

PROPOSTA DE UMA SOLUÇÃO ALTERNATIVA APLICADA EM REDE DE SENSORES SEM FIO NO PADRÃO IEEE 802.15.4

Adriel Alves de Souza, Higor Alexandre de Castro, Renato Santos Carrijo

Universidade Federal de Uberlândia – UFU, Faculdade de Engenharia Elétrica – FEELT, Uberlândia – Minas Gerais
asadriel@hotmail.com, higor0011@gmail.com, renato@eletrica.ufu.br

Resumo – Recentemente com a crescente demanda em processos fabris, as redes de sensores sem fio com a finalidade de monitoramento, têm se destacado como uma nova alternativa para troca de informações entre equipamentos de maneira rápida, segura e de fácil instalação.

Nesse contexto, surgem formas de atender as necessidades das indústrias com soluções que visam rapidez na troca de informações e baixo consumo de energia. Assim, o objetivo deste trabalho é a apresentação de uma rede sem fio de baixo custo que atenda essas necessidades, baseando-se nos padrões de comunicação IEEE 802.15.2 e SPI.

Palavras-Chave – Baixo consumo energia, IEEE 802.15.4, Redes sem fio, Redes industriais, SPI.

Abstract - Recently with the growing demand in industrial processes, wireless sensor networks for the purpose of monitoring, it has emerged as a new alternative to exchange information between devices quickly, safe and easy to install.

In this context, there are ways to meet the needs of industries with solutions that aim to speed the exchange of information and low power consumption. The objective of this paper is to present a low-cost wireless network that meets those needs, based on the IEEE 802.15.2 and SPI communication patterns.

Keywords – low-power consumption, IEEE 802.15.4, Wireless Networks, Industrial Networks, SPI.

I. INTRODUÇÃO

Atualmente, as redes sem fio são amplamente utilizadas em diversos domínios de aplicação, que variam de simples usos domésticos a complexos sistemas de automação industrial. Essa ampla utilização tem acontecido por vários motivos como a facilidade de instalação e manutenção, flexibilidade, baixo custo e pela capacidade de operar em locais que até então redes com fio não podiam ser viáveis.

Na indústria, existem vários processos que têm como foco obter os melhores resultados, seja aumentando a

produtividade, a qualidade do produto e a economia de energia. Com essa demanda crescente de processos houve a necessidade maior de troca de informações entre os diversos equipamentos, formando assim as redes de monitoramento sem fio.

Neste cenário, as redes sem fio com o padrão IEEE 802.15.4[1] são a primeira versão de uma tecnologia de transmissão de curto alcance e de baixas taxas de transmissão. Essa tecnologia, também conhecida como ZigBee, pode operar em diversos canais de comunicação, evitando assim interferências de sinais transmitidos por outras redes sem fio que, em um mesmo ambiente, estejam operando na mesma faixa de frequência[2].

A alternativa apresentada neste trabalho para a transmissão de dados no padrão IEEE 802.15.4, é a utilização dos transceptores MRF24J40MA da Microchip, o qual podem ser utilizados em microcontroladores de 8, 16 ou 32 bits com o protocolo SPI (*Serial Peripheral Interface*). O protocolo SPI é um método de comunicação *Full-Duplex* que permite a troca simultânea de informações entre dispositivos.

Neste artigo propõe-se o desenvolvimento de baixo custo de uma rede sem fio no padrão IEEE 802.15.4. Para isso, será utilizado o protocolo de comunicação SPI e os transceptores MRF24J40MA. Dessa forma, este trabalho está dividido da seguinte forma: Na seção II são apresentados os conceitos básicos sobre redes sem fio usando os protocolos IEEE 802.15.4 e SPI e descrição de equipamentos utilizados no protótipo. Na seção III descreve as etapas e diretrizes do trabalho desenvolvido, sendo analisadas e validadas na seção IV, por fim as devidas conclusões na seção V.

