

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

GABRIEL MARCON VILLA

**ANALISADOR DE ESPECTRO DE BAIXO
CUSTO PARA A FAIXA DE 2,4 GHZ**

Porto Alegre, Brasil

31 de maio de 2021

GABRIEL MARCON VILLA

ANALISADOR DE ESPECTRO DE BAIXO CUSTO PARA A FAIXA DE 2,4 GHZ

Trabalho de conclusão do curso de graduação em Engenharia Elétrica pela Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS
Escola de Engenharia - Departamento de Engenharia Elétrica
Graduação em Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. Dr. Ivan Müller

Porto Alegre, Brasil

31 de maio de 2021

GABRIEL MARCON VILLA

ANALISADOR DE ESPECTRO DE BAIXO CUSTO PARA A FAIXA DE 2,4 GHZ

Trabalho de conclusão do curso de graduação em Engenharia Elétrica pela Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Ivan Müller
Orientador

Prof. Dr. André Inácio Reis
Convidado 1

Me. Eng. Max Feldman
Convidado 2

Porto Alegre, Brasil
31 de maio de 2021

Dedico este trabalho a todos aqueles que gastam o seu tempo com a propagação de conhecimento e sabedoria, contribuindo com os avanços individuais e coletivos da humanidade.

Agradecimentos

Agradeço a todos os familiares, amigos, colegas e professores que me acompanharam e me deram suporte no período de minha formação acadêmica.

Resumo

Nos sistemas de comunicação modernos, a troca de informações entre dispositivos móveis de uso doméstico ou industrial, costumam ocorrer com protocolos que utilizam sistemas de radiofrequência. Como esses protocolos respeitam certos limites permitidos em determinadas normas internacionais, muitas vezes a ocupação de algumas faixas acaba sendo concorrida por diversos sistemas e dispositivos diferentes.

Analísadores de espectro de radiofrequência tem a proposta de efetuar o sensoriamento dos sinais de uma determinada faixa de frequências para ser possível depurar sistemas, detectar interferências, avaliar o funcionamento de uma determinada rede, etc.

Esses analisadores de espectro, normalmente apresentam o ponto negativo de possuírem custo elevado para a utilização por desenvolvedores que não estejam vinculados a grandes empresas ou projetos. Outro ponto negativo é que esses analisadores de espectro comerciais são normalmente adequados para utilização em bancadas de laboratório somente, dificultando análises em campo ou em *surveys* de longa duração.

Com este projeto, verificou-se a possibilidade da utilização de transceptores de baixo custo e portáteis na implementação de um analisador de espectro para a faixa de frequências de 2,4 GHz, faixa esta que não necessita de licenciamentos para utilizações em aplicações industriais, científicas e médicas, muito utilizada em redes locais sem fio e redes pessoais sem fio, para a troca de informações entre dispositivos e efetuar a conectividade de periféricos em aplicações domésticas ou industriais. Para tanto, foi utilizada uma plataforma de sensoriamento composta por um rádio-microcontrolador capaz de sintonizar nas frequências desejadas para a varredura do espectro, além de efetuar detecções de energia.

Os resultados mostraram ser possível efetuar medições nesta faixa, ajustando os limites de início e fim de varredura, com diferentes passos de frequências e detectar a presença de sinais provenientes de sistemas de comunicações próximas.

Ao final, foram apontadas possibilidades de trabalhos futuros utilizando essa plataforma, possibilitando maior precisão com hardware dedicado ou distribuído no ambiente de sensoriamento.

Palavras-chave: 1. Analisador de espectro. 2. Radiofrequência. 3. Detecção de Energia. 4. Sistemas Embarcados.

Abstract

In modern communication systems, the exchange of information between mobile devices for domestic or industrial use, usually occurs with protocols that use radio frequency systems. As these protocols respect certain limits allowed in some international norms, the occupation of these bands often ends up being competed by several systems and devices. Radio frequency spectrum analyzers have the proposal of sensing the signals of a certain frequency range in order to be able to debug systems, detect interference, evaluate the functioning of a given network, etc.

These spectrum analyzers, usually have the negative point of having a high cost for use by developers who are not linked to large companies or projects. Another negative point is that these commercial spectrum analyzers are usually suitable for use on laboratory benches only, making analysis in the field or in long-term surveys difficult.

With this project, was verified the possibility of using low-cost and portable transceivers in the implementation of a spectrum analyzer for the 2.4 GHz frequency band, a band that does not require licensing for use in industrial, scientific and medical applications, widely used in wireless local area networks and wireless personal area networks, to exchange information between devices and connect peripherals in domestic or industrial applications. For this purpose, was used a sensing platform, composed of a radio microcontroller capable of tuning in the desired frequencies for scanning the spectrum, in addition to making energy detections.

The results showed that it is possible to make measurements in this range, adjusting the limits of beginning and end of scanning, with different frequency steps and detecting the presence of signals from nearby communication systems.

In the end, possibilities for future work using this platform were pointed out, allowing greater precision with dedicated or distributed hardware in the sensing environment.

Keywords: 1. Spectrum analyzer. 2. Radio frequency. 3. Energy detection. 4. Embedded Systems.

Lista de ilustrações

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 – Diagrama de blocos de um analisador de espectro. | 22 |
| Figura 2 – Diagrama de blocos de um sintetizador de frequências. | 23 |
| Figura 3 – Parte das faixas para uso livre segundo a <i>International Telecommunica- tion Union</i> | 24 |
| Figura 4 – Máscara espectral utilizada para canais de Wi-Fi com 22 MHz de largura. | 26 |
| Figura 5 – Espectro de Wi-Fi, ZigBee, Bluetooth e BLE. | 28 |
| Figura 6 – Espectros de potência de sinais de banda estreita (a) e de banda larga (b) com densidade espectral de ruído para a mesma potência do sinal (PS). | 29 |
| Figura 7 – Analisador de espectro Aaronia RSA 80200 V5. | 33 |
| Figura 8 – Analisador de sinais Keysight N9030B. | 34 |
| Figura 9 – Analisador de espectro portátil Aaronia Spectran HF-80200 V5. | 35 |
| Figura 10 – Diagrama de blocos de alto nível do sistema do Namimote. | 40 |
| Figura 11 – Protótipo do Namimote, com seus principais componentes destacados. | 40 |
| Figura 12 – Protótipo da placa base com os principais blocos destacados. | 41 |
| Figura 13 – Típica conexão SPI entre um dispositivo principal (<i>Master</i>) e três secundários (<i>Slaves</i>). | 42 |
| Figura 14 – Projeto de hardware do rádio coletor. | 43 |
| Figura 15 – Perfil de tempo da detecção de energia. | 46 |
| Figura 16 – Diagrama de blocos do PLL de RF utilizado no MC1322x. | 46 |
| Figura 17 – Principais arquivos de código do Namimote. | 52 |
| Figura 18 – Fluxograma da análise de espectro no firmware. | 56 |
| Figura 19 – Fluxograma da análise de espectro no software de demonstração. | 57 |
| Figura 20 – Unidade coletora de dados multicanal montada. | 59 |
| Figura 21 – Pontos de acesso de Wi-Fi próximos à bancada de testes. | 62 |
| Figura 22 – Avanço temporal no espectro analisado, com passo de 2 MHz na frequên- cia e sem comunicação com o AP mais próximo. | 63 |
| Figura 23 – Avanço temporal no espectro analisado, em outra perspectiva, com passo de 2 MHz na frequência e sem comunicação com o AP mais próximo. | 63 |
| Figura 24 – Ocupação do espectro no tempo de execução analisado, com passo de 2 MHz na frequência e sem comunicação com o AP mais próximo. | 64 |
| Figura 25 – Avanço temporal no espectro analisado, com passo de 2 MHz na frequên- cia e com comunicação com o AP mais próximo, no canal 11. | 64 |
| Figura 26 – Avanço temporal no espectro analisado em outra perspectiva, com passo de 2 MHz na frequência e com comunicação com o AP mais próximo, no canal 11. | 65 |

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 27 – Ocupação do espectro no tempo de execução analisado, com passo de 2 MHz na frequência e com comunicação com o AP mais próximo, no canal 11. | 65 |
| Figura 28 – Avanço temporal no espectro analisado, com passo de 1 MHz na frequência e sem comunicação com o AP mais próximo. | 66 |
| Figura 29 – Avanço temporal no espectro analisado em outra perspectiva, com passo de 1 MHz na frequência e sem comunicação com o AP mais próximo. | 67 |
| Figura 30 – Ocupação do espectro no tempo de execução analisado, com passo de 1 MHz na frequência e sem comunicação com o AP mais próximo. | 67 |
| Figura 31 – Avanço temporal no espectro analisado, com passo de 1 MHz na frequência e com comunicação com o AP mais próximo, no canal 11. | 68 |
| Figura 32 – Avanço temporal no espectro analisado em outra perspectiva, com passo de 1 MHz na frequência e com comunicação com o AP mais próximo no canal 11. | 68 |
| Figura 33 – Ocupação do espectro no tempo de execução analisado, com passo de 1 MHz na frequência e com comunicação com o AP mais próximo no canal 11. | 69 |
| Figura 34 – Varredura temporal no espectro do canal 5, com comunicação e com passo de 1 MHz na frequência. | 70 |
| Figura 35 – Varredura temporal no espectro do canal 5, com comunicação e com passo de 1 MHz na frequência, em outra perspectiva. | 70 |
| Figura 36 – Ocupação do espectro no tempo de execução analisado, no canal 5, com passo de 1 MHz na frequência. | 71 |

Lista de tabelas

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 – Mapa de memória dos registradores do sintetizador de RF do MC1322x. | 47 |
| Tabela 2 – <i>VCO Loop Divider Integer</i> . Endereço: <i>0x8000980C</i> | 47 |
| Tabela 3 – <i>VCO Loop Divider Fractional</i> . Endereço: <i>0x80009810</i> | 48 |
| Tabela 4 – Características aproximadas da análise espectral implementada. | 71 |

Lista de abreviaturas e siglas

| | |
|------|-------------------------------------------|
| AP | <i>Access Point</i> |
| BLE | <i>Bluetooth Low Energy</i> |
| ED | <i>Energy Detection</i> |
| GPIO | <i>General Purpose Input-Output</i> |
| ISM | <i>Industrial, Scientific and Medical</i> |
| LNA | <i>Low Noise Amplifier</i> |
| MACA | <i>Medium Access Control Accelerator</i> |
| MCU | <i>Microcontroller Unit</i> |
| MIMO | <i>Multiple Input Multiple Output</i> |
| PA | <i>Power Amplifier</i> |
| PLL | <i>Phase-Lock Loop</i> |
| RF | Radiofrequência |
| SMAC | <i>Simple Media Access Controller</i> |
| SPI | <i>Serial Peripheral Interface</i> |
| VCO | <i>Voltage-Controlled Oscillator</i> |
| WLAN | <i>Wireless Local Area Network</i> |
| WPAN | <i>Wireless Personal Area Network</i> |

Sumário

| | | |
|----------|---------------------------------------------------------|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 19 |
| 2 | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 21 |
| 2.1 | Analísadores de Espectro para Radiofrequência | 21 |
| 2.2 | Sintetizadores de Frequência | 22 |
| 2.3 | Bandas de rádio ISM | 22 |
| 2.3.1 | Protocolos de Wi-Fi | 24 |
| 2.3.2 | Protocolo Zigbee | 26 |
| 2.3.3 | Protocolo Bluetooth | 27 |
| 2.4 | Detecção de Energia e Análise de Canal Livre | 27 |
| 3 | TRABALHOS RELACIONADOS | 31 |
| 3.1 | Dispositivos Comerciais | 32 |
| 3.2 | Contribuições Deste Trabalho | 35 |
| 4 | MÉTODOS E MATERIAIS | 39 |
| 4.1 | Principais Componentes de Hardware | 39 |
| 4.1.1 | Namimote | 39 |
| 4.1.2 | Analísador de Redes <i>WirelessHART</i> | 41 |
| 4.2 | Softwares Utilizados e Firmwares | 44 |
| 4.2.1 | Edição de Firmwares | 44 |
| 4.2.2 | Software para Demonstração os Dados Obtidos | 49 |
| 5 | DESENVOLVIMENTO DA PROPOSTA | 51 |
| 5.1 | Alterações no Firmware do Namimote | 51 |
| 5.2 | Alterações no Software de Demonstração do Namimote | 54 |
| 5.3 | Configurações para Demonstração | 55 |
| 5.4 | Firmware para o Analísador de Redes <i>WirelessHART</i> | 57 |
| 5.5 | Outras Possibilidades Futuras | 58 |
| 6 | RESULTADOS | 61 |
| 6.1 | Varredura Completa do Espectro de Wi-Fi | 61 |
| 6.2 | Varredura das Frequências de um Canal de Wi-Fi | 66 |
| 7 | CONCLUSÃO | 73 |
| | REFERÊNCIAS | 75 |

1 Introdução

Como mostrado no documento *Wi-Fi: Overview of the 802.11 Physical Layer and Transmitter Measurements* (TEKTRONIX, 2016) e no *White Paper: The Wi-Fi Evolution* (SHARMA, 2020), desde os anos 90, com o surgimento dos primeiros protocolos modernos de redes pessoais sem fio e redes locais sem fio, o estudo e desenvolvimento nesses campos tem aumentado significativamente, com a quantidade de dispositivos disponíveis no mercado e compatíveis com tais tecnologias.

Protocolos como Wi-Fi, Bluetooth e ZigBee adaptam-se às necessidades de mercado, onde milhões de dispositivos podem utilizar as mesmas faixas de frequência para efetuar suas comunicações com outros dispositivos ou com a Internet, portanto, a coexistência é essencial. Em especial, a coexistência na faixa de 2,4 GHz, devido ao emprego dela em escala mundial.

Esses avanços nos sistemas acompanham a ciência e proporcionam grandes aprimoramentos nas comunicações, com diferentes formas de modulação para os sinais (modulações como DSSS, OFDM ou FHSS), variações da faixa ocupada por uma rede (e.g. alguns protocolos de Wi-Fi podem utilizar bandas de cerca de 20 MHz ou 40 MHz), utilização de outras faixas de frequência para operação (e.g. o protocolo ZigBee pode utilizar canais nas faixas do ISM que se iniciam em 902 MHz ou 2,4 GHz).

As evoluções dos protocolos de comunicação trazem maiores taxas de transferência e confiabilidade, proporcionam conexões de maior distância e são aprimorados para consumir menos energia, como é o caso do Bluetooth e do BLE (*Bluetooth Low Energy*) (BLUETOOTH SIG, 2021), permitindo o uso ou proporcionando uma melhor eficiência no uso de baterias na alimentação dos dispositivos. Além disso, a conectividade de aparelhos e dispositivos comuns com acesso à Internet tem se mostrado um mercado em constante expansão, com o aumento das possibilidades para o surgimento de tecnologias de *Internet das Coisas* (IoT, do inglês *Internet of Things*), como relógios inteligentes, assistentes virtuais, carros, eletrodomésticos, sensores, entre outros (SCHULTZ, 2020). Esses dispositivos também podem utilizar protocolos legados, tais como Zigbee, Bluetooth, BLE ou Wi-Fi.

Como dito anteriormente, a faixa de 2,4 GHz é utilizada globalmente, portanto, os principais protocolos de WLAN e WPAN utilizam esta faixa. Estudos que visam a avaliação da ocupação desta faixa por sinais úteis ou não, são de grande importância na depuração de sistemas, como um estudo mostrado em *Coexistence and Interference Tests on a Bluetooth Low Energy Front-End* (SILVA et al., 2014), que busca avaliar o comportamento do BLE em ambientes com dispositivos que compartilham o canal utilizando outros protocolos.

Uma das formas de efetuar análises deste tipo é através da utilização de analisadores de espectro, cuja finalidade é captar os sinais presentes em uma determinada faixa de frequências e exibi-los em um terminal, sendo possível detectar assim, sinais indesejados provenientes de outras comunicações, interferências, ruídos e até mesmo distorções ou violações de protocolo em um sinal experimental. O ponto negativo é que esses analisadores de espectro comerciais apresentam custo elevado, o que impede seu uso corriqueiro. Analisadores de espectro de baixo custo, por outro lado, em detrimento de precisão, permitem a distribuição em diversos pontos de um local a ser monitorado, ou podem ser deixados para coleta de dados por longa duração em determinado local. Ainda, o uso de múltiplos analisadores de espectro de baixo custo e de estreita faixa, poderiam ser combinados para juntos aumentarem a resolução do sensoriamento.

Considerando o exposto, este trabalho apresenta a proposta de utilizar funcionalidades de uma plataforma rádio-microcontrolador de baixo custo para efetuar análises espectrais, com a varredura e detecção de energia na faixa de frequências que se inicia em 2,4 GHz, utilizada por muitos protocolos de comunicação e no desenvolvimento de muitos dispositivos, inclusive de IoT.

Este trabalho está dividido da seguinte forma: no Capítulo 2 encontra-se a fundamentação teórica, com as informações pertinentes para o entendimento da teoria empregada neste trabalho; no Capítulo 3, encontra-se uma listagem dos trabalhos relacionados, com revisão bibliográfica acadêmica e de dispositivos comerciais relacionados com as funcionalidades propostas aqui; no Capítulo 4 encontram-se os métodos e materiais, com uma descrição do hardware, software e firmware utilizados; no Capítulo 5 encontra-se uma descrição mais detalhada do desenvolvimento da proposta, funcionamento dos sistemas implementados e possibilidades de trabalhos futuros derivados deste; no Capítulo 6 encontram-se demonstrações dos resultados obtidos com diferentes testes; por último, no Capítulo 7, a conclusão é apresentada.

2 Fundamentação Teórica

Neste capítulo são apresentados os fundamentos teóricos para auxiliar na compreensão do que foi desenvolvido neste trabalho. Para tanto, apresentam-se conceitos, explicações de sistemas existentes relacionados com analisadores de espectro, apresentação de protocolos de comunicação sem fio e normas relacionadas a faixa de frequências de interesse.

2.1 Analisadores de Espectro para Radiofrequência

Um analisador de espectro para redes sem fio tem como função principal capturar sinais em um determinado espectro de frequências e verificar os parâmetros que compõem o seu estado. Um tipo clássico de analisador de espectro, mostrado na apresentação do *1997 Back to Basics Seminar, Spectrum Analysis Basics* (BROWN, 1997), efetua medidas de forma passiva, sem interferir nos sinais, para assim conseguir mostrar de forma confiável a ocupação do espectro de frequências por um determinado sistema. Esses analisadores normalmente apresentam informações sem processamento de sinais, como, por exemplo, tensão, potência, período, forma de onda, preenchimento de bandas e espectro de frequências, e ainda, dependendo da aplicação, os sinais podem ter várias características particulares analisadas, como tipo de modulação, distorções e níveis de ruído. Assim, conseguindo obter essas informações, torna-se possível efetuar avaliações complexas de um sistema de RF.

A Figura 1 contém um diagrama de blocos dos principais componentes de um analisador de espectro, como o atenuador de entrada de RF, *mixer*, ganho da frequência intermediária, filtros, detectores, osciladores e componentes para exibir os resultados em vídeo.

O *mixer* converte um sinal que está em uma frequência, para outra, neste caso, das altas frequências para as baixas. A sua saída resulta nos dois sinais originais que foram aplicados na entrada (o sinal a ser modulado ou demodulado) e no oscilador (normalmente um Oscilador Controlado por Tensão, VCO, do inglês *Voltage-Controlled Oscillator*, um dispositivo eletrônico que tem sua frequência de saída controlada por tensão), bem como a soma das frequências dos dois sinais e a subtração delas. Em um analisador de espectro, a parte da subtração dos sinais é que é utilizada, para transladar um sinal que está em alta frequência e depois filtrá-lo, deixando somente a frequência onde a informação se encontra. Logo após, o sinal passa por um tratamento para ser exibido em vídeo.

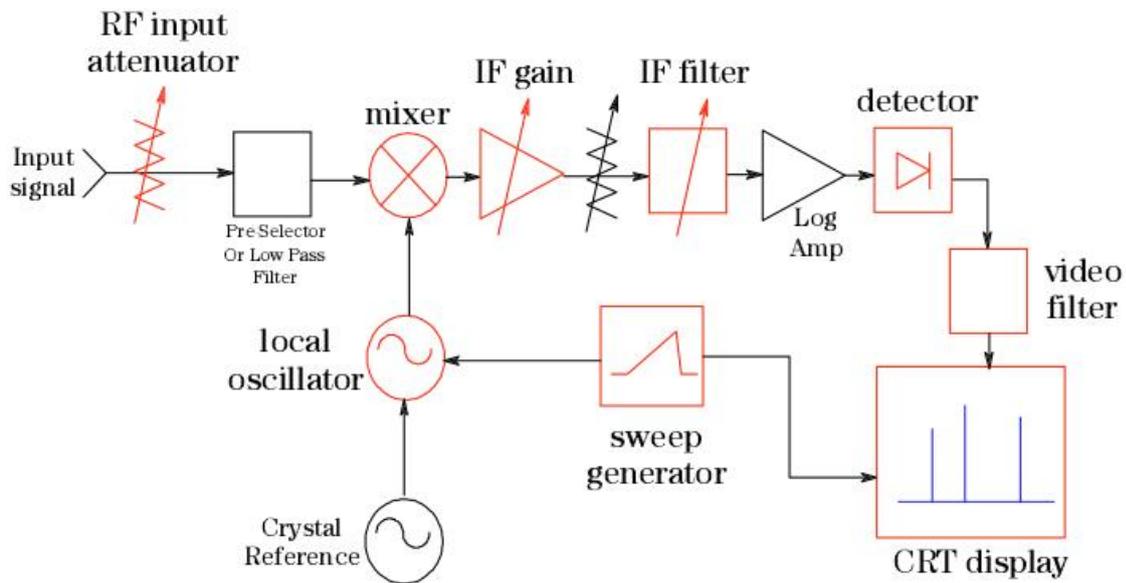


Figura 1 – Diagrama de blocos de um analisador de espectro.

Fonte: Retirado do documento *Spectrum Analysis Basics* (BROWN, 1997).

