

Ferramentas para Mapear e Minimizar o Consumo de Energia em Redes de Sensores Sem Fio

Larissa S. Del Rio¹, Tiago A. Rizzetti¹, Alexandre Rodrigues², Luciane N. Canha²,
Marcio de Abreu Antunes³

¹Colégio Técnico Industrial de Santa Maria – CTISM – UFSM
Av. Roraima, 1000 – 97015-900 – Santa Maria – RS – Brasil

²Centro de Tecnologia – UFSM – Santa Maria – RS – Brasil

³Companhia Estadual de Energia Elétrica – Distribuição – CEEE-D – RS – Brasil
{larissa, alexandre.rodrigues}@redes.ufsm.br, rizzetti@ctism.ufsm.br,
lucianecanha@ufsm.br, marcioaa@ceee.com.br

Abstract. *A Wireless Sensor Network (WSN) can be defined as a set of devices capable of collecting information without the presence of a physical structure interconnecting these devices. One of the most critical points in a WSN is power consumption, because the main power source of the network components are batteries. The useful life of the network is conditioned to the duration of the batteries. This paper presents some of the existing solutions in the literature that can minimize and/or optimize energy consumption in a WSN. It is also presented a proposal of hardware to be used in a WSN with the same function, that is, to reduce the energy consumption in the network.*

Resumo. *Uma Rede de Sensores Sem Fio (RSSF) pode ser definida como um conjunto de dispositivos capazes de realizar coleta de informações sem a presença de uma estrutura física interligando-os. Um dos pontos mais críticos em uma RSSF é o consumo de energia, já que a principal fonte de alimentação dos componentes da rede são baterias. O tempo de vida útil da rede fica condicionada ao tempo de duração das baterias. Este artigo tem o objetivo de apresentar algumas das soluções existentes na literatura, que possam minimizar e/ou otimizar o consumo de energia em uma RSSF. Também é apresentada uma proposta de hardware para ser utilizado em uma RSSF com a mesma função, ou seja, diminuir o consumo de energia na rede.*

1. Introdução

Uma Rede de Sensores Sem Fio (RSSF) ou WSN (*Wireless Sensor Networks*) pode ser definida como o uso de inúmeros sensores espalhados geograficamente sem a necessidade do uso de qualquer estrutura física. Entre as aplicações desse tipo de rede destaca-se o monitoramento de ambientes. Um dos usos mais decorrentes estão nas áreas industriais, na coleta de dados em locais perigosos ou de difícil acesso. Logo, o uso de uma WSN pode ocorrer nos mais variados locais, como em uma floresta, por exemplo, onde não há a disponibilidade de energia elétrica [Shelke *et al.* 2013].

Em uma rede de sensores sem fio há o emprego elevado do número de sensores, que são chamados de nós sensores ou nodos. Nessa rede, os sensores são responsáveis pelo monitoramento do ambiente, pela coleta e processamento das informações. Após é feito o envio das informações para o *gateway*, que é responsável por encaminhar as informações coletadas para uma aplicação de monitoramento e controle, como sistemas supervisórios (*Supervisory Control and Data Acquisition* - SCADA), por exemplo. Na Figura 1 encontra-se a arquitetura de rede mais comum utilizada em uma WSN. De acordo com [Shelke *et al.* 2013], a principal fonte de energia de uma WSN é uma bateria, assim o tempo de vida útil dos sensores está condicionada ao tempo de duração das baterias. Como, na maioria dos casos, os nós sensores são instalados em locais inóspitos, recarregar ou substituir as baterias torna-se financeiramente e logisticamente inviável.

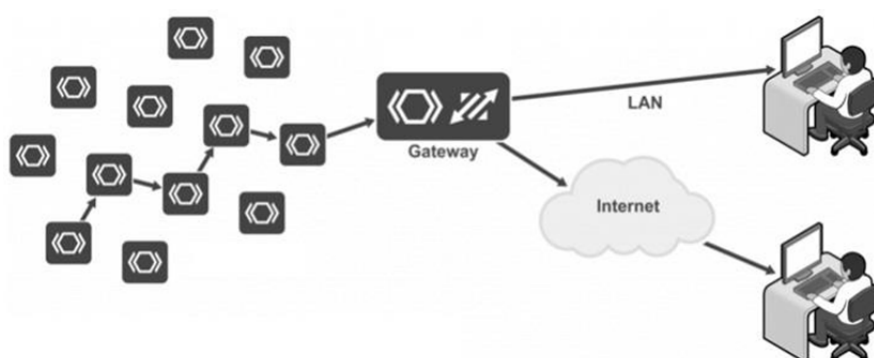


Figura 1. Arquitetura de uma WSN local (adaptado de [micrium.com 2017]).