II. ESTADO DA ARTE

O padrão de rede utilizado para redes sem fio de curto alcance é o IEEE 802.15.4, que é um padrão para a *low-rate wireless personal area networks* (LR-WPANs), que são redes sem fio de baixa transmissão. Esse padrão define especificações para a camada física (PHY,) e para a subcamada de acesso ao meio (MAC). Os principais objetivos do padrão IEEE 802.15.4 são de facilitar manutenções na instalação, transferir de dados de maneira confiável, operar em curtas distâncias, visar dispositivos de baixo custo e baixo consumo das baterias, sem inferir na flexibilidade e simplicidade do protocolo [2].

Neste caso, o protocolo ZigBee utiliza as especificações MAC e PHY da norma IEEE 802.15.4[3]. A seguir serão descritas as funcionalidades dessas duas camadas.

A. Camada física

A camada física do ZigBee segue o protocolo IEEE 802.15.4 e é responsável por permitir a transmissão das PDUs (*Protocol Data Units*), unidades de dados, através de



XIII CEEL - ISSN 2178-8308
12 a 16 de Outubro de 2015
Universidade Federal de Uberlândia - UFU
Uberlândia - Minas Gerais - Brasil

ondas de rádio. A PHY utiliza a modulação DSSS (*Direct Sequence Spread Spectrum*) que incorpora em cada bit de dado um padrão de redundância e os espalha pela largura de banda utilizada. Essa redundância permite não só que o dado seja identificado como pertencente a um determinado nó, como facilita a detecção de erros[3].

As faixas de frequência utilizadas conforme a figura 1, são as frequências livres de 2,4 GHz (global), 915 MHz (Américas) e 868 MHz (Europa). Cada uma das faixas implica em uma taxa de transmissão, número de canais e espectros diferentes.

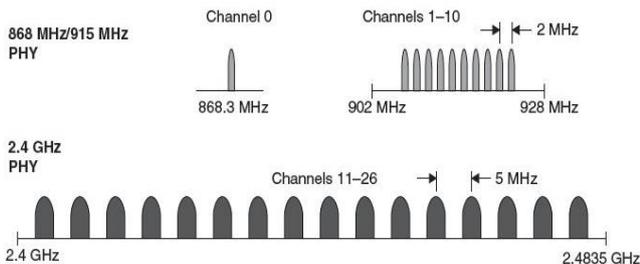


Fig.1. Faixa de frequência com a respectiva atribuição de canal [9].

Outras funções da camada física:

- Indicar qualidade de conexão: ao receber o pacote, o nó receptor envia de volta um pacote LQ (Link Quality) que determina qualidade do sinal de conexão;
- Detectar potência dos canais: a detecção e manipulação desses dados são feitas na camada de rede para definir algoritmos de escolha de canais;
- Reportar canais livres (CCA – *Clear Channel Assesment*): a camada física determina se os canais estão ocupados de acordo com o *Carrier Sense* dos sinais em DSSS ou caso o parâmetro ED (*Energy Deterction*) esteja acima do limite do canal.

B. Subcamada de acesso ao meio

A camada MAC tem como principal função controlar o acesso aos canais RF, utilizando para isso mecanismos de prevenção de colisão CSMA-CA (*Carrier Sense Multiple Access – Collision Avoidance*). Para efetuar esse controle estabelece uma comunicação com a camada inferior, ou seja, com a camada física (PHY). Além disso, define também o tipo de dispositivos permitidos na rede, a estrutura de tramas admissível e faz o controle do processo de sinalização, ou seja, faz a sincronização e transmissão de *beacons*, de modo a haver confiabilidade no funcionamento da rede[2].

Neste contexto, a camada MAC caracteriza-se por utilizar dois modos de acesso ao meio, o modo *beaconing* e o *un-beaconing* (não sincronizado). Esse primeiro modo de operação que define a principal característica da rede com ZigBee, o baixo consumo de potência.

