



Protocolo de Troca de Dados para Rádio Receptor Regenerativo com Alta Eficiência Energética*

A Data Exchange Protocol for Regenerative Radio Receivers with High Energy Efficiency

Autor2015¹

Autor2015²

Autor2015³

Resumo

Eficiência energética continua sendo um dos problemas importantes no desenvolvimento de dispositivos de comunicação sem fio operados por bateria. Neste trabalho, descrevemos um protocolo de camada Física chamado URP (*UART Radio Protocol*) e um protocolo simples de controle de acesso ao meio para transferência de dados através de transceptores baseados em *circuitos receptores regenerativos*. A falta até então de uma pilha de protocolos adequada para transmissão de dados estruturados para sistemas baseados em receptores regenerativos permitia seu uso apenas em aplicações bastante simples, como acionamento de sistemas por controle remoto. Com base nos protocolos apresentados neste trabalho, foi desenvolvido um módulo de *hardware* de comunicação que permite a troca de dados estruturados através de dispositivos baseados em rádios receptores regenerativos. O módulo de comunicação possui um consumo de energia extremamente baixo e alta sensibilidade, quando comparado a transceptores tipicamente utilizados em redes de sensores sem fio. O sistema apresentado neste trabalho tem sido utilizado na implementação de diversas aplicações reais de automação industrial.

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

* Artigo apresentado a revista Abakos.

¹ Instituição,
e-mail: Autor2015@Brasil.

² E-mail: e-mailAutor2015@
Instituição, Brasil.

³ E-mail: e-mailAutor2015@
Instituição, Brasil.

Abstract

Energy efficiency continues to be one of the important issues in the development of wireless devices operated by batteries. In this paper we describe a Physical Layer protocol called URP (*UART Radio Protocol*) and a simple medium access protocol for exchanging data with wireless transceivers based on *regenerative radio receiver circuits*. The lack so far of an appropriate protocol stack for exchanging structured data with devices based on regenerative radio receivers has restricted their use to very simple applications, like remote control applications. Based on the protocols described in this paper, we have built a wireless communication module that supports the exchange of structured data over devices based on regenerative radio receivers. The communication module has an extremely low energy consumption and high sensibility when compared to transceivers typically used in wireless sensor nodes. The system described in this paper has been used in many real industrial automation applications.

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

1 INTRODUÇÃO

A comunicação sem fio é base para o desenvolvimento de uma série de aplicações. Apesar dos diversos avanços obtidos nos últimos anos, o desenvolvimento de mecanismos para obtenção de eficiência no consumo de energia de dispositivos alimentados por baterias continua sendo um problema relevante (por exemplo, (NGUYEN et al., 2011; ZUO et al., 2014; WU et al., 2014)). Aplicações típicas de redes de sensores sem fio, por exemplo, envolvem a utilização de dispositivos cuja fonte energética são baterias não recarregáveis ou substituíveis (AKYILDIZ et al., 2002).

Economia de consumo energético de dispositivos pode ser obtida através de diversas abordagens. Uma delas é o desenvolvimento de transceptores com alta eficiência energética (VOUILLOZ et al., 2001; BAUWELINCK et al., 2006; HWANG, 2010; VIDOJKOVIC et al., 2011). Uma alternativa para o projeto destes transceptores que tem recebido interesse crescente é a utilização de *receptores regenerativos*. Inventados por Edwin Armstrong (IEEE, 2013) em 1914, um receptor regenerativo funciona 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 e baixíssimo consumo de energia.

Apesar do grande potencial para utilização em sistemas alimentados por baterias, atualmente os receptores regenerativos são utilizados comercialmente apenas para aplicações simples, como envio de senhas para sistemas de segurança ou envio de códigos para controle re-

moto. Estas aplicações demandam mecanismos bastante simples de comunicação. A falta de uma pilha de protocolos de comunicação adequada 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.

O foco deste trabalho é um protocolo relativo à Camada Física do Modelo de Referência RM-OSI/ISO (*Reference Model - Open Systems Interconnection / International Organization for Standardization*) (ISO/IEC, 1994) para transceptores baseados em receptores regenerativos. Este protocolo foi chamado de URP (*UART Radio Protocol*). Adicionalmente foi desenvolvido um módulo de *hardware* de comunicação sem fio no qual o URP e um protocolo simples de controle de acesso ao meio (correspondente à subcamada MAC - *Medium Access Control - Controle de Acesso ao Meio*) foram implementados. O URP e o protocolo MAC formam juntos um conjunto de funcionalidades básicas de comunicação, que permitem a troca de dados estruturados utilizando dispositivos baseados em rádios regenerativos e a construção de protocolos de camadas superiores mais complexos. O módulo descrito neste trabalho pode ser utilizado no desenvolvimento de redes de sensores sem fio de extremo baixo consumo de energia e alta sensibilidade. Ele já tem sido utilizado na implementação de diversas aplicações reais de automação que envolvem o monitoramento de dispositivos industriais.

