

**MINISTÉRIO DA DEFESA
EXÉRCITO BRASILEIRO
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA
(Real Academia de Artilharia, Fortificação e Desenho - 1792)**

SEÇÃO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

SISTEMAS DE COMUNICAÇÕES DE ULTRA-BAIXO CONSUMO DE ENERGIA

**CÍNTIA FERNANDA DE ABREU MELO
1º TEN RICARDO FREIRE DA SILVA**

**Rio de Janeiro
2014**

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA
(Real Academia de Artilharia, Fortificação e Desenho - 1792)

SISTEMAS DE COMUNICAÇÕES DE ULTRA-BAIXO CONSUMO DE ENERGIA

CÍNTIA FERNANDA DE ABREU MELO
1º TEN RICARDO FREIRE DA SILVA

TITULO

Projeto de Fim de Curso, apresentado ao Curso de Engenharia de Comunicações do Instituto Militar de Engenharia – IME – como requisito parcial para obtenção do grau de Verificação Final (VF)

Orientador: Cap QEM Luiz Renault Leite Rodrigues

Orientador: TC QEM Mauro Cezar Rebello Cordeiro, D.C..

Rio de Janeiro
2014

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA
(Real Academia de Artilharia, Fortificação e Desenho - 1792)

CÍNTIA FERNANDA DE ABREU MELO
1º TEN RICARDO FREIRE DA SILVA

SISTEMAS DE COMUNICAÇÕES DE ULTRA-BAIXO CONSUMO DE ENERGIA

Projeto de Fim de Curso, apresentado ao Curso de Engenharia de Comunicações do Instituto Militar de Engenharia – IME – como requisito parcial para obtenção do grau de Verificação Final (VF)

Orientador: Cap QEM Luiz Renault Leite Rodrigues

Orientador: TC QEM Mauro Cezar Rebello Cordeiro, D.C..

Aprovada em 3 de outubro de 2014 pela seguinte Banca Examinadora:

TC QEM Mauro Cezar Rebello Cordeiro, D.C. do IME

MAJ QEM Luciene da Silva Demenicis, D.C. do IME

Cap QEM Luiz Renault Leite Rodrigues, do IME – Presidente

Rio de Janeiro

2014

SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES	5
1 INTRODUÇÃO	9
2 ENERGY HARVESTING.....	10
2.1 CONCEITO	10
2.2 APLICAÇÕES: KIT ENOCEAN	15
3 PROJETO	19
3.1 MICROCONTROLADOR	19
3.2 TRASCEPTOR.....	23
3.3 MODULAÇÃO FSK	26
3.4 CÓDIGOS CORRETORES DE ERROS	27
3.4.1 CÓDIGO DE HAMMING	28
3.5 ANTENAS	29
3.5.1 ANTENAS E PROPAGAÇÃO	29
3.5.2 ANTENNA MATRIX: 434MHZ	36
3.6 BATERIA.....	43
3.6.1 CR2032.....	43
3.6.2 XL210F	46
4 METODOLOGIA E RESULTADOS	48
5 CONCLUSÃO	62
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	63
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	64

