



Desenvolvimento de um Protocolo para Troca de Dados por meio de Rádio Receptor Regenerativo com Alta Eficiência Energética*

Data Exchange Protocol for Regenerative Radio Receivers with High Energy Efficiency

Janderson Wilson Blanski¹
Flávio Morais de Assis Silva²
Iuri Muniz Pepe³

Resumo

Eficiência energética continua sendo um dos problemas importantes no desenvolvimento de dispositivos de comunicação sem fio operados por bateria. Uma das alternativas para diminuição do consumo energético em transmissões sem fio é o uso de transceptores baseados em receptores regenerativos. Comercialmente, esses transceptores são utilizados em aplicações que demandam mecanismos bastante simples de comunicação. Neste trabalho, descrevemos o protocolo *UART Radio Protocol (URP)*, relativo à Camada Física do Modelo de Referência para Interconexão de Sistemas Abertos (RM-OSI), para transferência de dados estruturados por meio de transceptores baseados em *circuitos receptores regenerativos*. Esse protocolo permite a utilização desse tipo de transceptor em aplicações mais complexas e o desenvolvimento de protocolos de comunicação de camadas superiores. Adicionalmente, o artigo descreve um módulo de *hardware* de comunicação no qual o URP e um protocolo simples de controle de acesso ao meio estão implementados. O módulo de comunicação possui baixo consumo de energia e alta sensibilidade, quando comparado com transceptores tipicamente utilizados em redes de sensores sem fio. Esse módulo vem sendo utilizado para a interconexão de dispositivos em aplicações de automação industrial.

Palavras-chave: Rádio Receptor Regenerativo. Protocolo. Camada Física. Eficiência Energética. Redes de Sensores sem Fio.

*Submetido em 28/02/2015 – Aceito em 07/04/2015

¹PPGM – Programa de Pós-Graduação em Mecatrônica, UFBA – Universidade Federal da Bahia, Brasil – janderson@blanski.com.br

²PPGM – Programa de Pós-Graduação em Mecatrônica, UFBA – Universidade Federal da Bahia, Brasil – fassis@ufba.br

³PPGM – Programa de Pós-Graduação em Mecatrônica, UFBA – Universidade Federal da Bahia, Brasil – lapo.if@gmail.com

Abstract

Energy efficiency continues to be one of the important issues in the development of wireless devices operated by batteries. One of the approaches to decrease energy expenditure in wireless communication is the use of transceivers based on regenerative receiver circuits. Commercially, these transceivers have been used in scenarios which demand very simple communication mechanisms. In this paper we describe the *UART Radio Protocol (URP)*, a Physical Layer protocol for the exchange of structured data through wireless transceivers based on regenerative receivers. URP enables the use of this type of transceivers in more complex applications and the development of upper layers communication protocols. Additionally, the paper describes a hardware communication module which implements URP and a simple medium access control protocol. The communication module has low energy consumption and high sensibility when compared to transceivers typically used in wireless sensor nodes. The module has been used for interconnecting devices wirelessly in industrial automation applications.

Keywords: Regenerative radio receiver. Protocol. Physical layer. Energy efficiency. Wireless sensor networks.

1 INTRODUÇÃO

Aplicações típicas de redes de sensores sem fio envolvem a utilização de dispositivos cuja fonte energética são baterias não recarregáveis ou substituíveis. O desenvolvimento de mecanismos para obtenção de eficiência no consumo de energia desses dispositivos continua sendo um problema relevante, apesar dos avanços obtidos nos últimos anos (NGUYEN et al., 2011; ZUO et al., 2014; WU; CHEN; CHEN, 2014).

Diferentes abordagens têm sido utilizadas para diminuir o consumo energético desses dispositivos. Uma delas é o desenvolvimento de transceptores com alta eficiência energética (VOUILLOZ; DECLERCQ; DEHOLLAIN, 2001; BAUWELINCK; MELANGE; VANDEWEGE, 2006; HWANG, 2010; VIDOJKOVIC. et al., 2011). Uma alternativa para o projeto desses transceptores, que tem recebido interesse crescente, é a utilização de receptores regenerativos. Esses receptores funcionam com a utilização de um amplificador sintonizado por um circuito tanque, que realimenta parte do sinal amplificado positivamente, ficando na iminência da oscilação. A realimentação positiva multiplica o ganho do componente ativo por um fator de até 15000 vezes (ARMSTRONG, 1922), permitindo a construção de receptores com alta sensibilidade (-105 dBm) e baixo consumo de energia, quando comparados com receptores não regenerativos.

Apesar do grande potencial para utilização em sistemas alimentados por baterias, atualmente, os receptores regenerativos são utilizados comercialmente apenas em aplicações que demandam mecanismos bastante simples de comunicação, tais como envio de senhas para sistemas de segurança ou envio de códigos para controle remoto. A falta, até então, de uma pilha de protocolos de comunicação que propicie o envio de sequências de bits representando dados estruturados dificulta a aplicação prática dos rádios receptores regenerativos no desenvolvimento de sistemas de maior complexidade.

Considerando esse cenário, foi desenvolvido o protocolo **UART Radio Protocol (URP)**. O URP é um protocolo relativo à Camada Física do Modelo de Referência para Interconexão de Sistemas Abertos (RM-OSI/ISO, de *Reference Model - Open Systems Interconnection / International Organization for Standardization*) (ISO/IEC, 1994) para transceptores baseados em receptores regenerativos. O URP implementa um conjunto de funcionalidades básicas de comunicação (relativas à Camada Física), que permite a troca de dados estruturados, utilizando dispositivos baseados em rádios regenerativos e a construção de protocolos mais complexos de camadas superiores.

Com base no URP, foi desenvolvido um módulo de *hardware* de comunicação sem fio no qual, além do URP, foi implementado também um protocolo simples de controle de acesso ao meio (MAC, de *Medium Access Control*). O URP permite o uso de um módulo de rádio transceptor regenerativo conectado diretamente à saída de uma porta *Universal Asynchronous Receiver-Transmitter (UART)*, disponível usualmente em microcontroladores comerciais. Os

protocolos desenvolvidos incorporam mecanismos para detecção de colisão, recuperação de dados em quadros colididos e codificação do sinal em código Manchester, o que diminui a vulnerabilidade do rádio receptor a ruídos.

O foco deste artigo é a descrição do URP, incluindo discussões sobre os principais aspectos que afetam o desenvolvimento de um protocolo relativo à Camada Física para transceptores baseados em receptores regenerativos. Adicionalmente, este artigo descreve o módulo de *hardware* desenvolvido e o protocolo simples de controle de acesso ao meio, implementado apenas para a utilização do módulo em aplicações reais.

A principal contribuição deste trabalho é a descrição de um protocolo relativo à Camada Física que permite a transmissão de dados estruturados através do uso de um transceptor baseado em receptor regenerativo. Com a possibilidade de transmissão de dados estruturados e por ser baseado em receptores regenerativos, esse módulo pode ser utilizado no desenvolvimento de nós de redes de sensores sem fio de muito baixo consumo de energia e alta sensibilidade, quando comparados com nós baseados em transceptores usualmente empregados nestas redes. O módulo de comunicação desenvolvido tem sido utilizado na implementação de diversas aplicações reais de automação, que envolvem o monitoramento de dezenas de dispositivos industriais.

O restante do artigo está organizado da forma descrita a seguir. Na Seção 2, é apresentada uma discussão sobre trabalhos relacionados. Na Seção 3, são descritos o princípio de funcionamento e as principais características dos circuitos receptores regenerativos. Na Seção 4, é descrita a arquitetura de *hardware* do dispositivo implementado. Na Seção 5, é descrita a pilha de protocolos desenvolvida (camadas Física e de Enlace). Na Seção 6, é apresentada uma discussão sobre como os aspectos específicos dos rádios regenerativos influenciaram o desenvolvimento do protocolo URP. Na Seção 7, são apresentados resultados de experimentos realizados com o objetivo de avaliar o desempenho do módulo de comunicação em relação à confiabilidade no envio de dados. A Seção 8 apresenta conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2 TRABALHOS RELACIONADOS

Eficiência energética continua sendo um importante problema no desenvolvimento de redes de sensores sem fio. Entre as abordagens utilizadas para diminuir o gasto energético dos nós e, com isto, prolongar o tempo de vida da rede, estão: utilização de algoritmos eficientes energeticamente para problemas fundamentais (por exemplo, roteamento (ZUO et al., 2014), difusão de mensagens (WANG et al., 2013), conectividade e cobertura (HAN et al., 2012), etc.); projeto de protocolos de controle de acesso ao meio (MERLIN; HEINZELMAN, 2010; ANCHORA et al., 2014); e projeto de transceptores eficientes energeticamente (MA et al., 2013; MCGREGOR; WASIGE; THAYNE, 2007; KIM et al., 2012; VIDOJKOVIC. et al.,

2011; BOHORQUEZ; CHANDRAKASAN; DAWSON, 2009) (dentre outros). O foco deste trabalho é a descrição de um protocolo referente à Camada Física para transceptores baseados em receptores regenerativos e, portanto, está mais relacionado ao último item⁴.