O módulo de comunicação conecta-se diretamente à saída de uma porta UART (*Universal Asynchronous Receiver-Transmitter*), 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 artigo está organizado da seguinte forma. Na seção 2 apresentamos o princípio de funcionamento e as principais características dos circuitos receptores regenerativos. Na seção 3 é descrita a arquitetura de *hardware* do dispositivo implementado. Na seção 4 é descrita a pilha de protocolos desenvolvida (camadas Física e de Enlace). Na seção 5 é apresentada uma discussão sobre como os aspectos específicos dos rádios regenerativos influenciaram o desenvolvimento do protocolo URP. Na seção 6 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 7 apresenta as conclusões sobre o trabalho.

2 RECEPTOR REGENERATIVO

2.1 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 forma

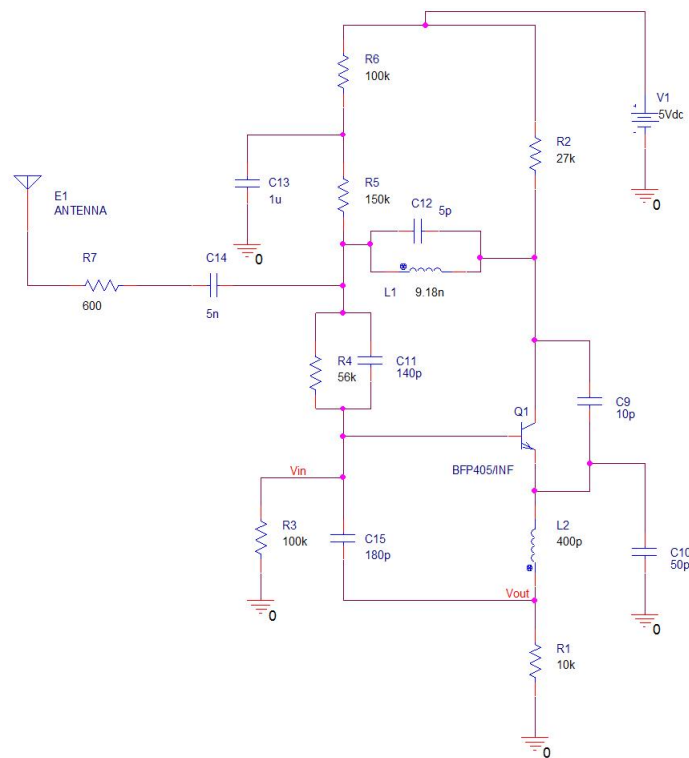


Figura 1 – Circuito de um Rádio Receptor Regenerativo

que fique na iminência da oscilação (Figura 1). A realimentação é feita por um circuito tanque LC (C_{12} , L_1) sintonizado na frequência de recepção, permitindo a realimentação somente desta 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). Esta rejeição a outros sinais permanece por um determinado tempo, mesmo quando o sinal sintonizado é interrompido.

2.2 Particularidades do Receptor Regenerativo

Os rádios 3R possuem três particularidades importantes, que devem ser levadas em consideração para a elaboração de um protocolo de camada Física para estes dispositivos. Cada um destes 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 disto, 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 adeque ao sinal.