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIG 2.1	Estrutura geral de um sistema autônomo de energia	11
FIG 2.2	Estrutura de um sistema autônomo que usa <i>energy harvesting</i>	13
FIG 2.3	Estrutura de um dispositivo de <i>energy harvesting</i>	14
FIG 3.1	Transmissor alimentado por energia térmica	16
FIG 3.2	Transmissor alimentado por energia cinética	17
FIG 3.3	Transmissor alimentado por energia solar	18
FIG 3.4	Placa de desenvolvimento do microcontrolador STM32L152RCT6	20
FIG 3.5	Diagrama de estados do Si4464	23
FIG 3.6	Resposta no tempo e consumo de corrente – Si4464.....	25
FIG 3.7	Forma de onda FSK, derivada de uma mensagem binária	26
FIG 3.8	Esquema conceitual de um modulador FSK	26
FIG 3.9	Diagrama de radiação em duas dimensões	31
FIG 3.10	Configuração de medição dos parâmetros de uma antena da família estudada	37
FIG 3.11	Circuito da antena impressa IFA (WES0071-01-APF434M-01)	37
FIG 3.12	Circuito da antena de cerâmica (WES0072-01-AM434D-01).....	38
FIG 3.13	Circuito da antena <i>Medium Size Wire Helical</i> (WES0074-01-AWH434M-01).....	38
FIG 3.14	Circuito das antenas <i>Panic Button IFA</i> (WES0076-01-APL434-01) e <i>Panic Button ILA</i> (WES0075-01-APF434P-01)	39
FIG 3.15	Circuito da antena <i>Printed Meander Monopole</i> (WES0077-01-APN434D-01).....	39
FIG 3.16	Circuito da antena <i>Small Size Printed ILA</i> (WES0078-01-APL434S-01)	39
FIG 3.17	Circuito da antena <i>Balanced IFA</i> (WES0073-01-APB434D-01)	40
FIG 3.18	Medição da impedância até 1,5GHz, considerando o <i>hand effect</i> para o modelo WES0071-01-APF434M-01	41
FIG 3.19	Curva do ganho em baixo nível de potência para o modelo WES0071-01-APF434M-01	41
FIG 3.20	Referência para os eixos de orientação das medições efetuadas para o modelo WES0071-01-APF434M-01	42

FIG 3.21	Diagrama de radiação no plano XY para o modelo WES0071-01-APF434M-01	42
FIG 3.22	Estrutura interna de uma bateria de Li/MnO_2 do tipo moeda	44
FIG 3.23	Dimensões da bateria CR2032, em mm (inchs).....	44
FIG 3.24	Curva de descarga contínua da bateria CR2032	45
FIG 3.25	Característica do pulso da bateria CR2032.....	45
FIG 3.26	Estrutura interna de uma bateria de $Li/SOCl_2$	46
FIG 3.27	Curva de descarga contínua da bateria XL-210F, à temperatura de 20°C	47
FIG 4.1	Representação conceitual do projeto	48
FIG 4.2	Interface do programa WDS, indicando a escolha dos parâmetros do projeto	49
FIG 4.3	Esquemático base de um dispositivo transceptor utilizando o Si446x	50
FIG 4.4	Seleção de cinco portas GPIO no microcontrolador do projeto	50
FIG 4.5	Proporção entre o consumo no modo <i>Standby</i> e no modo <i>Run</i>	51
FIG 4.6	Definição do ciclo de operação e consumo de corrente por tempo ..	53
FIG 4.7	Principais parâmetros técnicos do modelo de bateria CR2032	54
FIG 4.8	Duração estimada para a bateria CR2032 e alerta de incompatibilidade com o projeto	54
FIG 4.9	Principais parâmetros técnicos do modelo de bateria XL-210F	55
FIG 4.10	Duração estimada para a bateria XL-210F	56
FIG 4.11	Associação dos dispositivos de <i>energy harvesting</i> da EnOcean	57
FIG 4.12	Medição com o Analisador de Sinal N9010 EXA da Agilent Technologies	57
FIG 4.13	Transmissão de dois pacotes de dados, usando o PTM 330	58
FIG 4.14	Detalhe na transmissão de um pacote usando o PTM330	59
FIG 4.15	Medição com o Osciloscópio DSSO-X 3034A da Agilent Technologies	59
FIG 4.16	Curva da voltagem pelo tempo de um pulso do ECO 200	60