Devido a essas limitações, na literatura existem algumas técnicas que buscam diminuir o consumo de energia em uma WSN. Esse trabalho apresenta, de forma sucinta, algumas das técnicas utilizadas para minimização do consumo de energia em uma WSN e, também, a proposta de um *hardware*, que minimize o consumo energético, para ser utilizado em uma WSN. No Capítulo 2 desse artigo serão apresentados métodos para mapeamento e minimização do consumo de energia em uma WSN, em seguida, no Capítulo 3 é apresentado o padrão de comunicação 6LoWPAN. No Capítulo 4 é mostrado algumas opções de *hardware* existentes para uso em uma WSN. O Capítulo 5 apresenta uma proposta de um *hardware* equivalente aos apresentados no Capítulo 4. E, por fim, o Capítulo 6 que contém as considerações finais.

2. Mapeamento e Minimização do Consumo de Energia Através de Software

Para estudar o consumo energético em uma WSN é fundamental obter o quanto de energia é necessário para manter o funcionamento adequado da rede como um todo ou somente de um nó sensor. Com a obtenção de informações de apenas um nó é possível mensurar o consumo aproximado de toda rede [Souto *et al.* 2005]. Uma das formas mais simplórias de obter informações sobre o consumo de energia em uma WSN é cada sensor enviar mensagens periódicas ao *gateway*, onde a informação contida nas mensagens mostra o quanto de energia disponível cada sensor ainda possui. Porém, a troca de informações é um dos pontos mais críticos quando se trata da questão energética em uma rede de sensores sem fio. Em [Souto *et al.* 2005] é proposta uma solução para esse tipo de abordagem, onde o mapa de energia completo da rede é obtido através de uma amostragem estratificada. Nesse caso, os mapas de energia são

construídos com informações de apenas um subconjunto de nós que compõem a rede. Sendo assim, o consumo de energia necessário para a tarefa é minimizado.

Outra abordagem para o mapeamento de energia é proposta em [Kellner *et al.* 2008], no qual os autores propõem um modelo baseado no mapeamento dos estados de energia do *hardware* dos nós sensores e do sistema operacional. O modelo permite que o sistema operacional do nó sensor seja capaz de mapear o estado do *hardware* ao executar alguma ação como, por exemplo, fazer o envio de uma determinada mensagem ao nó controlador. Dessa forma, essa informação pode ser utilizada para ajustar determinado parâmetro para que haja a redução da energia gasta para a tarefa mapeada.

Para desenvolver técnicas de redução do consumo de energia em uma WSN, primeiramente, deve-se conhecer a arquitetura de um nó sensor. Em [Guidoni *et al.* 2005] é proposto um protocolo para coleta de dados em uma WSN. O protocolo é denominado como TreeDC baseado no algoritmo TopDisc, algoritmo este utilizado para descobrimento da topologia de uma rede de sensores sem fio. De acordo com os autores o TreeDC seleciona os melhores nós da rede através da quantidade de energia que determinado nó possui, assim o roteamento realizado na rede ocorre através da rota que tem a maior disponibilidade de energia. O nó que possui o mapa de energia é denominado como *sink*, esse nó é capaz de prever se algum nó está próximo de ficar sem energia.

3. O protocolo 6LoWPAN

O IPv6 é um protocolo que atua na camada de rede. Esse protocolo encontra-se em fase de implantação e tem como objetivo substituir o protocolo IPv4. Entre as alterações encontradas no IPv6 pode-se citar o aumento na quantidade de endereços, o endereço IP no IPv6 possui 128 *bits*, ao contrário do IPv4 que possui apenas 32 *bits*; diminuição do custo de processamento de pacotes ao simplificar o cabeçalho com a remoção de alguns campos obrigatórios no cabeçalho IPv4; entre outras [Schrickte, 2013].

