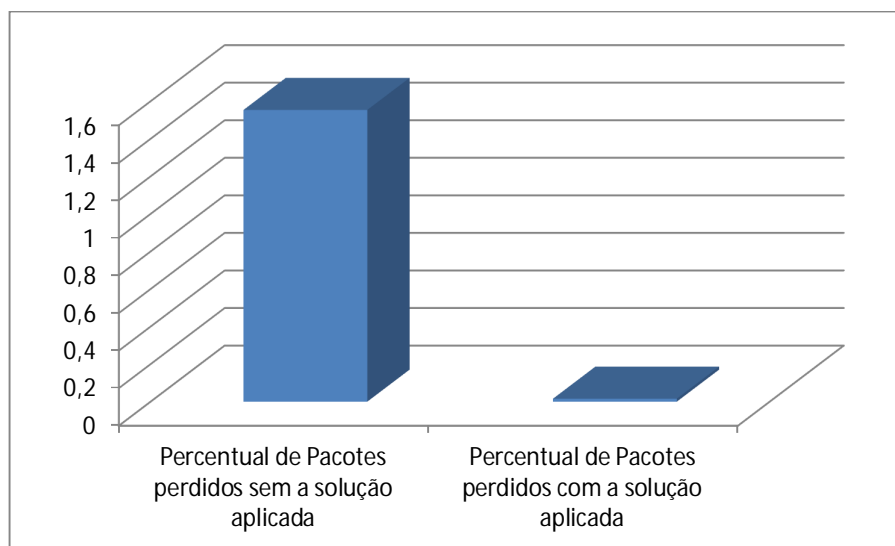


Figura 7.1 – Gráfico da avaliação dos resultados do algoritmo para de recuperação de quadros colididos.

poluição eletromagnética, evidenciada pela não geração de dados aleatórios na saída do rádio receptor regenerativo.

O resultado do experimento foi a recuperação de 100% dos quadros quando o algoritmo foi executado com a solução implementada, e a perda de 100% dos quadros quando utilizado um protocolo com mecanismo de detecção de quadros semelhante ao IEEE802.11, demonstrando que o algoritmo se comportou de forma eficiente no experimento realizado.

7.3 RESULTADOS DA SOLUÇÃO PARA VULNERABILIDADE A INTERFERÊNCIAS

O experimento para a demonstração do desempenho da solução para vulnerabilidade a interferências durante sequência de *bits* zero foi realizado da seguinte forma: foram realizados 50 ensaios com o envio e recebimento de 10000 quadros em cada ensaio, onde cada quadro continha 10 *bytes* zeros. Conforme descrito na seção 6.4, o erro gerado pelo envio de *bits* zero é influenciado pela intensidade de ruído eletromagnético do ambiente. Levando isto em consideração, os experimentos foram realizados em um ambiente industrial, com significativa poluição eletromagnética, que foi evidenciada pela constante geração de dados aleatórios no receptor regenerativo.

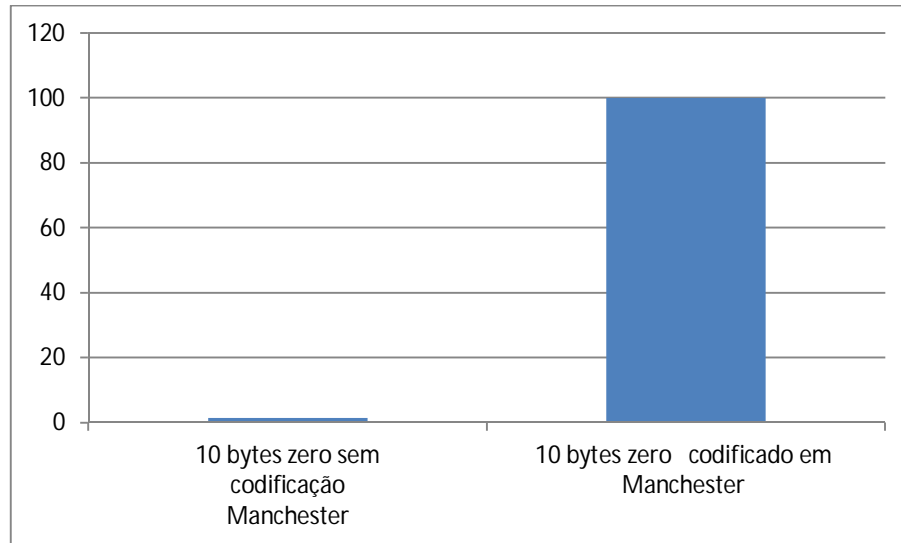


Figura 7.2 – Percentual de quadros codificados em *Manchester* transmitidos com sucesso

Os resultados mostraram que o protocolo com a solução aplicada obteve um excelente desempenho no experimento realizado (Figura 7.2). O percentual médio de quadros enviados com sucesso para os quadros codificados em *Manchester* foi de $99,99\% \pm 0,003\%$ com 95% de certeza e desvio padrão de 0,01%, enquanto que, para o protocolo sem a solução aplicada (Figura 6.4), apenas 1,47% dos quadros foram enviados com sucesso.

7.4 TESTE DE COMPATIBILIDADE DO PROTOCOLO URP

O protocolo URP foi desenvolvido para ser utilizado com qualquer rádio receptor regenerativo do mercado. Para avaliar a compatibilidade do protocolo, foram realizados ensaios experimentais com sete modelos, de seis fabricantes diferentes de rádio receptores regenerativos, das marcas: 1. *Wenshing*, modelo RWS-371-6; 2. *Saltech*, modelo RXTCH10; 3. *Dhay*, modelo TIE03; 4. *Keymark*, modelo RXD1-433, 5. *Keymark*, modelo RXD1-315; 6. *Shenzhen*, modelo CHJ-9931, 7. *Anyang New Century Electronic Research Institute* modelo J04V. Os modelos testados são mostrados na Figura 7.3.