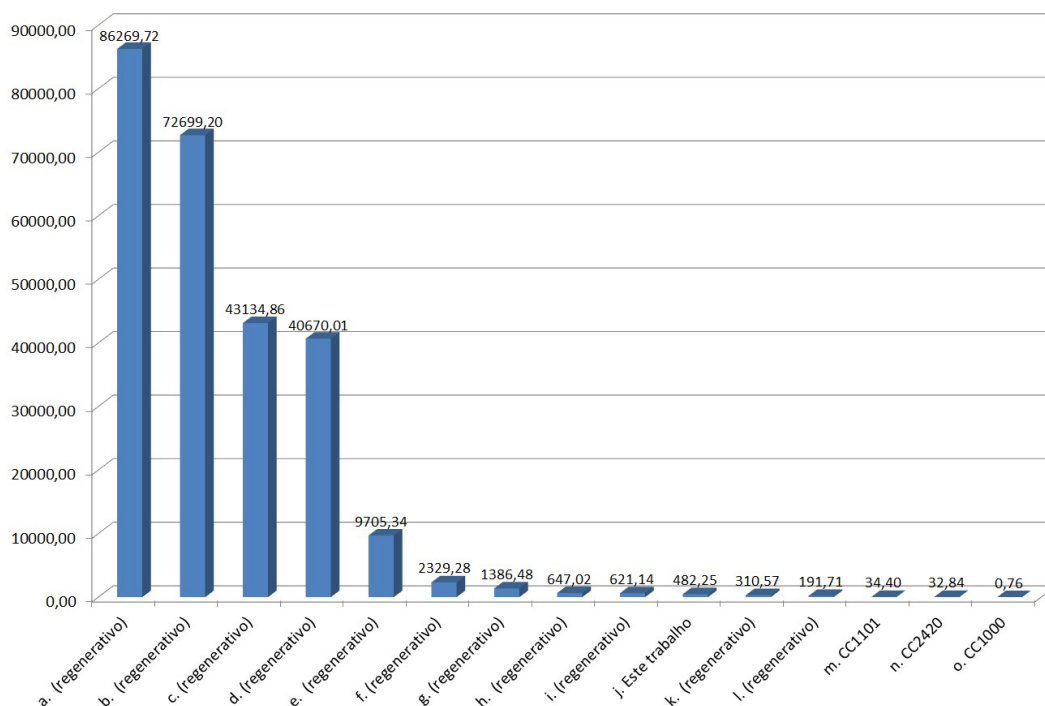
A segunda particularidade está relacionada à realimentação positiva dos rádios 3R. Quando o sinal é realimentado positivamente, o amplificador regenerativo continua oscilando de forma controlada por um determinado tempo, mesmo quando o sinal recebido pelo rádio é interrompido. Neste tempo, o receptor permanece insensível à captação de ruídos e a outros sinais de rádio com fases diferentes. Esta 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 OOK (*On-Off Keying*), normalmente utilizada com este tipo de receptor.

A terceira particularidade se refere ao fato de o receptor regenerativo gerar um trem de pulsos aleatório na saída digital do receptor, quando não há sinal sintonizado. Este 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.

2.3 Eficiência Energética dos Receptores Regenerativos

A característica principal do circuito dos rádios 3R é permitir a construção de um receptor de rádio com apenas uma etapa de amplificação, resultando em circuitos com baixo consumo de energia e baixo custo. Com a demanda crescente por sistemas de comunicação sem fio alimentados por bateria, vários autores publicaram trabalhos baseados no circuito receptor regenerativo buscando alta eficiência energética. Em (MA et al., 2013), por exemplo, os autores desenvolveram um rádio 3R que opera com uma tensão de alimentação baixíssima, de 0,6V, trabalhando na iminência da barreira de potencial do semicondutor. Isto permitiu reduzir ainda mais o consumo de energia do rádio transceptor, conseguindo um consumo de apenas 180 μW no modo de recepção e 160 μW para transmitir um sinal com intensidade de -17 dBm. Em (MCGREGOR et al., 2007) os autores reduziram o *duty cycle* da modulação do sinal, que se traduziu na redução da largura (período) do *bit* de nível lógico 1, representado na modulação OOK pela presença da portadora de rádio frequência. Desta forma, foi possível reduzir tanto o custo de recepção quanto o de transmissão de um transceptor baseado em 3R, conseguindo um consumo de 10 μW no modo de recepção e 30 μW para transmitir um sinal com intensidade de -11 dBm.

Diversos outros trabalhos descrevem receptores com excelentes resultados em relação ao custo de energia, quando comparados com os transceptores digitais *single chip* modernos, utilizados comumente em redes de sensores sem fio. A figura 2 ilustra o tempo que vários receptores levariam para consumir a energia equivalente à de uma bateria alcalina AA de 2300 mAh,


Legenda:

- | | |
|-----------------------------------|--|
| a. (KIM et al., 2012) | i. (MCGREGOR et al., 2007) |
| b. (VIDOJKOVIC et al., 2011) | j. (ANYANG, 2007) (Receptor regenerativo utilizado neste trabalho) |
| c. (MA et al., 2013) | k. (JOEHL et al., 2001) |
| d. (MONCUNILL-GENIZ et al., 2007) | l. (BAUWELINCK et al., 2006) |
| e. (OTIS et al., 2005) | m. (Texas Instruments, 2011b) CC1101 |
| f. (BOHORQUEZ et al., 2009) | n. (Texas Instruments, 2004) CC2420 |
| g. (CHEN et al., 2007) | o. (Texas Instruments, 2011a) CC1000 |
| h. (VOUILLOZ et al., 2001) | |

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

recebendo um quadro com 30 *bytes* a cada 5 segundos. A figura ilustra que os rádios 3R obtiveram um desempenho energético bastante superior em relação aos transceptores com modulação digital *single chip* CC1101, CC1000 e CC2420, 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 (KIM et al., 2012) obteve o melhor desempenho energético, podendo levar 86269 anos para esgotar a energia equivalente a uma bateria alcalina AA, nas condições consideradas.