Tipicamente, nós de redes de sensores utilizam transceptores digitais, encapsulados em um único *chip* (*single chip transceivers*). Esses transceptores proporcionam uma série de recursos ao projetista da rede, como, por exemplo, possibilidade de configuração de frequência de recepção e transmissão, largura de banda de canais, espaçamento entre as frequências dos canais e potência de transmissão. Esses transceptores oferecem, também, diferentes técnicas de modulação no mesmo dispositivo, como *Direct Sequence Spread Spectrum* (DSSS) e *Frequency Hopping Spread Spectrum* (FHSS) (RAPPAPORT, 2002). Essa flexibilidade é conseguida por meio de arquiteturas digitais, que combinam blocos de circuitos digitais e analógicos. Usualmente, os dispositivos de comunicação sem fio comerciais utilizam transceptores digitais baseados em receptores não regenerativos. Dentre os transceptores comumente usados estão: CC1101 (TEXAS INSTRUMENTS, 2011b); CC2420 (TEXAS INSTRUMENTS, 2004), compatível com IEEE 802.15.4 (IEEE, 2011); CC1000 (TEXAS INSTRUMENTS, 2011a). Cada bloco interno dos transceptores digitais tem um custo em relação ao consumo de energia. Na maioria desses transceptores, os blocos internos podem ser desligados ou ligados para economizar energia. Quando uma operação de comunicação está sendo feita (transmissão ou recepção), todos os blocos relativos à respectiva operação são ligados.

Os receptores regenerativos, por seu princípio de funcionamento (descrito na Seção 3), possuem uma arquitetura com uma pequena quantidade de componentes, em comparação com transceptores digitais baseados em receptores não regenerativos. Com isto, transceptores baseados em receptores regenerativos possuem um consumo de energia inferior. Com a demanda crescente por sistemas de comunicação sem fio alimentados por bateria, métodos para construção de receptores regenerativos passaram a ser foco de pesquisa.

Diferentes técnicas têm sido adotadas para diminuir o consumo de energia em transceptores baseados em receptores regenerativos (MA et al., 2013; MCGREGOR; WASIGE; THAYNE, 2007; KIM et al., 2012; VIDOJKOVIC. et al., 2011; BOHORQUEZ; CHANDRAKASAN; DAWSON, 2009). Alguns autores (MA et al., 2013) desenvolveram um receptor regenerativo que opera com uma tensão de alimentação muito baixa, de 0,6V, trabalhando na iminência da barreira de potencial do semicondutor. O transceptor criado obteve um consumo de apenas 180 μW no modo de recepção e 160 μW para transmitir um sinal com intensidade de -17 dBm. Outros autores (MCGREGOR; WASIGE; THAYNE, 2007) reduziram o ciclo de trabalho (*duty cycle*) da modulação do sinal, que se traduziu na redução da largura (período) do *bit* de nível lógico 1, representado na modulação *On-Off Keying* (OOK) pela ligação da portadora de rádio frequência. Desse modo, foi possível reduzir tanto o custo de recepção quanto o de transmissão de um transceptor baseado em receptor regenerativo, conseguindo um consumo

⁴Neste trabalho, foi utilizado um protocolo de controle de acesso ao meio simples, suficiente para permitir o uso do módulo de comunicação na conexão sem fio de alguns dispositivos em aplicações de automação industrial. A contextualização deste protocolo no estado-da-arte é, portanto, fora do escopo deste trabalho.

de $10 \mu W$ no modo de recepção e $30 \mu W$ para transmitir um sinal com intensidade de -11 dBm. O consumo de energia desses transceptores é significativamente inferior ao consumo de transceptores tipicamente utilizados em redes sem fio tradicionais, como será ilustrado na Seção 3.3.

O protocolo URP foi desenvolvido para permitir o uso de transceptores regenerativos em aplicações de redes de sensores. Os transceptores regenerativos, utilizados neste trabalho, não têm a mesma flexibilidade de operação encontrada nos transceptores com arquitetura digital, mas eles têm consumo de energia reduzido, e alta sensibilidade, e mostraram-se adequados para atender a requisitos de aplicações em automação industrial.

O protocolo URP trata de aspectos relacionados à Camada Física para receptores regenerativos genéricos, encontrados comumente no mercado, descritos da seção 7.4. Outros trabalhos na literatura, que descrevem protocolos relativos a esta camada, apresentam descrições bastante específicas para o tipo de receptor utilizado nos respectivos trabalhos (RABAEY et al., 2006).

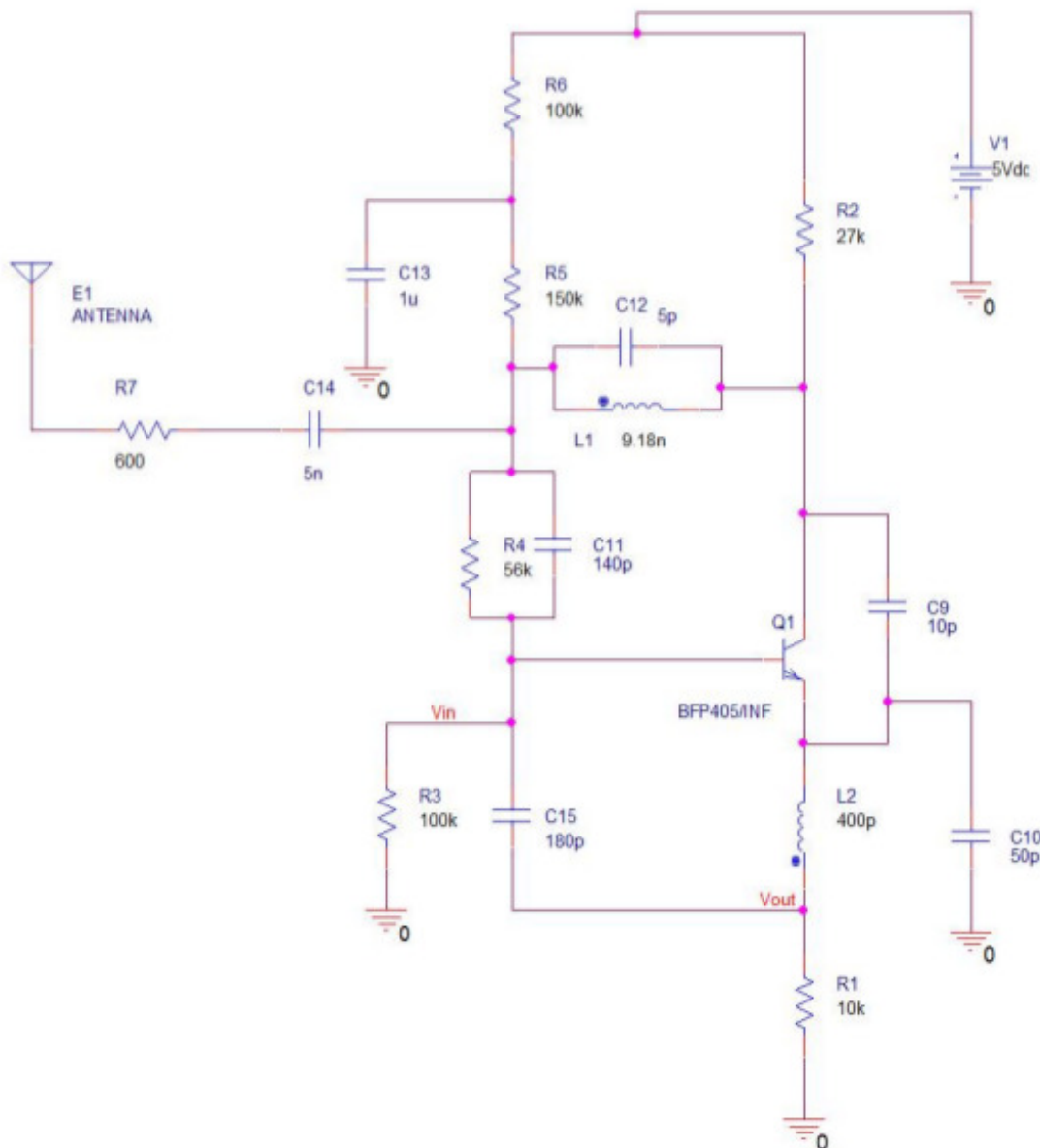
3 RECEPTOR REGENERATIVO

3.1 Princípio de Funcionamento

Um **Rádio Receptor Regenerativo** (rádio 3R) é um circuito receptor de rádio baseado em um amplificador constituído por um oscilador fracamente realimentado positivamente, de modo que fique na iminência da oscilação, como mostra a Figura 1. A realimentação é feita por um circuito tanque LC (C_{12} , L_1) sintonizado na frequência de recepção, permitindo a realimentação somente dessa frequência. O sinal de rádio frequência (RF) é captado pela antena (E_1) e inserido na base de um transistor (Q_1). O sinal é amplificado pelo transistor e uma fração do sinal amplificado é realimentado 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 (ARMSTRONG, 1922).