2.2 Sintetizadores de Frequência

Como mostrado no livro *RF Components and Circuits* (CARR, 2002), um Sintetizador de Frequência é um tipo de oscilador capaz de produzir sinais de referência de alta qualidade. Na Figura 2 está mostrado um diagrama de blocos de alto nível de um circuito comum para um sintetizador de frequências. O sinal de saída é produzido por um VCO, onde a tensão de controle aplicada nele é gerada pelo sinal de saída de um detector de fase (ou comparador de fase) que recebe uma frequência de referência e uma versão da frequência de saída do VCO dividida por N . Quando as duas frequências são iguais, a saída do detector de fase é zero, e a tensão entregue ao VCO está em um valor estável. Se a frequência do VCO começar a variar, o valor do detector de fase também varia e o integrador passará a ajustar a tensão para eliminar a variação de frequência. Este tipo de circuito é denominado *Malha de Captura de Fase* (PLL, do inglês *Phase-Locked Loop*).

Além do bloco do PLL, também estão presentes na Figura 2 um bloco do oscilador de referência e um bloco representando um circuito de saída do sintetizador. Esse bloco de saída (indicado por *Output Section* no diagrama), tem a finalidade de amplificar o sinal de saída do VCO, além de conferir estabilidade e precisão enquanto a frequência é variada.

2.3 Bandas de rádio ISM

Como mostrado no tutorial da página *Redes Wi-Fi I: Espectro de Frequência ISM* (PORTAL TELECO, 2020) e no artigo *Overview of ISM bands and Software-defined*

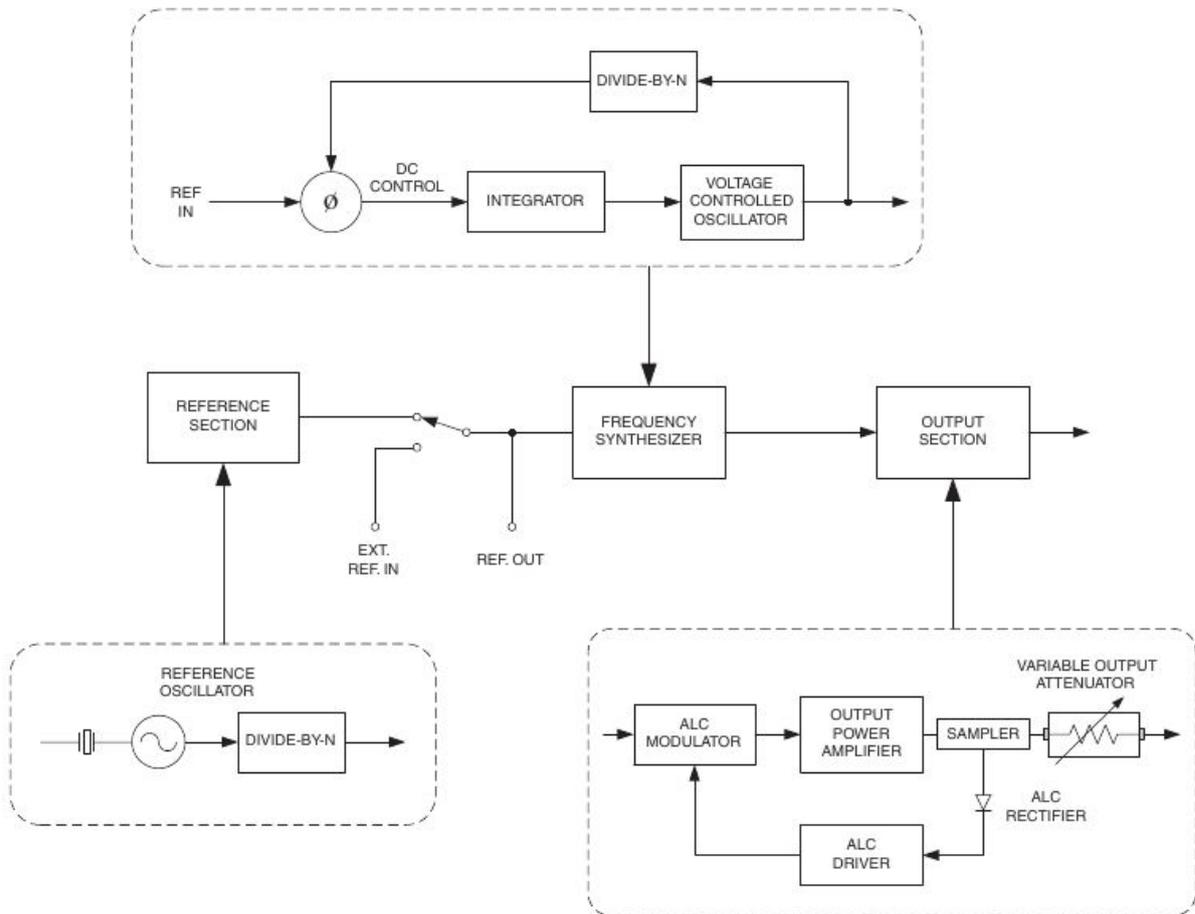


Figura 2 – Diagrama de blocos de um sintetizador de frequências.

Fonte: Retirado do livro *RF Components and Circuits* (CARR, 2002).

Radio Experimentation (KUMBHAR, 2016), no espectro de frequências utilizado para telecomunicações, as faixas denominadas ISM (*Industrial, Scientific and Medical*) são reservadas internacionalmente para o desenvolvimento industrial, científico e médico, para o uso livre, sem a necessidade de licenciamento individual, mas com limitações regulamentadas (que variam localmente, dependendo do país ou bloco econômico). Na Figura 3 está mostrado algumas partes do espectro de frequências segundo a *International Telecommunication Union*.

Para a coexistência entre os dispositivos que utilizam frequências semelhantes, foram desenvolvidos muitos protocolos de uso para determinadas aplicações, como, por exemplo, os sinais de Wi-Fi que podem utilizar a faixa de frequências que se inicia em 2,4 GHz e precisam coexistir com diversos outros dispositivos (que podem ser também de Wi-Fi, na chamada autocoexistência) ou ainda outros protocolos, como Bluetooth, DECT e Zigbee, que utilizam a mesma faixa.

Como mostrado no padrão do *European Telecommunications Standards Institute* (ETSI, 2012), a potência máxima de transmissão para dispositivos operando nessa faixa

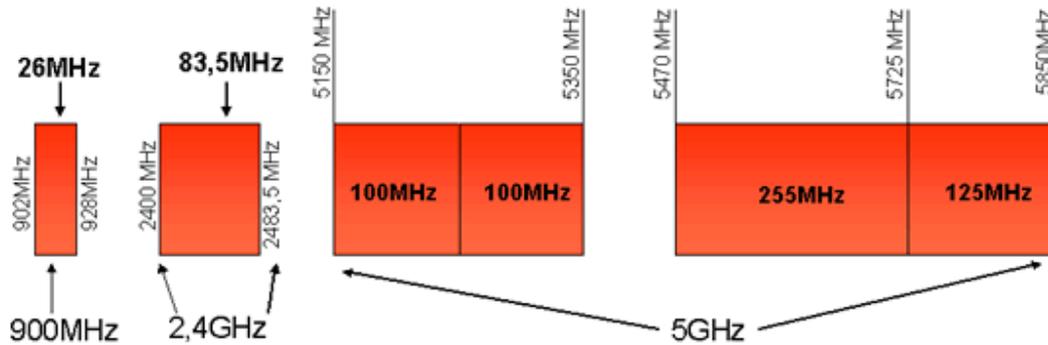


Figura 3 – Parte das faixas para uso livre segundo a *International Telecommunication Union*.

Fonte: Retirado do trabalho *Uma análise comparativa do padrão IEEE 802.11 operando em 2,4 GHz e em 900 MHz* (Jornal PETNews, 2011).

de frequências (2,4 GHz) é de no máximo 20 dBm (o equivalente à 100 mW), limite este utilizado na maioria das normas espalhadas pelo mundo. Esse valor pode apresentar variações conforme o protocolo, tipo de modulação ou legislação de algum país.

2.3.1 Protocolos de Wi-Fi

Como apresentado no documento técnico elaborado pela *Tektronix*, *Wi-Fi: Overview of the 802.11 Physical Layer and Transmitter Measurements* (TEKTRONIX, 2016), Wi-Fi é uma tecnologia de rede sem fio local (WLAN, sigla em inglês para *Wireless Local Area Network*) para a comunicação entre dispositivos eletrônicos, baseada nos padrões 802.11 da IEEE. Desta forma, produtos comerciais de diversas marcas e modelos podem operar em conjunto, utilizando a mesma banda de frequências, coexistindo ou até trocando informações entre si.

Para que essa coexistência ocorra o melhor possível, os protocolos de comunicação para esses dispositivos foram pensados para reduzir ao máximo a perda de informação por conta de conflitos, inclusive entre protocolos diferentes. Para a comunicação de Wi-Fi, os principais protocolos utilizados nos dispositivos comerciais, são (em ordem cronológica) o 802.11b, 802.11g e 802.11n. Outros protocolos semelhantes existem, mas devido ao avanço da tecnologia, são menos utilizados, como o 802.11 original ou o 802.11a. Também há o desenvolvimento de protocolos de Wi-Fi para operações específicas ou para o uso em outras frequências que não são as usuais na faixa dos 2,4 GHz ou 5 GHz, como o 802.11af, que utiliza a faixa entre 54 MHz e 790 MHz.

A faixa que se inicia em 2,4 GHz possui 13 canais (onde é possível que 3 deles operem sem sobreposição se estiverem com largura de 22 MHz) e na faixa de 5 GHz há 28 canais sem sobreposição (de 20 MHz) permitidos no Brasil. A seguir são apresentados os

protocolos 802.11 mais comumente utilizados.

802.11b

Utilizando uma forma de modulação dos dados diferente dos outros protocolos, o 802.11b (disponível no mercado desde 2000) pode atingir o máximo de taxa de transferência de 11 Mbit/s e utiliza somente a faixa de frequências de 2,4 GHz.

Na mesma época, o 802.11a foi disponibilizado para operar na faixa dos 5 GHz, mas não teve muita popularidade por ter seu alcance reduzido, mesmo possuindo métodos de modulação que permitissem maiores taxas de transferência.

A principal desvantagem do 802.11b é o fato de possuir baixa taxa de transferência com relação à demanda atual dos usuários. Mesmo assim, devido a sua popularidade e simplicidade (com relação aos outros protocolos que utilizam modulações mais complexas) é muito utilizado ainda hoje para sistemas que não necessitem de altas taxas de transferência ou ainda, em dispositivos providos de sistemas de processamento de baixa capacidade.

802.11g

Para aumentar a velocidade da transferência de dados, o tipo de modulação dos dados do 802.11b foi alterada para poder atingir taxas de transferência de até 54 Mbit/s (a mesma forma de modulação do 802.11a), dando origem ao 802.11g (no mercado desde 2003), que utiliza a mesma banda de 2,4 GHz e o hardware utilizado é compatível com o protocolo anterior, sendo capaz de identificar quando é possível utilizar o *b* ou o *g*, dependendo da tecnologia dos outros dispositivos presentes.

Da mesma forma que no *b*, no *g*, um dispositivo operando em um dos canais também sofre com as interferências que possam estar presentes nas suas frequências de operação ou dos canais adjacentes, mas também possui métodos e protocolos para que o efeito dessas colisões sejam minimizados.

802.11n

O padrão 802.11n foi projetado para melhorar muitos dos problemas encontrados nas versões anteriores da família 802.11, com o aumento do alcance, confiabilidade e taxa de transferência. Isso foi feito com o aprimoramento das técnicas de modulação, a possibilidade de operar com múltiplas antenas, além de utilizar canais mais largos (de 40 MHz, em comparação com os canais de 20–22 MHz dos protocolos anteriores). O resultado disso, foi a possibilidade de transferir dados com até 600 Mbit/s. Outra modificação foi o fato do *n* poder ser utilizado tanto na banda de 2,4 GHz como na de 5 GHz.

A utilização de múltiplas antenas tornou possível também a utilização de sistemas de múltiplas entradas e múltiplas saídas (MIMO, do inglês *Multiple Input Multiple Output*),

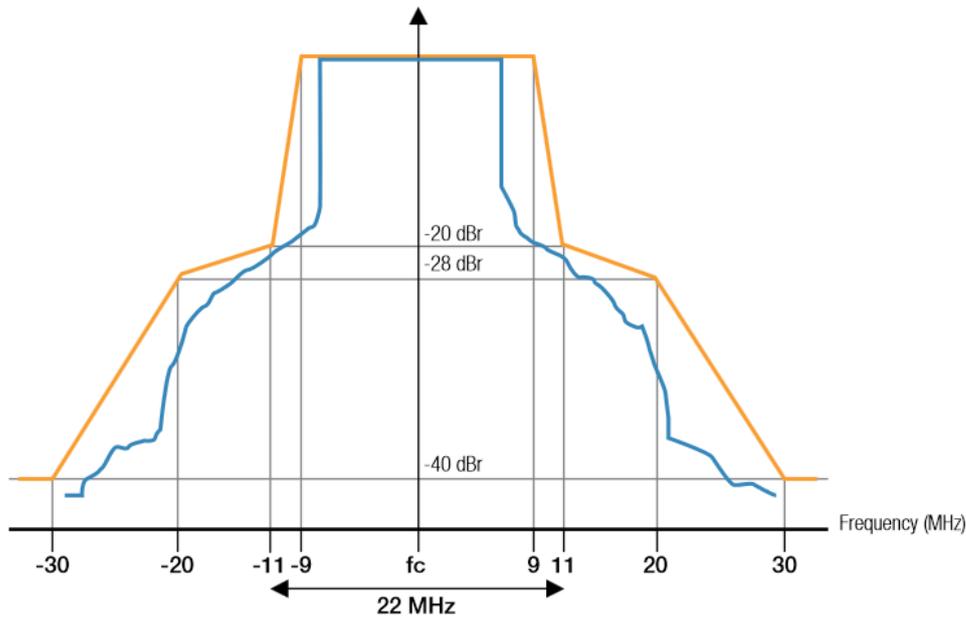


Figura 4 – Máscara espectral utilizada para canais de Wi-Fi com 22 MHz de largura.

Fonte: Retirada do documento *Wi-Fi: Overview of the 802.11 Physical Layer and Transmitter Measurements* (TEKTRONIX, 2016).

podendo transmitir e receber dados em simultâneo, utilizando o canal mais adequadamente conforme a quantidade de antenas e dispositivos presentes.

Na Figura 4 está um gráfico que mostra como ficam distribuídos os sinais na largura de banda ocupada em um canal de Wi-Fi com largura de banda de 22 MHz. Essa distribuição de ocupação pode variar, mas respeitando os limites impostos por um determinado protocolo. Essas restrições de potência, dentro de certos limites de frequência, podem ser chamados de *Máscara Espectral*.

2.3.2 Protocolo Zigbee

No livro *Computer Networking: A Top-Down Approach* (KUROSE; ROSS, 2013), o chamado de 802.15.4, é descrito como um protocolo que utiliza a faixa de frequências ISM iniciando em 2,4 GHz, assim como os 802.11. Esse protocolo foi pensado, principalmente, para a comunicação com baixo consumo energético, baixo custo e baixas taxas de transferência, para dispositivos do tipo sensores de temperatura, chaves de acionamento sem fio, entre outros, que não geram muitos dados.

Como mostrado no texto *Análise Sobre a Tecnologia de Rede Sem Fio Zigbee / IEEE 802.15.4* (BRONZATTI, 2013), na faixa dos 2400 – 2483,5 MHz, esse protocolo possui 16 canais (do 11 ao 26), possuindo outros 11 canais nas frequências de 868 – 868,6 MHz (1 canal) e 902 – 928 MHz (10 canais).

No *White Paper Demystifying 802.15.4 and ZigBee* (DIGI INTERNATIONAL

INC., 2016), é mostrado que os canais desse protocolo alocam 5 MHz de largura de banda, mas utilizam apenas 2 MHz para transmitir seus dados, restando assim, uma “guarda” de 3 MHz entre um canal e outro.

2.3.3 Protocolo Bluetooth

No livro *Computer Networking: A Top-Down Approach* (KUROSE; ROSS, 2013), o protocolo de Bluetooth é comentado e, como nos protocolos mencionados anteriormente, este protocolo também utiliza parte da faixa de 2,4 GHz. Foi desenvolvido para comunicações de curto alcance, baixa taxa de transferência e baixo consumo energético para substituir cabos para conectar dispositivos periféricos a computadores ou outros dispositivos móveis, além de ser possível a transferência de arquivos em uma rede sem fio pessoal, também conhecida como WPANs (*Wireless Personal Area Networks*).

Como mostrado no artigo *Coexistence and Interference Tests on a Bluetooth Low Energy Front-End* (SILVA et al., 2014), o protocolo clássico de *Bluetooth* utiliza a banda de 2400 – 2483,5 MHz com 79 canais com 1 MHz de largura, enquanto a tecnologia *Bluetooth Low Energy* (BLE) utiliza 40 canais de 2 MHz, como mostrado na Figura 5.

Na página da *Bluetooth SIG*, que é uma comunidade global de mais de 36.000 empresas, formada para unificar, harmonizar e impulsionar a inovação no ramo da conectividade de dispositivos, é mostrado que a tecnologia BLE surgiu para conectar dispositivos (assim como o Bluetooth clássico), proporcionando uma economia de energia de até 90% (comparando BLE com Bluetooth clássico), mas com menor alcance e taxa de transferência (BLUETOOTH SIG, 2021).

Na Figura 5 está mostrado como é a distribuição dos canais de Wi-Fi (mostrados somente os 3 que não se sobrepõem), ZigBee, Bluetooth e BLE na faixa de 2,4 GHz.

2.4 Detecção de Energia e Análise de Canal Livre

Como mostrado no artigo *Clear Channel Assessment in Energy-Constrained Wide-band Wireless Networks* (RAMACHANDRAN; ROY, 2007), as funcionalidades de Detecção de Energia (ED, do inglês *Energy Detection*) e Análise de Canal Livre (CCA, do inglês *Clear Channel Assessment*) estão presentes em dispositivos de rede sem fio e tratam-se de mecanismos para detectar se o meio (um determinado canal da faixa de frequências do protocolo sendo utilizado) encontra-se livre para poder ser utilizado de forma eficiente, com o mínimo possível de interferências, em uma comunicação.

Em um sistema sem fio que utiliza uma comunicação do tipo *banda estreita* (onde o sinal com a informação transmitida não excede significativamente a frequência central do canal, como mostrado na Figura 6), pode realizar a medida de CCA apenas efetuando

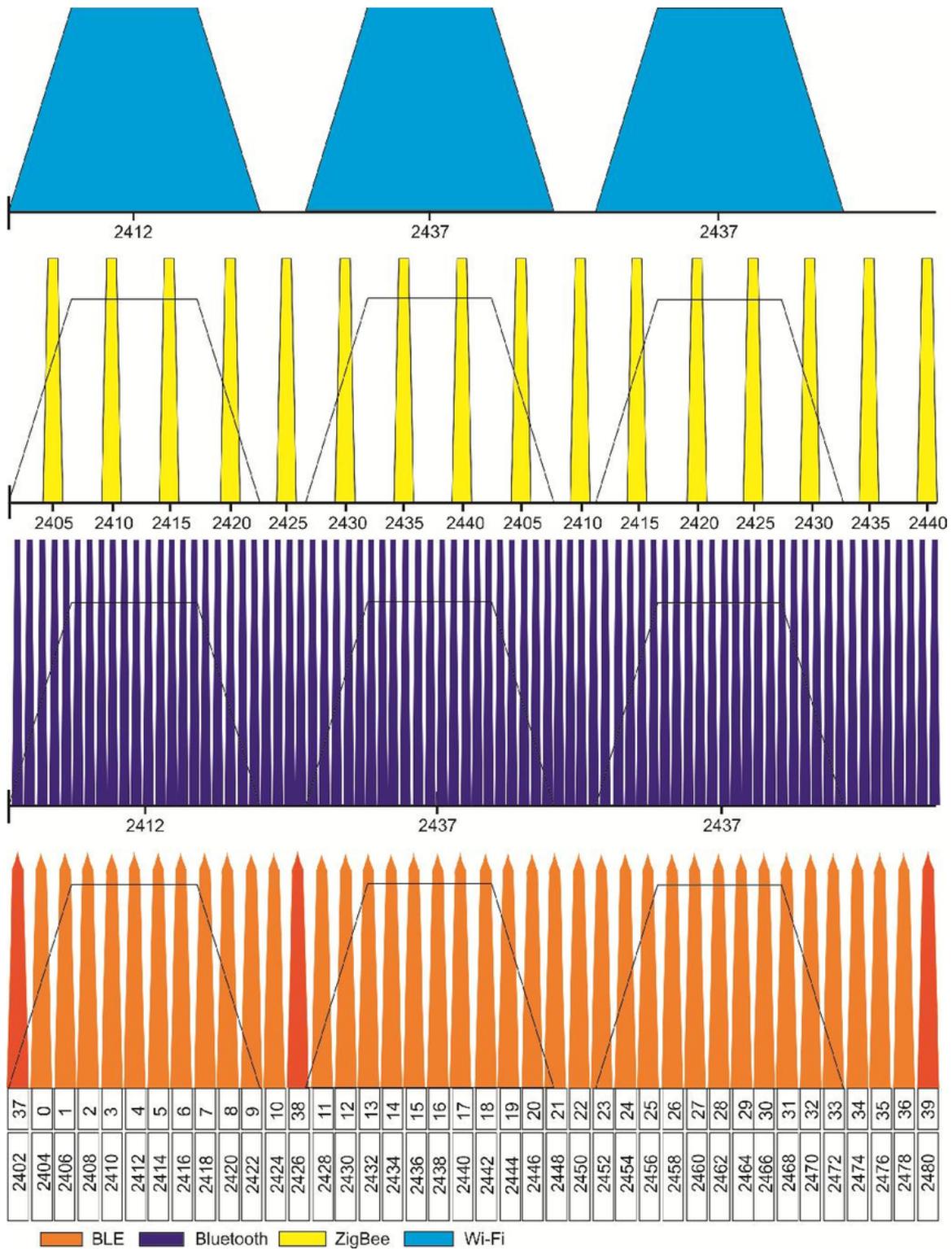


Figura 5 – Espectro de Wi-Fi, ZigBee, Bluetooth e BLE.