Para a verificação da compatibilidade foram realizados 50 ensaios com cada modelo de rádio, sendo que em cada ensaio foram enviados 10000 quadros. A taxa de transmissão foi escolhida de acordo com a velocidade mais alta suportada por todos os dispositivos, que foi de 3kbps, limitada pelo modelo RWS-371-6 da *Wenshing*.

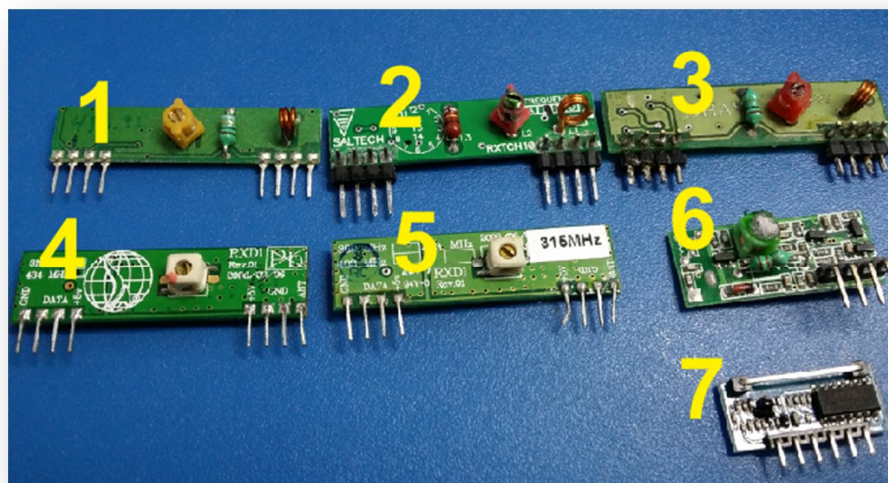


Figura 7.3 - Rádios receptores regenerativos testados

Foi enviado um quadro a cada 200 ms totalizando aproximadamente 28 horas de ensaio para cada modelo testado. Cada quadro continha 10 *bytes* de dados compostos pelo número hexadecimal 0x55. Os resultados dos ensaios mostraram que todos os modelos de rádios testados foram compatíveis com o protocolo URP. Cada rádio receptor regenerativo recebeu 50000 quadros durante o ensaio. Apenas o modelo RWS-371-6 da Wenshing perdeu um único quadro durante os testes. Os outros modelos não perderam quadros.

7.5 AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DOS RÁDIOS RECEPTORES

O consumo de energia para a troca de mensagens via rádio pode ser dividido em custo de transmissão e custo de recepção. Nesta seção será avaliada a energia gasta na recepção das mensagens. Na seção 7.6 será avaliada a energia gasta nos transmissores modulados em OOK.

Para avaliar a eficiência energética dos receptores regenerativos foi realizado um estudo teórico levando em consideração alguns trabalhos recentes sobre receptores regenerativos com alta eficiência energética (28), (29), (43), (44), (45), (46), (47), (48), (49), (50), (51). Estes trabalhos foram comparados com rádios receptores comerciais atualmente indicados para redes de sensores sem fio, que utilizam modernas técnicas de modulação digital, como por exemplo, o CC2420 (9), que adota o padrão IEEE802.15.4, o CC1000 (24) e o CC1101 (23), ambos da Texas Instruments, que operam com frequências abaixo de 1GHz. As características dos receptores, como, sensibilidade, potência consumida e taxa de transferência são mostrados na Tabela 7.1

Para comparar a eficiência energética entre os transceptores foi calculado o tempo de duração da energia de uma bateria alcalina AA alimentando os respectivos rádios no modo de recepção. Para estes cálculos, foram levadas em consideração as seguintes condições:

- cada transceptor é alimentado com uma bateria alcalina AA com capacidade de 2300 mAh, com energia aproximada de 3220 mW.h;
- o controle de acesso ao meio considerado foi o TDMA (*Time Division Multiple Access*), em que o receptor do rádio é ligado a cada 5 segundos para receber um quadro, e desligado logo após a sua recepção, salvo especificado diferente na descrição;
- o tamanho do quadro recebido é de 30 bytes: 9 bytes de preâmbulo, 4 bytes de endereço, 3 bytes de controle e 14 bytes de dados;

Tabela 7.1 – Avaliação da eficiência energética dos rádios receptores

Referência	Frequência de trabalho	Taxa de transmissão	Sensibilidade Rx	Energia por bit no modo de recepção	Potência consumida no modo de recepção
	[MHz]	[kbps]	[dBm]	[nJ/b]	[mW]
(29) (regenerativo)	2400	0,8	-90	12,5	0,01
Receptor regenerativo utilizado neste trabalho (8)	433	10	-90	16,1	0,16
(28) (regenerativo)	403	1000	-65	0,18	0,18
(43) (regenerativo)	404	120	-93	3,33	0,4
(44) (regenerativo)	1900	500	-80	0,8	0,4
(45) (regenerativo)	2400	5000	-75	0,107	0,53
(46) (regenerativo)	433	20	-97	40,5	0,81
(47) (regenerativo)	500	10000	-76	0,09	0,9
(48) (regenerativo)	1032	100	-107,5	12	1,2
(49) (regenerativo)	2450	11000	-81	0,191	2,1
(50) (regenerativo)	2400	500	-80	5,6	2,8
(51) (regenerativo)	1500	150	-105	25	3,75
CC1000(24)	433	2,4	-109	10200	24,42
CC1101(23)	433	250	-104	226	56,43
CC2420(9)	2400	250	-94	236	59,1