A figura 3 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. Nesta figura pode-se verificar o gasto extremamente baixo de energia e a alta sensibilidade dos receptores 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	54000	2400
Receptores Regenerativos				
RXD1 (usado neste trabalho) (KEYMARK, 2002)	17.5	-105	6	433
(BAUWELINCK et al., 2006)	0.81	-100	1	433
(HWANG, 2010)	0.42	-	200	10000
(VIDOJKOVIC et al., 2011)	0.32	-75	500	2400
(VOUILLOZ et al., 2001)	1.2	-113	1.2	1000

Figura 3 – Características de Transceptores Regenerativos e Não Regenerativos

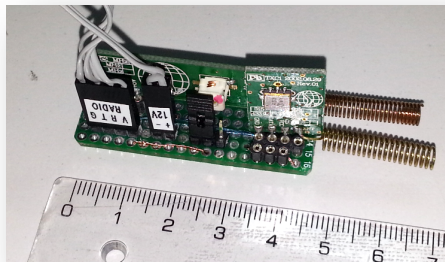


Figura 4 – Módulo transceptor montado, com módulos de rádio receptor e transmissor

3 MÓDULO DE COMUNICAÇÃO - HARDWARE

A figura 4 ilustra o transceptor desenvolvido, baseado em um circuito receptor regenerativo. O diagrama de blocos do módulo de comunicação, associado a uma interface de operação, aparece na figura 5. A estação de comunicação completa aparece na figura 6.

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 RXD1*, produzido pela Keymark Technology (KEYMARK, 2002).

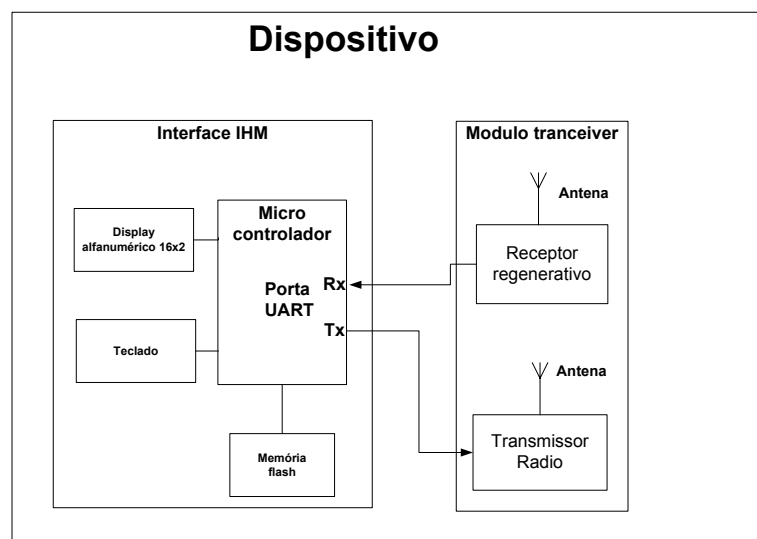


Figura 5 – Diagrama de bloco do hardware do dispositivo

No projeto do transmissor foi utilizado um circuito de rádio OOK bastante simples. Este circuito é baseado em um oscilador Colpitts com a frequência de oscilação estabilizada por um ressonador cerâmico (figura 7). 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, que é 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.

4 PROTOCOLOS DE COMUNICAÇÃO - PROTOCOLO URP

O módulo de comunicação possui componentes associados às camadas Física e de Enlace, como ilustrado na figura 8.

Como indicado anteriormente, este trabalho teve foco no desenvolvimento dos componentes associados à camada Física. Um protocolo simples de controle de acesso ao meio (MAC - *Medium Access Control*) foi desenvolvido, no entanto, para, juntamente com o protocolo URP, permitir o desenvolvimento de aplicações de sensoriamento baseadas no dispositivo. O protocolo MAC implementado está apresentado na seção 4.3.

Na camada Física, o protocolo URP foi estruturado em dois componentes (subcamadas): PLP (*Physical Layer Protocol*), que implementa as funções de controle associadas à camada, e PMD (*Physical Medium Dependent Entity*), que implementa as funções de transmissão direta dos bits.