Fonte: Retirada do artigo *Coexistence and Interference Tests on a Bluetooth Low Energy Front-End* (SILVA et al., 2014).

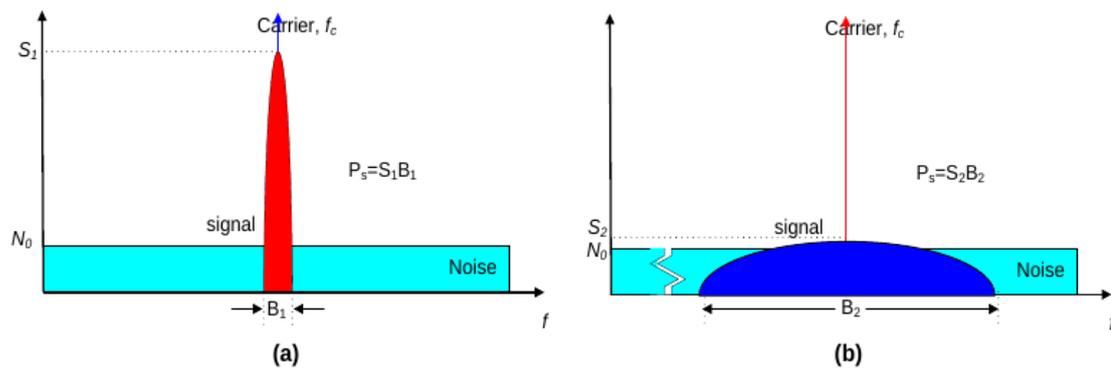


Figura 6 – Espectros de potência de sinais de banda estreita (a) e de banda larga (b) com densidade espectral de ruído para a mesma potência do sinal (PS).

Fonte: Retirada do artigo *Clear Channel Assessment in Energy-Constrained Wideband Wireless Networks* (RAMACHANDRAN; ROY, 2007).

uma medida de ED na frequência principal. Em uma comunicação sem fio de banda larga (onde parcelas da informação estão espalhadas em sinais de frequências no entorno da frequência central do canal), são necessários métodos mais complexos para determinar se o canal está livre. Neste caso, a utilização de analisadores de espectro de baixo consumo podem ser utilizados para em conjunto com sistemas de comunicação mais avançados para verificar se um determinado canal encontra-se realmente livre para ser utilizado.

3 Trabalhos Relacionados

Neste capítulo estão contidas informações referentes a trabalhos acadêmicos que auxiliaram no desenvolvimento deste trabalho ou na compreensão dos sistemas envolvidos (como protocolos, métodos e dispositivos). Algumas informações serão explicadas com maior detalhamento conforme o desenvolvimento for apresentado nos capítulos e seções seguintes.

O artigo *Qualidade da Medição de Intensidade de Sinal nas Comunicações de uma Rede de Sensores Sem Fios: Uma Abordagem da Camada Física* (GIACOMIN; VASCONCELOS, 2006) é importante para auxiliar na execução deste projeto, pois contém informações sobre comunicações de redes sem fios e métodos, que auxiliam no entendimento dos sistemas utilizados para interpretar os dados obtidos e avaliar o estado da rede. O artigo em questão possui estudos sobre tipos básicos de modulação de ondas de rádio utilizados para a transmissão de dados, modelo para o estudo da atenuação dos sinais em um meio de propagação, revisão sobre modulação e demodulação, características de transmissores e receptores de RF, métodos de medição de intensidade de sinal e tratamento dos dados.

O artigo *16-Channel-Analyser for Parallel IEEE 802.15.4 Monitoring* (KRÄTZIG et al., 2009) contém o conceito e um protótipo para um sistema para a análise de redes com 16 canais que utilizam o padrão IEEE 802.15.4, com informações referentes às configurações de rede, descrição de protocolos e técnicas.

Para a execução deste trabalho de conclusão poderão ser utilizados hardwares já existentes. As principais sugestões são dispositivos que possuam uma plataforma adequada para as funções de análise de níveis de energia e variação de frequência do rádio na faixa planejada. Para isso, é possível utilizar o dispositivo apresentado no artigo *Namimote: A Low-Cost Sensor Node for Wireless Sensor Networks* (MÜLLER et al., 2012) ou o dispositivo proposto na dissertação de mestrado *Analisador de Redes WirelessHART* (LORENÇATO, 2013). Esses trabalhos possuem documentação que, além de detalhar os hardwares projetados, também trazem informações detalhadas sobre o funcionamento dos mesmos, algumas técnicas e programas utilizados em testes, além de dicas e sugestões para o desenvolvimento de trabalhos futuros.

Outra dissertação de mestrado que utiliza sistemas semelhantes ao do Namimote, é o *Analisador de Redes WirelessHART com Capacidade de Detecção de Coexistência* (MACHADO, 2014), que possui informações detalhadas sobre um sistema de análise de redes *WirelessHART*, com estudos, programas e técnicas que auxiliam na compreensão do funcionamento dos possíveis dispositivos citados anteriormente.

Os artigos *Proposta de um Analisador de Rede Sem Fio Multicanal Padrão IEEE 802.15.4* (CARVALHO et al., 2014) e *16-Channel-Analyser for Parallel IEEE 802.15.4 Monitoring* (KRÄTZIG et al., 2009) contêm abordagens semelhantes para um sistema de análise multicanal, mas com propostas diferentes de componentes utilizados e outras técnicas de captura e interpretação de dados.

A dissertação *IEEE 802.11 Signal Source Mapping using Low Cost Spectrum Analysers* (WELLS, 2007) apresenta um sistema para visualização e mapeamento de redes de Wi-Fi, fazendo um estudo de caso, avaliando as frequências ocupadas no espectro e a potência captada por um dispositivo de análise espectral. Como é utilizado um dispositivo de baixo custo, com algumas características possíveis de serem configuradas e testadas nos dispositivos utilizados neste projeto em desenvolvimento, a dissertação em questão contém informações que podem ser úteis em estudos futuros, além de informações sobre a utilização de dispositivos para análises em redes de Wi-Fi.

3.1 Dispositivos Comerciais

Os dispositivos disponíveis no mercado que efetuam análise espectral para essa faixa ISM normalmente são de grande porte, de custo elevado e são projetados para serem utilizados em bancadas e laboratórios. Existem dispositivos que são portáteis, mas esses também possuem custo elevado, especialmente por operarem à bateria. Devido à incorporação de diversas funcionalidades, tais como a possibilidade de analisar uma ampla faixa de frequências (para aumentar a quantidade de áreas em que tais dispositivos podem ser utilizados), presença de tela para a avaliação em tempo real da rede analisada (e com isso, todo um desenvolvimento de um sistema de vídeo), além de sistemas que possam proporcionar um elevado desempenho e velocidade, faz com que tais equipamentos apresentem custo elevado. Essas funcionalidades extras ou grande poder de processamento, nem sempre são requeridas em análises feitas por desenvolvedores de sistemas mais simples, em manutenções de redes ou estudos de caso em um determinado local.

Fazendo uma seleção dos dispositivos presentes no mercado que mais se aproximam da faixa de radiofrequência e largura de banda a ser avaliada no projeto proposto aqui, é possível destacar:

- *Spectran 80200 V5 RSA* da *Aaronia AG*

Esse analisador de espectro possui uma escala de frequência que vai de 9 kHz até 20 GHz, com uma largura de banda de 88 MHz. Possui armazenamento interno e conexão USB para análise em tempo real (Figura 7).

Pode ser encontrado na Internet com preços na faixa de USD 27.000,00.



Figura 7 – Analisador de espectro Aaronia RSA 80200 V5.

Fonte: Imagem retirada de <<https://www.tequipment.net/Aaronia/RSA-80200/Spectrum-Analyzers/>>.

Mais informações sobre ele, podem ser obtidas em: <www.tequipment.net/Aaronia/RSA-80200/Spectrum-Analyzers/>

- *Spectran HF 80200 V5 X* da *Aaronia AG*

Possuindo uma frequência de trabalho de 9 kHz até 20 GHz e uma largura de banda de 88 MHz, controlado por USB e armazenamento interno, esse analisador de espectro se difere do anterior, pois possui bateria interna para duas horas de funcionamento, além de ser mais compacto.

Pode ser encontrado na Internet com preços na faixa de EUR 20.000,00.

Mais informações sobre ele, podem ser obtidas em: <www.rlx.sk/en/usb-spectrum-analyzer/6307-spectran-hf-80200-v5-x-aaronia-real-time-usb-spectrum-analyzer-9khz-20ghz.html>

- *R5550* da *ThinkRF*

Este dispositivo trabalha com frequências de até 8 GHz (podendo ser encontrado em versões que podem trabalhar com 27 GHz), com largura de banda de 100 MHz e pode ser controlado via porta *Ethernet*. Apesar de ser compacto, necessita de alimentação externa, que pode ser uma bateria de carro, tornando-o ideal para ser instalado em veículos terrestres ou aquáticos, possuindo ainda algumas funcionalidades mais voltadas para a área militar.

Pode ser encontrado na Internet custando na faixa de USD 4.000,00.

Mais informações sobre ele, podem ser obtidas em: <www.saelig.com/product/r5550-408.htm>

- *N9030B* da *Keysight Technologies*

Esse analisador de espectro é o mais completo dos citados aqui, para ser instalado em bancada, com uma frequência de operação de 3 Hz até 50 GHz, com largura de banda de 85 MHz até 510 MHz, além de não necessitar de conexão com outros dispositivos (como um computador) para utilizar todas as suas funcionalidades ou analisar os dados (Figura 8).

Pode ser encontrado na Internet com preços na faixa de USD 130.000,00.



Figura 8 – Analisador de sinais Keysight N9030B.

Fonte: Imagem retirada de <<https://www.keysight.com/br/pt/product/N9030B/pxa-signal-analyzer-multi-touch-2-hz-50-ghz.html>>.

Mais informações sobre ele, podem ser obtidas em: <www.ebay.com/p/14008786480>
<www.everythingrf.com/products/rf-spectrum-analyzers/agilent-technologies/668-23-n9030b>

- *RFeye Node 100-8* da *CRFS*

Esse dispositivo portátil trabalha com frequências de 9 kHz até 8 GHz, com uma largura de banda de 100 MHz e pode ser utilizado tanto em laboratório como em campo, possui conexão USB para a coleta dos dados mas também possui uma unidade de armazenamento interna.

Mais informações sobre esse dispositivo podem ser obtidas em: <www.crfs.com/product/receivers/rfeye-node-100-8/>

<www.everythingrf.com/products/rf-spectrum-analyzers/crfs/668-901-rf-eye-node-100-8>

- *Spectran HF-80200 V5* da *Aaronia AG*

Este é um analisador compacto e portátil para análise em tempo real que opera de 9 kHz até 20 GHz, com uma largura de banda de 175 MHz (Figura 9). Possui bateria para autonomia de duas horas de operação e cartão de memória.

Pode ser encontrado na Internet com preços na faixa de USD 24.000,00

Mais informações sobre esse dispositivo podem ser encontradas em: <www.tequipment.net/Aaronia/HF-80200/Spectrum-Analyzers/>

- *WiSpy* da *MetaGeek*

Este analisador de espectro, de menor custo que os anteriores, pode ser encontrado na Internet com preços a partir de USD 999 (isso pelo conjunto de hardware e software mais básico). O kit de análise espectral contém um dispositivo para ser utilizado



Figura 9 – Analisador de espectro portátil Aaronia Spectran HF-80200 V5.

Fonte: Imagem retirada de <<https://www.tequipment.net/Aaronia/HF-80200/Spectrum-Analyzers/>>.

em conjunto com um software, por conexão USB, e efetua análises de espectro para frequências utilizadas por dispositivos de Wi-Fi, de 2400 MHz até 2495 MHz

Mais informações sobre esse dispositivo podem ser encontradas em: <<https://www.metageek.com/products/wi-spy/>>

<<https://support.metageek.com/hc/en-us/articles/203802010-Wi-Spy-Data-Sheet>>

3.2 Contribuições Deste Trabalho

A lista de analisadores de espectro disponíveis no mercado é bem extensa, mas a maioria deles é de alto custo e com muitas funcionalidades que não seriam necessárias para certas análises na faixa específica de frequências proposta. Assim, o principal objetivo desse trabalho é fazer com que um dispositivo simples e de baixo custo efetue detecções de energia para a faixa de frequências ISM que se inicia em 2,4 GHz. O dispositivo proposto é uma ferramenta útil e barata para otimizar processos de desenvolvimento e analisar ambientes industriais que geralmente utilizam sensores sem fio imersos em um ambiente de comunicação onde estão presentes diversos protocolos diferentes, operando em conjunto (e possivelmente entrando em conflito); além disso, esse analisador de espectro de baixo custo pode se tornar uma ferramenta muito importante para auxiliar os desenvolvedores a depurarem o funcionamento de novos dispositivos que possam operar nesta faixa do espectro ISM, ou ainda, que possam sofrer com interferências provenientes da comunicação de outros protocolos.

O resultado esperado é ter a possibilidade de obter formas claras e simples de efetuar análises de uma determinada rede através da geração de gráficos a partir dos dados obtidos, chegando o mais próximo possível dos resultados que poderiam ser extraídos de um equipamento comercial, e assim, justificar o desenvolvimento e estudos futuros ou aprimoramentos desse projeto.

Para esse propósito, é possível utilizar uma plataforma comercial capaz de efetuar medidas de níveis de energia e também capaz de sintonizar em uma frequência específica, não estando necessariamente atrelada a um protocolo específico. Esse é o caso da família de microcontroladores MC1322x da antiga Freescale (NXP, 2008), uma plataforma para o desenvolvimento de projetos para radiofrequência na faixa de 2,4 GHz (no protocolo 802.15.4), com baixo consumo de energia e com um núcleo ARM7 de 32 bits.

Como o propósito desses microcontroladores é a comunicação no protocolo 802.15.4, toda a sua estrutura é voltada para o trabalho de desenvolvimento nele. Mesmo assim, verificou-se que é possível efetuar as funções desejadas através da programação dos registradores desta plataforma, para fazer varreduras em frequências que não correspondem às frequências utilizadas para a comunicação nos canais do protocolo e então efetuar medidas de níveis de energia com a utilização de funções de *Energy Detection* disponíveis.

Um transceptor que utiliza esse microprocessador, o Namimote (MÜLLER et al., 2012), trata-se de uma plataforma multifuncional de baixo custo para redes de sensores sem fio, utilizando o protocolo de comunicação 802.15.4. É possível efetuar alterações no seu firmware para que ele passe a realizar operações de análise de espectro, sem perder suas funcionalidades originais. Além disso, para estudos mais específicos, é possível a confecção de um firmware para que o Namimote efetue varreduras no espectro e armazene os dados na memória, para serem verificados depois de um período de captura. Esses estudos de caso podem ser pensados, configurados e testados conforme o interesse do usuário, já que é possível fazer capturas por períodos variados de tempo (já que o Namimote possui bateria), fazer capturas em locais de difícil acesso (por ser compacto), ou ainda, verificar a possibilidade de estudos em locais utilizando diversos transceptores para mapeamentos ou análises mais complexas.

Também há outro hardware possível (LORENÇATO, 2013), que possui dezesseis rádios e um controlador principal (cujos componentes estão pormenorizados na próxima seção), que pode efetuar as operações necessárias de detecção de energia, fazendo uma varredura no espectro de frequências da faixa de 2,4 GHz. Neste dispositivo, um firmware específico deve conter as instruções para que o controlador principal se comunique com os rádios que efetuarão a captura dos dados referentes ao estado de uma determinada faixa do espectro. Os rádios deverão enviar esses dados para o controlador principal da placa, para serem armazenados no cartão de memória ou mostrados em um terminal. Assim, depois de o microcontrolador principal efetuar as configurações iniciais, ele irá receber

de cada um dos rádios os conjuntos de informações capturadas e enviará, para cada um deles, um sinal indicando que as informações foram recebidas, para eles poderem efetuar novas capturas. Esse processo acontecerá de forma contínua por um tempo previamente estipulado.

Como este último hardware possui 16 rádios com configuração semelhante ao do Namimote, é possível ajustar para que cada um deles efetue a medida de 1/16 do espectro planejado, conferindo maior velocidade na obtenção dos dados, com menos perda de informação e um detalhamento superior à plataforma de um único rádio do Namimote.

4 Métodos e Materiais

Neste capítulo serão apresentadas as informações referentes ao hardware dos dispositivos que podem ser empregados no sensoriamento do espectro proposto, informações sobre os softwares utilizados e também algumas características (referentes ao desenvolvimento deste projeto) do microcontrolador MC1322x, como registradores a serem modificados em firmware, funções e demais ferramentas computacionais utilizadas.

4.1 Principais Componentes de Hardware

Como mencionado anteriormente, poderiam ser utilizados para a finalidade deste projeto, plataformas contendo o rádio-microcontrolador MC1322x, como o Namimote e o Analisador de Redes WirelessHART, que terão seus sistemas melhor apresentados nesta seção.

4.1.1 Namimote

Uma das possibilidades para o desenvolvimento do trabalho é a utilização do projeto (hardware e firmware) do Namimote (MÜLLER et al., 2012). Esse dispositivo foi projetado para ser utilizado como uma plataforma de sensoriamento ou uma plataforma controladora para sensores (um rádio principal pode ser configurado para comunicar-se com os rádios sensores de um ambiente), formando uma rede de sensoriamento sem fio de baixo custo. Por exemplo, rádios Namimote com sensores acoplados (temperatura, luminosidade, umidade, entre outros) podem ser espalhados por um ambiente e se comunicarem (utilizando o protocolo 802.15.4) com um desses dispositivos configurado como rádio controlador principal, que armazena as informações e efetua a sincronia dos demais rádios sensores.

Para este trabalho, é necessário somente uma destas plataformas e o código do firmware do controlador para ser modificado, de modo que ele funcione também como um analisador de espectro de baixo custo.

A Figura 10 apresenta o diagrama de blocos do Namimote com seus principais módulos. Na Figura 11 está o protótipo do hardware com os principais blocos operacionais destacados.

Nesse dispositivo estão presentes o microcontrolador MC13224, que possui um transceptor para o protocolo IEEE 802.15.4, uma bateria de lítio de 3,7 V com uma unidade de controle de carga (recarregável por uma porta USB padrão), sensores integrados *onboard* (luminosidade, temperatura e aceleração triaxial), pinos de propósito geral (GPIO) analógicos e digitais (para expansões), amplificadores de RF (LNA e PA) para

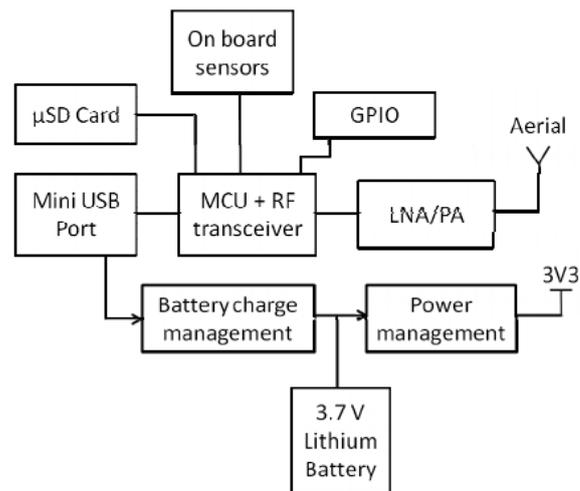


Figura 10 – Diagrama de blocos de alto nível do sistema do Namimote.

Fonte: Retirado do artigo *Namimote: A Low-Cost Sensor Node for Wireless Sensor Networks* (MÜLLER et al., 2012).

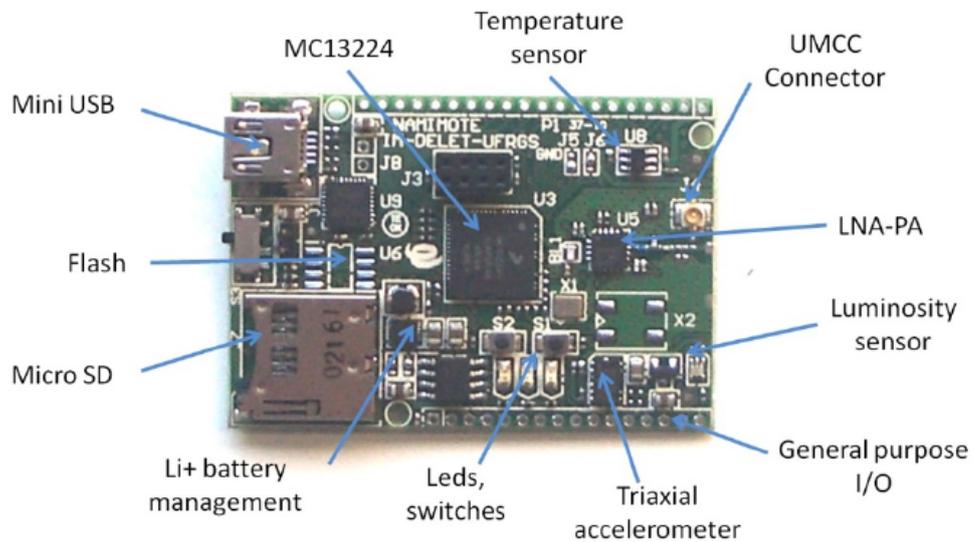


Figura 11 – Protótipo do Namimote, com seus principais componentes destacados.

Fonte: Retirado do artigo *Namimote: A Low-Cost Sensor Node for Wireless Sensor Networks* (MÜLLER et al., 2012).