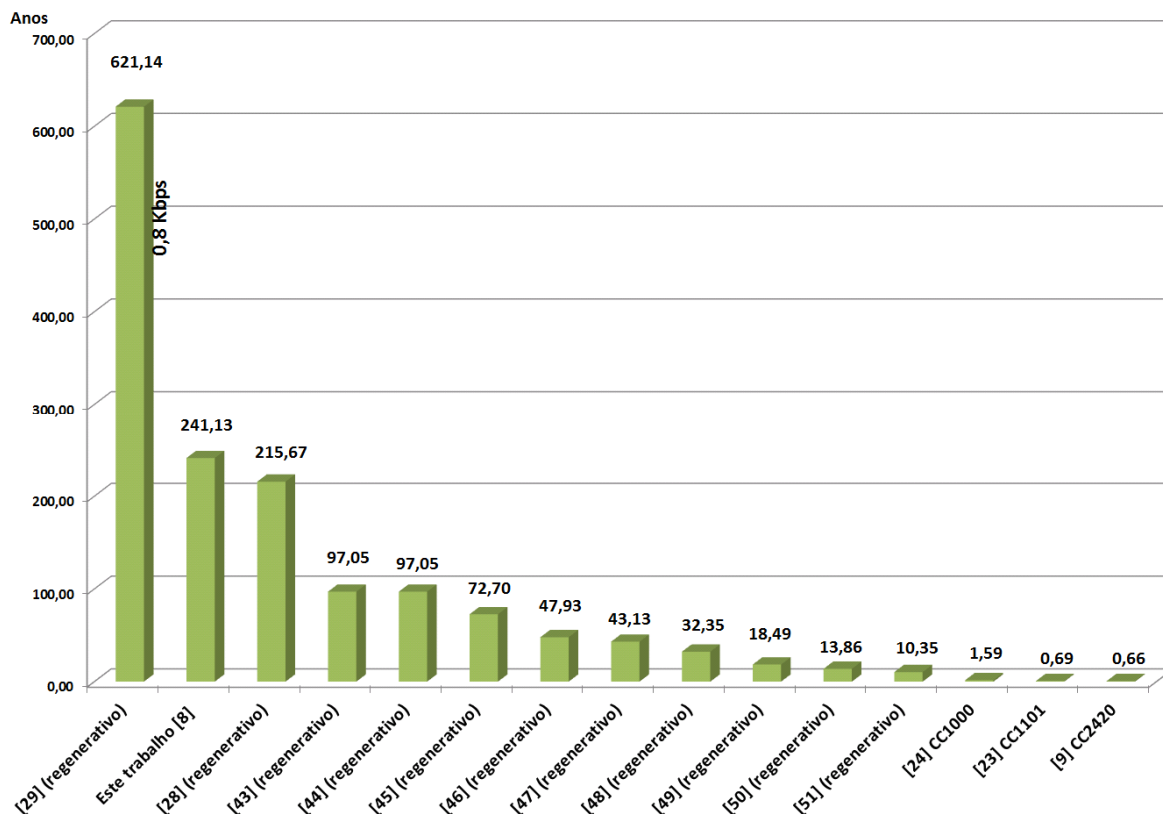


Figura 7.4 – Rádios Receptores: tempo para consumir a energia equivalente a uma bateria alcalina AA com a taxa de transmissão limitada a 5kbps

O estudo para a demonstração da eficiência energética dos rádios receptores regenerativos foi realizado considerando três casos diferentes.

No primeiro caso, foi considerada uma taxa de transmissão máxima de 5 Kbps, com exceção de (29), para o qual a taxa de transferência foi de 0,8 Kbps devido a limitações do receptor. A taxa de 5 kbps foi considerada por causa das limitações de processamento computacional imposta pelos microcontroladores com baixo consumo energético, indicados para sistemas alimentados por bateria. O resultado é mostrado na Figura 7.4. Com a taxa de transmissão limitada a 5 kbps, a duração da bateria para os rádios, atualmente indicados para redes de sensores sem fio, foram as seguintes: para o CC2420 (9), foi de 7,8 meses; para o CC1101 (23), foi de 8,2 meses; para o CC1000(24) foi de 19 meses. Os rádios receptores regenerativos tiveram desempenho significativamente superior em relação às outras tecnologias, levando entre 10 a 621,14 anos para consumir a energia equivalente a uma bateria alcalina AA.