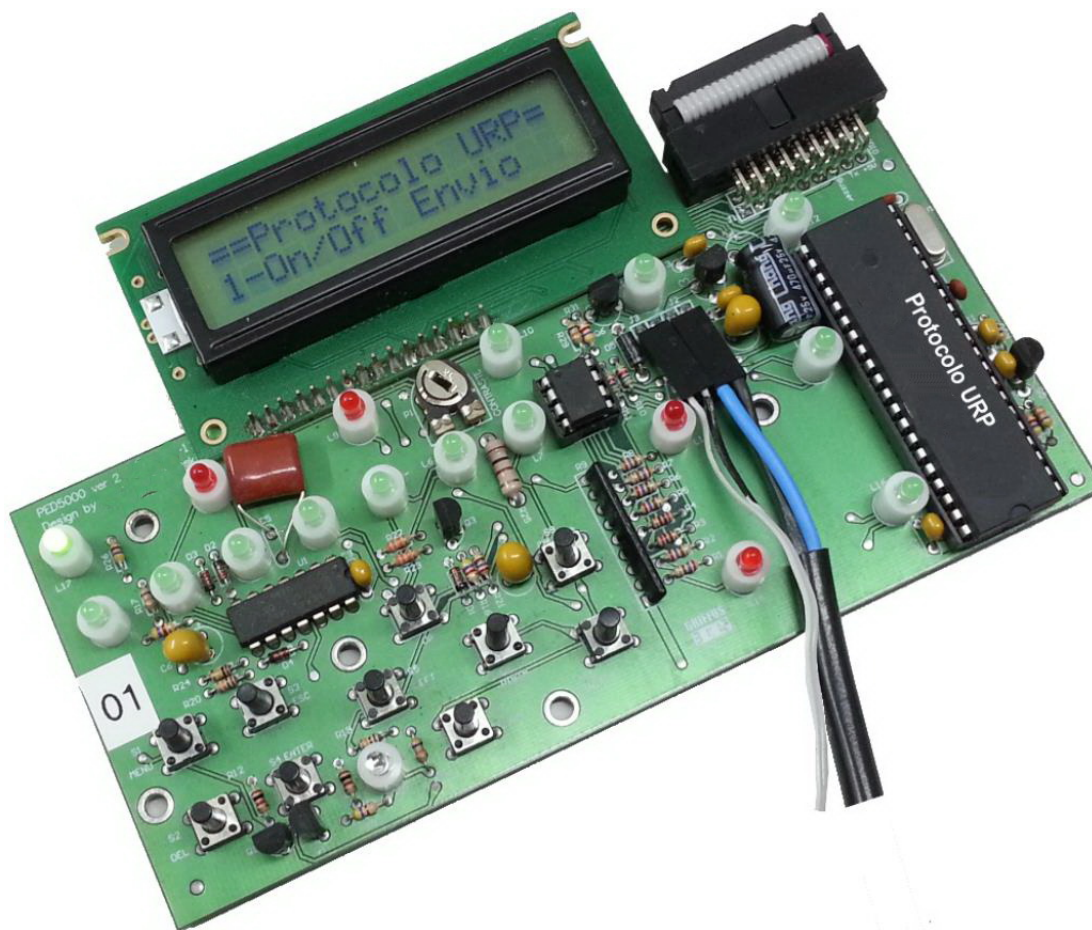


Figura 6 – Estação de comunicação

Os campos das PDUs (*Protocol Data Units* - Unidades de Dados de Protocolo) correspondentes à subcamada MAC e à camada Física estão apresentados, respectivamente, nas figura 9 e 10.

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

4.1 PLP

Este componente é responsável por encapsular os dados da camada superior (MAC) em uma PPDU (*Physical Layer PDU*), acrescentando os seguintes campos (ver figura 10): preâmbulo (um campo de 8 bytes e um campo de 1 byte); *start byte*; CRC de 16 bits; e *stop byte*.