O oscilador fracamente realimentado tende a oscilar na mesma frequência e fase do sinal de entrada, fazendo com que o circuito rejeite outros sinais com frequência ou fase diferentes (ARMSTRONG, 1922). Essa rejeição a outros sinais permanece por um determinado tempo, mesmo quando o sinal sintonizado é interrompido.

Figura 1 – Circuito de um Rádio Receptor Regenerativo



Fonte: Elaborado pelos autores

3.2 Particularidades do Receptor Regenerativo

Os rádios 3R possuem três particularidades importantes, que devem ser levadas em consideração para a elaboração de um protocolo relativo à Camada Física para esses dispositivos. Cada um desses aspectos influenciou o desenvolvimento de mecanismos específicos na implementação do protocolo URP, como será descrito mais tarde neste artigo.

A primeira particularidade está relacionada ao ganho do circuito, que aumenta gradativamente quando um sinal é sintonizado, levando um determinado tempo para atingir o valor máximo. Em função disso, para a transmissão de dados é necessário o envio de um preâmbulo (sequência específica de *bits*) antes dos *bits* que representam as informações úteis, para que o

ganho do rádio receptor se adequa ao sinal.

A segunda particularidade está relacionada à realimentação positiva dos rádios 3R. Quando o sinal é realimentado positivamente, o amplificador regenerativo continua oscilando de modo controlado por um determinado tempo, mesmo quando o sinal recebido pelo rádio é interrompido. Nesse tempo, o receptor permanece insensível à captação de ruídos e a outros sinais de rádio com fases diferentes. Essa característica deve ser levada em consideração para a definição do tempo máximo que a portadora de RF pode ficar desligada para a transferência de bits zero na modulação *On-Off Keying* (OOK), normalmente, utilizada com esse tipo de receptor.

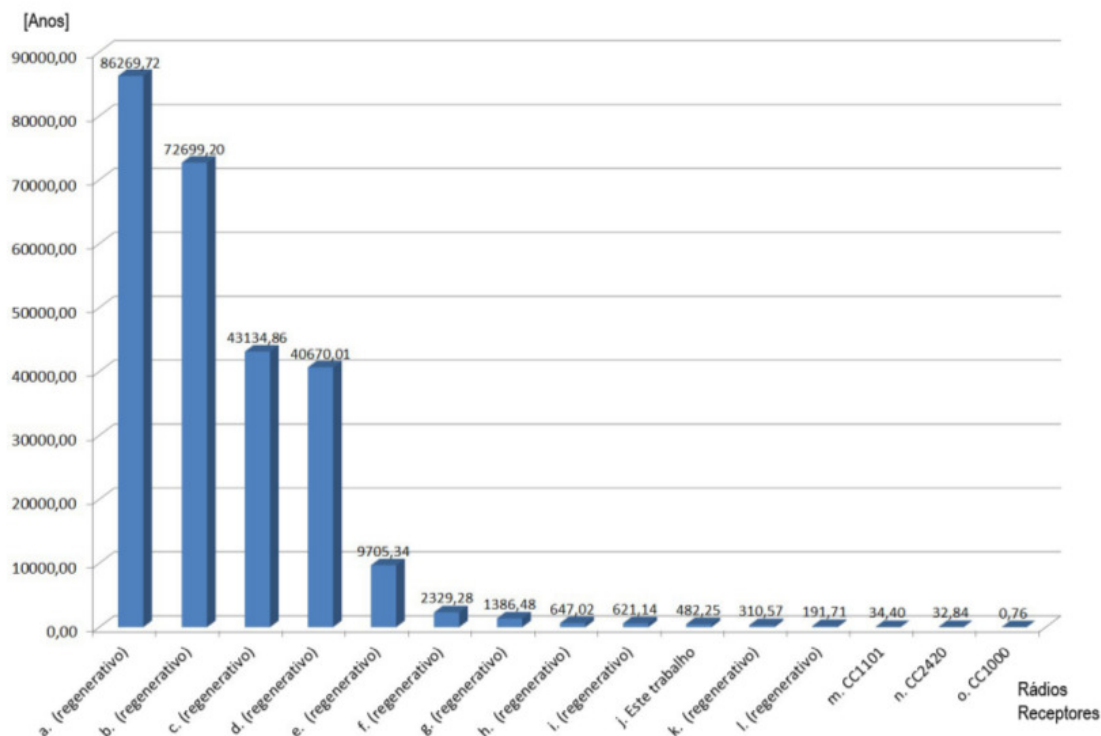
A terceira particularidade se refere ao fato de o receptor regenerativo gerar um trem de pulsos aleatórios na saída digital do receptor, quando não há sinal sintonizado. Esse ruído é causado pelo método de demodulação OOK, que, devido ao seu princípio de funcionamento (sinal ligado-desligado), demodula o ruído de fundo do sinal de RF, quando o mesmo varia a sua intensidade na entrada do amplificador.

3.3 Eficiência Energética dos Receptores Regenerativos

Em função do reduzido número de componentes utilizados, receptores regenerativos possuem baixo consumo de energia, quando comparados a receptores não regenerativos.

A Figura 2 ilustra o tempo em que vários receptores levariam para consumir a energia equivalente à de uma bateria alcalina AA de 2300 mAh, recebendo um quadro com 30 *bytes* a cada 5 segundos. Os rádios 3R obtiveram um desempenho energético bastante superior em relação aos transceptores com modulação digital *single chip* CC1101, CC1000 e CC2420, comumente utilizados em redes de sensores sem fio (por exemplo, o CC2420 é utilizado em dispositivos SUN SPOT (ARSENEAU et al., 2006) e Imote2 (CROSSBOW, 2011). O rádio 3R desenvolvido em trabalho anterior (KIM et al., 2012) obteve o melhor desempenho energético, podendo levar 86.269 anos para esgotar a energia equivalente a uma bateria alcalina AA nas condições consideradas.

Figura 2 – Tempo para os rádios receptores consumirem a energia equivalente a uma bateria alcalina AA



Legenda:

- a. KIM ET AL., 2012
- b. VIDOJKOVIC. ET AL., 2011
- c. MA ET AL., 2013
- d. MONCUNILL-GENIZ ET AL., 2007
- e. OTIS, CHEE E RABAEY, 2005
- f. BOHORQUEZ, CHANDRAKASAN E DAWSON, 2009
- g. CHEN, FLYNN E HAYES, 2007
- h. VOUILLOZ, DECLERCQ E DEHOLLAIN, 2001
- i. MCGREGOR, WASIGE E THAYNE, 2007
- j. ANYANG, 2007 (Receptor regenerativo utilizado neste trabalho)
- k. JOEHL ET AL., 2001
- l. BAUWELINCK, MELANGE E VANDEWEGE, 2006
- m. TEXAS INSTRUMENTS, 2011b CC1101
- n. TEXAS INSTRUMENTS, 2004 CC2420
- o. TEXAS INSTRUMENTS, 2011a CC1000

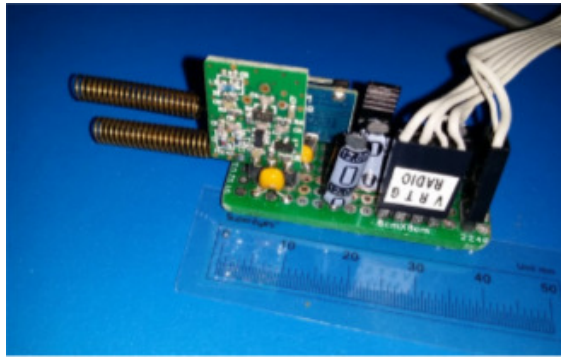
Fonte: Elaborado pelos autores

A Tabela 1 apresenta algumas características adicionais de alguns transceptores baseados em receptores não regenerativos, tipicamente utilizados em plataformas de redes de sensores sem fio e redes baseadas no padrão IEEE 802.11, e transceptores baseados em rádios regenerativos.