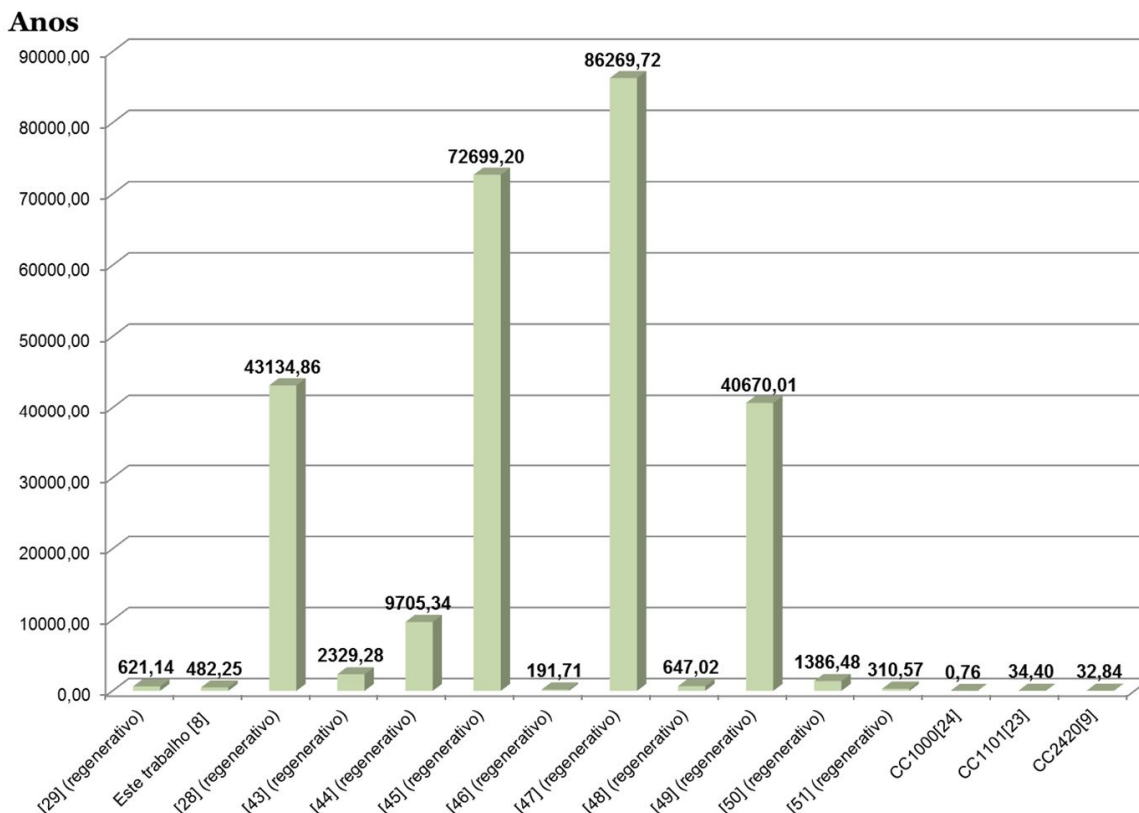


Figura 7.5 - Rádios Receptores: tempo para consumir a energia equivalente a uma bateria alcalina AA utilizando a taxa de transferência máxima

No segundo caso, foi considerada nos cálculos a taxa de transmissão máxima dos rádios receptores regenerativos. O resultado é mostrado na Figura 7.5. Nestas condições, os receptores com maiores taxas de transferências e consumos de energia mais baixos tiveram melhor desempenho. O rádio que obteve o melhor desempenho foi o receptor regenerativo desenvolvido em (47), podendo levar 86269 anos para consumir a energia equivalente a uma bateria alcalina AA. O rádio receptor utilizado neste trabalho levaria 482 anos para consumir a mesma energia. Os rádios transceptores com arquitetura digital, atualmente indicados para redes de sensores sem fio, tiveram desempenhos energéticos inferiores, quando comparados com os receptores regenerativos. Para o CC2420 (9), o tempo para consumir a energia equivalente a uma bateria alcalina AA foi de 32,84 anos; para o CC1101 (23), foi de 34,4 anos; para o CC1000(24) foi de 0,76 anos.

No terceiro caso foram considerados nos cálculos os receptores ligados continuamente. O resultado é mostrado na Figura 7.6. Neste caso, o rádio desenvolvido em (29) obteve o melhor

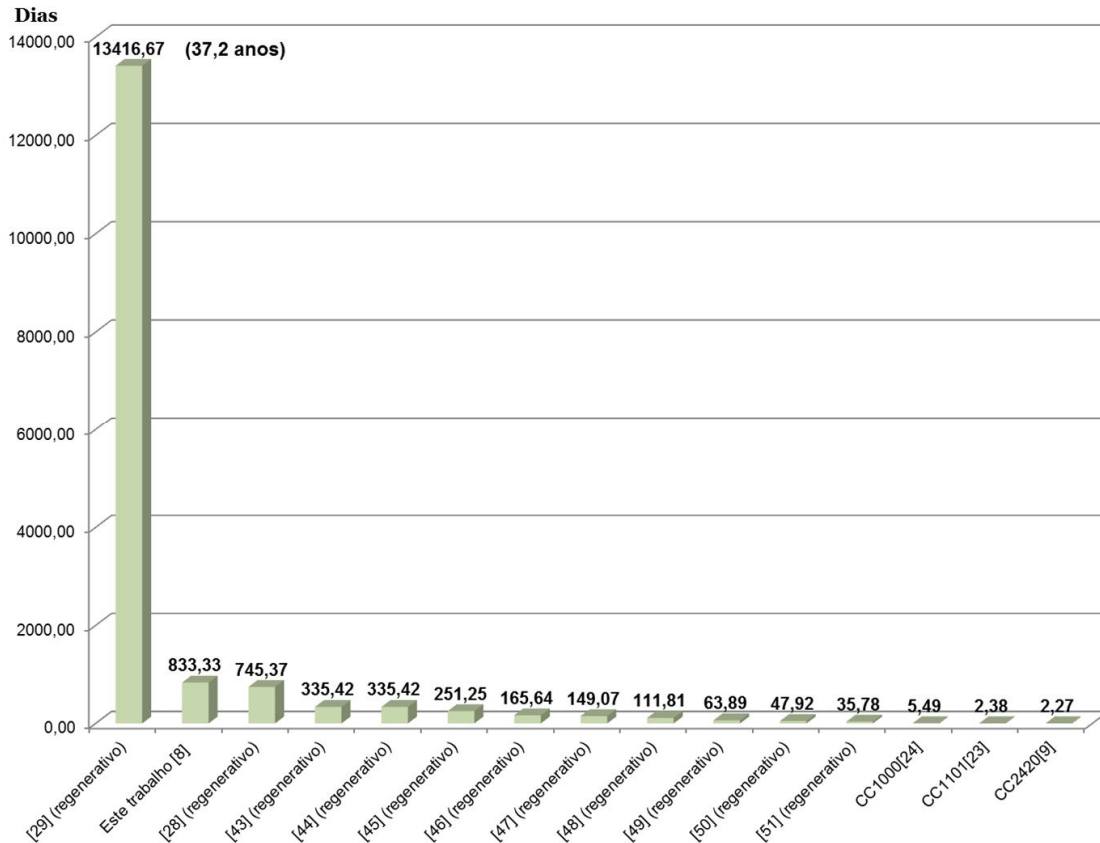


Figura 7.6 - Rádios Receptores: tempo para consumir a energia equivalente a uma bateria alcalina AA considerando o receptor ligado continuamente

desempenho levando 13416 dias para consumir a energia equivalente a uma bateria alcalina AA. O rádio receptor utilizado neste trabalho (8) levaria 833 dias para consumir a mesma energia. Os transceptores com arquitetura digital CC1000, CC1101 e CC2420 apresentaram um desempenho inferior aos rádios receptores regenerativos, levando, respectivamente, 5,49, 2,38 e 2,27 dias para consumir a mesma energia.