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

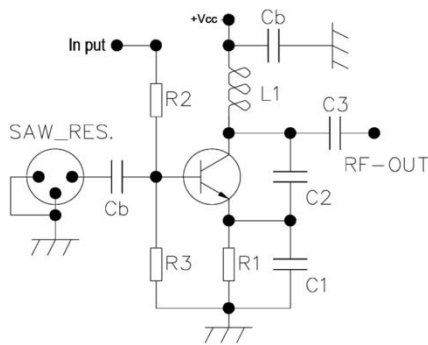


Figura 7 – Esquema do transmissor com modulação OOK

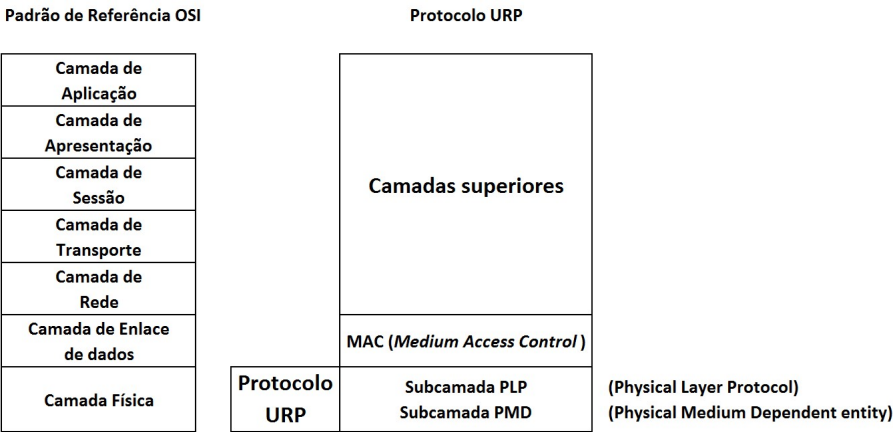


Figura 8 – Protocolo URP

no *buffer* de entrada do protocolo. Desta forma, se houver a chegada de uma PDU, ela será inserida no *buffer*, independentemente de ter sido detectada ou não. Todas as vezes 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 isto 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. Neste 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.

4.2 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 controles *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 (ver seção 5.3).

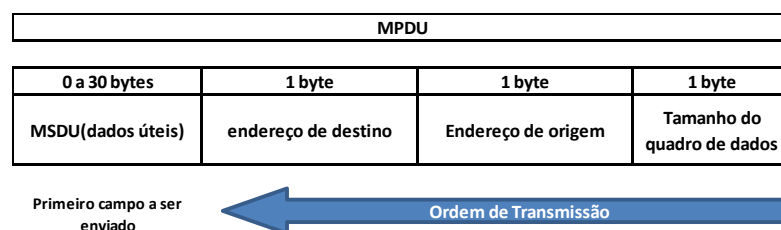


Figura 9 – Formato da PDU da subcamada MAC

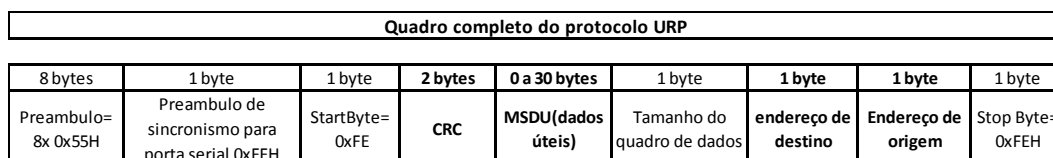


Figura 10 – Formato da PDU da Camada Física

A figura 11 mostra os detalhes dos bits de sincronismo (a figura ilustra um exemplo para o *byte* 0x55h).

4.3 Subcamada MAC

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 adequa à aplicação 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 6, foi satisfatório para aplicações com baixo tráfego e com tamanho de quadros pequenos.

Os campos de quadros da subcamada MAC estão indicados na figura 9. 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*.

5 DISCUSSÃO

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

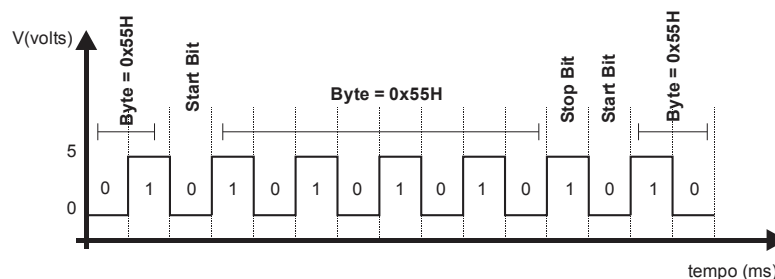


Figura 11 – Sincronismo do *byte* 0x55h

5.1 Definição do Preâmbulo para o Protocolo URP

Conforme descrito na seção 2, 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 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 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 de sinal estável. Para a definição deste tempo foram realizados testes experimentais com uma quantidade conhecida de *bytes* de preâmbulo com o valor 0x55h (01010101). Este valor foi escolhido por três motivos:

- O nível DC do quadro com o dado 0x55h é igual a zero. Isto 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 11 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, fazendo 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 neste 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 isto, 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.