4 MÓDULO DE COMUNICAÇÃO - *HARDWARE*

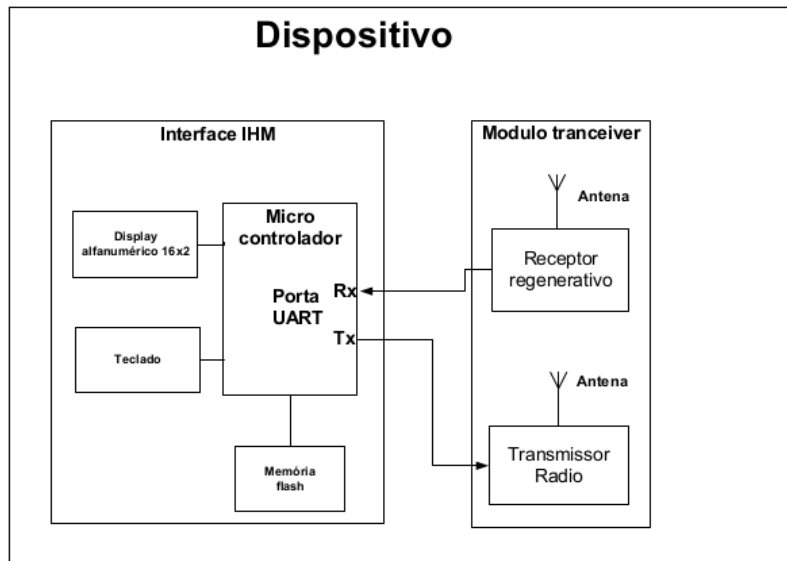
A Figura 3 ilustra o transceptor desenvolvido, baseado em um circuito receptor regenerativo. O diagrama de blocos do módulo de comunicação, associado a uma interface de operação, é apresentado na Figura 4. A estação de comunicação completa é mostrada na Figura 5.

Figura 3 – Módulo transceptor montado, com módulos de rádio receptor e transmissor



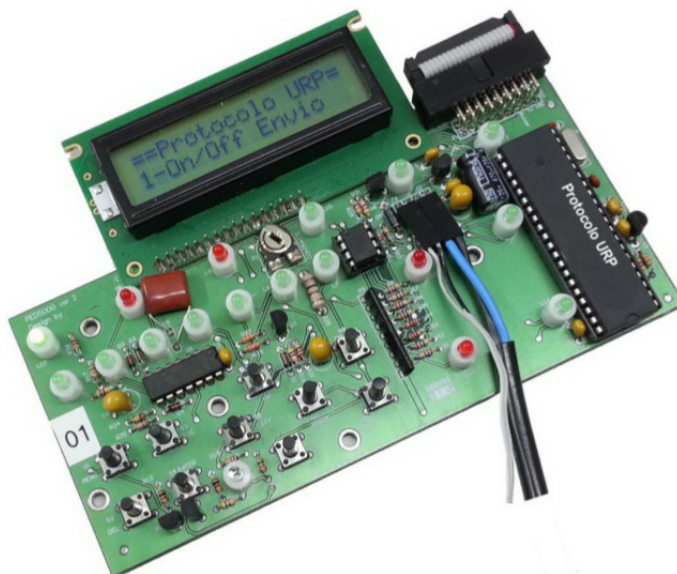
Fonte: Elaborado pelos autores

Figura 4 – Diagrama de bloco do hardware do dispositivo



Fonte: Elaborado pelos autores

Figura 5 – Estação de comunicação



Fonte: Elaborado pelos autores

Na Tabela 1, é possível verificar o consumo baixo de energia e a alta sensibilidade dos receptores regenerativos quando comparados com os outros tipos de receptores.

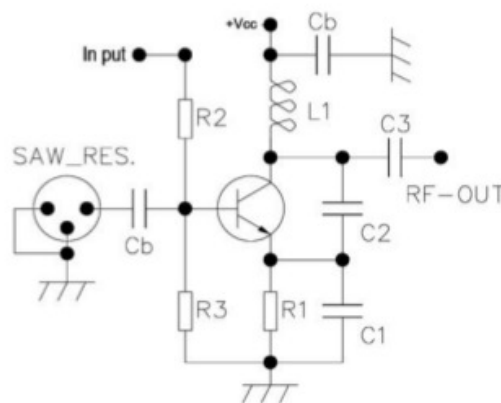
Tabela 1 – Características de Transceptores Regenerativos e Não Regenerativos

Rádio Receptor	Potência Rx (mW)	Sensibilidade (dBm)	Taxa de Dados (kbps)	Frequência (MHz)
Receptores Não Regenerativos				
CC1000	24.42	-109	2.4	43
CC1101	56.43	-104	250	433
CC2420	65.01	-94	250	2400
CC3000 (IEEE 802.11)	320.1	-95	5400	2400
Receptores Regenerativos				
(BAUWELINCK; MELANGE; VANDEWEGE, 2006)	0.81	-100	1	433
(HWANG, 2010)	0.42	-	200	10000
(VIDOJKOVIC. et al., 2011)	0.32	-75	500	2400
(VOUILLOZ; DECLERCQ; DEHOLLAIN, 2001)	1.2	-113	1.2	1000
J04V (usado neste trabalho)	0.16	-105	6	433
(ANYANG, 2007)				

Fonte: Elaborado pelos autores

A interface homem-máquina (IHM) foi montada com um microcontrolador *core* 8051, com 64 kB de memória de programa e 1250 *bytes* de memória RAM, com um *clock* de 22.1 MHz, um *display* de cristal líquido (16x2), um teclado e memória *flash* para salvar as configurações do protocolo de comunicação. Neste trabalho, foi utilizado o *Receiver Module J04V*, produzido pela Anyang (ANYANG, 2007). No projeto do transmissor, foi utilizado um circuito de rádio OOK bastante simples. Esse circuito é baseado em um oscilador Colpitts com a frequência de oscilação estabilizada por um ressonador cerâmico como mostra a Figura 6. O circuito completo pode ser montado com apenas um transistor, um ressonador cerâmico e alguns componentes passivos, resultando em um produto de baixo custo. 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 LC tanque, realimentado positivamente através de uma derivação capacitiva na malha base-emissor do transistor (GOTTLIEB, 1997). O circuito transmissor utilizado tem frequência de operação de 433 MHz.

Figura 6 – Esquema do transmissor com modulação OOK



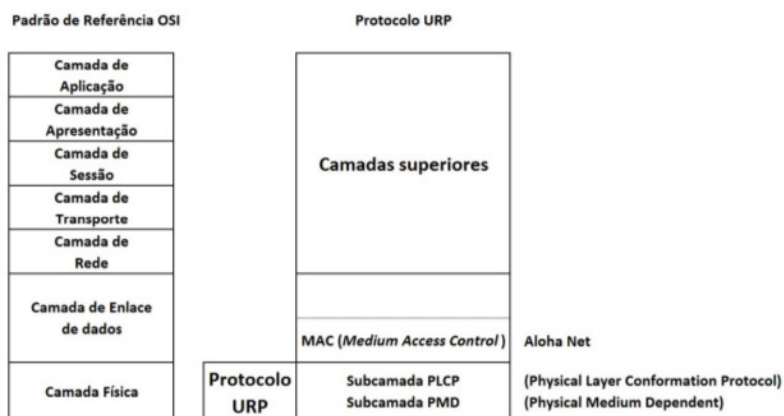
Fonte: Elaborado pelos autores

5 PROTOCOLO URP

Como indicado anteriormente, esse trabalho tem foco no desenvolvimento do protocolo URP, associado à Camada Física. O protocolo URP foi estruturado em dois componentes (subcamadas), representados na Figura 7: *Physical Layer Protocol* (PLP), que implementa as funções de controle associadas à camada, e *Physical Medium Dependent Entity* (PMD), que implementa as funções de transmissão direta dos *bits*.

Um protocolo simples de controle de acesso ao meio foi desenvolvido, no entanto, para, juntamente com o protocolo URP, permitir o desenvolvimento de aplicações de sensoriamento baseadas no dispositivo.