Em uma WSN torna-se inviável a utilização do protocolo IPv6 devido a simplicidade dos dispositivos que compõem a rede. Para isso, o 6LoWPAN (IPv6 over Low Power Wireless Personal Area Networks) é uma adaptação do protocolo IPv6. O objetivo do 6LoWPAN é possibilitar o uso do IPv6 em redes sem fio de baixa potência, denominadas como LoWPAN (*Low-power Wireless Personal Area Networks*). De acordo com [Montenegro *et al.* 2007], o 6LoWPAN estabelece uma nova camada entre as camadas de enlace e de rede do modelo OSI, demonstrada na Figura 2. Essa camada é denominada como *Adaptation Layer* (camada de adaptação).

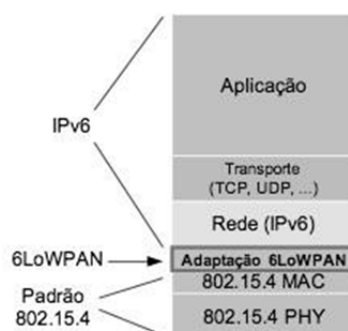


Figura 2. Modelo da pilha de protocolo 6LoWPAN (adaptado de [ipv6.br, 2013]).

A camada de adaptação 6LoWPAN foi desenvolvida para que o protocolo IPv6 pudesse ser utilizado em redes WPAN (*Wireless Personal Area Network*), que contém dispositivos com baixa potência, pouca memória e uma capacidade de processamento limitada. Dessa forma, a camada estabelece algumas alterações no protocolo IPv6, como a redução do cabeçalho dos pacotes IPv6 através de técnicas de compressão, onde os cabeçalhos passam a ter até 2 *bytes*; compressão dos cabeçalhos dos protocolos TCP, UDP e ICMP; fragmentação dos datagramas IPv6; e, a adição de cabeçalhos e informações nos pacotes com o objetivo de otimizar as configurações típicas da rede.

4. O *Hardware* em uma WSN

A escolha do *hardware* correto para compor a rede também deve ser levada em consideração quando a energia é um ponto crítico. É preciso que o MCU (*Microcontroller Unit*) que compõe os nós sensores ou o *gateway* ofereça um baixo consumo de energia, além de suporte aos protocolos utilizados na rede de sensores. Um MCU pode ser definido como um chip que possui uma Unidade Central de Processamento (UCP), memórias, entradas e saídas para utilização externa, periféricos, etc. A seguir serão apresentadas algumas opções de *hardware* encontradas para uso tanto como *gateway* ou nó sensor.

A empresa *Freescale Semiconductor* oferece uma placa para ser usada como nó sensor, denominada como *IoT Low Power Sensor Node board*. Essa placa é composta por um MCU que provê um baixo consumo de energia, o *Freescale* MKW24D512. Possui suporte aos protocolos IPv6/LoWPAN, Zigbee Pro, entre outros. Oferece ao usuário 7 GPIOs (*General Purpose Input/Output*), o que torna possível controlar outros dispositivos conectados à placa. Devido à baixa potência, a placa da *Freescale* pode ser alimentada com apenas uma bateria de 3.0 V e 1200 mAh [NXP, 2015].

Outro exemplo de placa com essa finalidade é o 6LoWPAN IoT *gateway* da fabricante WEPTECH *elektronik* GmbH. A principal funcionalidade da placa é atuar como um roteador de borda em uma rede 6LoWPAN, conectando uma rede IPv6 à *Internet*. O *hardware* é composto por um ARM Cortex-M3 da *Texas Instruments*, o circuito integrado CC2538 que, também, trabalha com uma potência baixa. Este *chip* opera na faixa de 32 MHz e possui uma interface de rádio que opera a 2.4 GHz. Além da interface de 2.4 GHz, a placa possui um *chip* extra, o CC1200 que permite o uso de faixas de frequência menores, ou seja, opera a 868 MHz ou 915 MHz [WEPTECH, 2017].

Ambas as soluções apresentadas utilizam como controladores principais, MCUs que operam em baixa potência. Dessa forma, oferecem uma característica muito importante quando se trata da implementação de uma WSN, o baixo consumo de energia. No próximo capítulo desse artigo será apresentada uma proposta de uma placa, que também constitui um *hardware* para ser utilizado em uma rede de sensores sem fio. Deste modo, a placa possui componentes e especificações similares às mencionadas anteriormente.