RESUMO

Ganha força, no campo das telecomunicações e eletrônica, o conceito de sistema autônomo de energia. Isto é, um sistema eletrônico projetado para operar o maior tempo possível, proporcionando, elaborando, armazenando e transmitindo informações sem estar conectado a uma rede elétrica. Tais sistemas são de grande interesse por suas variadas aplicações práticas. Na etapa de suprimento de energia para esse tipo de dispositivo, temos duas grandes vertentes: uso de fontes (como baterias), ou captação da energia do meio (ideia conhecida pelo termo de *energy harvesting*). Ambas as vertentes foram abordadas neste trabalho, com o objetivo de projetar um dispositivo push-to-talk (PTT), para uso operacional, de ultra-baixo consumo de energia, para durar cinco anos sem troca de bateria. Esse dispositivo sem fio estará ao alcance dos dedos do combatente e sua função é autorizar o início da comunicação entre dois rádios, ao pressionar do botão sem a necessidade de ter que movimentar a mão da posição original. Para desenvolvermos esse projeto, foi realizado um longo estudo de viabilidade, em que foi abordada a análise técnica de todos os equipamentos envolvidos, bem como simulações de consumo de energia. Foram escolhidos equipamentos de ultra-baixo consumo, como o microcontrolador STM32L152RCT6 e o transceptor Si4464. Estudou-se a modulação mais adequada para o tipo de pacote a ser transmitido, bem como técnicas de correção de erro. Analisou-se também as possibilidades de antenas em nossa frequência de operação. Foi realizada ainda uma abordagem bastante detalhada, tanto de fontes de energia (baterias CR2032 e XL-210F), quanto do conceito de *energy harvesting*. Neste campo, analisamos e testamos os equipamentos de um kit de desenvolvimento da EnOcean, contendo dispositivos de captação de energia através do movimento, da diferença de temperatura e da energia solar. O estudo aprofundado dos componentes do projeto nos possibilitou o desenvolvimento de simulações, em que pudemos constatar que é possível construir o dispositivo PTT, usando uma bateria XL-210F. Posteriormente, verificou-se que há viabilidade de projetar o PTT remoto usando apenas a captação de energia do meio. Neste caso, verificou-se que há viabilidade, desde que se potencialize a capacidade do sensor.

Palavras-chave: *Energy harvesting*, ultra-baixo consumo de energia, *push-to-talk*

ABSTRACT

The concept of autonomous energy system gains strength in the field of telecommunications and electronics. It is an electronic system designed to operate, as long as possible, providing, preparing and storing information, without being connected to a power grid. Such systems are of great interest for its many practical applications. In the power supply step for this type of device, we have two major components: use of sources (such as batteries), or capture energy from the medium (known by the term idea of energy harvesting). Both aspects have been addressed in this work, with the goal of designing a push-to-talk (PTT) device, for operational use, ultra-low power consumption, to last five years without battery replacement. Such a device will be attached to the soldier and its function is to authorize the start of the communication between two radios, pressing the button. To develop this project, a long feasibility study, which was addressed in the technical review of all equipment involved, as well as simulations of energy consumption was performed. Ultra-low power devices such as the microcontroller STM32L152RCT6 and the transceiver Si4464 were chosen. We studied the most suitable type of modulation for the packet to be transmitted, as well as techniques for error correction. Also we examined the possibilities in our antenna operating frequency. A very detailed approach was done, both in power sources (batteries CR2032 and XL-210F), and in the concept of energy harvesting. In this field, we analyzed and tested a development kit from EnOcean, containing devices that captures energy through movement, temperature difference and solar energy. The depth study of the components of the project enabled us to develop simulations, in which we could conclude that the PTT device could be designed using a XL-210F battery. Later, the focus was shifted to the possibility of designing such a device using only the energy captured from the medium. In this case, it was found that there are viability, as long as it potentiates the ability of the sensor.

Keywords: Energy harvesting, ultra-low power consumption, push-to-talk

1 INTRODUÇÃO

Esta monografia descreve o projeto conceitual de um dispositivo push-to-talk (PTT), para uso operacional, de ultra-baixo consumo de energia, para durar cinco anos sem troca de bateria. O dispositivo projetado será acoplado ao combatente e sua função é autorizar o início da comunicação entre dois rádios, ao pressionar do botão. Para a realização de tal projeto, fizemos um longo estudo de viabilidade, a fim de determinar qual seria a melhor maneira de se gerar energia para o adequado funcionamento do dispositivo.