No modo *beaconing*, os dispositivos com funções de roteador, transmitem de tempos em tempos sinalizações para tentar confirmar sua presença aos outros roteadores da mesma rede. Já os outros nós da rede só precisam estar ativos no momento da sinalização, devendo ser configurados para percebê-la, pois a maioria dos dispositivos permanece desativados (*sleep*).

Nesse modo, o consumo de energia é o mínimo possível. O método de acesso padrão utiliza o CSMA-CA. Aplicações que necessitem de características de baixa latência devem utilizar o GTS (*Guaranteed Time Slot*), um método de QoS (*Quality of Service*) que garante um espaço de tempo para que o dispositivo faça o que for necessário, sem atrasos.

Para o funcionamento desse modo é utilizada a estrutura de *superframe* [4]. Essa estrutura tem o objetivo de prover banda livre em algumas situações e de proporcionar baixa latência nas transmissões.

No modo não *un-beaconing*, se os nós permanecerem desligados por muito tempo podem perder janelas de transmissão ou atualizações de eventos importantes.

O método de acesso utilizado é o CSMA *unslotted ALOHA*, que tem um tempo de espera (*backoff*) aleatório e exponencialmente decrescente, não dependente de slots de tempo.

A outra possibilidade é fazer com que a maioria dos nós dispositivos da rede permaneça sempre com seus receptores ativos, consumindo mais energia. Os dispositivos devem ser alimentados com fontes de energia mais potentes e duradouras que pilhas ou baterias comuns. Isso compromete a principal característica da rede: baixo consumo de potência.

C. Protocolo SPI

O padrão SPI foi desenvolvido pela Motorola com o objetivo de interligar diversos periféricos [5]. Esse padrão utiliza o modo síncrono para transmissão dos dados. Neste modo, tanto o transmissor quanto o receptor devem ser sincronizados para a troca de informação.

Essa sincronização é realizada por meio de um sinal dedicado denominado de *clock* (relógio). A cada transmissão, um pulso de *clock* é enviado antes, visando realizar o sincronismo do receptor de acordo com o transmissor.

Suas principais características são:

- Comunicação utilizando 4 fios;
- Alta velocidade de transmissão;
- Comunicação utilizando o protocolo baseado em *Master-Slave* ;
- Transmissão de dados *Full-Duplex*.

A figura 2 apresenta o esquema de ligação entre os módulos da arquitetura desenvolvida utilizando o barramento SPI.

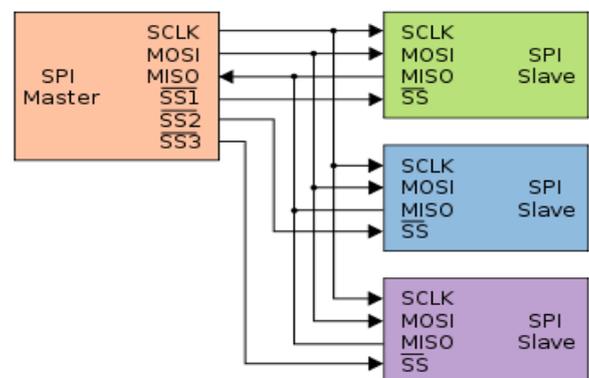


Fig.2. Conexão dos módulos no barramento SPI.

A comunicação utilizando o padrão SPI, por ser *Full-Duplex*, é considerada um tipo de comunicação por

intercâmbio de dados[5], ou seja, enquanto um dado é enviado, outro é recebido ao mesmo tempo. Nenhum dispositivo conectado ao barramento é somente transmissor ou receptor. No protocolo SPI, cada Master pode controlar ou estar conectado a vários *slaves*. Neste trabalho a ligação física entre os nós foi substituída pelos transceptores MRF24J40MA, sendo estes considerados *slaves* da plataforma envolvida que será especificada posteriormente.