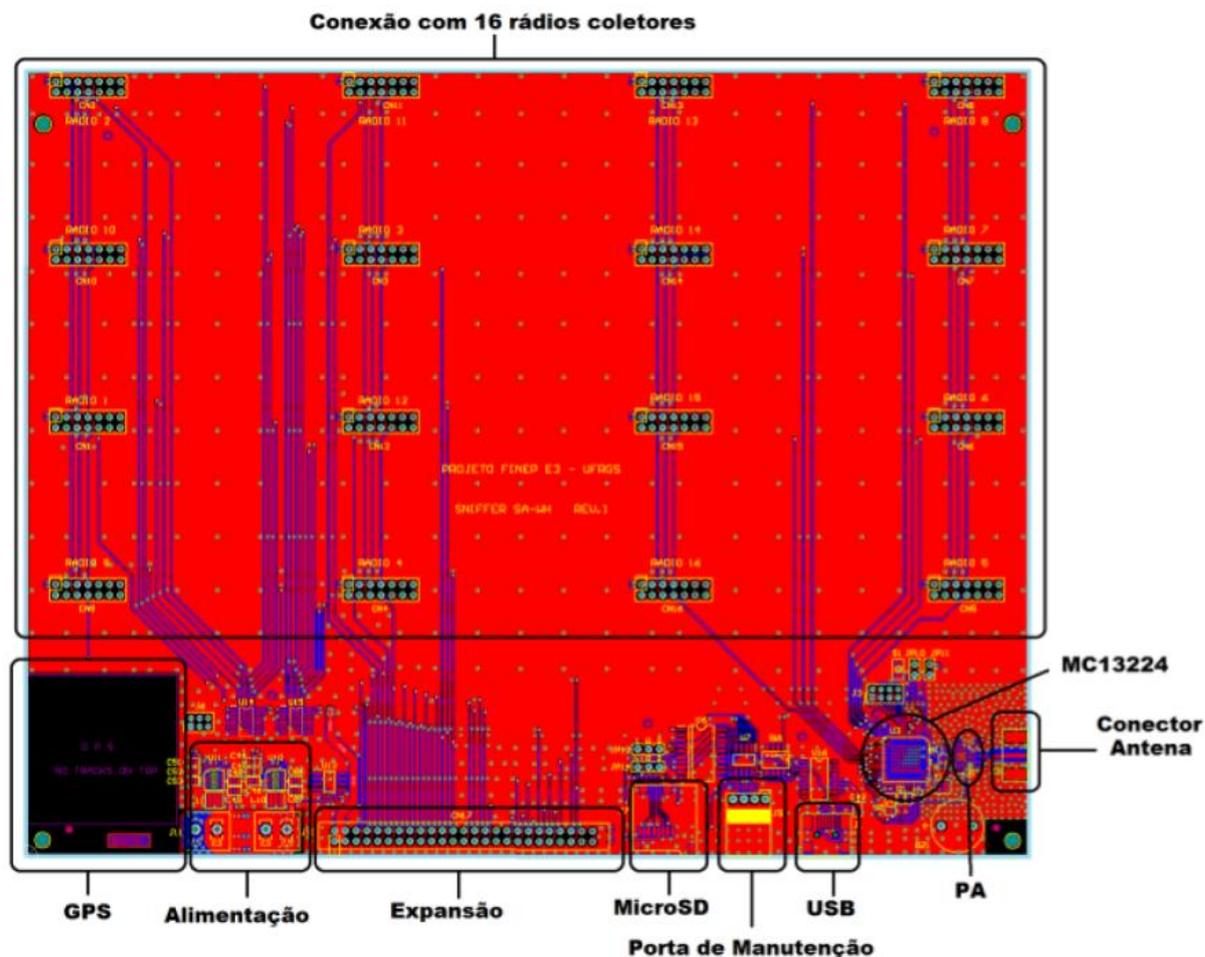


Figura 12 – Protótipo da placa base com os principais blocos destacados.

Fonte: Retirado do documento *Analizador De Redes WirelessHART* (LORENÇATO, 2013).

efetuar comunicações adequadas e leitor de cartões de memória do tipo microSD para armazenamento de dados dos sensores.

Para efetuar a programação e a depuração do firmware no Namimote pode ser utilizada uma interface *JTAG*, como o *J-Link* (SEGGER Microcontroller GmbH, 2021).

4.1.2 Analisador de Redes *WirelessHART*

Outra possibilidade de hardware, como citado anteriormente, é o projeto Analisador de Redes *WirelessHART* (LORENÇATO, 2013). Para a sua utilização, ele pode ser dividido em diferentes setores ou módulos que deverão operar em conjunto para o correto funcionamento do sistema completo.

Na figura 12, verificam-se os principais módulos que compõem a placa principal do hardware.

Todo o hardware e o processo de concepção dele estão na dissertação de mestrado

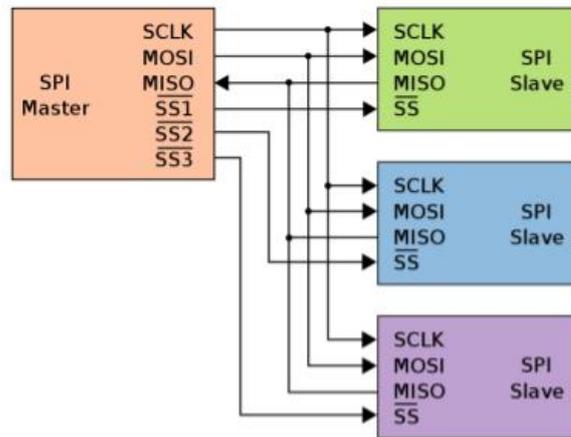


Figura 13 – Típica conexão SPI entre um dispositivo principal (*Master*) e três secundários (*Slaves*).

Fonte: Retirado da página da web <https://en.wikipedia.org/wiki/Serial_Peripheral_Interface>.

citada anteriormente, mas um resumo das principais partes são apresentadas a seguir.

MC13224

O microcontrolador principal se comunica com os outros componentes da placa base, como os chamados mini-rádios (que também possuem, cada um deles, esse mesmo microcontrolador) e o microSD, através de um barramento SPI, ou seja, o microcontrolador principal seleciona com qual componente irá se comunicar (através do *Slave Select*, SS, ver Figura 13) e então troca informações com o mesmo (através do *Master Output Slave Input*, MOSI, e o *Master Input Slave Output*, MISO). Na Figura 13, há um diagrama que exemplifica as conexões entre os componentes.

Rádios

Os rádios são dezesseis dispositivos conectados na placa base cuja função é converter os dados que estão em radiofrequência para sinais digitais.

Esses rádios coletores também possuem um microcontrolador MC13224. Pelo seu conector, cada rádio se comunica com o microcontrolador principal, recebe a alimentação de energia, as definições do canal a ser sintonizado, sinal de sincronização e a interface SPI.

A frequência em que o rádio irá operar é determinada pela posição em que ele se encontra na placa, pois ela contém pinos de identificação previamente configurados, de forma que a programação do rádio identifica e adapta-se a essa configuração.

Na figura 14 está o diagrama do hardware de um dos rádios utilizados.

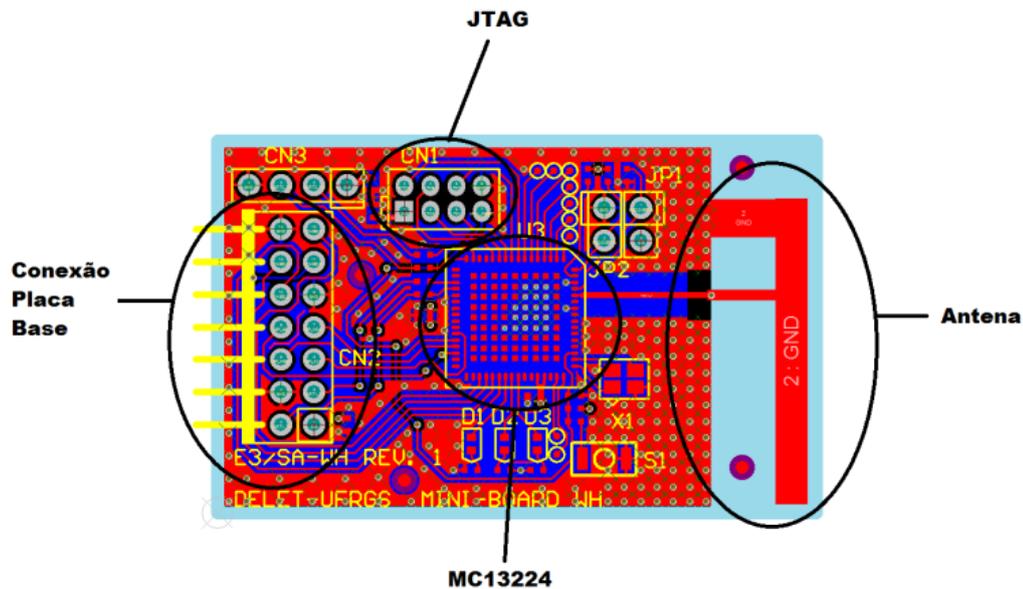


Figura 14 – Projeto de hardware do rádio coletor.

Fonte: Retirado do documento *Analisador De Redes WirelessHART* (LORENÇATO, 2013).

MicroSD

Este módulo é responsável pela gravação de dados de forma não volátil para serem transferidos para um computador para serem avaliados. Comunica-se com o microcontrolador pela porta SPI e requer um cartão de memória microSD formatado com sistema de arquivos FAT.

GPS

Este módulo é utilizado para localizar os dispositivos de campo que estão trocando informações com os rádios além de fornecer uma base temporal precisa para sincronizar as amostras do espectro de RF coletadas.

Alimentação

Este módulo é responsável pela correta alimentação dos outros componentes do sistema. Possui dois reguladores de tensão, um para o fornecimento de energia para o microcontrolador e demais circuitos, e outro para os rádios. O microcontrolador pode desligar a alimentação dos rádios quando for necessário para economizar energia.

Porta de Manutenção e USB

O hardware possui uma porta USB que é utilizada para a manutenção do equipamento e uma porta RS-485 utilizada em algumas funcionalidades quando trabalha com o

protocolo WirelessHART. As duas portas utilizam a mesma serial do microcontrolador e necessitam que seja feita uma seleção através de micro chaves para a troca entre elas.

4.2 Softwares Utilizados e Firmwares

Nessa seção serão mostrados os softwares para o sistema operacional *Microsoft Windows* utilizados na programação, depuração e demonstrações deste trabalho. Também serão mostradas as funções e configurações que devem ser inseridas nos firmwares para que o projeto funcione de forma adequada no MC1322x.

4.2.1 Edição de Firmwares

Para a depuração e edição dos firmwares que controlam os possíveis dispositivos propostos, foi utilizado o IDE *IAR Embedded Workbench 7.5* da empresa *IAR Systems*, utilizando a linguagem C.

Firmware do Namimote

Como o Namimote já possui funcionalidades de sensoriamento, como mostrado no artigo que o apresenta (MÜLLER et al., 2012) e na Seção 4.1.1, seu firmware pode ser modificado para também efetuar as medidas de detecção de energia no espectro, sem estar vinculado aos canais do protocolo 802.15.4. Para isso, foi feita a programação dos registradores referentes à mudança de frequência do rádio e detecção de energia, diretamente ou com o auxílio de funções prontas fornecidas pelo fabricante, como será apresentado a seguir.

MC1322x Simple Media Access Controller

A empresa fabricante do microcontrolador utilizado disponibiliza para os desenvolvedores um conjunto de ferramentas para facilitar a customização e elaboração de aplicações que utilizam as funcionalidades da camada física e de enlace do protocolo 802.15.4. Esse conjunto de ferramentas é o *Freescale BeeKit Wireless Connectivity Toolkit* (NXP, 2009), com funções (*MC1322x Simple Media Access Controller*, SMAC) para serem utilizadas conforme as configurações desejadas para o dispositivo.

A função necessária para efetuar a detecção de energia desejada é a *MLMEEnergy-Detect*, que, segundo a documentação do fabricante, efetua a detecção de energia para um canal específico do protocolo 802.15.4 e retorna o maior valor medido em um período.

O valor de detecção de energia obtido com essa função é salvo primeiramente em um registrador, denominado na programação do firmware *RxAgcCcaEdOut* (declarado no código *RadioMngmntWrapper.h*), com endereço *0x80009488*. A informação relativa ao

funcionamento deste registrador não está presente no *datasheet* do fabricante, mas aparece como parte da função *MLMEEnergyDetect*.

Os valores retornados para a leitura de ED são salvos em valores de $0x00$ até $0xFF$, ou seja, de 0 até 255, onde o valor 0 indica -100 dBm e o valor 255 indica -15 dBm. A fórmula para converter os valores está mostrada na Equação 4.1, encontrada em uma versão mais atual do *datasheet* (NXP, 2012).

$$\text{InputPower(dBm)} = (\text{ValorED}_{dec}/3) - 100 \quad (4.1)$$

Essa função efetua a configuração dos registradores relacionados com a detecção de energia e a configuração do *Medium Access Control Accelerator* (MACA) para proporcionar uma correta leitura do valor de energia presente.

Para que essa função possa efetuar a detecção de energia para toda a faixa de frequências, é necessário alterá-la para que deixe de sintonizar em um canal específico e passe a sintonizar uma frequência qualquer do espectro. A função utilizada no firmware original quando é necessário sintonizar em um canal é a *MLMSEtChannelRequest*, mas para a variação das frequências, é necessário efetuar as mudanças diretamente em particular bloco de registradores do microcontrolador, explicado em detalhes a seguir.

Outro fato importante é que essa função de ED requer tempo para conseguir efetuar a medição de energia, que, segundo a documentação, é de $198 \mu s$ (Figura 15). Quando solicitada sem um período de espera, a função não retorna parâmetro válido. Esse fato é um dos pontos que torna a detecção de energia uma operação não muito rápida (quando comparada com a velocidade que alguns *frames* de Wi-Fi são transmitidos, como os $52 \mu s$ de alguns *Acknowledgments*, por exemplo), requerendo a configuração de um atraso na programação de cerca de $190 \mu s$ para terminar uma medida (outros atrasos de processamento compensariam um pouco esse período). Dessa forma, nota-se que para um rádio efetuar as medidas para todo o espectro desejado, o tempo para terminar uma varredura completa e iniciar a próxima está diretamente relacionada com o passo utilizado para o sensoriamento do espectro de RF (em *MHz*).

Registradores Relacionados

Para efetuar o processo de troca de frequências é necessário alterar os valores nos registradores do bloco *Modem Radio Frequency Synthesizer* (NXP, 2008).

Esse bloco consiste em registradores que alteram as configurações necessárias do *PLL* do rádio, ajustando a operação do *VCO*, onde o sintetizador realizará os cálculos de divisão necessários para fixar a frequência do *VCO* a um múltiplo não inteiro de uma frequência de referência. Essas configurações são iniciadas sequencialmente pelo *MAC*

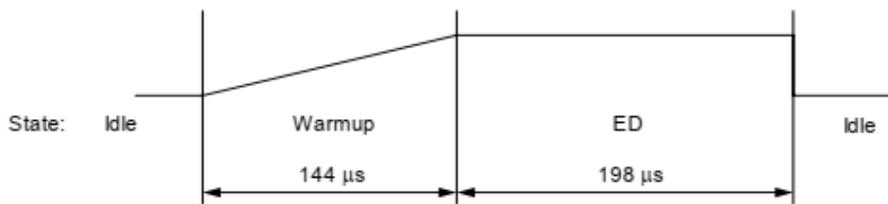


Figura 15 – Perfil de tempo da detecção de energia.

Fonte: Retirado do *datasheet* da plataforma (NXP, 2008).

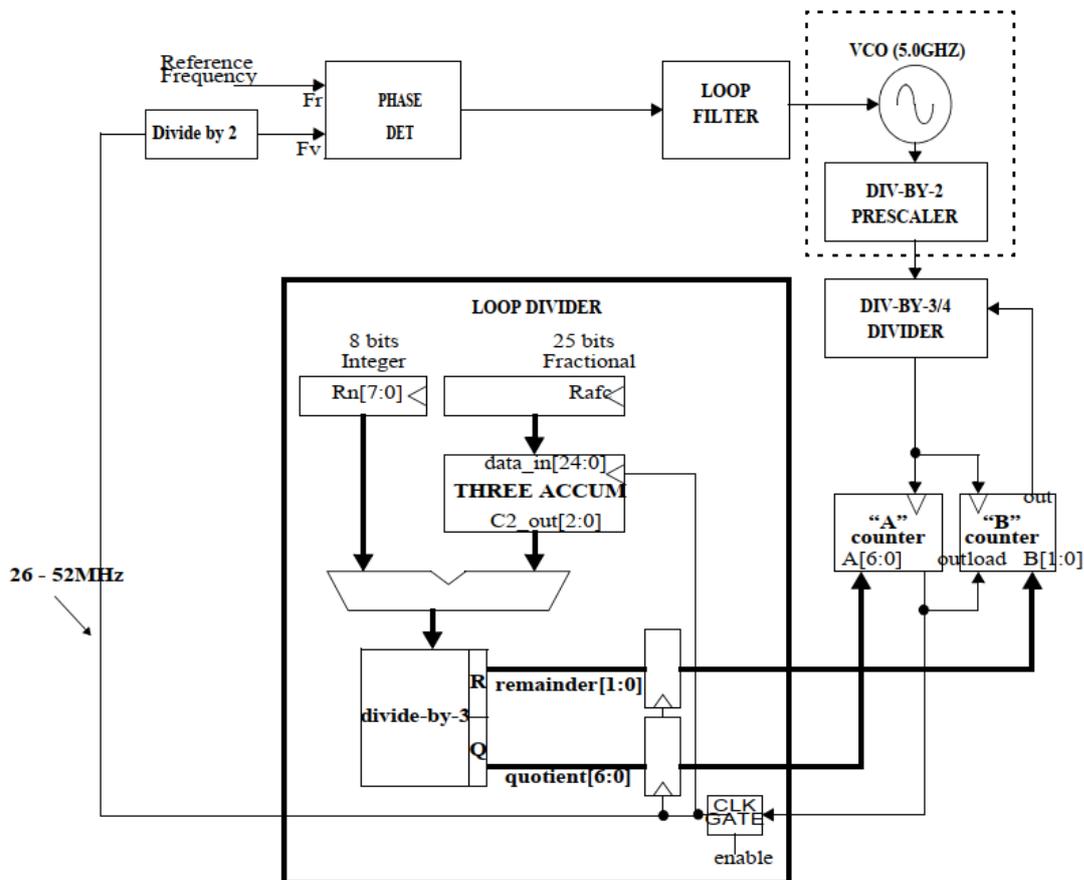


Figura 16 – Diagrama de blocos do PLL de RF utilizado no MC1322x.

Fonte: Retirado do *datasheet* da plataforma (NXP, 2008).

Accelerator (MACA). O MACA consiste em um bloco em hardware que fornece um controle de baixo nível das camadas de controle de acesso ao meio e física.

A Figura 16 mostra o diagrama de alto nível do PLL de radiofrequência do microcontrolador em questão.

A configuração necessária nos registradores desse bloco consiste nos ajustes do valor inteiro do Divisor de Laço do VCO (*VCO loop divider*), RN , e no valor fracionário

Tabela 1 – Mapa de memória dos registradores do sintetizador de RF do MC1322x.

| Offset | Nome (original não traduzido) do registrador | Tipo de Acesso | Tamanho do Acesso |
|-----------------|-------------------------------------------------|----------------|-------------------|
| + 0x00 até 0x08 | Enable and Override Register (Reserved) | R/W | 32 bits |
| + 0x0C | VCO Loop Divider Integer (RFSYN_REFDIV) | R/W | 32 bits |
| + 0x10 | VCO Loop Divider Fractional (RFSYN_VCODIV_FRAC) | R/W | 32 bits |
| + 0x14 | VCO Lock (RFSYN_VCOLOCK) | R | 32 bits |
| + 0x18 até 0x38 | Reserved | - | 32 bits |

Fonte: Retirado do *datasheet* da plataforma (NXP, 2008).

Tabela 2 – VCO Loop Divider Integer. Endereço: 0x8000980C

| Bit | 31 | 30 | 29 | 28 | 27 | 26 | 25 | 24 | 23 | 22 | 21 | 20 | 19 | 18 | 17 | 16 |
|--------|----|----|----|----|----|----|----|----|--------------------------|----|----|----|----|----|----|----|
| Nome | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Acesso | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Reset | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Bit | 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 |
| Nome | | | | | | | | | RN [7:0] | | | | | | | |
| Acesso | | | | | | | | | Leitura ou Escrita (R/W) | | | | | | | |
| Reset | | | | | | | | | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Fonte: Retirado do *datasheet* da plataforma (NXP, 2008).

do Divisor de Laço do VCO, $RAFC$. Para saber quais valores devem ser programados nesses registradores, é necessário resolver algumas equações para cada frequência desejada. Na Equação 4.2 está mostrada a fórmula da frequência do VCO.

$$F_{VCO} = 2 * F_{REF} * \left(RN + 3 + \frac{RAFC}{2^{25}} \right) \quad (4.2)$$

Onde, F_{VCO} é a frequência de saída desejada, F_{REF} é a frequência do oscilador de referência, RN é a parte inteira e $RAFC$ é a parte fracionária do divisor de laço do VCO.

Esses registradores nos microcontroladores MC1322x, possuem o endereço de base para a escrita 0x80009800, com um deslocamento (*offset*) a partir deste valor de base para cada um dos valores necessários de serem programados. A Tabela 1 mostra os registradores deste bloco com seu *offset* relacionado e as Tabelas 2 e 3 mostram a descrição dos bits nos registradores.

Para serem sintetizadas as frequências do espectro desejado, de 2400 MHz até 2484

Tabela 3 – VCO Loop Divider Fractional. Endereço: 0x80009810

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------|--------------------------|----|----|----|----|----|----|--------------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|--|--|--|
| Bit | 31 | 30 | 29 | 28 | 27 | 26 | 25 | 24 | 23 | 22 | 21 | 20 | 19 | 18 | 17 | 16 | | | |
| Nome | | | | | | | | RAFC [24:16] | | | | | | | | | | | |
| Acesso | | | | | | | | Leitura ou Escrita (R/W) | | | | | | | | | | | |
| Reset | | | | | | | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | |
| Bit | 15 | 14 | 13 | 12 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 | | | |
| Nome | RAFC [15:0] | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Acesso | Leitura ou Escrita (R/W) | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Reset | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | | |

Fonte: Retirado do *datasheet* da plataforma (NXP, 2008).