Para tanto, duas vertentes foram abordadas: o uso de uma bateria como fonte ou a captação da energia do meio, conceito conhecido como *energy harvesting*. Para elaboração do projeto, foram escolhidos equipamentos de ultra-baixo consumo: o microcontrolador STM32L152RCT6 e o transceptor Si4464. Outros aspectos foram considerados, como uma modulação robusta, um eficiente código de correção de erros e o estudo de antenas apropriadas, de ganho razoavelmente alto e dimensões compactas.

Como fonte de bateria foram considerados nas simulações dois modelos de bateria de lítio, caracterizados por sua alta performance. No campo do *energy harvesting*, apresentamos o estudo de dispositivos de captação baseados nos principais princípios: movimento, diferença de temperatura e energia solar.

A seção 2 introduz o conceito de *energy harvesting*, bem como as aplicações que existem na área. A seção 3 aborda os equipamentos envolvidos em nosso projeto. São apresentados os parâmetros técnicos que nos motivaram a escolha do microcontrolador, transceptor, modulação, código de correção de erros, antena e bateria.

Na seção 4 é apresentada a metodologia adotada para consolidação de nosso projeto. São apresentados os requisitos, considerações, simulações e medições realizados no projeto. Nesta seção são expostos as discussões parciais que levaram à decisão dos passos seguintes, bem como os resultados finais.

A seção 5 faz referência aos próximos passos sugeridos para o projeto. A seção 6 apresenta a conclusão a que chegamos após o desenvolvimento do

trabalho. E a seção 7 expõe as referências bibliográficas pelas quais nos pautamos para elaboração do projeto e do relatório.

2 ENERGY HARVESTING

Um dos conceitos-chave deste trabalho é a captação da energia do meio para alimentar o dispositivo PTT projetado. Este conceito, conhecido pelo termo de *energy harvesting* será abordado nesta seção. Inicialmente, será realizada uma abordagem teórica, definindo as principais ideias e termos. Posteriormente, serão discutidas as principais aplicações, tendo como base o kit de desenvolvimento desenvolvido pelo EnOcean, empresa que é referência no setor de *energy harvesting*. Para uma referência mais completa, recomenda-se a consulta ao livro *Energy Harvesting Systems – Principles, Modeling and Applications*, de Tom J. Kazmierski e Steve Beeby, bem como aos *datasheets* dos equipamentos apresentados.

2.1 CONCEITO

O sistema autônomo de energia é um sistema eletrônico que projetado para operar o maior tempo possível em ambientes conhecidos ou desconhecidos, proporcionando, elaborando e armazenando informações sem estar conectado a uma rede elétrica. Os sistemas podem ter variadas aplicações, desde ambientes industriais, até a área de diagnóstico e terapêutica.

Os sistema autônomos de energia podem ser entendidos da seguinte forma, esquematizada na figura 2.1.

A primeira etapa é a geração de energia, que pode ocorrer pela captação de energia do meio (Energy Harvesting) ou através de fontes de energia. A geração através do conceito de *energy harvesting* leva em consideração qualquer dispositivo ou sistema que poderia captar energia a partir de fontes correlacionadas ou não correlacionadas de energia. Consiste em muitas técnicas que podem ser classificadas pelo tipo de energia utilizada: diferença de temperatura, radiação de luz, campos eletromagnéticos, energia cinética, etc. A técnica poderia tirar vantagens de mais fontes ao mesmo tempo.

A fontes de energia leva em conta qualquer tipo de elemento de armazenamento de energia que pode ser usado para acumular energia em excesso e fornecê-la para o sistema quando a energia é insuficiente. Geralmente, consistem de fontes eletro-químicas, tais como baterias ou células de combustível ou de sistemas de armazenamento elétricos, tais como capacitores.

Posteriormente, temos a etapa de conversão de energia e otimização, que considera que quaisquer fontes de captação de energia devem ser condicionadas às fontes existentes e que a energia utilizada deve ser menor do que o que foi ganho pelo processo.

Por fim, temos a parte de consumo de energia por parte de dispositivos de ultra-baixo consumo. Refere-se à aquisição de dados, armazenamento e transmissão. Isso é fundamental, já que a implementação da *energy harvesting* está relacionada com a eficiência desta parte.