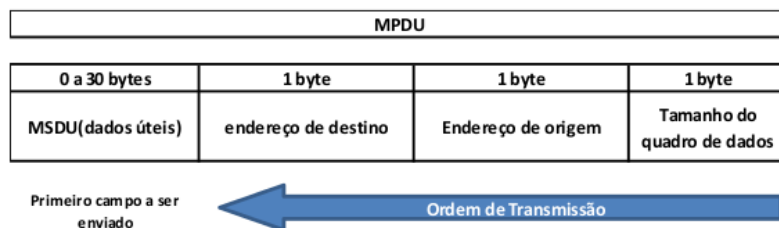
Figura 7 – Protocolo URP



Fonte: Elaborado pelos autores

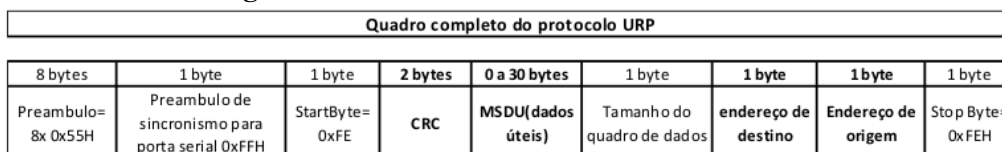
Os campos das Unidades de Dados de Protocolo (PDUs, de *Protocol Data Units*) correspondentes à subcamada MAC e à Camada Física, estão apresentados, respectivamente, nas Figuras 8 e 9.

Figura 8 – Formato da PDU da subcamada MAC



Fonte: Elaborado pelos autores

Figura 9 – Formato da PDU da Camada Física



Fonte: Elaborado pelos autores

Os componentes de cada uma das camadas estão descritos nas subseções a seguir.

5.1 PLP

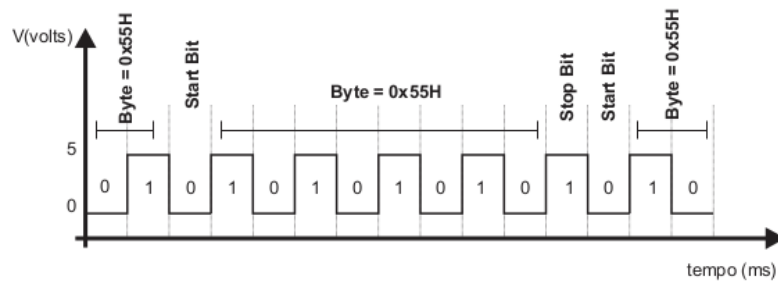
Esse componente é responsável por encapsular os dados da camada superior (MAC) em uma PDU da Camada Física (PPDU, de *Physical Layer PDU*), acrescentando os seguintes campos: preâmbulo (um campo de 8 *bytes* e um campo de 1 *byte*); *start byte*; CRC de 16 *bits*; e *stop byte*, conforme mostra a Figura 9.

O PLP mantém um *buffer* rotatório para recepção de PDUs, uma nova PDU entra no endereço zero do *buffer* e todos os outros *bytes* são deslocados de uma posição de endereço em direção ao final do *buffer*. O tamanho do *buffer* deve ser, no mínimo, igual ao tamanho máximo da PDU sem o preâmbulo, acrescido de um. Todos os *bytes* que chegam pelo rádio, independentemente de serem ruído ou não, devem ser inseridos na mesma ordem que chegam no *buffer* de entrada do protocolo. Desse modo, se houver a chegada de uma PDU, ela será inserida no *buffer*, independentemente de ter sido detectada ou não. Todas as vezes em que um *byte* for inserido no *buffer*, é verificado se o mesmo coincide com o *stop byte*. Se coincidir, significa que pode haver uma PDU válida no *buffer*. Se isso for verdade, o primeiro *byte* do *buffer* conterá o *stop byte*; o segundo e o terceiro *bytes* conterão os endereços de origem e destino; o quarto *byte* conterá o tamanho do quadro; o penúltimo e o antepenúltimo *bytes* conterão o CRC; o último *byte* conterá o *start byte*; e os campos restantes conterão os dados. Nesse caso, é feita a validação da PDU pelo cálculo do CRC. Caso seja válida, os dados são copiados sem os campos de CRC, *start byte* e *stop byte* para a lista de PDUs validadas, e a camada superior é avisada da chegada de um novo quadro.

5.2 PMD

O componente PMD é executado pelo *hardware* da porta serial UART e realiza as seguintes funções: divide o *byte* recebido em *bits*; acrescenta os *flags* de controle *start bit* e *stop bit*; envia os *bits* pela saída Tx da porta serial; detecta e faz a leitura dos *bits* que são recebidos pela entrada Rx da porta serial; e informa ao PLP quando chega um *byte* pela entrada Rx da porta serial. Os *bits* são codificados de acordo com a codificação Manchester, que será discutida na Seção 6.3. A Figura 10 mostra os detalhes dos bits de sincronismo e ilustra um exemplo para o *byte* 0x55h.

Figura 10 – Sincronismo do byte 0x55h



Fonte: Elaborado pelos autores

5.3 Protocolo de Controle de Acesso ao Meio

O protocolo MAC realiza uma função simples de transmissão de dados com confirmação. Os quadros transmitidos são sempre confirmados. Um nó com dado a transmitir envia o quadro e aguarda uma confirmação por 0.5s. Caso não receba a confirmação, reenvia o quadro por um número predeterminado de vezes. Quando o receptor recebe o quadro, o nó, simplesmente, envia um quadro de confirmação.

A simplicidade do protocolo o torna adequado a aplicações em dispositivos com poucos recursos computacionais, como os baseados em microcontroladores de pequeno porte, com no mínimo 64 *bytes* de RAM. O desempenho do protocolo, como será demonstrado na Seção 7, foi satisfatório para aplicações com baixo tráfego e com tamanho de quadros pequenos.

Os campos de quadros da subcamada MAC estão indicados na Figura 8. São utilizados campos para indicar o endereço de origem (1 *byte*), de destino (1 *byte*) e para o tamanho do campo de dados. Como pode ser observado, os nós são identificados por endereços de até 1 *byte*.

6 DECISÕES DE PROJETO

Nesta seção, serão discutidas algumas questões necessárias relacionadas a decisões de projeto, considerando-se as propriedades específicas dos receptores regenerativos.

6.1 Definição do Preâmbulo para o Protocolo URP

Conforme descrito na Seção 3, 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 desse circuito é o fato de o ganho de tensão aumentar gradativamente quando

o sinal é sintonizado Isso acontece devido à característica ressonante do circuito. A depender da intensidade do sinal, no início da sintonização, quando o ganho do receptor ainda não atinge o valor máximo, pode ocorrer corrupção dos dados devido à baixa relação sinal-ruído. Para evitar esse problema, é preciso enviar um preâmbulo por um determinado tempo, até que o circuito receptor regenerativo atinja um ganho suficiente para uma recepção de sinal estável. Para a definição desse tempo foram realizados testes experimentais com uma quantidade conhecida de *bytes* de preâmbulo com o valor 0x55h (01010101). Esse valor foi escolhido por três motivos:

- O nível DC do quadro com o dado 0x55h é igual a zero. Isso evita que o sinal seja bloqueado pelos acoplamentos capacitivos do circuito.
- O *byte* composto pelo número 0x55h proporciona uma detecção confiável pelo *hardware* da porta serial para todos os *bytes* do preâmbulo transmitidos. Na Figura 10, pode ser observado que, para qualquer transição de 1 para 0, que possa ser detectada como o início de um *byte* (*start bit*), depois de 9 *bits* haverá um *stop bit* com nível zero. Isso faz com que o *byte* com valor 0x55H seja validado e recebido pelo *hardware* da porta serial.
- O *byte* composto pelo número 0x55h limita o período em que a portadora fica desligada (*bit* 0) ao menor tempo possível, equivalente ao período de 1 *bit*, diminuindo a possibilidade da captação de ruídos nesse período.

Para a determinação do tamanho do preâmbulo, foram feitos experimentos com transmissões entre dois dispositivos a diferentes distâncias (distâncias variando de 2 a 100 metros). Nos experimentos, foram enviadas sequências de *bytes* 0x55h. No máximo 4 *bytes* de preâmbulo foram perdidos. Com isso, definiu-se o tamanho do preâmbulo de 8 *bytes* 0x55h mais um *byte* 0xFFh, o que oferece uma larga margem de segurança em relação ao tempo máximo que o receptor regenerativo leva para se estabilizar.