MHz, que engloba a faixa de frequências dos principais protocolos que utilizam essa parte do ISM, é necessário efetuar a programação dos registradores antes de cada leitura do valor obtido com a detecção de energia. A mudança de uma frequência para a próxima deverá ser programada com um passo fixo, de forma que as medidas sejam uniformes na varredura do espectro.

A solução da Equação 4.2 pode ser implementada em código como demonstrado a seguir para a frequência de 2405 MHz nas Equações 4.3 (definições iniciais), 4.4 (aplicação na fórmula) e 4.5 (resultado).

$$F_{VCO} = 2405\text{MHz}, F_{REF} = 26\text{MHz}, RN = 47 \quad (4.3)$$

$$2405 = 2 * 26 * \left(47 + 3 + \frac{RAFC}{2^{25}} \right) \quad (4.4)$$

$$RAFC = 3.495.253 \quad (4.5)$$

O valor de 26 MHz para F_{REF} é o valor do oscilador de referência implementado no hardware do projeto.

O valor de RN deve ser ajustado para que o valor final a ser programado nos registradores seja um número natural, diferente de zero e que, em simultâneo, não ultrapasse a quantidade de bits reservada para sua definição. Assim, foi selecionado o valor de 47 para frequências até 2448 MHz e 48 para frequências acima de 2448 MHz até 2484 MHz. Desta forma, os valores do $RAFC$ ficarão nos limites, já que não podem ultrapassar 2^{25} (ou seja, 33.554.432) e devem ser maiores que zero.

4.2.2 Software para Demonstração os Dados Obtidos

Como os dados podem ser salvos em um cartão de memória (tanto no Namimote quanto no Analisador de Redes WirelessHART), a interpretação deles poderá ser efetuada com a importação dos valores para um software de análise gráfica de dados, como as versões mais atuais do *Excel* ou *Matlab*. Além disso, o Namimote possui uma interface gráfica para a demonstração em tempo real das suas funcionalidades (projetado com o software *C++ Builder*) que pode ser modificado para mostrar novas operações, como a proposta aqui apresentada.

A interface de demonstração do Namimote possui originalmente funcionalidades de comunicação por porta USB e funcionalidades gráficas para exibir o estado dos dispositivos semelhantes em uma rede, tanto do controlador quanto outros dispositivos operando como sensores distribuídos em um ambiente (sensores comunicando-se com o controlador utilizando o protocolo 802.15.4 e o controlador comunicando-se com a interface gráfica por USB).

Estão presentes na interface os gráficos de nível de bateria, temperatura, luminosidade, aceleração e outros gráficos possíveis para o uso de placas acessórias ao dispositivo (como sensoriamento de pressão, umidade, entre outros). Presente neste programa, também está o gráfico referente à detecção de energia, mas somente para os canais do protocolo 802.15.4, que deve ser desativado (para que a nova função de ED utilize as mesmas funções), ou ainda, modificado para que não entre em conflito com o novo sistema de detecção de energia.

5 Desenvolvimento da Proposta

Nesse capítulo estão as informações referentes à execução do trabalho. Utilizando o que foi apresentado anteriormente, serão descritos os passos para a obtenção de resultados (como o que foi adicionado e modificado nos códigos existentes do firmware e software de demonstração), além de descrever algumas possibilidades para serem avaliadas e desenvolvidas em trabalhos futuros.

5.1 Alterações no Firmware do Namimote

Para a execução do trabalho, foram efetuados testes no firmware do Namimote com a finalidade de verificar a possibilidade de que os sistemas da plataforma (rádio-MCU) suportariam tais funcionalidades propostas, já que não há garantias de que o sistema funcione para tarefas que não estejam relacionadas com o funcionamento no protocolo nas quais ela foi pensada. Neste caso, o MC1322x poderia possuir sistemas de segurança que impedissem a troca de frequência para valores fora dos canais do protocolo 802.15.4, ou ainda, não permitir a leitura dos valores de detecção de energia para outras frequências senão as padronizadas.

Desta forma, utilizando as informações coletadas do *datasheet* da plataforma (NXP, 2008) e das ferramentas para desenvolvedores (NXP, 2009) fornecidos pelo fabricante e apresentadas na Seção 4.2.1, foram feitas alterações no firmware do *Namimote controlador*, e assim, verificou-se que é possível efetuar a troca de frequências e a leitura do nível de energia com a plataforma escolhida.

Também foram verificados certos parâmetros que não estão claros na documentação do fabricante, como a presença de registradores que pudessem identificar o término das configurações solicitadas (possíveis *flags* ou interrupções indicando sucesso da detecção de energia). Essa indicação seria ideal para evitar o desperdício de tempo com o excesso de atrasos (como o mostrado na Figura 15), mas não foram encontrados indícios de tais registradores que apresentassem algum comportamento nesse sentido com as modificações que foram feitas. Um dos registradores testados, foi o *RX AGC CCA and ED Control Register* (NXP, 2008) (*0x80009460*) do bloco *Modem Radio Receiver Functions* (que possui um bit denominado *ed_en*), outra função testada foi a leitura do estado da função de ED, que, quando em *MSG_ED_ACTION_COMPLETE_SUCCESS* (NXP, 2009) indicaria o final de uma leitura. Esses testes não foram bem sucedidos e poderiam ser explorados (testados novamente) caso seja desenvolvido outro firmware semelhante a esse.

As alterações foram efetuadas de tal forma a substituir a detecção de energia para

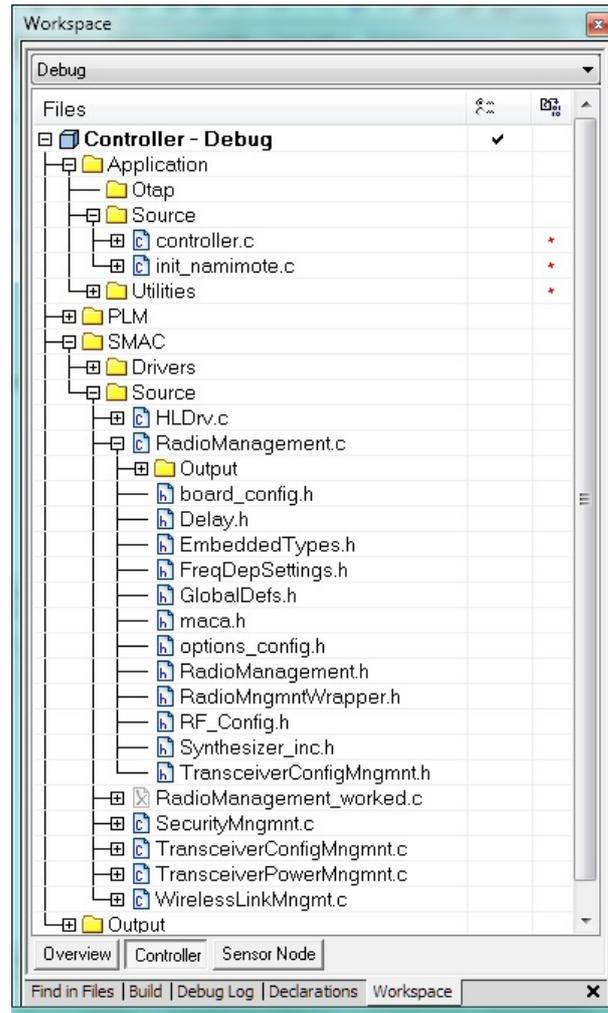


Figura 17 – Principais arquivos de código do Namimote.

Fonte: Do autor.

os canais do protocolo e passaram a varrer as frequências da faixa do ISM que se inicia em 2400 MHz, mas mantendo a forma com que o resultado das detecções é salvo e enviado para o software de demonstração, via USB, aproveitando as funções de comunicação serial previamente desenvolvidas. Na Figura 17 estão mostrados os principais arquivos que contêm os códigos para o Namimote (imagem retirada de uma captura de tela do ambiente do IAR Embbeded Workbench 7.5).

Conforme o mostrado na Seção 4.2.1, a alteração do valor do registrador da troca de frequência passou a integrar a programação para que então, a detecção de energia (através da função apresentada do fabricante) pudesse ler e retornar o nível de energia de possíveis sinais presentes e salvá-los. Quando um valor de energia é retornado, ele é salvo em uma posição de um vetor e, então, é configurado o próximo valor de frequência para uma nova leitura. Ao final da faixa desejada, esse vetor é enviado pela USB para o software de demonstração das funcionalidades do Namimote. Portanto, no firmware

original, no código principal (*controller.c*) foram adicionadas variáveis para definir a faixa de frequências a ser estudada, além das definições dos registradores apresentados na Seção 4.2.1. Também foram adicionados comparadores e equações para verificar e calcular os valores para cada um dos parâmetros de registradores necessários.

No arquivo-fonte *controller.c*, o tempo de espera para a verificação do nível de energia pode ser modificado (onde foi chamado um *delay* depois da função *MLMEE-energyDetect*), mas, como mencionado anteriormente, caso esse tempo seja modificado sem cuidado, o programa deixa de retornar os valores corretamente.

Para a função de detecção de energia, no código do *RadioMngmntWrapper.h* (na declaração de *command_xcvr_ed*) foram feitas alterações para que ela não chamasse mais as funções de troca de canal, e assim, passando a efetuar apenas o necessário para verificar o nível de energia.

Quando deseja-se verificar a presença de sinais contínuos em cada frequência da varredura, é possível ajustar no firmware para serem feitas diversas leituras de ED antes que a frequência seja alterada, desta forma o maior valor detectado no período é retornado e não necessariamente o último. Isso porque a variável de retorno da função de ED está vinculada com uma função que não apaga o valor obtido sem isso ser solicitado, guardando sempre o maior valor detectado.

Quanto ao vetor de envio para o software de demonstração via USB, seu tamanho deve ser modificado conforme a quantidade de medidas feitas em uma varredura completa do espectro. No código *init_namimote.h* as variáveis *COM_FRAME_SIZE*, *DATA_FRAME_SIZE* e *COMM_FRAME_SIZE* devem ter seu valor entre 33 (valor original e que não prejudica as outras funcionalidades do Namimote) e $N + 2$, onde N é a quantidade de valores obtidos até o final de uma varredura.

Portanto, o código final foi adicionado ao firmware para efetuar as funções como o mostrado no seguinte roteiro:

- Quando ocorre solicitação de ED pelo software:

1. Definição da faixa de frequências, passo em MHz, vetor necessário para uma varredura e variáveis auxiliares;

2. Definição dos registradores que serão alterados “manualmente”;

3. Repete os seguintes comandos, para uma quantidade de varreduras completas:

3.1. Repete os seguintes comandos, até o final do espectro com o passo de frequência programado:

3.1.a. Compara o valor atual da frequência e ajusta o valor de RN (47 ou 48);

3.1.b. Grava o valor de RN no registrador relacionado;

3.1.c. Calcula o valor de RAFC utilizando o valor da frequência atual;

3.1.d. Grava o valor de RAFC no registrador relacionado;

3.1.e. Chama a função da Detecção de Energia quantas vezes forem desejadas (o maior valor obtido no período será salvo), aguardando o tempo da função após cada chamada;

3.1.f. Salva o valor da variável de saída da função de ED em um vetor;

4. Envia o vetor de detecções para a função de envio serial.

5.2 Alterações no Software de Demonstração do Namimote

Para processar e exibir os dados obtidos com a detecção de energia (valores enviados pela interface USB), é utilizado o software de demonstração do Namimote, apresentado na Seção 4.2.2.

As edições neste software foram feitas para que ele passasse a interpretar corretamente as novas funcionalidades. Assim, a página que exibia a detecção de energia para os canais do protocolo 802.15.4 foi desativada e uma nova página contendo novos gráficos para a detecção de energia da varredura do espectro foi adicionada.

Estudos foram feitos na programação original de modo a possibilitar que os valores de detecção de energia passassem a ser recebidos em vetores configuráveis de diferentes tamanhos, conforme a necessidade do usuário (como em situações mostradas a seguir). O tamanho do vetor a ser recebido tem que ser configurado para corresponder aos vetores de ED enviados pelo Namimote, pois as configurações do firmware e software devem ser compatíveis para que os gráficos possam exibir informações corretas e todas as outras funcionalidades desejadas possam ser processadas e funcionar conforme o planejado.

Se o firmware for configurado para efetuar a varredura de uma determinada faixa do espectro proposto, com um passo específico (em MHz) que resulte em uma quantidade específica de valores de detecção, esse vetor que guarda as informações obtidas de ED deve ser configurado igualmente no software de demonstração. O mesmo vale para a quantidade vezes que o processo é repetido.

Além disso, foram adicionadas linhas de código (MASUR, 2003) entre o recebimento de um vetor de detecções e o próximo, para ser possível obter e exibir uma estimativa de tempo, em milissegundos (WINDOWS DEVELOPER, 2020), entre uma varredura e outra.

Assim, o código final foi adicionado ao software de demonstração como mostrado no seguinte roteiro:

- Quando o usuário solicita a detecção de energia no software:

1. Definição da faixa de frequências, passo em MHz, vetor necessário para uma varredura

e variáveis auxiliares;

2. Envia o comando de ED via USB e registra o tempo de início;
3. Quando receber o vetor da primeira varredura no espectro, registra o tempo que levou desde a solicitação;
4. Calcula as frequências de cada detecção a partir da posição do valor de ED no vetor;
5. Calcula o valor de ED como mostrado na Equação 4.1;
6. Envia os valores de frequência, tempo e potência para os gráficos;
7. Registra o tempo final (para calcular o tempo de duração da próxima varredura);
8. Aguarda o recebimento dos outros vetores até que o firmware finalize a função.

Para unir as ideias mostradas nessa seção e nas seções anteriores, foram elaborados fluxogramas mostrando os principais passos efetuados pelo software e pelo firmware com a nova função da ED adicionada. Na Figura 18 é apresentado o fluxo de funcionamento da detecção de energia no firmware, já na Figura 19 é apresentado o fluxo de funcionamento da detecção de energia no software de demonstração.

Nesses diagramas, os blocos na cor laranja indicam a ocorrência ou espera de uma ação externa ao código, por comando do usuário ou comunicação USB.

5.3 Configurações para Demonstração

As varreduras feitas na faixa de frequências proposta podem ser configuradas conforme a análise desejada pelo usuário, como mostrado e exemplificado a seguir.

Um caso possível, pode ser uma análise espectral onde é necessário um estudo em uma faixa de frequências limitada, como, por exemplo, a faixa de frequências referentes a um dos canais do protocolo de Wi-Fi, com 22 MHz de largura, portanto, é possível efetuar a configuração para que os limites da varredura correspondam a esse canal desejado (ELECTRONIC NOTES, 2021). Como a leitura do nível de energia para uma quantidade muito grande frequências (com passos correspondendo a frações de frequência, por exemplo) pode mostrar-se muito lenta para uma determinada análise, as mudanças de frequência podem ser ajustadas para um passo maior, permitindo a chegada no final da faixa mais rapidamente e assim, o recomeço da varredura em menos tempo, aumentando a taxa de atualização dos dados.

Um segundo exemplo possível é a análise completa do espectro proposto, onde é possível configurar para que a varredura seja efetuada com leituras mais demoradas a cada avanço (repetindo o comando de detecção de energia em uma mesma frequência algumas vezes) e assim conseguindo registrar o valor de energia de sinais mais rápidos que possam estar aparecendo em uma determinada frequência, mas, em contrapartida, demorando

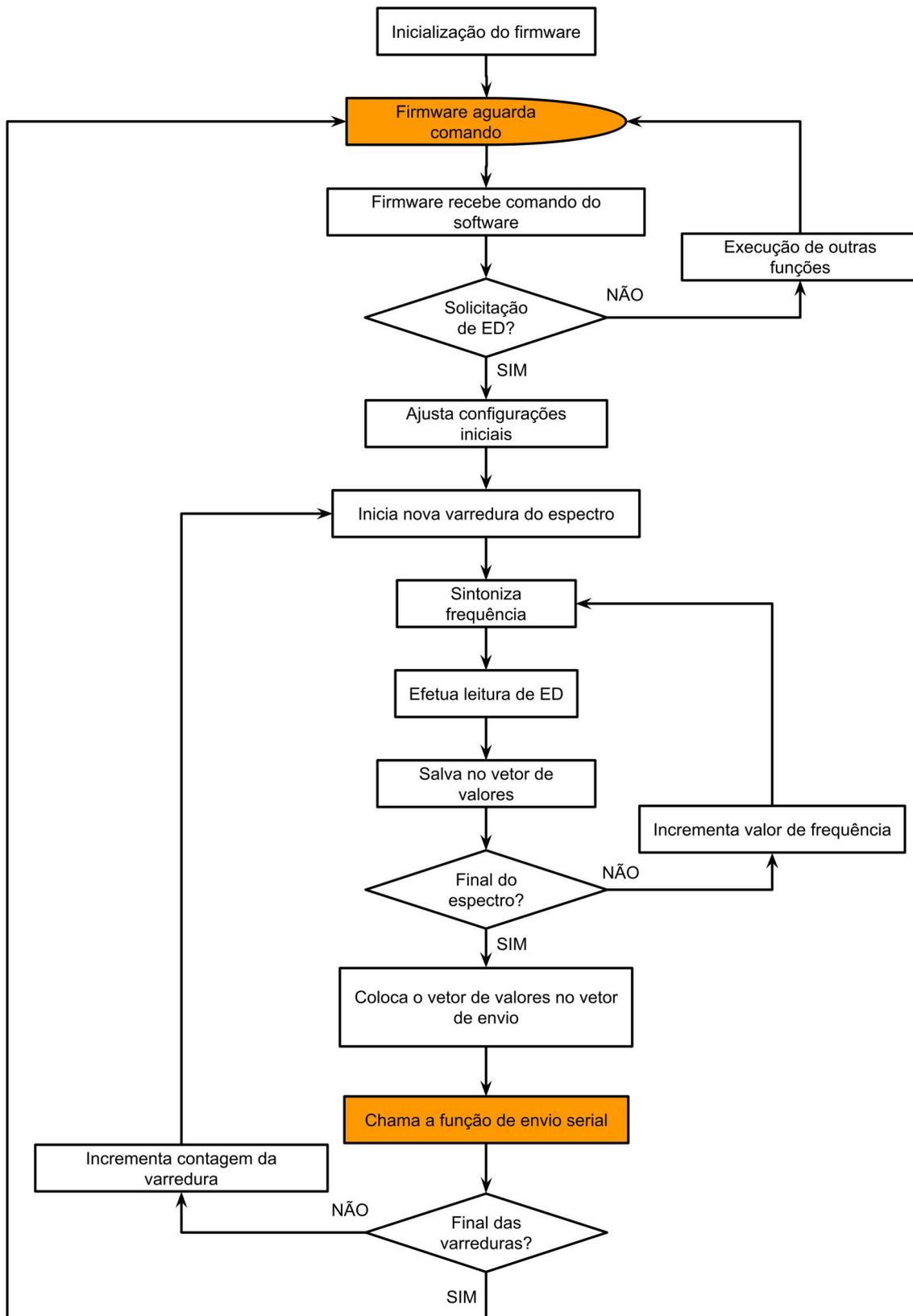


Figura 18 – Fluxograma da análise de espectro no firmware.

Fonte: Do autor.

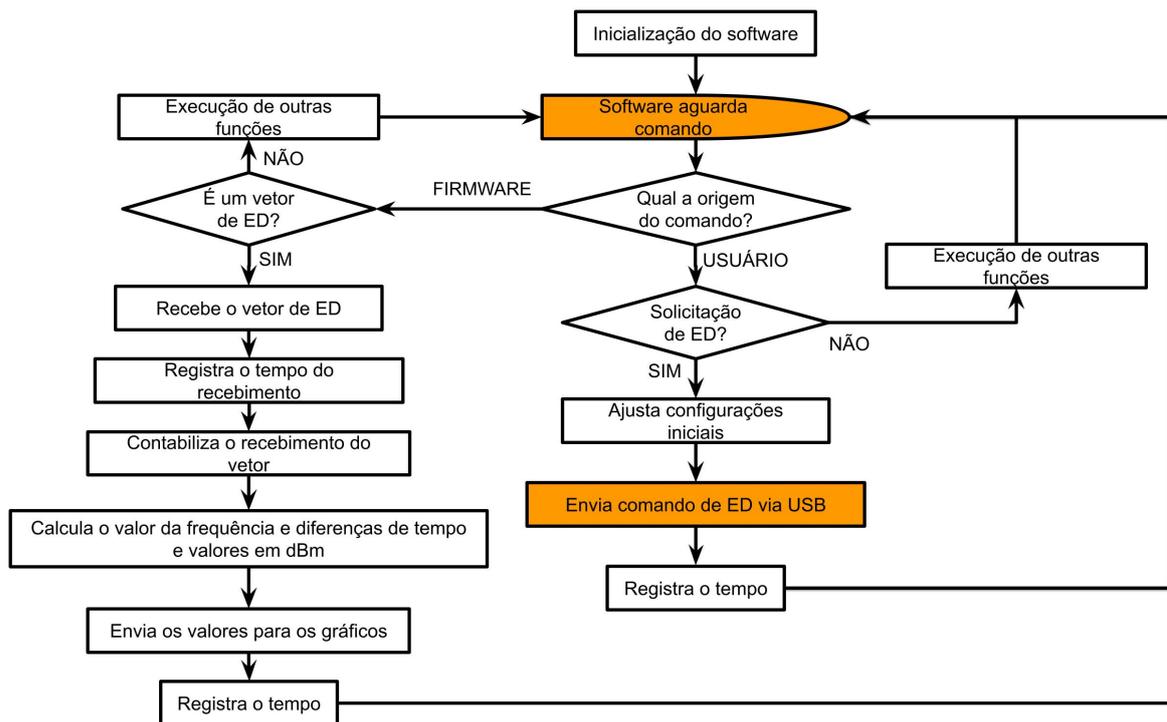


Figura 19 – Fluxograma da análise de espectro no software de demonstração.