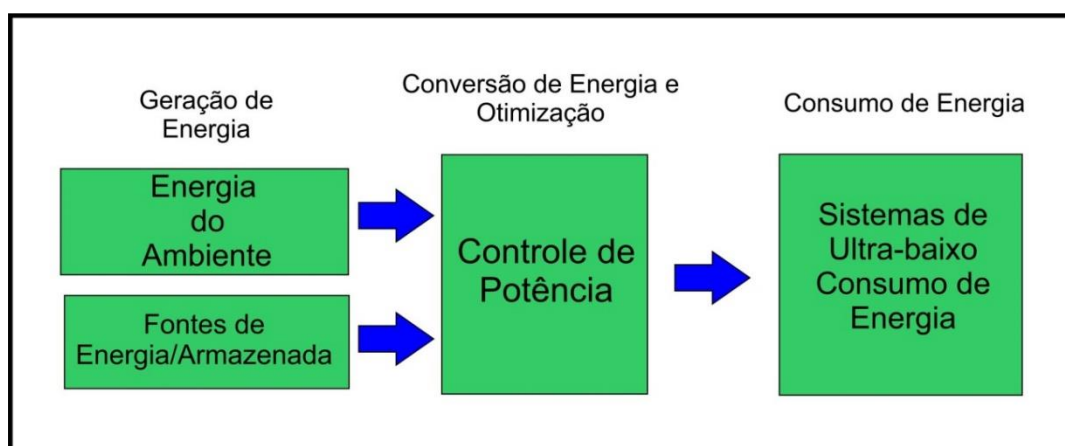


Figura 2.1: Estrutura geral de um sistema autônomo de energia

O conceito *energy harvesting* em geral, refere-se ao processo de utilização de energia do ambiente, que é convertida, principalmente (mas não exclusivamente) em energia elétrica, a fim de abastecer dispositivos eletrônicos pequenos e autônomos. Os termos “power harvesting” ou “energy scavenging” também são utilizados para descrever o mesmo processo. O conceito não é novo e tem aplicações amplas. Estamos familiarizados com implementações de grande escala, tais como a geração de energia elétrica e térmica para edifícios, a presença de painéis solares em grande escala e as turbinas eólicas.

No entanto, para o escopo desse trabalho, vamos analisar as questões dos sistemas eletrônicos miniaturizados. Há muitos exemplos de tais sistemas, em que o principal foco é a capacidade de controle do ambiente circundante, com a utilização de uma variedade de formas de energia do ambiente para se alimentar. Os sistemas estudados são projetados para explorar excesso ou desperdício de energia dentro de um ambiente, podendo ser suficiente para transmitir dados através de uma frequência de rádio para uma estação base.

Há uma ampla gama de domínios da energia dentro de qualquer ambiente típico, seja ele interno ou externo. A energia solar (luz), energia térmica (calor) e energia cinética (movimento) são três exemplos que podemos imaginar como possíveis fontes para a *energy harvesting* a partir de um ambiente ao ar livre. Podemos considerar algumas questões técnicas e desafios para a captação de energia do meio: disponibilidade da fonte, combinação de mais fontes, custos envolvidos, eficiência na captação, etc.

A escolha da fonte para implementação do conceito é fortemente determinada pela aplicação. Pode haver condições com grande disponibilidade de energia solar ou, por exemplo, captação de energia cinética explorando as vibrações. É preciso estudar detalhadamente e especificar as condições de fornecimento dessa energia.

Sensores sem fio oferecem muitas vantagens óbvias, como a facilidade de instalação, flexibilidade, custo, peso, etc. Em alguns cenários, não se pode contar com o fornecimento de energia elétrica da rede, bem como as baterias têm um tempo de vida limitado. Nesse cenário, a disponibilidade de energia do ambiente, portanto, tem benefícios claros. Dispositivos de *energy harvesting* podem ser projetados para operar por toda a vida útil do sistema, inclusive para alimentação de sensores sem fio.