5.2 Efeito de Captura

Transmissões de quadros em ambiente sem fio estão sujeitos ao *efeito de captura* (*capture effect*). Este efeito ocorre quando, durante o recebimento de um quadro, chega ao nó receptor 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 deste procedimento, esta pode ser perdida, porque a rotina de recepção poderá já 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, 2005). Esta 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). Nestas redes, monitora-se a ocorrência de um acréscimo na energia do sinal recebido. Se este acréscimo de energia for detectado, cancela-se a recepção da PDU atual e passa-se a tratar a recepção de uma nova PDU. Porém esta 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*. Desta forma, quando o quadro é detectado, ele já 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.

5.3 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.

Este 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 já é suficiente para que o rádio receptor regenerativo consiga captar ruídos. Quando isto ocorre, os *bits* zero são trocados por *bits* 1, causando a corrupção dos dados transmitidos.

A melhor forma de resolver 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. Isto pode ser conseguido limitando a quantidade de *bits* zero enviados sequencialmente.

A solução utilizada para resolver o problema no desenvolvimento do URP foi a codificação dos *bits* em código Manchester. Esta codificação foi originalmente projetada para enviar o sinal do relógio da estação transmissora embutido nos dados, para que o receptor pudesse recuperar este sinal e fazer a amostragem dos *bits* no tempo certo, e para eliminar o nível DC do sinal (TANENBAUM; WETHERALL, 2011; KUROSE; ROSS, 2005). 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. Desta forma, a sequência de *bits* zero presente no sinal fica limitada para no máximo dois *bits*, minimizando o problema da corrupção de dados.

6 EXPERIMENTOS

Nesta seção são descritos os resultados de experimentos realizados para avaliar a taxa de sucesso de transmissão de PDUs. Foram realizados experimentos para se verificar a taxa de envio correto de PDUs na presença de: (a) ruído no ambiente e amplificação deste 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.

6.1 Robustez quanto a Ruído no Ambiente

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 2.2). O experimento 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 esta 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 5. 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.

6.2 Efeito de 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 descrita em (LEE et al., 2007) representada na figura 12. 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



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

de 100% dos quadros quando utilizado um protocolo com mecanismo de detecção de quadros tradicional, demonstrando que o algoritmo se comportou de forma eficiente no experimento realizado.

6.3 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 5.3, 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.

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.

6.4 Teste de compatibilidade do protocolo URP

O protocolo URP foi desenvolvido para ser utilizado com diversos rádios receptores regenerativos 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 13.

A taxa de transmissão utilizada nos ensaios foi a mais alta suportada por todos os dispo-

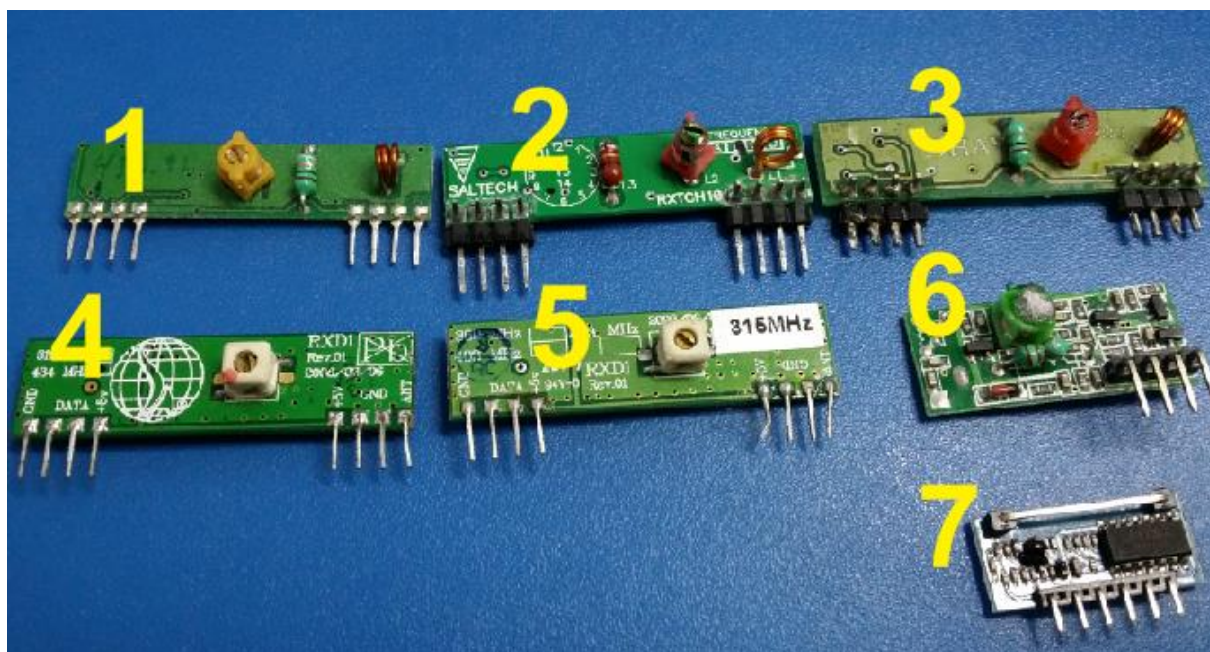


Figura 13 – Rádios receptores regenerativos testados

sitivos: 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.