Fonte: Do autor.

mais tempo para chegar até o final da varredura.

Para conseguir uma maior velocidade nas leituras, é possível diminuir o tempo de detecção para seu limite, além de diminuir o espectro a ser analisado ou então, aumentar o passo na frequência, desta forma, as varreduras completas ocorreriam mais frequentemente, em detrimento da resolução das mesmas.

Com esses exemplos foi possível propor ideias de como certas análises podem requerer procedimentos diferentes para atingir diferentes objetivos e que, considerando as limitações da plataforma MC1322x, ainda assim é possível variar o firmware para adaptá-lo a certas condições.

No próximo capítulo, estão mostrados os resultados obtidos utilizando as informações mostradas neste projeto e com diferentes configurações de varredura, comprovando ser possível fazer análises espectrais com o Namimote.

5.4 Firmware para o Analisador de Redes WirelessHART

Como mencionado anteriormente, um possível hardware a ser utilizado é o do Analisador de Redes WirelessHART (Figura 20) que possui a mesma plataforma rádio-MCU MC13224 que o Namimote.

Por se tratar de um dispositivo único e vinculado a um laboratório da universidade, o trabalho com esse hardware foi prejudicado pelo estendimento da crise causada pela situação pandêmica que está em curso no momento do desenvolvimento deste trabalho e, com isso, ocorreram dificuldades no acesso contínuo aos laboratórios da universidade para assuntos não urgentes. Assim, este projeto foi feito apenas com a utilização do Namimote e seus códigos de firmware e software de demonstração. Mesmo assim, para que o Analisador de Redes WirelessHART seja utilizado, é possível aproveitar as estruturas dos códigos do Namimote, adaptando-os conforme as necessidades do projeto.

Como mostrado na Seção 4.1.2, cada um dos 16 rádios deve possuir o mesmo firmware para que, quando qualquer um deles for conectado na placa base, ele possa detectar a partir do seu conector qual a sua posição nesta placa, posição esta que estará vinculada a uma parcela de 1/16 da faixa de frequências total a ser estudada. Ou seja, identificando a posição, adapta-se à faixa que irá analisar.

Outro firmware deve ser carregado no controlador principal, para esse receber os vetores com os valores de detecção de energia e os envie serialmente por USB (ou salve no cartão de memória) de forma ordenada. O fato deste hardware possuir mais rádios e, por consequência, efetuar processos de detecção de energia simultaneamente em faixas menores, o torna muito mais avançado para analisar o espectro do que o Namimote, dado que a granularidade de dados obtidos por faixa de frequências é maior.

5.5 Outras Possibilidades Futuras

Como neste projeto verificou-se que é possível elaborar um programa para o MC1322x que seja capaz de varrer e detectar energia nas frequências do espectro que se inicia em 2,4 GHz, além de haver a possibilidade de testar a expansão das funções para o Analisador de Redes WirelessHART (e obter um analisador muito mais eficiente, como sugerido na seção anterior), também é possível efetuar testes e estudos mais elaborados com as mesmas plataformas Namimote utilizadas, isto é, montar um plano de estudo em um determinado local, ajustar no firmware a varredura do espectro (em sua plenitude ou uma parcela dele) e programar para que os valores de detecção de energia sejam salvos em um MicroSD para análises de perfil de utilização de redes, utilização de canais, potência de sinais, presença de ruído, presença de sinais fora de um determinado protocolo de comunicação, entre outros.

Caso essa proposta seja implementada com sucesso no Analisador de Redes WirelessHART e realmente for possível obter uma eficiência muito superior devido à presença de 16 rádios para análise, os estudos de caso podem ser enriquecidos com detalhes, como uma maior velocidade na repetição da varredura e melhor identificação de características físicas dos sinais (como duração de comunicações, duração de pacotes de dados e largura

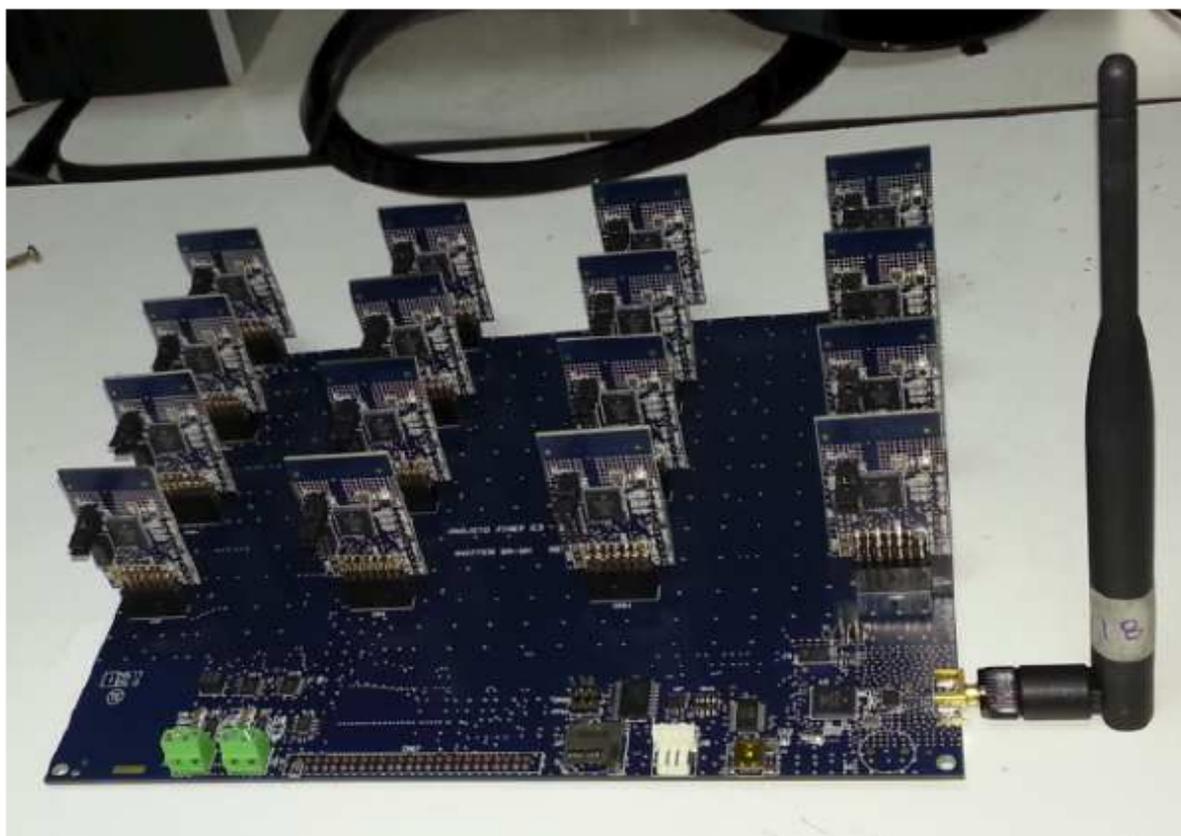


Figura 20 – Unidade coletora de dados multicanal montada.

Fonte: Retirado do documento *Analisador De Redes WirelessHART* (LORENÇATO, 2013).

de banda).

Se houver a possibilidade de acessar um analisador de espectro comercial em um ambiente laboratorial, é desejável que seja feita uma averiguação da precisão das medidas efetuadas com essas plataformas, comparando a intensidade do sinal, tempo de varredura e a precisão da sintonia em uma determinada frequência. Com isso, podem ser efetuadas possíveis correções em firmware para conferir exatidão nas análises efetuadas.

6 Resultados

Neste capítulo são apresentadas algumas possibilidades para a utilização deste trabalho para a análise espectral na faixa do ISM de 2400 MHz até 2484 MHz.

6.1 Varredura Completa do Espectro de Wi-Fi

Para uma demonstração de resultados, os códigos foram modificados de modo a exibir a ocupação (nas proximidades do Namimote) do espectro utilizado para a comunicação de Wi-Fi (do canal 1 até o 13). Esses testes foram executados em um local com diversos dispositivos e pontos de acesso efetuando outras comunicações em unidades habitacionais próximas, como é possível verificar na Figura 21, que mostra os pontos de acesso próximos e uma estimativa da potência dos sinais transmitidos por eles. A captura de tela da Figura 21 foi obtida do aplicativo para *Android WiFi Analyzer* (VREM Software Development, 2021).

O ponto de acesso (AP, do inglês *Access Point*) mais próximo, nas quais outro dispositivo está efetuando comunicações controladas com a Internet, está no canal 11 (identificado por *Medite 11* na Figura 21). Os outros são APs vizinhos efetuando comunicações aleatórias com um número desconhecido de dispositivos.

Passos de 2 MHz

Nessa primeira demonstração, foram feitas 50 varreduras de 84 MHz de largura de banda, com 42 medições cada, resultando em um passo de 2 MHz. Cada medida isolada levou 200 μs para ser efetuada, e o valor mostrado é a maior potência captada (em *dBm*) nesse período.

Com as funções adicionadas de medição de tempo no software de demonstração, verifica-se que as 50 varreduras completas levaram cerca de 1,2 s para acontecer (cerca de 24 *ms* por varredura). Destaca-se que esse tempo é referente ao processamento de todas as funções necessárias para que a informação fosse exibida no gráfico, incluindo todos os processamentos do firmware, envio pelo USB, tratamento do vetor de detecções pelo software de demonstração, etc. Portanto, caso exista a necessidade do desenvolvimento de um sistema mais eficiente de detecção de energia, poderiam ser pensadas formas de reduzir ao máximo todas as formas de processamento extra, que não fossem necessárias nas detecções e salvamento de informações.

Nas Figuras 22, 23 e 24, estão exibidos os resultados para esta primeira demonstração, onde não há comunicação sendo feita com o AP mais próximo. Essas figuras foram

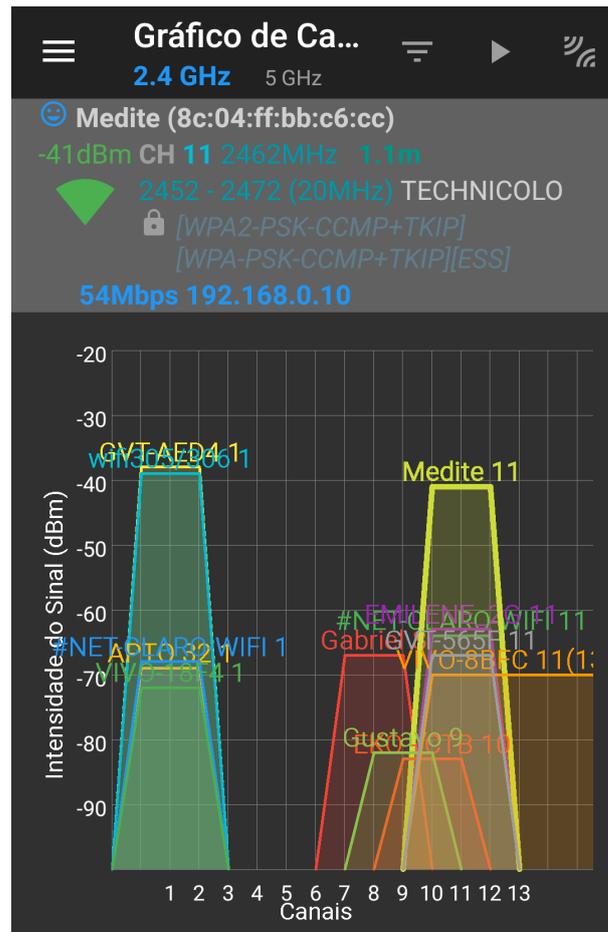


Figura 21 – Pontos de acesso de Wi-Fi próximos à bancada de testes.

Fonte: Do autor.

obtidas com a execução deste projeto e com o uso do software de demonstração modificado.

Na Figura 22, está mostrado o avanço temporal das varreduras efetuadas. Esse mesmo gráfico foi rotacionado e na Figura 23 está mostrado em outra perspectiva, para melhor visualização do espectro ocupado.

Outra análise gráfica feita, foi com a exibição em tempo real, com um gráfico que possui um *design* semelhante aos obtidos em analisadores comerciais, onde os maiores valores de algumas medidas são “congelados” na tela por alguns instantes para ser possível verificar a ocupação do espectro, mostrado na Figura 24.

Da mesma forma que nas Figuras 22, 23 e 24, foram feitos testes com uma comunicação Wi-Fi entre um *smartphone* e o AP mais próximo, no canal 11 (de 2451 MHz até 2473 MHz). Esse teste tem por objetivo mostrar ser possível observar as “perturbações” que ocorrem no espectro. Os resultados são mostrados nas Figuras 25, 26 e 27.

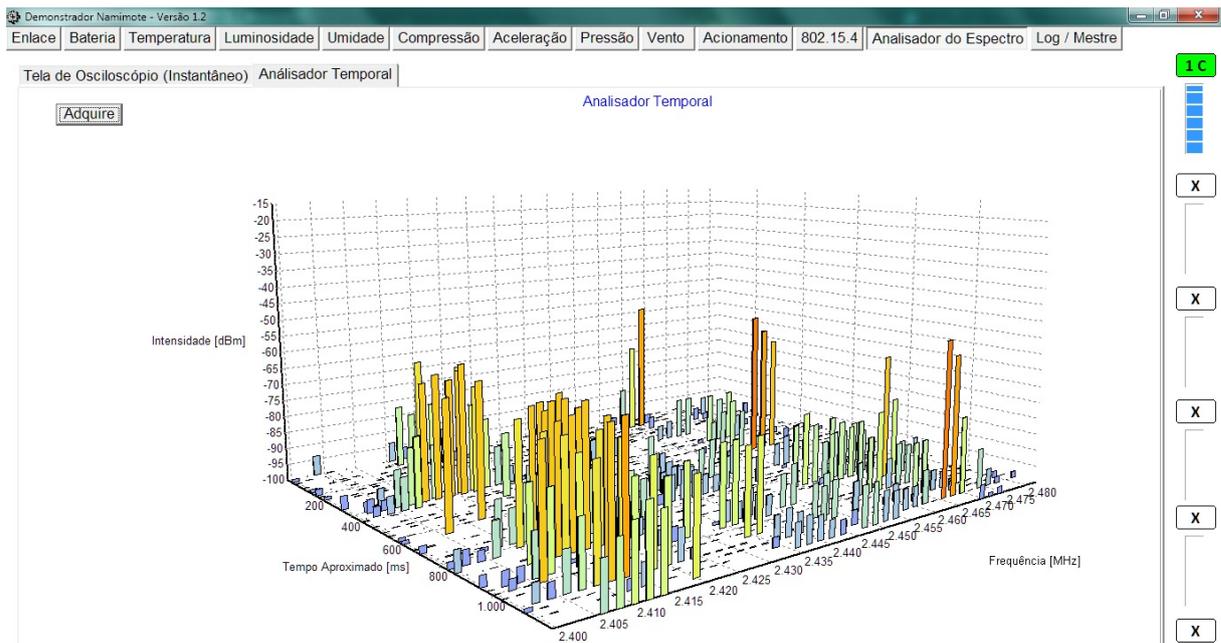


Figura 22 – Avanço temporal no espectro analisado, com passo de 2 MHz na frequência e sem comunicação com o AP mais próximo.

Fonte: Do autor.

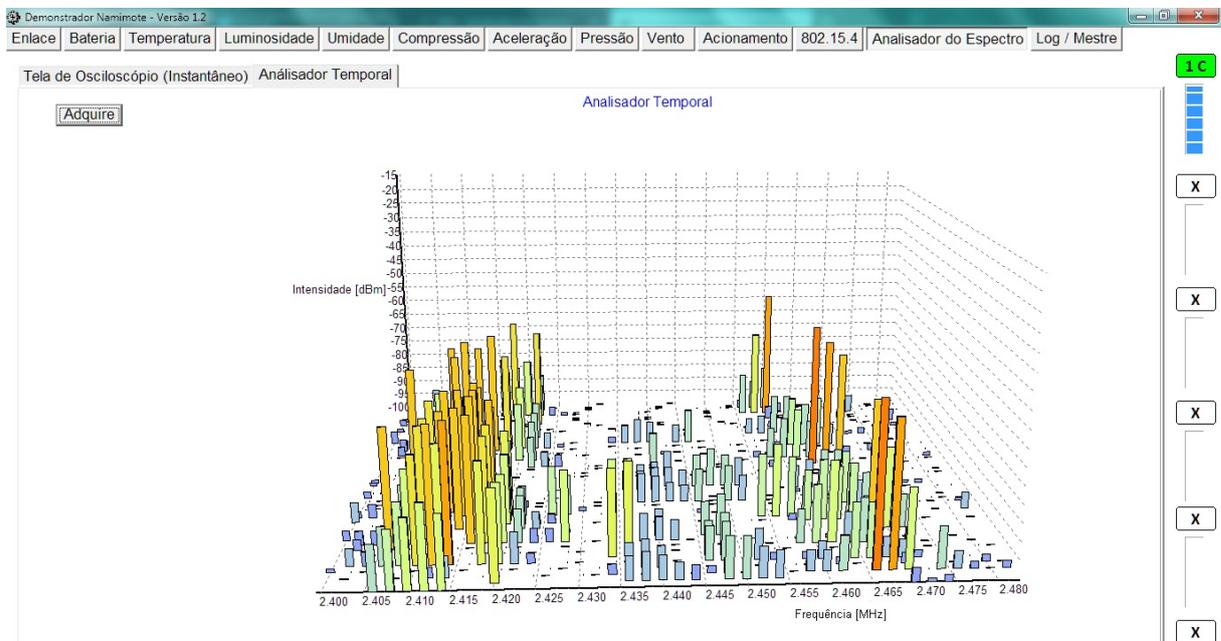


Figura 23 – Avanço temporal no espectro analisado, em outra perspectiva, com passo de 2 MHz na frequência e sem comunicação com o AP mais próximo.

Fonte: Do autor.

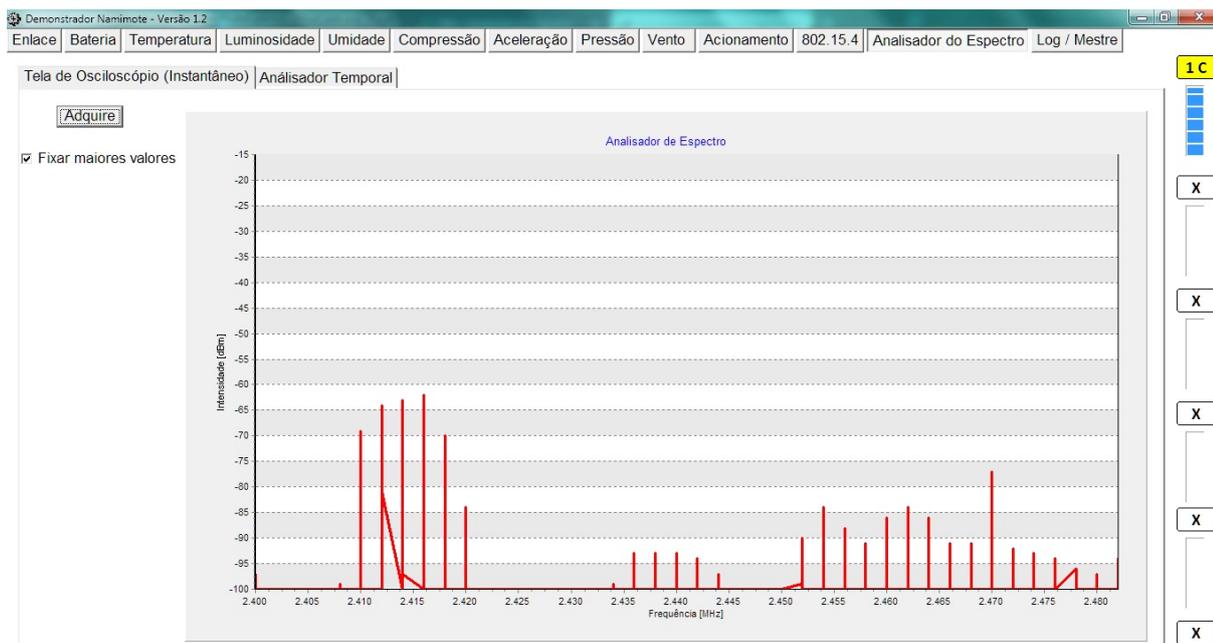


Figura 24 – Ocupação do espectro no tempo de execução analisado, com passo de 2 MHz na frequência e sem comunicação com o AP mais próximo.

Fonte: Do autor.

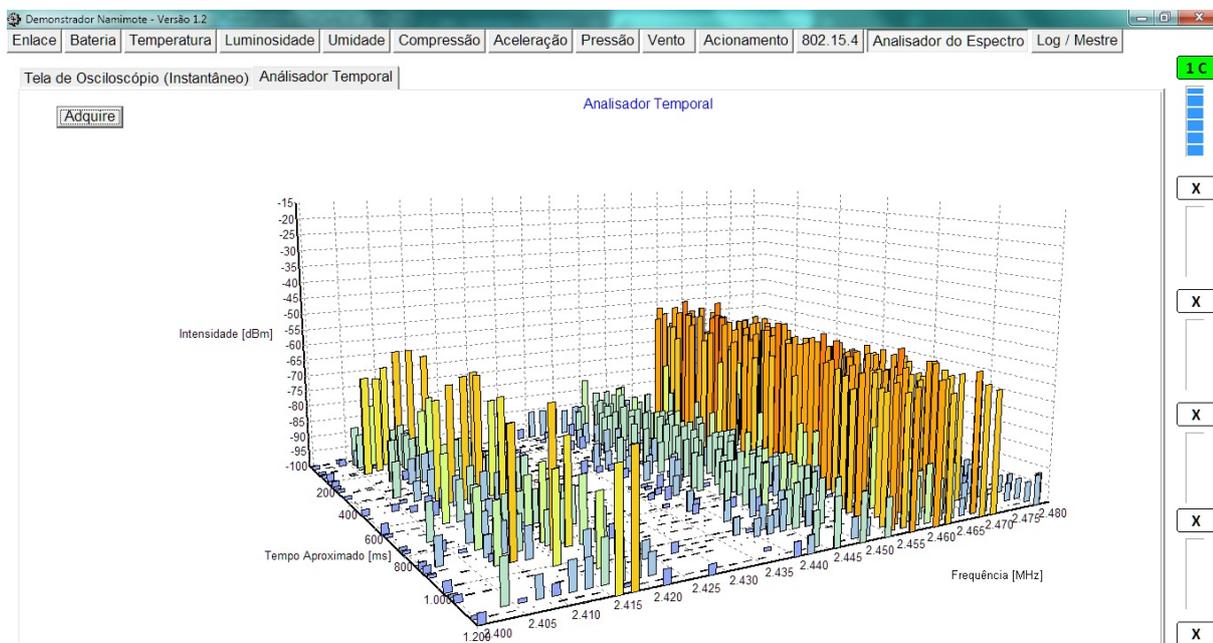


Figura 25 – Avanço temporal no espectro analisado, com passo de 2 MHz na frequência e com comunicação com o AP mais próximo, no canal 11.