A figura abaixo é um diagrama de blocos simples dos elementos fundamentais de um sistema de *energy harvesting*. A saída assume forma de variáveis elétricas: tensão e corrente. Dependendo da natureza do dispositivo, as características destes parâmetros podem variar consideravelmente; em fase, frequência, e amplitude de formas de onda. Modifica-se a saída do dispositivo, a fim de fornecer a excitação desejada para alimentar o subsistema eletrônico, tal como um sensor ou microcontrolador. Por exemplo, um dispositivo de *energy*

harvesting de vibração pode produzir uma tensão alternada com uma frequência de 50 Hz e magnitude de 1V, e isto precisa ser convertido em uma tensão CC de 3V para alimentar um acelerômetro.

Outro exemplo, tomemos o caso de uma célula solar e considere a variabilidade da luz solar incidente ao longo de um período de 24 horas. A intensidade da luz irá mudar de acordo com a quantidade de nuvens, a posição do sol no céu e o horário do dia. De modo geral, a fonte de energia pode, muitas vezes, variar, resultando em flutuações significativas na potência recebida pelo dispositivo. Desse modo, muitas vezes é necessário armazenar a energia em uma base temporária, de modo que possa ser administrada de uma maneira controlada para o subsistema eletrônico.

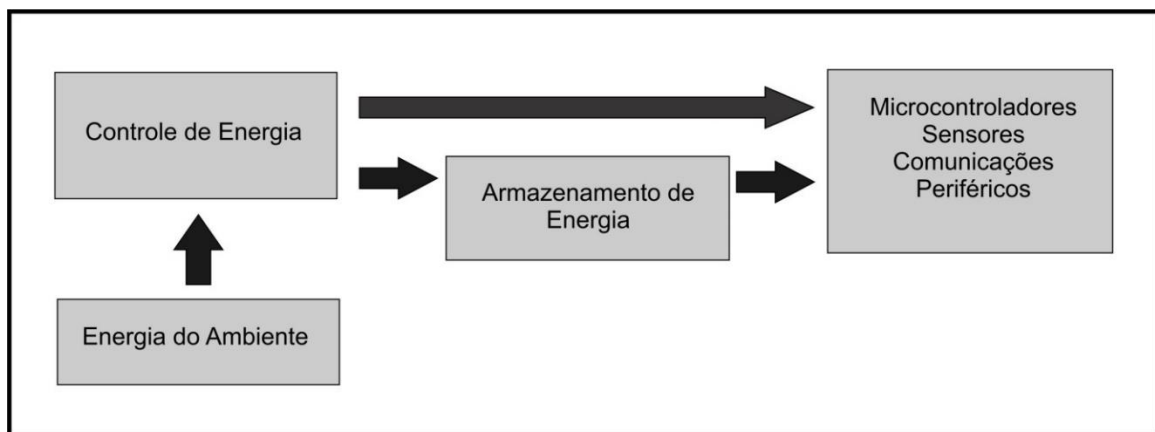


Figura 2.2: Estrutura de um sistema autônomo que usa *energy harvesting*

Atualmente, existem consideráveis esforços de investigação em todo o mundo para desenvolver a ideia de captação de energia para sistemas eletrônicos auto-alimentados. A maioria das pesquisas publicadas nessa área têm sido no sentido de melhorar a eficiência de captação através da concepção e fabricação de novos materiais e dispositivos micro-geradores. A quantidade de energia que pode ser captada em uma determinada aplicação é totalmente dependente da fonte de energia a ser escolhida.

Tipicamente, a tensão gerada a partir de um micro-gerador é insuficiente para alimentar um dispositivo eletrônico diretamente, e, portanto, circuitos analógicos externos são frequentemente utilizados, para corrigir e aumentar a tensão, e armazenar a energia em uma bateria ou capacitor. Vários projetos de

circuitos também foram estudados, tais como um retificador AC / DC, combinando com um comutador de modo conversor DC / AC. Devido a potência de saída ser altamente variável e imprevisível, recentemente foram propostos circuitos digitais que utilizam o cálculo aritmético em série, como um meio de lidar com a variação da energia disponível. Além disso, há publicações em que foi relatado que, por meio da utilização de lógica dedicada, é possível implementar um processador de FFT que funciona na prática com tensão de alimentação tão baixo quanto 180 mV, adequado para dispositivos de *energy harvesting*.