D. Módulo de comunicação sem fio

O módulo de comunicação sem fio selecionado para esta aplicação foi o MRF24J40MA da Microchip, figura 3. Ele é um transmissor e receptor para comunicação sem fio na faixa de 2.4GHz, usando o protocolo 802.15.4, que é a base do padrão ZigBee[6].

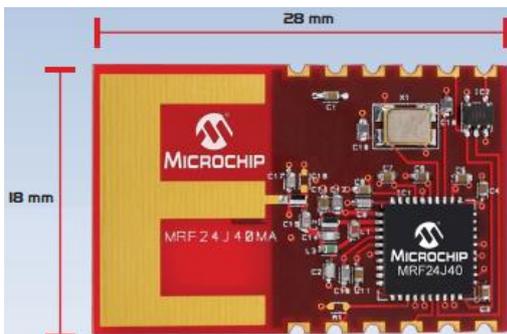


Fig. 3 – Módulo de comunicação MRF24J40.

Este módulo possui uma taxa de transferência de 250Kbps e permite até 65 mil módulos trocando informações entre si em uma mesma rede. Também, possui uma interface SPI para estabelecer a conexão entre o nó sensor e nó coordenador, outro ponto a se considerar é em relação às dimensões, que se torna uma boa alternativa às aplicações que requerem espaço físico limitado.

A distância de comunicação pode variar muito de acordo com cada aplicação, dependendo de fatores como: visada direta entre os módulos, reflexões de sinal e ruído eletromagnético. Em campo aberto o módulo pode atingir uma comunicação máxima de até 120 metros. Em ambientes internos, a qualidade do sinal pode variar muito de acordo com as características de cada lugar, como por exemplo, o número de paredes entre os módulos.

Para controle de energia, o transceptor possui um pino de hibernação (*Wake*), pelo qual se ativa ou desativa para um modo de baixo consumo. O consumo de energia do módulo pode variar com os seguintes estágios: na transmissão 23mA, recepção 19mA e no modo *sleep* 2uA[6]. Onde, esse último é responsável pela longa duração das baterias dos nós, as quais podem durar anos.

Para utilizar os recursos disponíveis no módulo, foi englobada a plataforma Freescale FDRM-KL25Z no propósito de estabelecer a relação *Master and Slave* da comunicação SPI.

E. Plataforma Freescale

A plataforma FDRM-KL25Z, figura 4, é uma alternativa de baixo custo e baixo consumo de energia.



Fig. 4 – Plataforma FDRM-KL25Z

Ela possui integrada recursos de debug para programação flash e *run-control*, e pode ser programada via mbed[7], plataforma open-source que não requer instalação de software, e dispõe de um grande repositório de bibliotecas e códigos online. As principais características do KL25Z são:

- Microcontrolador de 48MHz, 128KB flash, 16KB SRAM;
- Slider de toque capacitivo, acelerômetro MMA8451Q;
- Interface de depuração OpenSDA;
- Mbed habilitado;
- Possibilidade de troca de firmware para trabalho em multiplataforma;
- Plataforma Ultra-low-cost;

Devido estas características, associamos o KL25Z e rádio à comunicação SPI, visando uma solução de melhor relação custo-benefício.

III. METODOLOGIA

A maioria das aplicações de redes de sensores sem fio são projetadas sob restrições de energia e largura de banda. Tais restrições levam aplicações a limitar seus mecanismos de aquisição de dados para alguns tipos de transmissão de baixa largura de banda, pois dessa forma a quantidade de dados transferida tende a ser pequena para não comprometer a autonomia do nó. Neste sentido, o projeto teve como objetivo o desenvolvimento de uma rede de sensores sem fio que permita um equilíbrio perfeito entre autonomia e taxa de comunicação de cada um dos nós. Para tal propósito foi associado a plataforma de desenvolvimento com o rádio.

Para isso, o rádio foi conectado ao KL25Z no propósito de criar o primeiro nó de comunicação. A conexão segue o protocolo SPI onde o KL25Z faz o papel do *master*, e o rádio o de *slave*.