5. Proposta de um *Hardware* para Utilização em uma WSN

Esse capítulo apresenta uma proposta de desenvolvimento de uma placa de circuito impresso (PCB), que na prática pode ser utilizada como *gateway* ou como um nó sensor

em uma WSN. Dessa forma, a utilização das técnicas de *software* apresentadas anteriormente agregadas à placa a ser desenvolvida fará com que o *hardware* proposto seja uma escolha promissora para a implementação de uma WSN. Essa PCB tem como controlador principal o circuito integrado (CI) denominado CC2650 (modelo de 48 pinos) da empresa *Texas Instruments*.

Seu processador principal é um ARM Cortex-M3 que opera a 48 MHz. Um dos seus principais periféricos é um controlador para sensores com uma potência ultrabaixa, tornando-se ideal para o uso em WSN, pois é capaz de coletar dados de forma autônoma enquanto o resto do sistema encontra-se suspenso. Pode ser utilizado para aplicações sem fio devido ao suporte a diversos padrões utilizados nesse tipo de comunicação, como, por exemplo, o 6LoWPAN e *Bluetooth*. Essa placa pode ser utilizada em outras aplicações, além da implementação de uma WSN, como o uso na Automação, tanto residencial como industrial. Através das GPIOs (*General Purpose Input/Output*) disponíveis no CC2650, pode-se controlar uma grande quantidade de dispositivos, como sensores e atuadores, por exemplo. Já para a utilização em uma WSN, a principal característica é o pequeno consumo de energia, o que proporcionará um maior tempo de vida útil da rede.

O desenvolvimento da placa tem como base o material disponível pela *Texas Instruments* através da documentação do CC2650. Dessa forma, as especificações necessárias para o funcionamento do CI, como a tensão de alimentação, serão as determinadas pelo fabricante. Porém, pretende-se fazer algumas modificações, como, por exemplo, adicionar um módulo de alimentação separado da PCB principal, já que a tensão de alimentação do CI é muito baixa, entre 1.8 V e 3.0 V. O que torna inviável a utilização da PCB para outras aplicações, onde a tensão pode encontrar-se na casa dos 12 V. Assim, o *hardware* final será composto por dois módulos, onde o primeiro é uma PCB que tem a função de fornecer mais de um nível de tensão (3.0 V e 12 V, por exemplo) e o segundo, o módulo denominado como principal, onde estará o CI (controlador principal) e os demais componentes necessários para o funcionamento adequado da PCB.

O módulo de alimentação será constituído por um circuito eletrônico capaz de reduzir a tensão principal, ou seja, a tensão vinda da fonte de alimentação quando conectado à rede elétrica. Nesse caso, a aplicação que estará inserido o *hardware* será diferente de uma WSN, já que haverá a disponibilidade de alimentação através da rede elétrica do local. Porém, a alimentação também pode ser feita por uma bateria (uso em uma WSN). Para isso, o circuito não irá realizar alteração alguma na tensão de entrada. A tensão que a ser utilizada para alimentar o módulo principal é a tensão da própria bateria conectada ao módulo de alimentação. No módulo principal estará o CC2650, um conector JTAG (*Joint Test Action Group*) de 10 pinos, dois barramentos de pinos (GPIOs disponíveis) totalizando 29, um botão para reset, um borne para alimentação e os demais componentes necessários ao circuito de alimentação do CI principal. Na Figura 3 é apresentado um protótipo inicial do que poderá vir a ser o módulo principal do *hardware* em questão.

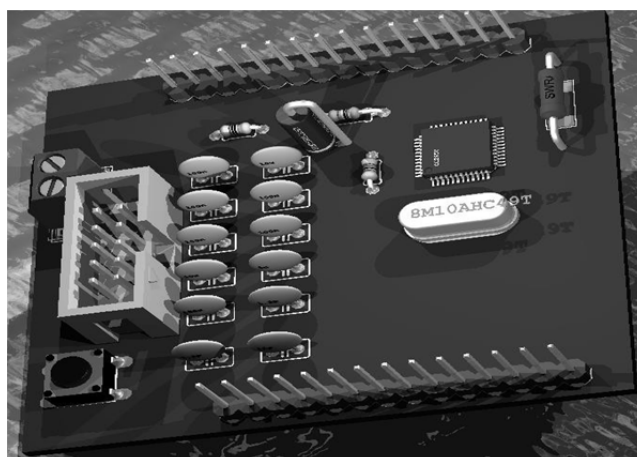


Figura 3. Protótipo do módulo principal [Arquivo Pessoal 2017].