7.6 AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DOS TRANSMISSORES MODULADOS EM OOK

Conforme já foi descrito, os transmissores com modulação OOK, usados com os receptores regenerativos, têm duas vantagens em relação ao consumo de energia, quando comparado com transmissores com outros tipos de modulação. A primeira vantagem é a extrema simplicidade do circuito, sendo possível construir um transmissor OOK completo com apenas um transistor (ver seção 3.3), não tendo a necessidade de circuitos auxiliares para a modulação. A

segunda vantagem esta relacionada à eficiência energética da modulação OOK (ver seção 3.2), que permite uma economia de 50% de energia em relação às outras técnicas de modulação, como por exemplo, FSK (*Frequency Shift Keying*) ou PSK (*Phase Shift Keying*).

Tabela 7.2 – Características dos rádios transmissores

Modelo	Frequência transmissão	Taxa de transmissão	Rendimento Transmissor	Potência consumida pelo transmissor para P(out)=0db	Energia por bit para P(Tx)=0db
	[MHz]	[kbps]	[%]	[mW]	[nJ/b]
(29) (OOK)	2400	0,8	264,78	0,38	470
(52) RFM85 (OOK)	433	10	19,91	5,02	502
(37) (Este Trabalho) TX-C1 (OOK)	433	10	15,84	6,31	631
(53) RCT-433 (OOK)	433	8	14,81	6,75	844
(54) STT-433 (OOK)	433	8	13,50	7,41	926
(28) (OOK)	403	1000	12,47	8,02	8,02
(55) MO-SAWR (OOK)	433	10	9,09	11,00	1100
(24) CC1000	433	2,4	3,21	31,20	13000
(23) CC1101	433	250	2,22	45,00	180
(9) CC2420	2400	250	1,92	52,20	209

Para avaliar o impacto destas vantagens na eficiência energética dos transmissores com modulação OOK foi realizado um estudo teórico, similar ao estudo realizado para os receptores regenerativos na seção anterior. Este estudo levou em consideração alguns rádios transmissores com modulação OOK encontrados no mercado (52), (53), (54), (55), (37), (29), (28), os quais foram comparados com rádios transceptores digitais *single chip* utilizados para redes de sensores sem fio, que utilizam modernas técnicas de modulação digital, como por exemplo, o CC2420 (9), o CC1000 (24) e o CC1101 (23). As características destes transmissores são mostradas na Tabela 7.2, onde: a coluna "Rendimento do Transmissor" é calculada pela razão entre a potência do sinal de saída do transmissor e a potência total gasta pelo transmissor; a coluna "Energia por Bit" mostra a energia gasta pelo transmissor para transmitir 1 bit considerando a taxa de transmissão de dados máxima do transmissor; a coluna "Potência consumida pelo transmissor para P(out) =

0dBm” mostra a potência total consumida pelo transmissor quando o mesmo transmite um sinal de 0dBm, que equivale a 1mW.

Para comparar a eficiência energética entre os dispositivos foi calculada a energia consumida pelo transmissor para que o mesmo gerasse um sinal de saída com intensidade de 0 dBm. Levando em consideração esta energia, foi calculado o tempo de duração de uma bateria alcalina AA alimentando os respectivos transmissores. Para estes cálculos, foram consideradas as seguintes condições:

- a. cada transmissor é alimentado com uma bateria alcalina AA com capacidade de 2300 mAh, com energia aproximada de 3220 mW.h;
- b. o transmissor é ligado a cada 5 segundos para transmitir um quadro, e desligado logo após a transmissão;
- c. o tamanho do quadro transmitido é de 30 *bytes*: 9 *bytes* de Preâmbulo, 4 *bytes* de endereço, 3 *bytes* de controle e 14 *bytes* de dados;

O estudo para a demonstração da eficiência energética dos rádios transmissores foi realizado considerando dois casos.

O primeiro caso considerou uma taxa de transmissão da rede limitada a 5kbps. O resultado da comparação é mostrado na Figura 7.7. Neste caso, os rádios transmissores com modulação OOK tiveram desempenho superior aos transceptores com modulação digital. O transmissor desenvolvido em (29) obteve o melhor desempenho levando 16,45 anos para consumir a energia equivalente a uma bateria alcalina AA. O transmissor utilizado neste trabalho levaria 6,15 anos para consumir a mesma energia. Os transceptores com modulação digital CC1000, CC1101 e CC2420 levariam respectivamente 1,24, 0,86 e 0,74 anos para consumir a mesma energia.

O segundo caso estudado considerou a taxa de transferência máxima dos transmissores. O resultado é mostrado na Figura 7.8. Nestas condições, o transmissor que obteve o melhor desempenho foi o transmissor com modulação OOK desenvolvido em (28), que levaria 968 anos para consumir a energia equivalente a uma bateria alcalina AA. O rádio transmissor utilizado neste trabalho (37) levaria 12,3 anos para consumir a mesma energia. Os transceptores com modulação digital CC1101 e CC2420 obtiveram um bom desempenho, levando respectivamente 43,13 e 37,19 anos para consumir a mesma energia.