7 CONCLUSÃO

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 et al., 2006; HWANG, 2010; VIDOJKOVIC et al., 2011; VOUILLOZ et al., 2001). Estes 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, um protocolo de comunicação referente à camada Física do modelo de referência OSI, que permite a transmissão de dados estruturados em dispositivos utilizando rádios regenerativos. O protocolo URP per-

mite, com isto, 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. Uma série de experimentos foi realizada, que demonstrou o comportamento adequado do protocolo na prática.

Para o desenvolvimento de aplicações utilizando o dispositivo criado, foi utilizado um protocolo simples de controle de acesso ao meio. Como uma das atividades futuras, está o desenvolvimento de um protocolo MAC mais adequado para a utilização do módulo de comunicação em cenários de redes de sensores sem fio.

O protocolo e os dispositivos de *hardware* descritos neste trabalho estão atualmente em uso, permitindo a comunicação de diversos equipamentos de automação industrial.

REFERÊNCIAS

AKYILDIZ, I.F. et al. A survey on sensor networks. **IEEE Communications Magazine**, v. 40, n. 8, 2002.

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

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

ARSENEAU, E. et al. Simplifying the development of sensor applications. In: **Proc. of the OOPSLA'06 - ACM SIGPLAN International Conference on Object-Oriented Programming, Systems, Languages and Applications**. Portland, Oregon, USA: [s.n.], 2006.

BAUWELINCK, J.; MELANGE, C.; VANDEWEGE, J. Low-power, super-regenerative receiver targets 433-MHz ISM band. **EDN**, v. 51, n. 3, 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>>.

BOHORQUEZ, J.; CHANDRAKASAN, A.; DAWSON, J. A 350 mu W CMOS MSK Transmitter and 400 mu 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>>.

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

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

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

IEEE. **Edwin H. Armstrong - Biography**. 2013. Disponível em: http://www.ieeeeghn.org/wiki/index.php/Edwin_H._Armstrong - Acessado em 18 de janeiro de 2013.

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. **IEEE Journal of Solid-State Circuits**, v. 36, n. 7, p. 1025–1031, 2001.

KEYMARK. **Keymark Technology Receiver Module RXD1**. 2002.

KIM, K. et al. Low-Power CMOS Super-Regenerative Receiver With a Digitally Self-Quenching Loop. **IEEE Microwave and Wireless Components Letters**, v. 22, n. 9, p. 486–488, 2012. ISSN 1531-1309. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6275448>.

KUROSE, J.F.; ROSS, K.W. **Computer Networking: A Top-Down Approach Featuring the Internet**. [S.l.]: Pearson, 2005.

LEE, J. et al. An experimental study on the capture effect in 802.11a networks. In: **Proc. of the Second ACM International Workshop on Wireless Network Testbeds, Experimental Evaluation and Characterization - WinTECH'07**. [S.l.: s.n.], 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>.

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. In: **Proc. of the 37th European Microwave Conference**. [S.l.: s.n.], 2007. p. 1322–1325. ISBN 9782874870019.

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>.

NGUYEN, H.A. et al. Sensor node lifetime: An experimental study. In: **Proc. of the 2011 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PERCOM Workshops)**. [S.l.: s.n.], 2011.

OTIS, B.; CHEE, Y.H.; RABAEY, J. A 400 μ W-RX, 1.6mW-TX superregenerative transceiver for wireless sensor networks. In: **ISSCC. 2005 IEEE International Digest of Technical Papers. Solid-State Circuits Conference, 2005**. IEEE, 2005. v. 36, n. 3, p. 396–398. ISBN 0-7803-8904-2. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1494036>.

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, 2011. 1–23 p.

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

VIDOJKOVIC, M. et al. A 2.4GHz ULP OOK single-chip transceiver for healthcare applications. In: **Procs of the 2011 IEEE International Solid-State Circuits Conference**. [S.l.: s.n.], 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.

WHITEHOUSE, K. et al. Exploiting the capture effect for collision detection and recovery. In: **Proc. of the Second IEEE Workshop on Embedded Networked Sensors**. [S.l.: s.n.], 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.