A interface JTAG é responsável pela depuração do CC2650, ou seja, através dela é possível a realização de testes no *hardware*, além de ser possível a programação do microcontrolador. O JTAG implementa uma porta de comunicação serial que dá acesso ao sistema interno de um circuito integrado, sem a necessidade de um circuito externo que permita essa comunicação. Através da interface é possível a transferência do *firmware* (sistema operacional embarcado), *softwares* e dados para a memória não-volátil do dispositivo. Para a programação do dispositivo é necessário a utilização de uma IDE (*Integrated Development Environment*), um ambiente de desenvolvimento integrado. O *Code Composer Studio* é uma IDE desenvolvida pela *Texas Instruments*, que possui suporte aos microcontroladores da fabricante. A IDE possui um conjunto de ferramentas para desenvolvimento e depuração de aplicações embarcadas. Inclui um compilador para as linguagens de programação C/C++, um editor de código fonte, um ambiente com interface intuitiva para a construção de projetos, depurador, entre outros diversos recursos.

O sistema operacional utilizado no CC2650 é um RTOS (*Real Time Operating System*), ou seja, um sistema operacional de tempo real, o qual é destinado à execução de diversas tarefas, onde seus tempos de resposta são pré-definidos. Um RTOS é considerado um sistema mais eficaz, pois, possui uma resposta rápida e previsível a um determinado evento. A *Texas Instruments* possui uma versão própria de um RTOS a ser utilizada em seus microcontroladores. O sistema é denominado como TI-RTOS. Segundo a fabricante, o sistema fornece os componentes de *software* essenciais ao funcionamento do sistema. É uma solução completa em relação aos RTOS, incluindo pilhas de protocolos, comunicação de múltiplos núcleos, drivers de dispositivos e gerenciamento de energia. Há a possibilidade de fazer uso da pilha de protocolos desejada, já que o TI-RTOS suporta diversos padrões que operam na faixa de 2.4 GHz, como *Bluetooth*, *WiFi*, *6LoWPAN*, entre outros [Texas Instruments, 2017].

De forma genérica, a placa apresentada relaciona-se com o sistema como um todo. A placa envia as informações através da rede 6LoWPAN para o *gateway* 6LoWPAN, que converte o pacote para IPv4 ou IPv6 nativo, após é feita a transmissão desses pacotes através da Internet para, por exemplo, um *software* supervisor.

6. Considerações Finais

O prolongamento do tempo de vida útil de uma WSN depende totalmente da minimização do consumo de energia. Por isso, a literatura está repleta de técnicas que buscam aprimorar a eficiência energética dos nós sensores. No entanto é uma tarefa bastante complexa, pois deve ser levado em consideração diversos fatores e diferentes variáveis para a elaboração dos métodos. Para a implementação dessas técnicas e de diversas outras é necessário um profundo conhecimento da arquitetura de um nó sensor, da árvore topológica da rede, entre outros fatores.

Nesse trabalho foi apresentada a proposta de um *hardware* que tem como objetivo minimizar o consumo de energia em uma WSN. A proposta baseia-se na utilização de um microcontrolador com baixíssimo consumo de energia, desenvolvido especialmente para uso em aplicações onde a energia disponível é um problema crítico. Além disso, o microcontrolador apresenta suporte ao padrão de comunicação 6LoWPAN, que é responsável por tornar possível o uso do IPv6 em uma rede onde os dispositivos disponíveis trabalham com limitada capacidade de processamento e memória. A união das técnicas de minimização apresentas ao *hardware* proposto nesse artigo torna o dispositivo uma eficiente ferramenta para diminuir o consumo de energia em uma WSN. Por exemplo, a integração do *hardware* proposto com o algoritmo TreeDC pode proporcionar uma economia ainda maior de energia, já que o algoritmo escolhe a melhor rota através dos nós que possuem mais carga em sua bateria. Assim, a aplicação desses algoritmos pode trazer um aumento considerável do tempo de vida útil da rede de sensores.