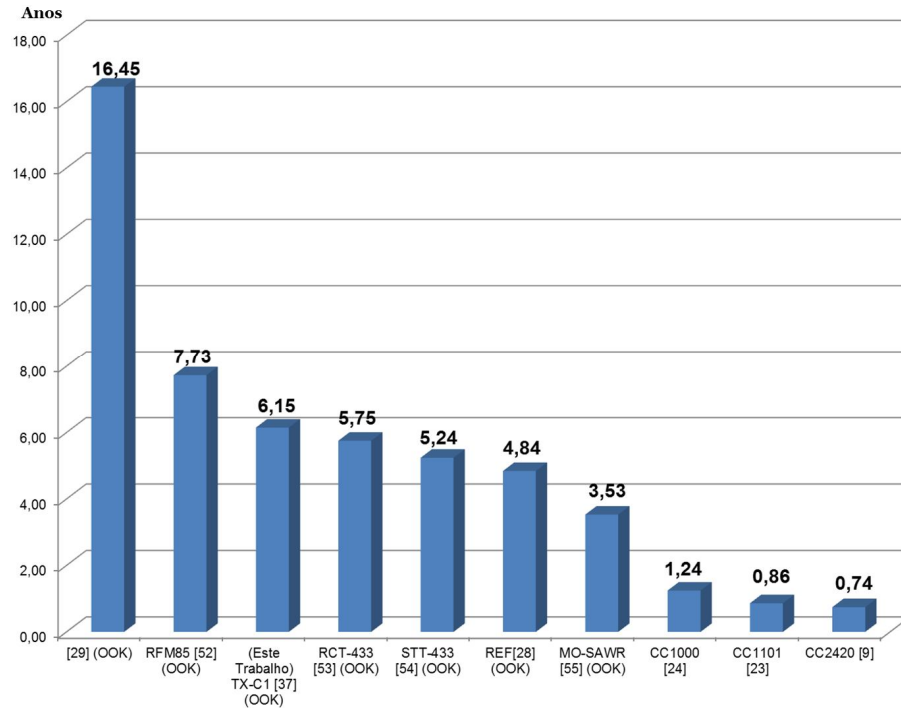


Figura 7.7 – Rádios transmissores: tempo para consumir a energia equivalente a uma bateria alcalina AA com a taxa de transmissão limitada a 5kbps

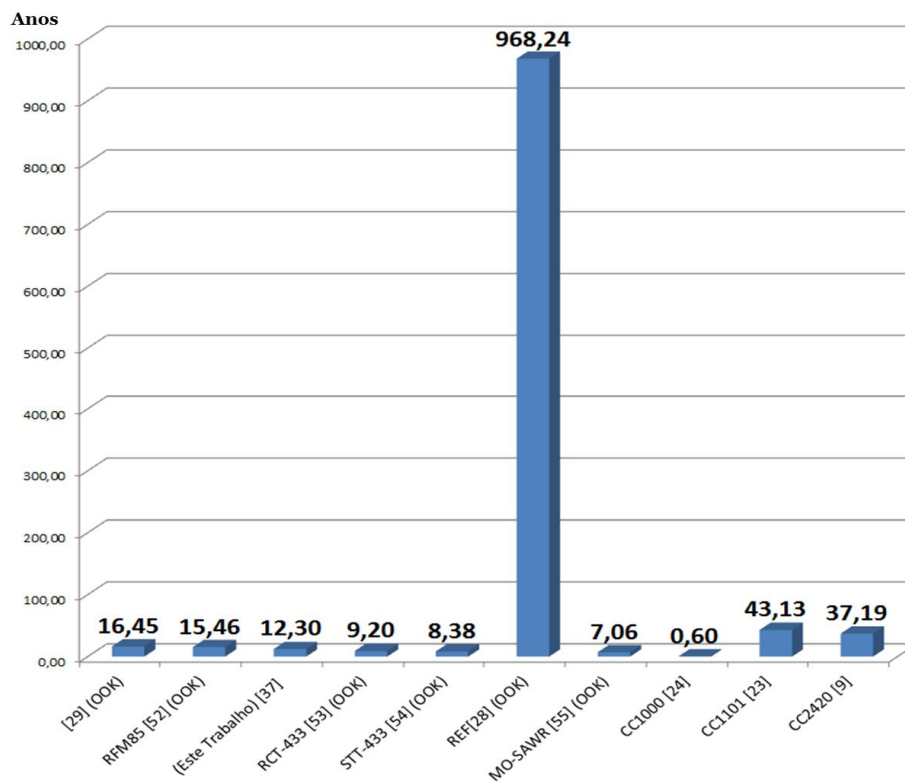


Figura 7.8 - Rádios transmissores: tempo para consumir a energia equivalente a uma bateria alcalina AA utilizando a taxa de transferência máxima

8 CAPÍTULO 8 – CONCLUSÃO

8.1 CONCLUSÃO

A extrema simplicidade do circuito do rádio receptor regenerativo, dada pela sua característica peculiar de obter um alto ganho de tensão em uma única etapa de amplificação, possibilita a construção de rádios receptores com alta eficiência energética (46), (45), (48). Estes rádios receptores podem atender a uma demanda crescente no mercado, pela necessidade de dispositivos com baixo consumo de energia, como redes de sensores sem fio, nas quais a vida da rede depende da duração da bateria.

Apesar do grande potencial para aplicações que exijam alta eficiência energética, existe uma carência de um protocolo de comunicação para o rádio receptor regenerativo, que dificulta a sua aplicação no mercado.

Uma das contribuições deste trabalho foi o desenvolvimento de um protocolo de comunicação estruturado na camada física do modelo de referência RM-OSI, que permite a utilização dos rádios regenerativos conectados diretamente à porta serial UART, disponível na maioria dos microcontroladores, facilitando a utilização do rádio receptor regenerativo com alta eficiência energética pela comunidade científica e pelos fabricantes de produtos com tecnologia sem fio.

Durante o desenvolvimento, foram sugeridas soluções para as adversidades técnicas características do receptor regenerativo, como sensibilidade à captação de ruídos de RF e a geração de dados aleatórios na saída do rádio receptor, e foi demonstrado, através de experimentos, o comportamento real do protocolo com as soluções aplicadas.