A comunicação SPI é definida utilizando 4 fios de ligação entre o *master* e o *slave*. Como visto anteriormente na Figura 2, temos SCLK, MOSI, MISO, SS ou CS. O *clock* sincroniza a transferência de dados entre *master* e *slave*. O MOSI (*Master Output Slave Input*) faz o envio de dados do *master* para o *slave* e o MISO (*Master Input Slave Output*) do *slave* para o *master*. O SS (*Slave Select*) é responsável por habilitar qual *slave* será utilizado no momento da comunicação.

Como protótipo da rede sem fio, foram utilizados dois conjuntos KL25Z e MRF24J40MA para comunicarem entre si. No projeto transmitiu-se um conjunto de informações pré-

definidas que podem ser trocadas por informações de sensores ou afins.

O KL25Z foi programado em linguagem C++, utilizando a plataforma mbed *compiler*[8], que dispõe de bibliotecas básicas necessárias para desenvolvimento em diversos trabalhos. Na programação do KL25Z deve-se atentar a alguns valores de trabalho do MRF24J40, como por exemplo, *mode* definido como 0, para que o clock seja ativado em nível de tensão baixo e também o pino CS na comunicação deve estar em nível baixo.

No programa foi definido que as duas plataformas KL25Z funcionassem como *master* e os rádios como *slave*, enviando dados de 8 bits a uma taxa de transferência de 5MHz. Nele também são definidos os canais de comunicação que variam de 11 a 26, na faixa de frequência de 2,4 a 2,4835GHz.

A programação baseou-se em trocar informações entre os conjuntos KL25Z e rádio, para isso, utilizaram-se os recursos da biblioteca MRF24J40 da plataforma mbed onde são definidos no objeto MRF24J40 os pinos MOSI, MISO, SCLK, C e RESET e foram feitas algumas mudanças de forma a adequar a solução final. Mas basicamente cada bit é enviado do KL25Z aos registradores do rádio, e dos registradores ao KL25Z, esses limitados a um máximo de 128 bytes de dados, sendo os oito primeiros bytes destinados ao endereçamento. As funções de envio e recebimento são distintas na biblioteca, para adequar ao padrão *full-duplex* do SPI, as funções foram concatenadas, sendo possível em uma mesma rotina, fazer as funções de envio e recebimento.

IV. RESULTADOS E ANÁLISES

Nesta etapa do projeto serão apresentados os testes feitos com os módulos de comunicação a fim de analisar o comportamento dos transceptores em diversas situações. Para executar o teste foi montado o esquema da figura 5, tendo como objetivo determinar o desempenho dos rádios e o alcance máximo em um ambiente de visada direta.

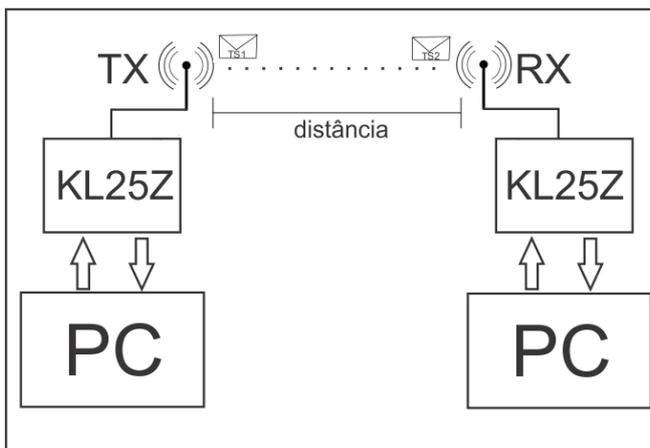


Fig.5. Esquemático do teste realizado.

No esquema mostrado na figura 5, cada módulo de comunicação rádio e plataforma KL25Z foram conectados a um computador pela porta serial, desta forma os dados trocados entre os módulos puderam ser armazenados em banco de dados, a partir de um programa criado na plataforma Visual Studio C#[11].