Em comparação com os *hardwares* apresentados, a placa proposta possui algumas vantagens. Entre essas vantagens encontra-se a capacidade de modularização, um módulo responsável pela alimentação, como foi citado anteriormente. Como o desenvolvimento da placa é de responsabilidade dos autores, ela se torna uma opção bastante versátil, já que nas placas mencionadas não há a possibilidade de realizar quaisquer mudanças. Em relação ao consumo de energia dos processadores principais (MCUs), ambas as placas apresentam características semelhantes, já que os MCUs utilizados são de baixa potência, o que minimiza o consumo de energia. Por exemplo, de acordo com as informações contidas nos documentos técnicos, o MCU CC2538 da placa 6LoWPAN IoT *gateway* da fabricante WEPTECH *elektronik* GmbH consome quando o transmissor de informações do rádio está ativo 24 mA de corrente, já o CC2650 utilizado na placa proposto consome realizando a mesma função 6.1 mA. Outro ponto a ser considerado é a quantidade de GPIOs do CC2650 em relação ao MCU *Freescale* MKW24D512, enquanto este possui apenas sete, o CC2650 possui 30 GPIOs.

Após a finalização do desenvolvimento do *hardware* proposto nesse artigo pretende-se realizar testes de desempenho em relação ao consumo de energia, a fim de certificar a eficiência do microcontrolador CC2650 em termos de consumo energético. Também pretende-se desenvolver, futuramente, uma rede de sensores sem fio, onde será implementado o *hardware* a ser desenvolvido e técnicas através de *softwares* para minimização do consumo energético.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio da ANEEL P&D Código PD-5707-4301/2015, CEEE-D, UFSM e CNPq (Processo 311516/2014-9).

Referências

- Dunkels, A., Osterlind, F., Tsiftes, N. and He, Z. (2007). Software-based on-line energy estimation for sensor nodes. In *Proceedings of the IEEE Workshop on Embedded Networked Sensor Systems (IEEE Emnets)*, Cork, Ireland.
- Guidoni, D., Mini, R. and Machado, M. (2005). TreeDC: Um Algoritmo de Coleta de Dados Ciente da Energia para Redes de Sensores Sem Fio. In *XXV Congresso da Sociedade Brasileira de Computação*. São Leopoldo, RS.
- IPv6.br (2013). “ZigBee usa agora 6LoWPAN! Sua próxima lâmpada terá IPv6?”. <http://ipv6.br/post/zigbee-usa-agora-6lowpan-sua-proxima-lampada-tera-ipv6/>, Agosto de 2017.
- Kellner, S., Pink, M., Meier, D. and Blab, E. O. (2008). Towards a realistic energy model for wireless sensor networks. In *Proc. 5th Annual Conference on Wireless on Demand Network Systems and Services, Garmisch*, 1: 97–100.
- Kushalnagar, N.; Montenegro, G.; Schumacher, C. (2007). “Request for Comments 4919: IPv6 over Low-Power Wireless Personal Area Networks (6LoWPANs): Overview, Assumptions, Problem Statement, and Goals”, <https://www.rfc-editor.org/rfc/pdf/rfc4919.txt.pdf>, Julho.
- Micrium Partners (2017). “How to think about the Internet of Things (IoT)”, <https://www.micrium.com/iot/devices/>, July.
- NXP (2015). “IoT Low Power Sensor Node Reference Design”, <http://www.nxp.com/docs/en/user-guide/ILOSENORDUG.pdf>, Agosto.
- Sheke, R., Kulkarni, G., Sutar, R., Bhore, P., Nilesh, D. and Belsare, S. (2013). Energy management in wireless sensor network. *UKSim 15th International Conference on Computer Modelling and Simulation*, pages 668-671.
- Schrickte, L. F. (2013). “Projeto, Implementação e Avaliação de Desempenho de Nós e Gateway 6LoWPAN”, <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/122627/325160.pdf>, Julho.
- Texas Instruments (2017). “CC2538”, <http://www.ti.com/product/CC2538/datasheet>, Agosto.
- Texas Instruments (2017). “Code Composer Studio™ - Integrated Development Environment”, <http://www.ti.com/tool/ccstudio>, Julho.
- Texas Instruments (2017). “TI-RTOS: Real-Time Operating System (RTOS)”, <http://www.ti.com/tool/ti-rtos>, Julho.
- Texas Instruments (2017). “XDS100v2 JTAG Debug Probe (ARM version)”, <http://www.ti.com/tool/tmdsemu100v2u-arm>, Julho.
- WEPTECH (2017). “SAKER 6LOWPAN IOT GATEWAY”, <https://www.weptech.de/en/6lowpan/gateway-saker.html>, Agosto.