Fonte: Do autor.

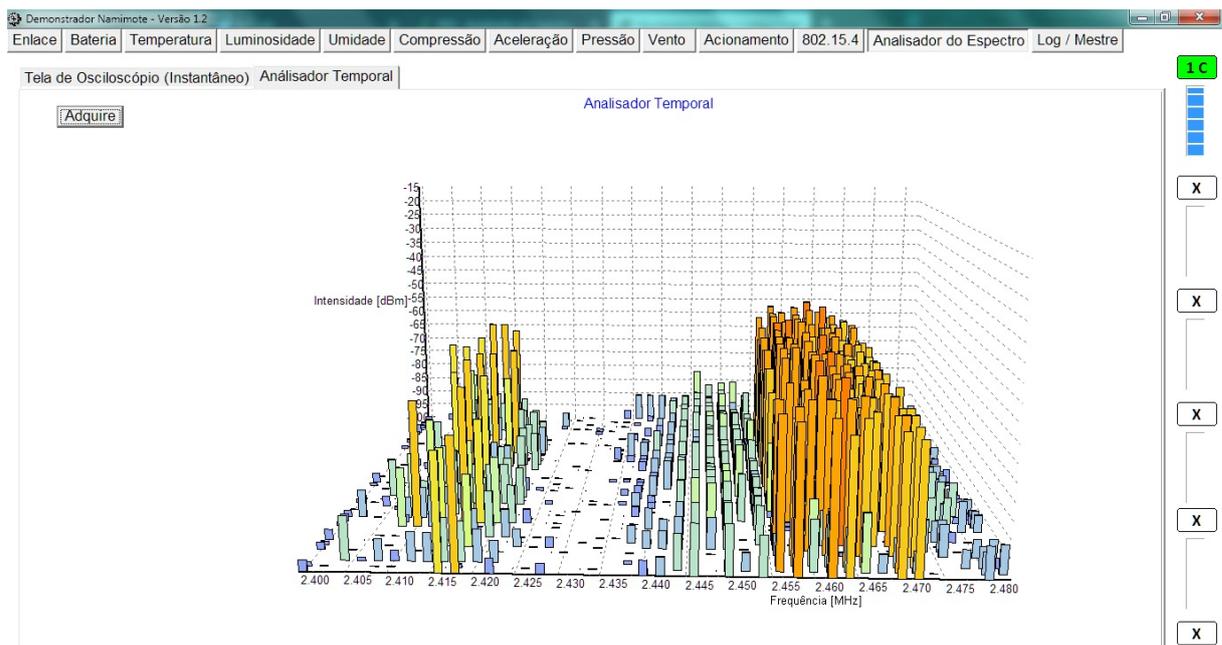


Figura 26 – Avanço temporal no espectro analisado em outra perspectiva, com passo de 2 MHz na frequência e com comunicação com o AP mais próximo, no canal 11.

Fonte: Do autor.

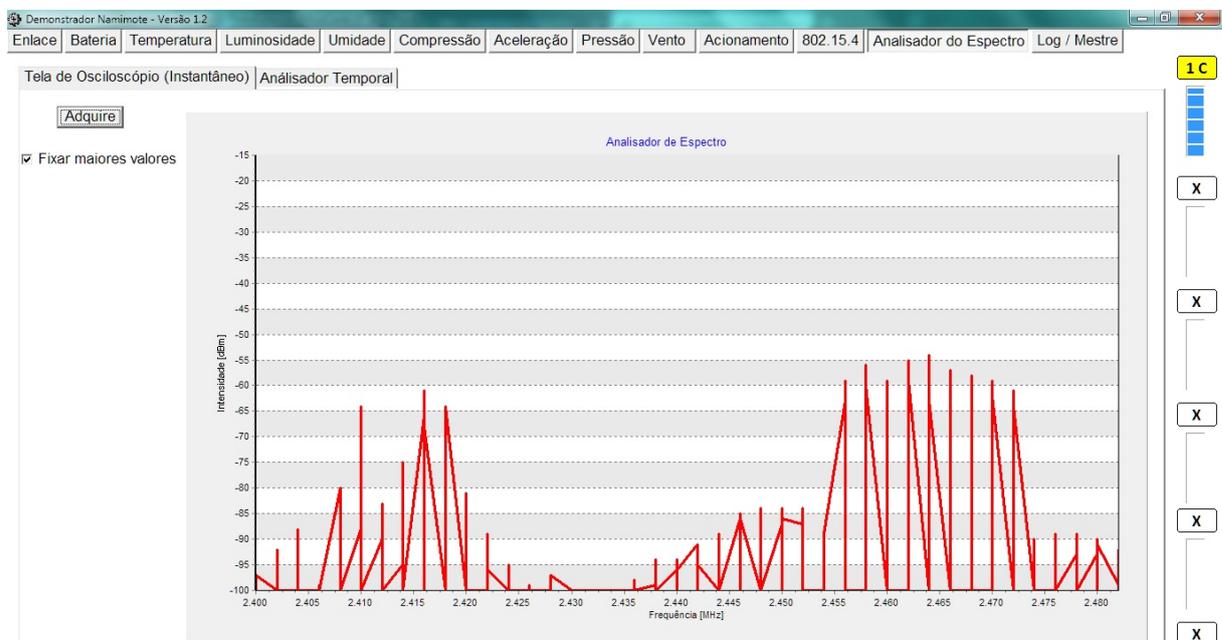


Figura 27 – Ocupação do espectro no tempo de execução analisado, com passo de 2 MHz na frequência e com comunicação com o AP mais próximo, no canal 11.

Fonte: Do autor.

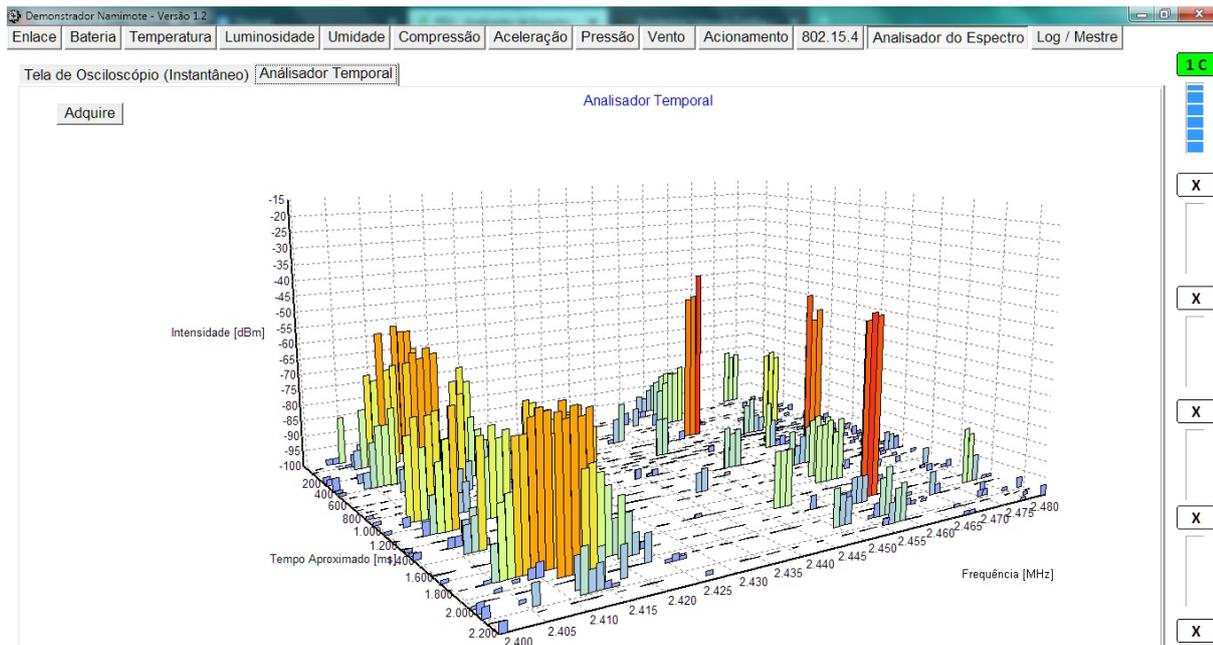


Figura 28 – Avanço temporal no espectro analisado, com passo de 1 MHz na frequência e sem comunicação com o AP mais próximo.

Fonte: Do autor.

Passos de 1 MHz

Um segundo teste (também para o espectro completo de Wi-Fi) foi feito com mais medidas por varredura (84), resultando em um passo de 1 MHz na frequência.

Da mesma forma que anteriormente, nas Figuras 28, 29 e 30 estão exibidos os resultados para esta demonstração, onde não há comunicação sendo feita com o AP mais próximo. Nas Figuras 31, 32 e 33, estão os resultados para quando há uma comunicação com o AP próximo, no canal 11. Nota-se que com a diminuição do passo, sinais com banda mais estreita são captados e identificados, em contrapartida, o tempo para a análise completa dobrou, de 1, 2 s para 2, 4 s, com cerca de 48 ms entre uma varredura e a próxima.

6.2 Varredura das Frequências de um Canal de Wi-Fi

Para um estudo em uma parcela limitada do espectro, é possível ajustar as configurações dos códigos para que a análise tenha sua varredura configurada conforme os requisitos de um projeto, como, por exemplo, a análise de um canal de Wi-Fi.

Mostrado nas Figuras 34, 35 e 36, foi feita varredura e detecção de energia para o canal 5 do protocolo de Wi-Fi (com largura de banda de 22 MHz), com uma comunicação ocorrendo entre um dispositivo móvel e um AP próximo. A detecção de energia neste caso, foi ajustada para um passo de 1 MHz na frequência, resultando em 22 medidas para o canal, mais 2 medidas extras foram adicionadas nas extremidades do canal para ser

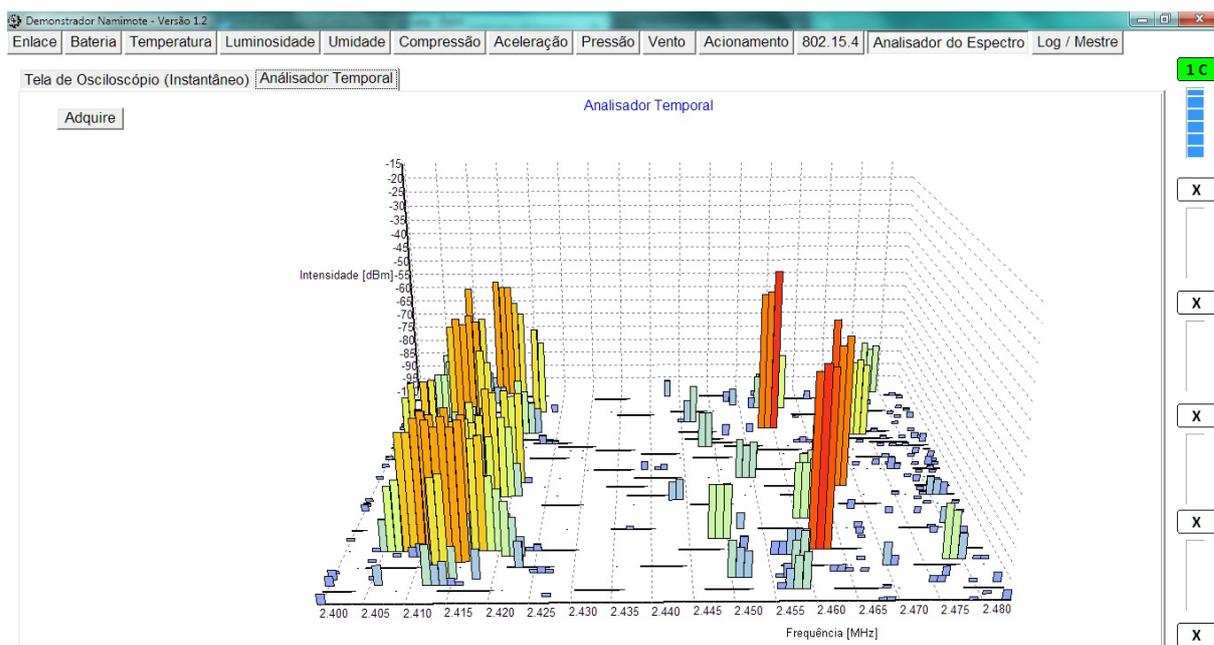


Figura 29 – Avanço temporal no espectro analisado em outra perspectiva, com passo de 1 MHz na frequência e sem comunicação com o AP mais próximo.

Fonte: Do autor.

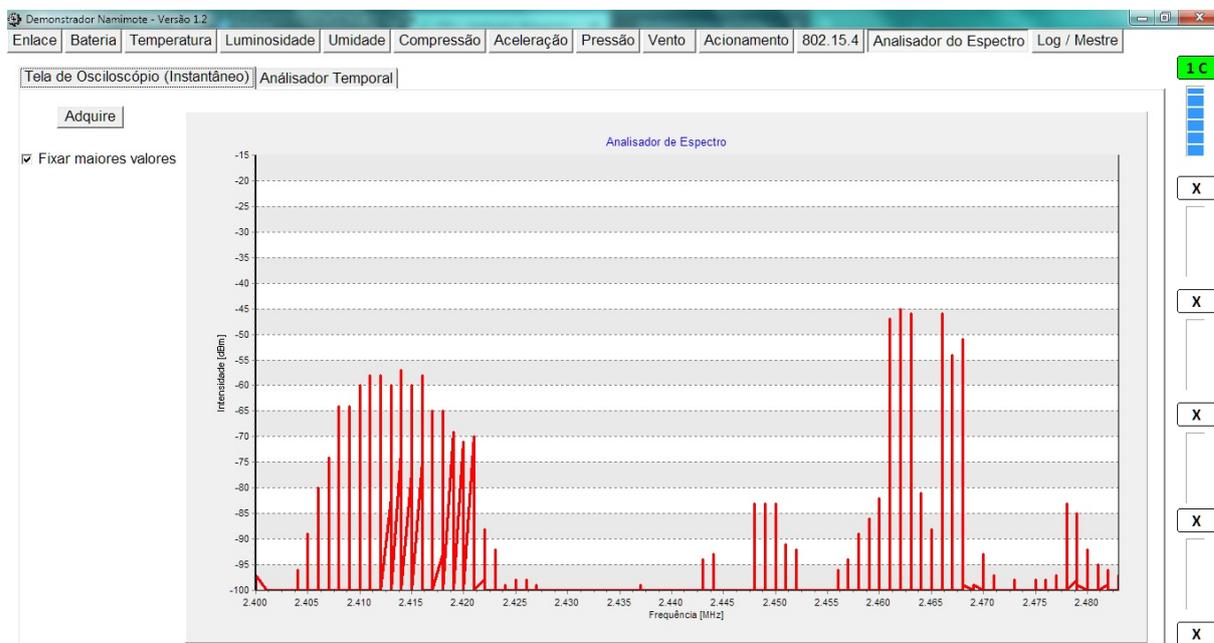


Figura 30 – Ocupação do espectro no tempo de execução analisado, com passo de 1 MHz na frequência e sem comunicação com o AP mais próximo.

Fonte: Do autor.

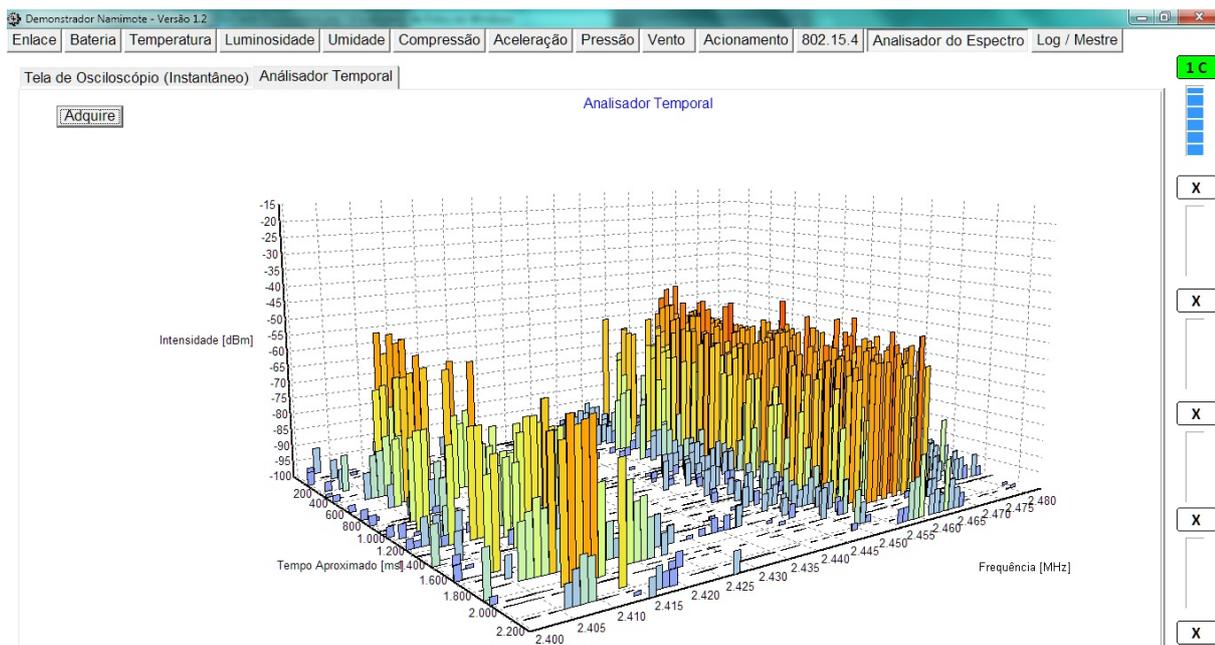


Figura 31 – Avanço temporal no espectro analisado, com passo de 1 MHz na frequência e com comunicação com o AP mais próximo, no canal 11.

Fonte: Do autor.

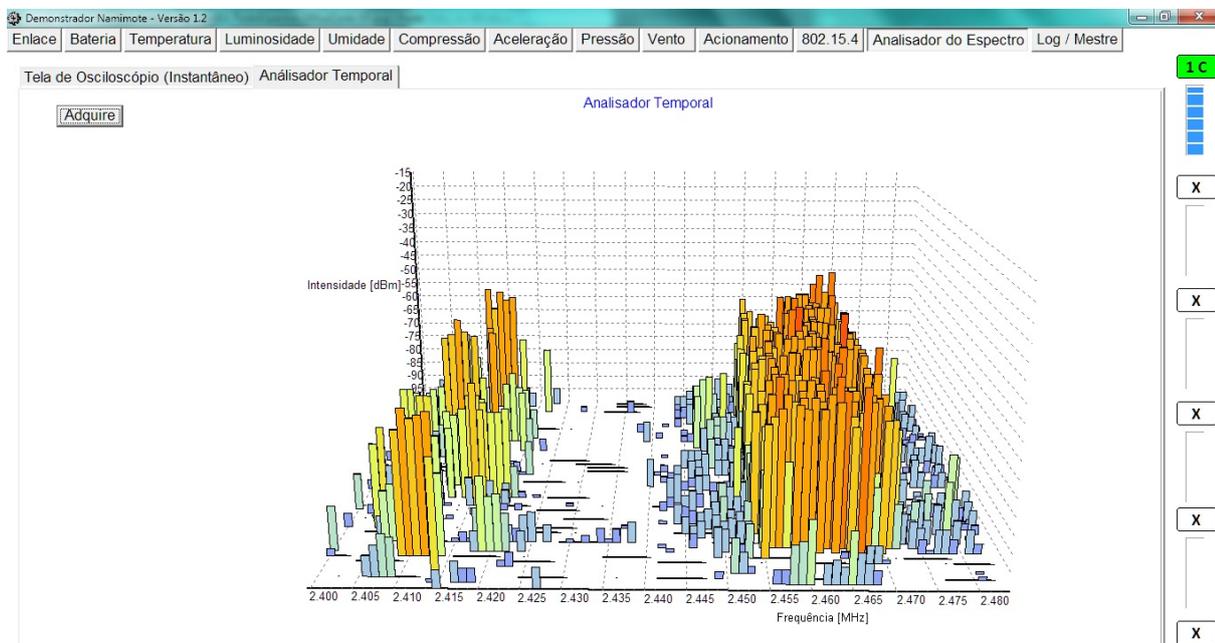


Figura 32 – Avanço temporal no espectro analisado em outra perspectiva, com passo de 1 MHz na frequência e com comunicação com o AP mais próximo no canal 11.

Fonte: Do autor.