6.2 Efeito de Captura

Transmissões de quadros em ambiente sem fio estão sujeitos ao *efeito de captura* (*capture effect*). Esse efeito ocorre quando, durante o recebimento de um quadro, chega ao nó recebedor um sinal de maior potência correspondente a um quadro enviado por outro nó (WHITEHOUSE et al., 2005). Caso não haja um tratamento especial, ambos os quadros podem ser perdidos, devido à colisão.

No caso do receptor regenerativo, um problema semelhante ocorre quando o ruído digital, gerado na saída do demodulador do rádio receptor, confunde-se com o *byte* de início de PDU. Caso não haja um procedimento de tratamento adequado, a rotina de recepção pode iniciar o procedimento de leitura dos *bytes* da PDU incorreta. Se chegar alguma PDU real no

decorrer desse procedimento, essa pode ser perdida, porque a rotina de recepção poderá estar ocupada recebendo a PDU inválida.

A questão da recuperação de dados no caso de efeito de captura é um problema clássico dos protocolos de redes sem fio. Diversas soluções para o problema têm sido propostas na literatura. Uma solução simples consiste em se verificar continuamente a chegada de uma nova PDU durante a recepção de outra (KUROSE; ROSS, 2002). Essa verificação consiste na busca de um preâmbulo e cabeçalho entre os dados que estão sendo recebidos. Se forem encontrados, a recepção da PDU anterior (se houver) é cancelada e dá-se início à recepção de uma nova PDU. Em redes IEEE 802.11, um método chamado MIM (*Message In Message*) é utilizado (BOER et al., 1999). Nessas redes, monitora-se a ocorrência de um acréscimo na energia do sinal recebido. Se esse acréscimo de energia for detectado, cancela-se a recepção da PDU atual e passa-se a tratar a recepção de uma nova PDU. Porém, essa solução pode causar perdas de PDUs se a potência do sinal de RF variar, e não pode ser aplicada a sistemas de rádios mais simples, que não possuam recursos de *hardware* para monitorar a energia do sinal captado.

No URP, um método alternativo foi implementado. Ele se baseia em dois procedimentos básicos: forma de armazenamento das PDUs em um *buffer* circular e modificação do instante de detecção de PDU.

Tradicionalmente, cada campo da PDU é reconhecido em tempo real para depois ser memorizado no *buffer*. No URP, todos os *bits* que são detectados pelo demodulador, inclusive os dados aleatórios gerados pela demodulação de ruídos, são armazenados em um *buffer* rotatório, e os dados são analisados somente depois do armazenamento.

Em relação ao instante de detecção de PDU, no URP, a existência de um quadro será considerada quando for detectado o *stop byte*. Dessa forma, quando o quadro é detectado, ele se encontra inserido completamente na memória, permitindo sua validação imediata. Caso algum ruído tenha gerado a ocorrência de um padrão semelhante ao *stop byte*, a inexistência de um quadro válido poderá ser imediatamente detectada.

6.3 Sequências de *Bits* Zero

Em experimentos iniciais realizados durante o desenvolvimento do protocolo URP, foi observado que a taxa de erro de transmissão aumentava com o aumento da quantidade de *bytes* zero sendo transmitidos, chegando-se a taxas de sucesso de recebimento de PDUs muito pequenas. Esse comportamento pode ser explicado pelo princípio de funcionamento da modulação OOK, que opera ligando a portadora de RF para os *bits* 1 e desligando-a para o nível zero. Quando o sinal de RF é interrompido por um curto espaço de tempo, 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, 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 é suficiente para que o rádio receptor regenerativo consiga captar ruídos. Quando isso ocorre, os *bits* zero são trocados por *bits* 1, causando a corrupção dos dados transmitidos.

Um modo de tratar o problema causado pela ausência da portadora durante o envio de *bits* zero é minimizar ao máximo o período em que a portadora fica desligada. Isso pode ser conseguido limitando-se a quantidade de *bits* zero enviados sequencialmente.

Para isso, no URP, foi adotada a codificação dos bits em código Manchester. Essa codificação foi originalmente projetada para enviar o sinal do relógio da estação transmissora embutido nos dados, para que o receptor pudesse recuperar esse sinal e fazer a amostragem dos *bits* no tempo certo, e para eliminar o nível DC do sinal (TANENBAUM; WETHERALL, 2011; KUROSE; ROSS, 2002). Para tal finalidade, na codificação Manchester os *bits* lógicos de valor zero são representados por dois pulsos consecutivos com valores zero e 1, e os *bits* lógicos de nível 1 são representados por pulsos consecutivos com valores 1 e zero. Dessa forma, a sequência de *bits* zero presente no sinal fica limitada para no máximo dois *bits*, minimizando o problema da corrupção de dados.

7 EXPERIMENTOS

Nesta Seção, são descritos os experimentos realizados para avaliar a taxa de sucesso de transmissão de PDUs, na presença de: (a) ruído no ambiente e amplificação desse ruído pelo receptor regenerativo; (b) efeito de captura; e (c) PDUs com sequências de *bits* zero. Também foram realizados experimentos para a verificação de teste de compatibilidade do protocolo URP com receptores regenerativos de diversos fabricantes encontrados no mercado.

Todos os experimentos foram realizados com a taxa de transmissão máxima permitida pelo *hardware* utilizado, que é de 5kbps. Todas as transmissões foram realizadas com a potência do sinal de saída do transmissor configurada para 3 dBm (2 mW). A distância entre os nós foi mantida em 2 metros. Os resultados foram obtidos com 95% de certeza. Cada um dos experimentos foi realizado com a quantidade de 50 ensaios, sendo que, para cada ensaio, foi padronizado o envio de 10000 quadros, cada um com 10 *bytes* de dados.

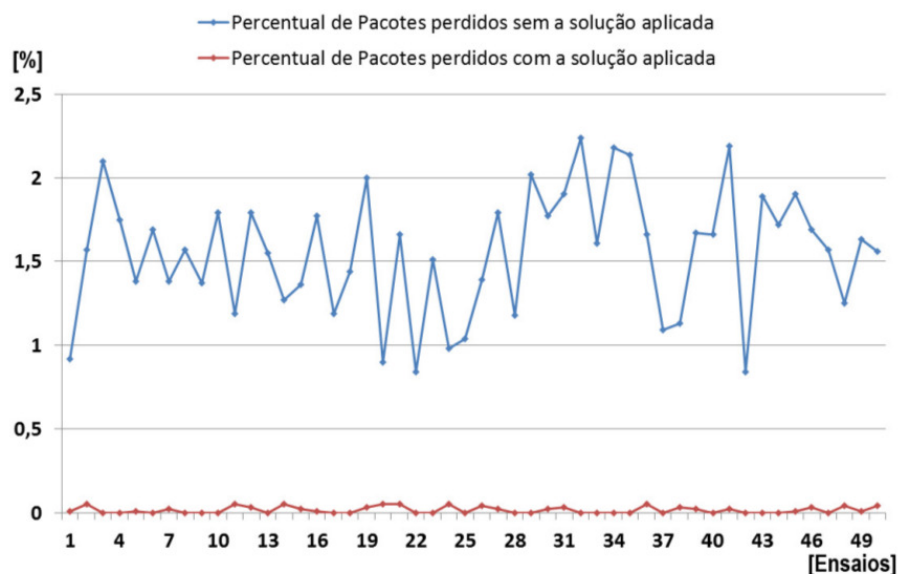
7.1 Robustez quanto a Ruído no Ambiente

Esse 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, conforme discutido na Seção 3.2. O expe-

rimento foi realizado em um ambiente industrial com presença significativa de ruído de fundo, o que foi evidenciado pela geração constante de dados aleatórios pelo rádio receptor regenerativo. Para fazer essa comparação, foram realizados 50 ensaios com um mecanismo de detecção de quadros tradicional, onde o *start byte* (início do quadro) é detectado no momento em que o byte é recebido pelo rádio receptor, e 50 ensaios com o mecanismo de detecção de quadros do URP, como descrito na Seção 6. Cada ensaio teve as características descritas acima. Cada *byte* de dados dos quadros era composto pelo número hexadecimal 0x55h. O experimento completo durou aproximadamente 54 horas.

A média percentual de quadros perdidos, quando utilizado um protocolo com mecanismo de detecção de quadros tradicional foi de 1,553%, com desvio padrão de 0,369%. Para o protocolo URP, a média percentual de quadros perdidos ficou em 0,016%, com desvio padrão de 0,019%, demonstrando que a solução obteve um desempenho satisfatório, conforme apresentado pela Figura 11.