Outra contribuição foi a proposta de uma solução para um problema típico de redes sem fio, que é a recuperação de dados em caso de colisão com efeito de captura (*Capture Effect*). A solução proposta apresenta algumas vantagens em relação às soluções encontradas na literatura. As principais são: possibilita a recuperação dos dados mesmo que ocorram colisões enfileiradas entre vários quadros; não descarta quadros, a não ser que sejam invalidados pelo CRC; não necessita de *hardware* especial; proporciona um consumo mínimo de recursos do sistema pelo protocolo, podendo ser aplicado a dispositivos com microcontrolador de pequeno porte, com no mínimo 64 *bytes* de memória RAM.

Durante os experimentos realizados, o protocolo URP se comportou de forma satisfatória, proporcionando um enlace de dados sem fio transparente e, principalmente, confiável, tendo um baixo percentual de erros de transmissão.

8.2 TRABALHOS FUTUROS

No decorrer do trabalho, o protocolo URP possibilitou a construção de um transceptor com alta eficiência energética e baixo custo. Nos trabalhos futuros, este transceptor será utilizado para a construção de um nó sensor sem fio. Para isto serão desenvolvidas uma subcamada MAC e uma camada de rede, que serão aprimoradas para aproveitar a eficiência energética dos rádios receptores regenerativos.

Referências Bibliográficas

1. Armstrong EH. Some Recent Developments of Regenerative Circuits. Proc IRE [Internet]. 1922 Aug [cited 2013 Mar 18];10(4):244–60. Available from: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1666729>
2. Dr. Lee de Forest Biography [Internet]. IEEE Global History Network. [cited 2027 Jan 13]. Available from: http://www.ieeeahn.org/wiki/index.php/Lee_De_Forest
3. IEEE. Alexanderson - Tuned radio frequency receiver. Electr Eng. 1911;54(2):256–8.
4. IEEE. Radio history [Internet]. [cited 2027 Jan 13]. Available from: <http://www.ieeeahn.org/wiki/index.php/Radio>
5. Terman FE. Radio Engineers Handbook. In: McGraw-Hill Book Company, editor. 1st ed. New York; 1943.
6. Edwin H. Armstrong [Internet]. IEEE Global History Network. Available from: http://www.ieeeahn.org/wiki/index.php/Edwin_H._Armstrong
7. Haykin S, Moher M. An Introduction to Analog & digital Communications. Second Ed. John Wiley & Sons, editor. 2007.
8. Anyang. Super-regenerative Receiver Module J04V - Datasheet [Internet]. China: Anyang New Century Electronic Research Institute Ltd; 2007. p. 3–6. Available from: <http://www.ayxsj.com/>
9. Texas Instruments. CC2420 Transceiver Datasheet. 2004.
10. EIA Standards. Electronic Industries Alliance ANSI/EIA-232-D [Internet]. [cited 2007 Dec 13]. Available from: <http://www.eciaonline.org/>
11. Freescale Semiconductor. Application Note, Software-Driven Asynchronous Serial Communication Techniques. 1995; Available from: www.freescale.com
12. Forouzan BA. DATA COMMUNICATIONS AND NETWORKING. Fourth Ed. McGraw, editor. New York; 2007.
13. Tanenbaum AS. Redes de computadores. Quarta edi. Editora Campus, editor. 2002.
14. Zimmermann H. OSI Reference Model-The ISO Model of Architecture for Open Systems Interconnection. IEEE Trans Commun [Internet]. 1980 Apr [cited 2012 Nov 22];28(4):425–32. Available from: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1094702>

15. Haigh T, Charles W, Bachman: Database Software Pioneer. IEEE Ann Hist Comput [Internet]. 2011 Apr;33(4):70–80. Available from: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6096530>
16. ISO/IEC. International Standard ISO/IEC 7498-1 - OSI - Open Systems Interconnection. Second Edi. ISO/IEC 7498-1 1994.
17. Roshan P, Leary J. 802.11 Wireless LAN Fundamentals. Cisco Press; 2003.
18. IEEE 802.11 Working Group. IEEE Standard 802.11TM-2007. IEEE; 2007.
19. Lee J, Kim W, Lee S, Jo D, Ryu J, Kwon T, et al. An experimental study on the capture effect in 802.11a networks. Proceedings of the the second ACM international workshop on Wireless network testbeds, experimental evaluation and characterization - WinTECH '07 [Internet]. New York, New York, USA: ACM Press; 2007 [cited 2013 Feb 19]. p. 19. Available from: <http://portal.acm.org/citation.cfm?doid=1287767.1287772>
20. Whitehouse K, Woo A, Jiang F, Polastre J, Culler D. Exploiting the Capture Effect for Collision Detection and Recovery. The Second IEEE Workshop on Embedded Networked Sensors, 2005 EmNetS-II [Internet]. IEEE; [cited 2013 Feb 19]. p. 45–52. Available from: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1469098>
21. Boer J, Van H. WIRELESS LAN WITH ENHANCED CAPTURE PROVISION. 5,987,033, 1999.
22. Mutsuura K, Okada H, Ohtsuki K, Tezuka Y. A new control scheme with capture effect for random access packet communications. IEEE International Conference on Communications, World Prosperity Through Communications [Internet]. IEEE; 1989 [cited 2014 Jan 9]. p. 938–44. Available from: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=49825>
23. Texas Instruments. CC1101 Low-Power Sub-1 GHz RF Transceiver Datasheet. 2011.
24. Texas Instruments. CC1000 Transceiver Datasheet. 2011. p. 1–23.
25. Holtek. Datasheet HT6P20x2 Encoder IC [Internet]. Holtek; p. 1–13. Available from: <http://www.holtek.com.tw/english/>
26. Texas Instruments. CC3000 Host Programming Guide [Internet]. 2010 [cited 2015 Feb 13]. Available from: http://processors.wiki.ti.com/index.php/CC3000_Host_Programming_Guide
27. IEEE. CC3000 IEEE 802.11 Datasheet. 2011;(December).
28. Ma C, Hu C, Cheng J, Xia L, Chiang PY. A Near-Threshold, 0.16 nJ/b OOK-Transmitter With 0.18 nJ/b Noise-Cancelling Super-Regenerative Receiver for the Medical Implant Communications Service. IEEE Trans Biomed Circuits Syst