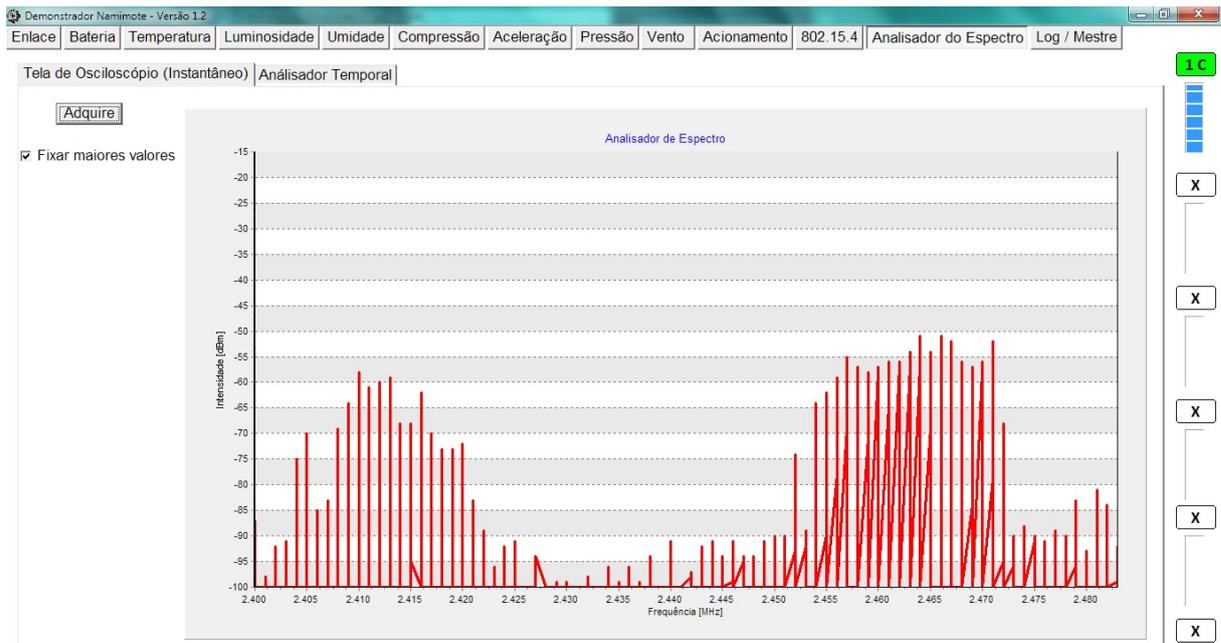


Figura 33 – Ocupação do espectro no tempo de execução analisado, com passo de 1 MHz na frequência e com comunicação com o AP mais próximo no canal 11.

Fonte: Do autor.

possível identificar o início e o final do espectro utilizado, como na Figura 4.

Nesta análise, o tempo total para 50 varreduras foi de 0,8 s, como o esperado, já que a varredura do espectro inteiro (com esse passo) foi de 2,4 s e um canal desse protocolo corresponde a 1/3 do espectro total.

A partir dos resultados obtidos com esses testes, foi possível mostrar que o transceptor utilizado, o Namimote, contendo a plataforma MC1322x, pode ser utilizado em análises espectrais para a faixa de 2,4 GHz com a função de detecção de energia, sendo possível configurar seus limites de varredura, passo, tempo de captura e forma de apresentação dos dados. Os valores de detecção de energia exibidos podem ser calibrados em um laboratório capacitado, efetuando possíveis ajustes no firmware projetado, aumentando a confiabilidade dos valores exibidos.

Com esses resultados e todos os testes feitos, foi montada a Tabela 4 com a finalidade de mostrar o desempenho aproximado da funcionalidade de análise espectral adicionada ao Namimote. O *tempo de cada medida* foi estimado a partir da duração de uma análise espectral completa, considerando o tempo de todas as operações até que a informação seja exibida no gráfico, com uma única leitura de nível de energia para cada frequência. Os *limites de frequência* foram obtidos conforme as possibilidades de testes disponíveis (com sinais de Wi-Fi). Valores de frequências superiores ou inferiores a essas mostradas poderiam ser testadas com equipamentos capazes de emissões em tais frequências. O passo mínimo de 1 MHz está limitado pelo software de demonstrações, que, atualmente,

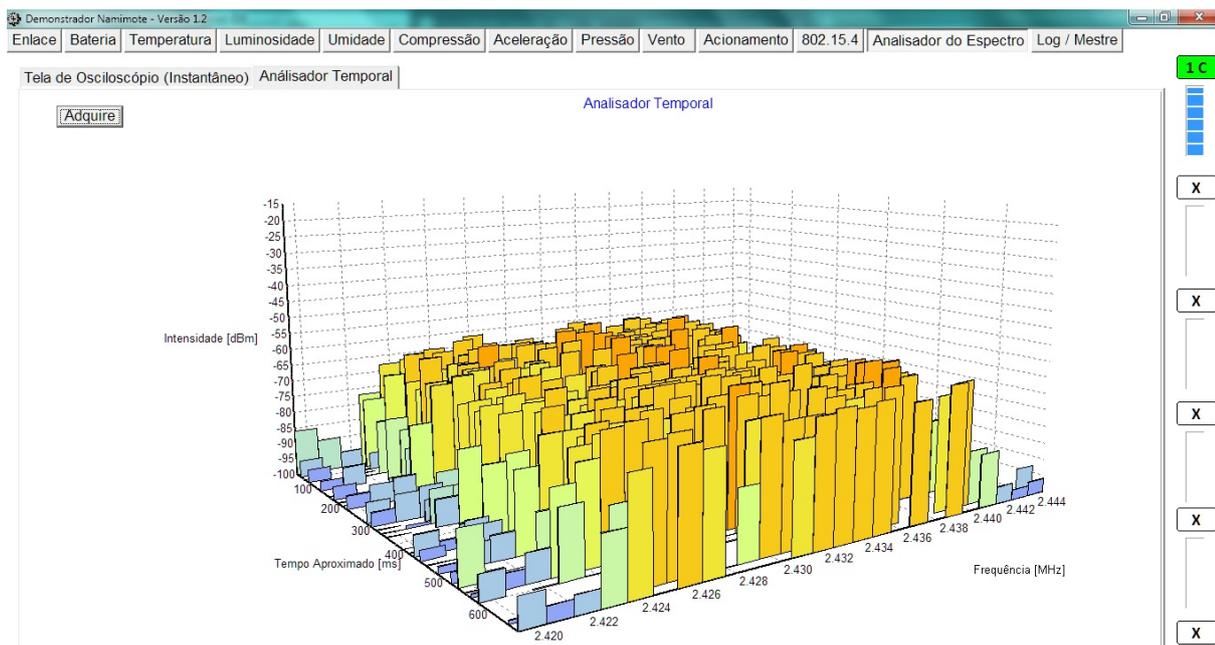


Figura 34 – Varredura temporal no espectro do canal 5, com comunicação e com passo de 1 MHz na frequência.

Fonte: Do autor.

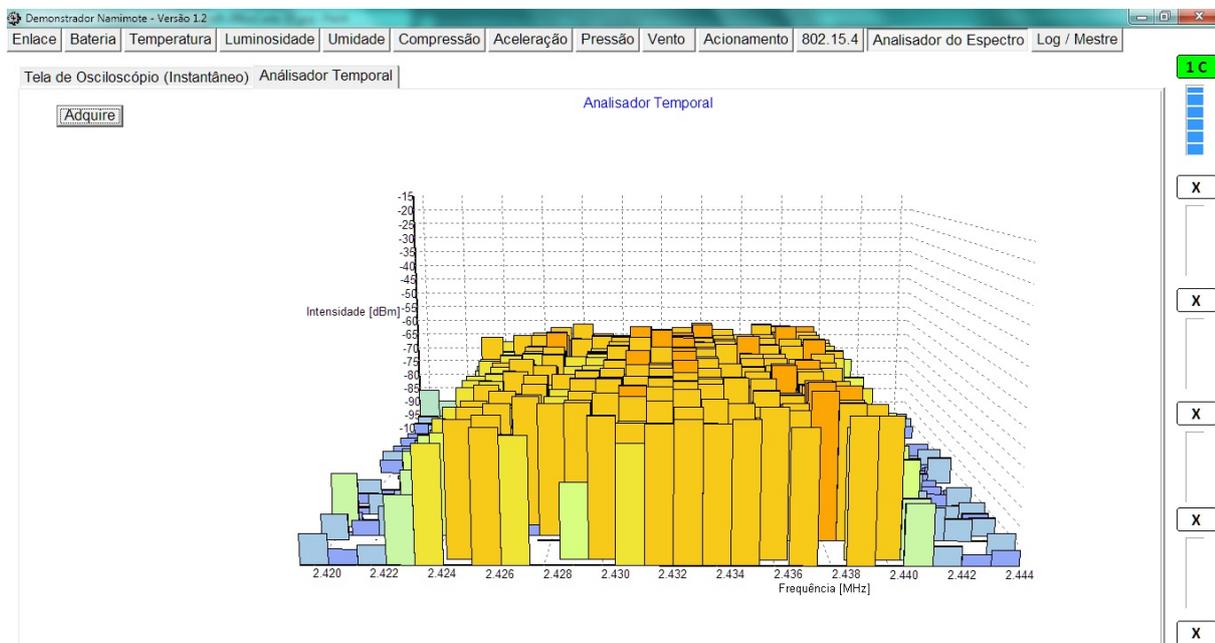


Figura 35 – Varredura temporal no espectro do canal 5, com comunicação e com passo de 1 MHz na frequência, em outra perspectiva.

Fonte: Do autor

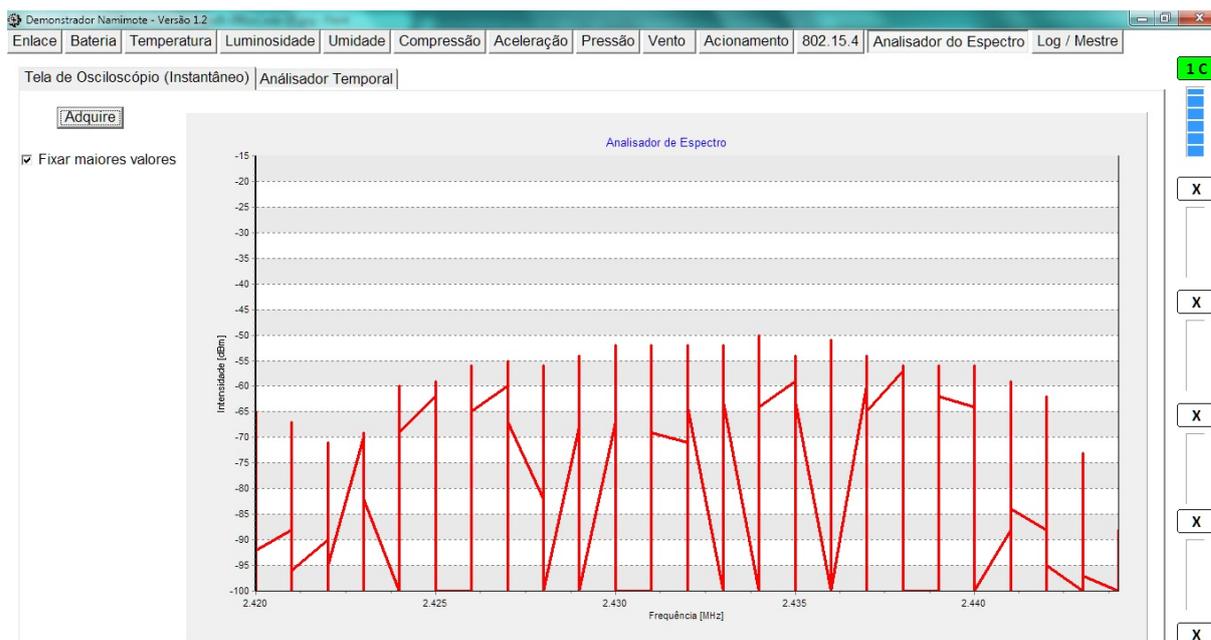


Figura 36 – Ocupação do espectro no tempo de execução analisado, no canal 5, com passo de 1 MHz na frequência.

Fonte: Do autor.

Tabela 4 – Características aproximadas da análise espectral implementada.

| Característica | Limites aproximados |
|-----------------------------|-----------------------|
| Tempo de cada leitura de ED | $\sim 550 \mu s$ |
| Frequências testadas | 2400 MHz até 2484 MHz |
| Passo | Mínimo 1 MHz |

Fonte: Do autor.

não exibe corretamente as informações para passos menores que esse (por limitações das configurações dos gráficos). Caso as informações de análise espectral sejam utilizadas de outra forma (ou em outro software), passos menores podem ser configurados e testados.

7 Conclusão

Neste trabalho foi mostrada a importância de efetuar análises espectrais em aplicações de radiofrequência, como na tão utilizada faixa ISM se inicia em 2400 MHz e que vai até 2484 MHz, e que engloba partes de protocolos muito utilizados para comunicação em redes locais e pessoais, com Wi-Fi (IEEE 802.11), Bluetooth e ZigBee (IEEE 802.15.4).

Com o destaque de alguns trabalhos que auxiliam no entendimento de sistemas e protocolos, além de mostrar dispositivos comerciais utilizados para tal finalidade, procurou-se destacar a importância de conseguir utilizar plataformas de baixo custo para efetuar medições de energia em varreduras do espectro proposto.

Como alguns transceptores de baixo custo estavam disponíveis, foram propostas modificações em seu modo de funcionamento, a partir de informações fornecidas pelo fabricante do microcontrolador embarcado nestes transceptores (o MC13224), para serem efetuadas varreduras e detecções de energia no espectro com esses dispositivos de baixo custo. A possibilidade de aproveitar essas funções dos dispositivos precisou ser verificada, pois, esses transceptores foram pensados para operar em um protocolo de comunicação específico, o 802.15.4, a sintonia e detecção de energia em frequências que estivessem fora do protocolo poderiam não ser possíveis. A verificação também foi importante pelo motivo de certas informações que não estavam diretamente relacionadas com a utilização no protocolo não foram detalhadas na documentação fornecida pelo fabricante.

Foi utilizado o mais simples dos transceptores para essa verificação, o Namimote. Trata-se de uma plataforma de sensoriamento que possui o microcontrolador em questão.

Para essa verificação, o código do firmware que efetua as funções de sensoriamento deste dispositivo foi alterado e a função de varredura e detecção pode ser implementada com sucesso. O código referente às demais funções do Namimote foram mantidas, apenas foram adaptadas para que a nova operação pudesse funcionar de forma adequada.

O outro dispositivo, mais robusto, mas que também possui o mesmo microcontrolador da plataforma anterior, precisa ser trabalhado no laboratório da universidade que o detém e, por motivos pandêmicos, o acesso contínuo ao local foi bastante limitado. Portanto, comentou-se a possibilidade de ampliação das funcionalidades para este outro hardware possível, restando como trabalho futuro.

Esse projeto também abre precedentes para que estudos mais elaborados sejam feitos, mesmo com a plataforma mais simples, isolando suas funcionalidades de análise espectral implementadas, para estudos de caso específicos.

As demonstrações apresentadas aqui, mostram resultados que comprovam a possi-

bilidade de fazer análises espectrais com dispositivos de baixo custo, detectando a energia referente à ocupação das frequências utilizadas por sinais de Wi-Fi.

Referências

- BLUETOOTH SIG. *Learn About Bluetooth Bluetooth Radio Versions*. 2021. Disponível em: <<https://www.bluetooth.com/learn-about-bluetooth/radio-versions/>>. Acesso em: 14 maio 2021. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 27.
- BRONZATTI, L. F. C. Análise sobre a tecnologia de rede sem fio zigbee / ieee 802.15.4. *Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo*, 2013. Citado na página 26.
- BROWN, C. *Spectrum Analysis Basics*. Santa Rosa, Califórnia, U.S.A.: Hewlett-Packard Company Microwave Instruments Division, 1997. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 22.
- CARR, J. J. *RF Components and Circuits*. 1. ed. [S.l.]: Newnes, 2002. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 23.
- CARVALHO, R. A. de et al. Proposta de um analisador de rede sem fio multicanal padrão ieee 802.15.4. *XII Conferência de Estudos em Engenharia Elétrica - Universidade Federal de Uberlândia*, 2014. Citado na página 32.
- DIGI INTERNATIONAL INC. *White Paper: Demystifying 802.15.4 and ZigBee*. 2016. Disponível em: <https://www.mouser.com/pdfdocs/digi-wp_zigbee.pdf>. Acesso em: 14 maio 2021. Citado na página 27.
- ELECTRONIC NOTES. *Wi-Fi Channels, Frequencies, Bands & Bandwidths*. 2021. Disponível em: <<https://www.electronics-notes.com/articles/connectivity/wifi-ieee-802-11/channels-frequencies-bands-bandwidth.php>>. Acesso em: 18 maio 2021. Citado na página 55.
- ETSI. *Harmonized European Standard: Final draft ETSI EN 300 328 V1.8.1 (2012-04)*. European Telecommunications Standards Institute, 2012. Disponível em: <https://www.etsi.org/deliver/etsi_en/300300_300399/300328/01.08.01_30/en_300328v010801v.pdf>. Acesso em: 17 maio 2021. Citado na página 23.
- GIACOMIN, J. C.; VASCONCELOS, F. H. Qualidade da medição de intensidade de sinal nas comunicações de uma rede de sensores sem fios: uma abordagem da camada física. *INFOCOMP Journal of Computer Science*, v. 5, p. 83–92, 2006. ISSN 1982-3363. Disponível em: <<http://www.dcc.ufba.br/infocomp/index.php/INFOCOMP/article/view/137>>. Citado na página 31.
- Jornal PETNews. *Uma análise comparativa do padrão IEEE 802.11 operando em 2,4 GHz e em 900 MHz*. 2011. Grupo PET Computação UFCG. Disponível em: <http://www.dsc.ufcg.edu.br/~pet/jornal/setembro2011/materias/pesquisas_dsc.html>. Acesso em: 22 fev 2021. Citado na página 24.
- KRÄTZIG, M. et al. 16-channel-analyser for parallel ieee 802.15.4 monitoring. 2009 IEEE Conference on Emerging Technologies Factory Automation, p. 1–4, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 31 e 32.

- KUMBHAR, A. Overview of ism bands and software-defined radio experimentation. *Department of Electrical and Computer Engineering, Florida International University, Miami, FL*, 2016. Citado na página 23.
- KUROSE, J. F.; ROSS, K. W. *Computer Networking: A Top-Down Approach*. 6. ed. [S.l.]: Pearson, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 27.
- LORENÇATO, A. D. A. Analisador de redes wireless. *Dissertação de mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul*, 2013. Citado 5 vezes nas páginas 31, 36, 41, 43 e 59.
- MACHADO, T. M. Analisador de redes wireless com capacidade de detecção de coexistência. *Dissertação de mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul*, 2014. Citado na página 31.
- MASUR, A. *Thread: QueryPerformanceCounter to milliseconds*. [Postagem em fórum online]. CodeGuru, 2003. Disponível em: <<https://forums.codeguru.com/showthread.php?261134-QueryPerformanceCounter-to-milliseconds>>. Acesso em: 12 maio 2021. Citado na página 54.
- MÜLLER, I. et al. Namimote: A low-cost sensor node for wireless sensor networks. *Andreev S., Balandin S., Koucheryavy Y. (eds) Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networking. ruSMART 2012, NEW2AN 2012. Lecture Notes in Computer Science, vol 7469. Springer, Berlin, Heidelberg, 2012*. Citado 5 vezes nas páginas 31, 36, 39, 40 e 44.
- NXP. *Reference Manual: Reference Manual: MC1322x, Advanced ZigBee - Compliant SoC Platform for the 2.4 GHz IEEE 802.15.4 Standard, Rev. 0.0*. [S.l.], 2008. Citado 6 vezes nas páginas 36, 45, 46, 47, 48 e 51.
- NXP. *Reference Manual: MC1322x Simple Media Access Controller (SMAC), Rev. 1.4*. [S.l.], 2009. Citado 2 vezes nas páginas 44 e 51.
- NXP. *Reference Manual: MC1322x, Advanced ZigBee - Compliant SoC Platform for the 2.4 GHz IEEE 802.15.4 Standard, Rev. 1.6*. [S.l.], 2012. Citado na página 45.
- PORTAL TELECO. *Redes Wi-Fi I: Espectro de Frequência ISM*. 2020. Disponível em: <https://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialredeswifi1/pagina_5.asp>. Acesso em: 22 fev 2021. Citado na página 22.
- RAMACHANDRAN, I.; ROY, S. Clear channel assessment in energy-constrained wideband wireless networks. *IEEE Wireless Communications*, v. 14, n. 3, p. 70–78, 2007. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 29.
- SCHULTZ, F. *O que é Internet das Coisas (IoT) e como funciona?* Milvus BR, 2020. Disponível em: <<https://milvus.com.br/internet-das-coisas-iot/>>. Acesso em: 16 maio 2021. Citado na página 19.
- SEGGER Microcontroller GmbH. *J-Link Debug Probes*. 2021. Disponível em: <<https://www.segger.com/products/debug-probes/j-link/>>. Acesso em: 14 maio 2021. Citado na página 41.
- SHARMA, J. *White Paper: The Wi-Fi Evolution*. [S.l.]: Qorvo, 2020. Acesso em: 14 maio 2021. Citado na página 19.

SILVA, S. et al. Coexistence and interference tests on a bluetooth low energy front-end. Science and Information Conference, London, UK, 2014. Citado 3 vezes nas páginas 19, 27 e 28.

TEKTRONIX. *Wi-Fi: Overview of the 802.11 Physical Layer and Transmitter Measurements*. [S.l.], 2016. Disponível em: <<https://www.tek.com/document/primer/wi-fi-overview-80211-physical-layer-and-transmitter-measurements>>. Acesso em: 22 fev 2021. Citado 3 vezes nas páginas 19, 24 e 26.

VREM Software Development. *WiFi Analyzer (open-source)*. [Aplicativo para Android]. Disponível na Google Play, 2021. Disponível em: <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.vrem.wifianalyzer&hl=pt_BR&gl=US>. Acesso em: 14 maio 2021. Citado na página 61.

WELLS, D. D. Ieee 802.11 signal source mapping using low cost spectrum analysers. *Submitted in partial fulfilment of the requirements of the degree of Bachelor of Science (Honours) of Rhodes University*, 2007. Citado na página 32.

WINDOWS DEVELOPER. *QueryPerformanceCounter function (profileapi.h)*. MICROSOFT, 2020. Disponível em: <<https://docs.microsoft.com/en-us/windows/win32/api/profileapi/nf-profileapi-queryperformancecounter>>. Acesso em: 12 maio 2021. Citado na página 54.