Figura 11 – Gráfico da avaliação dos resultados do algoritmo para de recuperação de quadros colididos



Fonte: Elaborado pelos autores

7.2 Efeito Captura

Para avaliar a recuperação de quadros em caso de colisão com efeito de captura, foram realizados experimentos enviando quadros intencionalmente interrompidos no campo de dados, seguidos de quadros completos, simulando o resultado de colisão entre os quadros. Os cenários criados simulam a situação de colisão representada na Figura 12 (LEE et al., 2007). Existem outros cenários que resultam no efeito de captura (LEE et al., 2007), mas os cenários simulados correspondem aos casos em que o receptor deve deixar o recebimento de uma PDU e iniciar o de outra. O ensaio foi realizado num ambiente com pouca 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 pelo URP e a perda de 100% dos quadros quando utilizado um protocolo com mecanismo de detecção de quadros tradicional, demonstrando que o algoritmo se comportou de modo eficiente no experimento realizado.

Figura 12 – Quadro com maior potência enviado junto com os dados de outro quadro com menor potência (LEE et al., 2007)



Fonte: Elaborado pelos autores

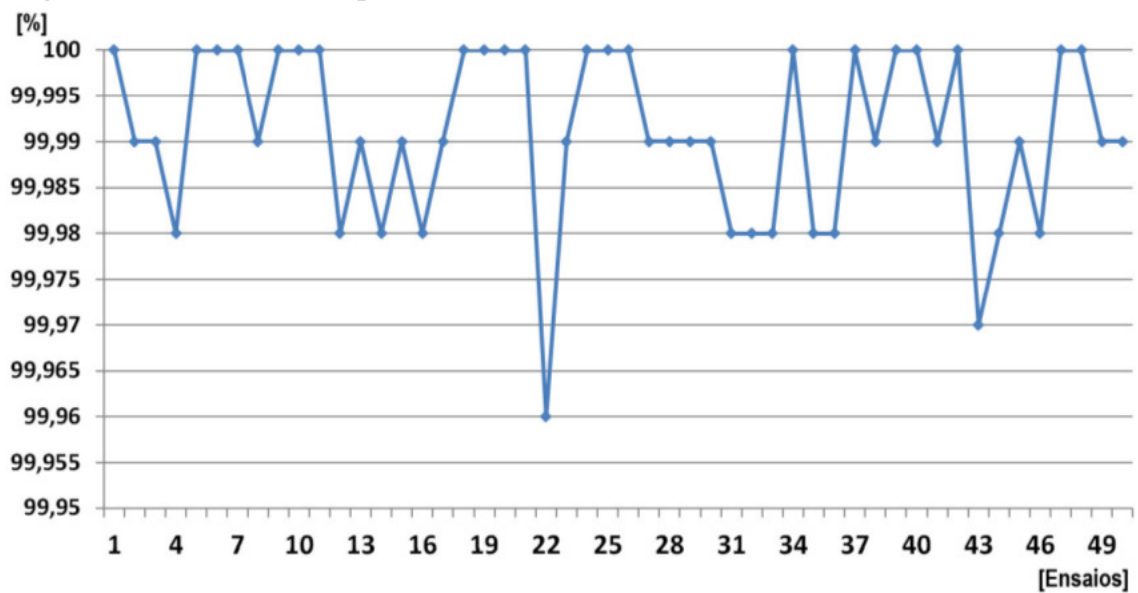
7.3 Robustez a Sequências de *Bits* Zero

Para realizar o experimento para a demonstração do desempenho do URP, em relação à vulnerabilidade a interferências eletromagnéticas durante sequências de *bits* zero, foram enviados, nos ensaios, quadros com *bytes* com valor zero em seus campos de dados.

Conforme descrito na Seção 6.3, o erro gerado pelo envio de *bits* zero é influenciado pela intensidade de ruído eletromagnético do ambiente. Levando isso 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.

Os resultados mostraram que o protocolo URP obteve um excelente desempenho no experimento realizado. O percentual médio de quadros enviados com sucesso para os quadros codificados em Manchester foi de 99,99% com desvio padrão de 0,01%, enquanto que, para o protocolo sem a codificação Manchester, apenas 1,47% dos quadros foram enviados com sucesso como descreve a Figura 13.

Figura 13 – Percentual de quadros codificados em *Manchester* transmitidos com sucesso

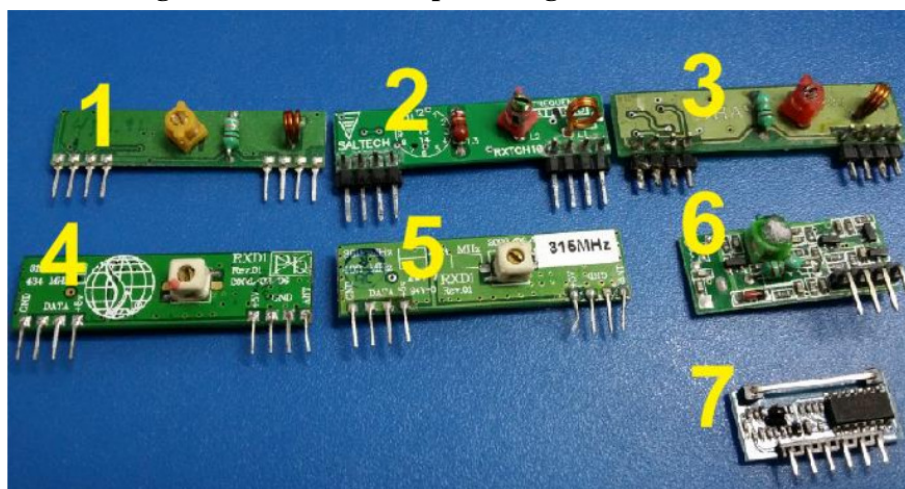


Fonte: Elaborado pelos autores

7.4 Teste de compatibilidade do protocolo URP

O protocolo URP foi desenvolvido para ser utilizado com rádios receptores regenerativos de fabricantes diversos do mercado. Para avaliar a compatibilidade do protocolo, foram realizados ensaios experimentais com sete modelos, de seis fabricantes diferentes: 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 14.

Figura 14 – Rádios receptores regenerativos testados



Fonte: Elaborado pelos autores

A taxa de transmissão utilizada nos ensaios foi a mais alta suportada por todos os dispositivos: 3kbps, limitada pelo modelo RWS-371-6 da Wenshing. 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 0x55h. Os resultados dos ensaios mostraram que todos os modelos de rádio testados foram compatíveis com o protocolo URP. Cada rádio receptor regenerativo recebeu 500000 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.

8 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

A extrema simplicidade do circuito de rádio receptor regenerativo, dada pela sua característica intrínseca de obter um alto ganho de tensão em uma única etapa, possibilita a construção de rádios receptores com alta eficiência energética (BAUWELINCK; MELANGE; VANDEWEGE, 2006; HWANG, 2010; VIDOJKOVIC. et al., 2011; VOUILLOZ; DECLERCQ; DEHOLLAIN, 2001). Esses rádios receptores podem atender a uma demanda crescente no mercado por dispositivos com baixo consumo de energia, como redes de sensores sem fio, em que a vida da rede depende da duração da bateria dos nós. Apesar do grande potencial para aplicações que exijam alta eficiência energética, existe uma carência de protocolos de comunicação baseados em receptores regenerativos, o que dificulta a sua utilização em aplicações reais que envolvem transferências de dados estruturados.

A contribuição deste trabalho foi o desenvolvimento do protocolo URP, que é um protocolo de comunicação referente à Camada Física do modelo de referência RM-OSI e que permite a transmissão de dados estruturados em dispositivos utilizando rádios regenerativos. O protocolo URP permite a construção de dispositivos como nós sensores com alta eficiência energética e alta sensibilidade. O transceptor desenvolvido conecta-se diretamente a uma porta serial UART, disponível na maioria dos microcontroladores, fazendo com que o módulo desenvolvido possa ser utilizado facilmente em aplicações práticas.

Durante o desenvolvimento do módulo, foram definidas soluções para as adversidades características do receptor regenerativo, como sensibilidade à captação de ruídos de RF e à geração de dados aleatórios na saída do rádio receptor. Os experimentos realizados demonstraram o comportamento adequado do protocolo na prática. Para o desenvolvimento de aplicações que fazem uso do dispositivo, foi utilizado um protocolo simples de controle de acesso ao meio, adequado para os cenários simples de automação industrial.