Os experimentos foram realizados no Campus da Universidade Federal de Uberlândia, em local aberto com objetivo de visada direta. Como mostrado na Figura 5, um módulo foi responsável por receber as mensagens (RX), e o outro para enviá-las (TX). Foram enviados pacotes de dados de 8 bytes, em intervalos de tempo de 1 segundo, a uma distância de 10 a 80 metros, colhendo 100 amostras em intervalos de 10 em 10 metros.

No primeiro teste, os rádios foram configurados a trabalharem no canal 11, e com os dados coletados obteve-se o gráfico que relaciona a eficiência do rádio em transmitir os dados em diversas distâncias. Gráfico esse que é mostrado na figura 6.

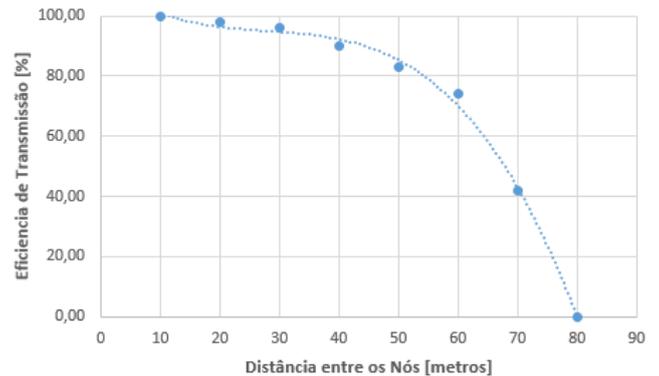


Fig. 6 – Gráfico Eficiência x Distância.

As redes WiFi no padrão 802.11 operam em larguras de banda que incluem frequências de transmissão de alguns canais do padrão 802.15.4, vistos na figura 7. Essas sobreposições de sinais provocam interferências que causam atenuação da distância de transmissão e confiabilidade dos dados.

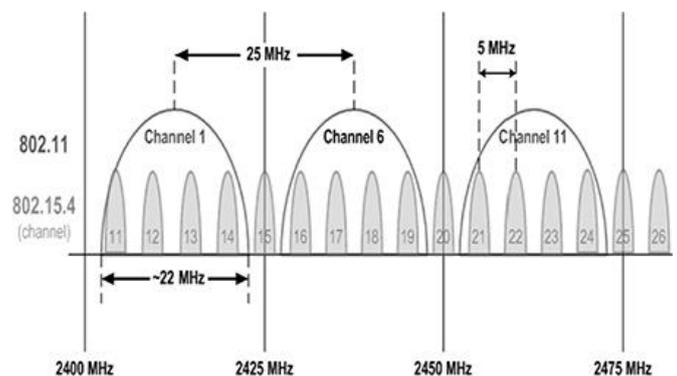


Fig. 7 – Faixas de transmissão do padrão 802.15.4 e 802.11[10]

Para isso, englobamos os testes acima em outros canais de transmissão, no objetivo de comprovar os efeitos da interferência das redes WiFi 802.11. Os canais 15, 25 e 26 são os canais que não sofrem essas interferências, e a relação dos testes foram estendidas para os canais 25 e 26, mostrados na figura 8.

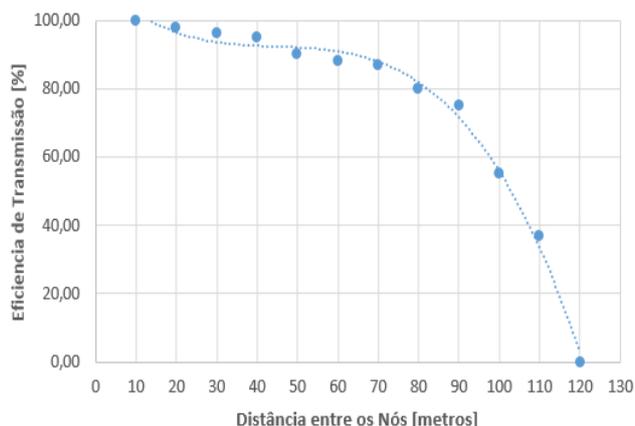


Fig. 8 – Gráfico Eficiência x Distância.