[Internet]. 2013 [cited 2013 Oct 6];1–1. Available from:
<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6523221>

29. Mcgregor I, Wasige E, Thayne I. Sub-50 μ W , 2 . 4 GHz Super-Regenerative Transceiver with Ultra Low Duty Cycle and a 675 μ W High Impedance Super-Regenerative Receiver. 2007;(October):1322–5.
30. Hwei PH. Analog and Digital Communcations. Second. 2003.
31. Housley T. Data Communications & Teleprocessing Systems. Secund. Publications B, editor. 2008.
32. Irving G. Practical Oscillator Handbook. 1997.
33. Alexander G. EPCOS - Application Note Principles of SAWR-stabilized oscillators. 2001;1–8. Available from: <http://www.epcos.com>
34. Elektor Electronics. Aplication Note 433MHz short range communication licence-exempt data transmission. 2010.
35. Abramson N. THE ALOHA SYSTEM. Proceedings of the November 17-19, 1970, fall joint computer conference on - AFIPS '70 (Fall) [Internet]. New York, New York, USA: ACM Press; 1970 [cited 2012 Apr 30]. p. 281. Available from: <http://portal.acm.org/citation.cfm?doid=1478462.1478502>
36. Binder R, Abramson N, Kuo F, Okinaka A, Wax D. ALOHA packet broadcasting. Proceedings of the May 19-22, 1975, national computer conference and exposition on - AFIPS '75 [Internet]. New York, New York, USA: ACM Press; 1975 [cited 2012 Jun 10]. p. 203. Available from: <http://portal.acm.org/citation.cfm?doid=1499949.1499985>
37. Keymark - The Wireless RF solution company. Datasheet 433MHz RF Transmitter TX-C1. 2002.
38. Altium Limited. Altium Designer [Internet]. Australian; 2014. Available from: www.altium.com
39. Graham M. High-Speed Digital Design, A Handbook of Black Magic. First Edit. Hall P, editor. 1993. 464 p.
40. Schultz T. C and the 8051 complete. 3rd ed. Purdue University West Lafayette, editor. 1999. 435 p.
41. Ayala K. The 8051 Microcontroller Architecture, programming and Apllications. West Publishing Company; 1991.
42. Markus H, S. Moschytz G. CIRCUITS AND SYSTEMS FOR WIRELESS COMMUNICATIONS. 2002.

43. Bohorquez J, Chandrakasan A, Dawson J. A 350 μ W CMOS MSK Transmitter and 400 μ W OOK Super-Regenerative Receiver for Medical Implant Communications. *IEEE J Solid-State Circuits*. 2013;
44. Otis B, Chee YH, Rabaey J. A 400 μ W-RX, 1.6mW-TX superregenerative transceiver for wireless sensor networks. *ISSCC 2005 IEEE International Digest of Technical Papers Solid-State Circuits Conference, 2005* [Internet]. IEEE; 2005 [cited 2013 Oct 6]. p. 396–8. Available from: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1494036>
45. Vidojkovic M, Huang X, Harpe P, Rampu S, Zhou C, Huang L, et al. A 2.4GHz ULP OOK single-chip transceiver for healthcare applications. *2011 IEEE International Solid-State Circuits Conference* [Internet]. IEEE; 2011 [cited 2013 Mar 12]. p. 458–60. Available from: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5746396>
46. Bauwelinck J, Melange C, Vandewege J. Low-power, super-regenerative receiver targets 433-MHz ISM band. *Acad OneFile*. 2006;
47. Kim K, Yun S, Lee S, Nam S. Low-Power CMOS Super-Regenerative Receiver With a Digitally Self-Quenching Loop. *IEEE Microw Wirel Components Lett* [Internet]. 2012 Sep [cited 2013 Oct 6];22(9):486–8. Available from: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6275448>
48. Vouilloz A, Declercq M, Dehollain C. A low-power CMOS super-regenerative receiver at 1 GHz. *IEEE J Solid-State Circuits* [Internet]. 2001 Mar [cited 2013 Feb 22];36(3):440–51. Available from: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=910483>
49. Moncunill-Geniz FX, Pala-Schonwalder P, Dehollain C, Joehl N, Declercq M. An 11-Mb/s 2.1-mW Synchronous Superregenerative Receiver at 2.4 GHz. *IEEE Trans Microw Theory Tech* [Internet]. 2007 Jun [cited 2013 Oct 6];55(6):1355–62. Available from: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4230879>
50. Chen J, Flynn MP, Hayes JP. A Fully Integrated Auto-Calibrated Super-Regenerative Receiver in 0.13. *IEEE J Solid-State Circuits* [Internet]. 2007 Sep [cited 2013 Oct 6];42(9):1976–85. Available from: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4295182>
51. Joehl N, Dehollain C, Favre P, Deval P, Declercq M. A Low-Power 1-GHz Super-Regenerative Transceiver with Time-Shared PLL Control. 2001;36(7):1025–31.
52. Hoperf Electronic. Datasheet 433MHz RF Transmitter RFM85.
53. Radiotronix. Datasheet 433MHz RF Transmitter Rct-433-asbr.
54. Sunrom. Datasheet 433 MHz RF Transmitter STT-433 Sunrom. p. 1–3.

55. Holy Stone Enterprise Co Ltd. Datasheet 433MHz RF Transmitter MO-SAWR-A. 2004.