Como atividades futuras, propõe-se o desenvolvimento de um protocolo MAC e o projeto de um protocolo de rede para a criação de um nó baseado em receptores regenerativos para aplicações de redes de sensores sem fio mais complexas. O protocolo MAC deve ser esten-

dido para atender a cenários em que a possibilidade de colisão seja maior, para que se amplie o escopo de aplicação do módulo de comunicação.

Referências

ANCHORA, Luca et al. A novel MAC scheduler to minimize the energy consumption in a wireless sensor network. **Ad Hoc Networks**, v. 16, May 2014.

ANYANG. **Super-regenerative Receiver Module J04V – Datasheet**. Anyang New Century Electronic Research Institute Ltd, 2007. 3–6 p. Disponível em: <<http://www.ayxsj.com/>>. Acesso em: 20 mai. 2015.

ARMSTRONG, E.H. Some recent developments of regenerative circuits. In: IRE. **Proceedings...** [S.l.], 1922.

ARSENEAU, E. et al. Simplifying the development of sensor applications. In: OOPSLA'06 – ACM SIGPLAN INTERNATIONAL CONFERENCE ON OBJECT-ORIENTED PROGRAMMING, SYSTEMS, LANGUAGES AND APPLICATIONS, Portland, Oregon. **Proceedings...** USA, 2006.

BAUWELINCK, J.; MELANGE, C.; VANDEWEGE, J. **EDN**. Low-power, super-regenerative receiver targets 433-MHz ISM band: [s.n.], 2006.

BOER, J. et al. **Wireless lan with enhanced capture provision**, nov. 16 1999. US Patent 5,987,033. Disponível em: <<http://www.google.com/patents/US5987033>>. Acesso em: 20 mai. 2015.

BOHORQUEZ, J.; CHANDRAKASAN, A.P.; DAWSON, J.L. A 350 μ W CMOS MSK Transmitter and 400 μ W OOK Super-Regenerative Receiver for Medical Implant Communications. **IEEE Journal of Solid-State Circuits**, v. 44, n. 4, 2009.

CHEN, J.-Y.; FLYNN, M.P.; HAYES, J.P. A Fully Integrated Auto-Calibrated Super-Regenerative Receiver in 0.13. **IEEE Journal of Solid-State Circuits**, v. 42, n. 9, p. 1976–1985, 2007. ISSN 0018-9200. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4295182>>. Acesso em: 20 mai. 2015.

CROSSBOW. **Imote2.NET Edition - High Performance Wireless Sensor Network Node**. [S.l.], 2011. Document Part Number: 6020-0134-01 Rev_A.

GOTTLIEB, I.M. **Practical Oscillator Handbook**. [S.l.]: Newnes, 1997.

HAN, K. et al. Minimum-energy connected coverage in wireless sensor networks with omnidirectional and directional features. In: 13TH ACM INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON MOBILE AD HOC NETWORKING AND COMPUTING (MOBIHOC). **Proceedings...** [S.l.], 2012.

HWANG, C.J. **Ultra-Low Power Radio Transceiver for Wireless Sensor Networks**. 2010. Tese (Doutorado) — University of Glasgow.

IEEE. **IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks - Part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs) - IEEE Std 802.15.4-2011**. [S.l.], 2011.

ISO/IEC. **International Standard ISO/IEC 7498-1 - OSI - Open Systems Interconnection - Second Edition**. [S.l.]: ISO, 1994.

JOEHL, N. et al. **A Low-Power 1-GHz Super-Regenerative Transceiver with Time-Shared PLL Control**. [S.l.]: ISO, 2001. 1025–1031 p.

KIM, K. et al. Low-power cmos super-regenerative receiver with a digitally self-quenching loop. **IEEE Microwave and Wireless Components Letters**, ISO, v. 22, n. 9, p. 486–488, 2012. ISSN 1531-1309. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6275448>>. Acesso em: 20 mai. 2015.

KUROSE, James F; ROSS, Keith W. **Computer Networking A Top-Down Approach Featuring the Internet**. 2. ed. [S.l.]: Newnes, 2002. ISBN 978-0201976991.

LEE, J. et al. An experimental study on the capture effect in 802.11a networks. In: SECOND ACM INTERNATIONAL WORKSHOP ON WIRELESS NETWORK TESTBEDS, EXPERIMENTAL EVALUATION AND CHARACTERIZATION - WINTECH'07. **Proceedings...** [S.l.], 2007.

MA, C. et al. 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 Transactions on Biomedical Circuits and Systems**, v. 7, n. 6, p. 1–1, 2013. ISSN 1932-4545. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6523221>>. Acesso em: 20 mai. 2015.

MCGREGOR, I.; WASIGE, E.; THAYNE, I. Sub-50 μw , 2.4 GHz super-regenerative transceiver with ultra low duty cycle and a 675 μw high impedance super-regenerative receiver. In: 37TH EUROPEAN MICROWAVE CONFERENCE. **Proceedings...** [S.l.], 2007. p. 1322–1325. ISBN 9782874870019.

MERLIN, C.J; HEINZELMAN, W.B. Duty cycle control for low-power listening mac protocols. **IEEE Transactions on Mobile Computing**, v. 9, n. 11, 2010. ISSN 1932-4545.

MONCUNILL-GENIZ, F.X. et al. An 11-mb/s 2.1-mw synchronous superregenerative receiver at 2.4 GHz. **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**, v. 55, n. 6, p. 1355–1362, 2007. ISSN 0018-9480. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4230879>>. Acesso em: 20 mai. 2015.

NGUYEN, H.A. et al. Sensor node lifetime: An experimental study. In: 2011 IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON PERVASIVE COMPUTING AND COMMUNICATIONS WORKSHOPS (PERCOM WORKSHOPS). **Proceedings...** [S.l.], 2011.

OTIS, B.; CHEE, Y.H.; RABAEY, J.A. 400 μw -rx, 1.6mw-tx superregenerative transceiver for wireless sensor networks. In: ISSCC. 2005 IEEE INTERNATIONAL DIGEST OF TECHNICAL PAPERS. SOLID-STATE CIRCUITS CONFERENCE, 2005. **Proceedings...** [S.l.]: IEEE, 2005. v. 36, n. 3, p. 0–7803–8904–2. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1494036>>. Acesso em: 20 mai. 2015.

RABAEY, Jan et al. Ultra-low-power design. **IEEE Circuits and Devices Magazine**, v. 22, n. 4, p. 23–29, 2006. ISSN 87553996. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=1708372>. Acesso em: 20 mai. 2015.

RAPPAPORT, T. **Wireless Communications: Principles and Practice**. [S.l.]: Prentice Hall, 2002.

TANENBAUM, A.S.; WETHERALL, D.J. **Redes de Computadores - Quinta Edição**. [S.l.]: Pearson Education, 2011.

TEXAS INSTRUMENTS. **CC2420 Transceiver Datasheet**. [S.l.]: Texas Instruments, 2004.

TEXAS INSTRUMENTS. **CC1000 Transceiver Datasheet**. [S.l.]: Texas Instruments, 2011a. 1–23 p.

TEXAS INSTRUMENTS. **CC1101 Low-Power Sub-1 GHz RF Transceiver Datasheet**. [S.l.]: Texas Instruments, 2011b.

VIDOJKOVIC., M. et al. A 2.4GHz ulp ook single-chip transceiver for healthcare applications. In: 2011 IEEE INTERNATIONAL SOLID-STATE CIRCUITS CONFERENCE. **Proceedings...** [S.l.], 2011.

VOUILLOZ, A.; DECLERCQ, M.; DEHOLLAIN, C. A low-power cmos super-regenerative receiver at 1 GHz. **IEEE Journal of Solid-State Circuits**, v. 36, n. 3, 2001.

WANG, S. et al. Corlayer: a transparent link correlation layer for energy efficient broadcast. In: 19TH ANNUAL INTERNATIONAL CONFERENCE ON MOBILE COMPUTING AND NETWORKING (MOBICOM). **Proceedings...** [S.l.], 2013.

WHITEHOUSE, K. et al. Exploiting the capture effect for collision detection and recovery. In: SECOND IEEE WORKSHOP ON EMBEDDED NETWORKED SENSORS. **Proceedings...** [S.l.], 2005.

WU, S.-H.; CHEN, M.-S.; CHEN, C.-M. Optimally adaptive power-saving protocols for ad hoc networks using the hyper quorum system. **IEEE/ACM Transactions on Networking**, v. 22, n. 1, 2014.

ZUO, J. et al. Cross-layer aided energy-efficient opportunistic routing in ad hoc networks. **IEEE Transactions on Communications**, v. 62, n. 2, 2014.