Os testes feitos visaram mostrar a confiabilidade dos dados enviados de acordo com as variações de canais de comunicação. Analisando as figuras 6 e 8, percebe-se que ao utilizar os canais 25 e 26, o sinal sofreu menos interferência do que o canal 11, conseqüentemente a distância de transmissão entre os módulos foi maior. Apesar de algumas interferências, notou-se grande eficácia na comunicação entre os módulos.

V. CONCLUSÕES

Os testes realizados acima firmam uma solução de baixo custo que podem ser aplicados à indústria. Requisitos como velocidade na troca de informação, confiabilidade e baixo consumo de energia foram atendidos como esperado, pelos padrões de comunicação IEEE 802.15.4 e SPI.

As informações trocadas se deram de forma genérica, mas podem ser substituídas por informações de sensores de temperatura, pressão, umidade, por exemplo. Quando comparado o custo da implementação de monitoramento sem fio convencional, a proposta alternativa torna-se extremamente viável atendendo de forma considerável as necessidades de chão de fábrica.

Como proposta futura, visa-se a implementação de uma rede de sensores contendo um maior número de nós e a utilização de um algoritmo bioinspirado para que a comunicação ocorra de maneira otimizada.

VI. REFERÊNCIAS

- [1] IEEE std. 802.15.4-2011 - Part. 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs), Standard for Information Technology Std., 16 June 2011.
- [2] ALLIANCE, Zigbee. ZigBee Overview. Disponível em: <https://docs.zigbee.org/zigbee-docs/dcn/07/docs-07-5482-01-0mwg-zigbee-alliance-overview.pdf> Acesso em: 12 mar. 2015.
- [3] ERGEN, Sinem Coleri. ZigBee/IEEE 802.15.4 Summary. Disponível em:

http://www.prism.uvsq.fr/~mogue/Biblio/Sensor/AUTRES/zigbee_summary.pdf. Acesso em: 13 abr. 2015.

- [4] CHENG, Liang. IEEE 802.15.4 MAC PROTOCOL STUDY AND IMPROVEMENT. 2007. 86 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Computer Science, Department Of Computer Science, Georgia State University, Atlanta, 2007.
- [5] MOTOROLA. SPI Block Guide V03.06. Disponível em: http://www.ee.nmt.edu/~teare/ee3081/datasheets/S12SPI_V3.pdf. Acesso em: 02 fev. 2015.
- [6] INC, Microchip Technology. MRF24J40 Data Sheet. Disponível em: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/39776C.pdf>. Acesso em: 24 fev. 2015.
- [7] FREESCALE. FRDM-KL25Z Data sheet. Disponível em: http://www.freescale.com/webapp/sps/site/prod_summary.jsp?code=FRDM-KL25Z. Acesso em: 16 mar. 2015.
- [8] MBED, Arm. Mbed Compiler. Disponível em: <https://developer.mbed.org/handbook/mbed-Compiler> Acesso em: 16 mar. 2015.
- [9] RADIO, Anaren Integrated. Zigbee channels. Disponível em: https://www.anaren.com/air-wiki-zigbee/File:Zigbee_channels.jpg. Acesso em: 15 abr. 2015.
- [10] AUTOMATION, International Society Of. Field wireless networks. Disponível em: <https://www.isa.org/standards-publications/isa-publications/intech-magazine/2013/december/field-wireless-networks/>. Acesso em: 22 maio 2015.
- [11] STUDIO, Visual. Visual Studio Express. Disponível em: <https://www.visualstudio.com/en-us/products/visual-studio-express-vs.aspx>. Acesso em: 15 abr. 2015.