Um dispositivo de *energy harvesting* normalmente tem três componentes principais: o micro-gerador, que converte a energia ambiente em energia elétrica; o bombeio de tensão, que regula a tensão gerada; e o elemento armazenador.

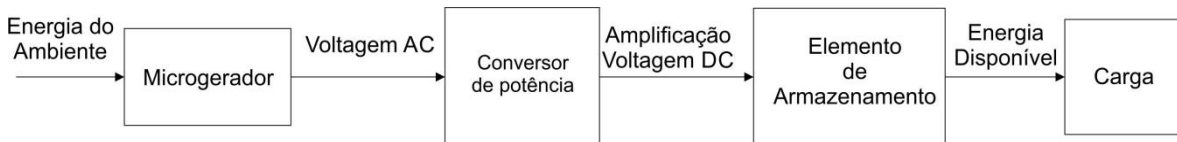


Figura 2.3: Estrutura de um dispositivo de *energy harvesting*

Tal dispositivo consiste em componentes tanto no domínio mecânico, quanto elétrico, bem como circuitos externos que regulam e armazenam a energia gerada. Portanto, a otimização de desempenho deve ser baseada em um modelo que descreva o dispositivo como um sistema integrado. No entanto, a maioria dos métodos de modelagem e otimização existentes se concentram ou no micro-gerador ou nos circuitos externos separadamente, enquanto as ferramentas de projeto para um sistema integrado estão em falta.

Para projetar dispositivos altamente eficientes em termos energéticos, é fundamental levar em consideração os diversos componentes, no contexto de um sistema completo. Do contrário, o ganho de uma parte pode vir à custa de perda de eficiência em outras, tornando-o muito menos eficiente do que o esperado. É possível prever o fluxo de projeto para a modelagem, configuração e otimização de um dispositivo, através do uso de VHDL-MAS, com o objetivo de prever corretamente o desempenho de um sistema. Descreve-se o micro-gerador e o sistema eletrônico externo como um modelo integrado, de modo que a interação

mecânico-elétrica, que muitas vezes falta em métodos tradicionais, possa ser capturada com precisão.

2.2 APLICAÇÕES: KIT ENOCEAN

Transmissores sem fio são capazes de gerar energia a partir do meio ambiente. Essa captação permite a utilização de interruptores e sensores sem fios e sem baterias para a construção, casa e automação industrial. Além de confiabilidade da transmissão e do longo alcance sem fio, esses tipos de aplicações exigem sensores miniaturizados e de baixo custo.

A utilização de sensores sem fio está crescendo expressivamente em diversas áreas da engenharia. Não só nas nossas casas, onde eles podem controlar e monitorar a iluminação e aparelhos domésticos, mas também na indústria de fabricação para controle de processos, em automóveis para verificar a pressão dos pneus, monitorando o ambiente ou ao ar livre e aplicações militares. Para garantir a confiabilidade dos sistemas são necessárias soluções livres de manutenção, em muitos casos são absolutamente essenciais.

EnOcean GmbH é a criadora da patente de tecnologia sem fio auto-alimentado. Com sede em Oberhaching, perto de Munique, a empresa fabrica e comercializa soluções de sensores sem fio livre de manutenção para uso em edifícios e instalações industriais. Soluções EnOcean são baseadas em conversores de energia miniaturizados, circuitos eletrônicos de ultra-baixo consumo de energia e sem fio confiável. Combinando esses elementos, a EnOcean e os seus parceiros disponibilizam produtos que oferecem sistemas de sensores que podem ser utilizados nas mais diversas áreas. Hoje, os módulos sem fio EnOcean são escolhidos entre mais de 150 países em todo o mundo e por fabricantes nas mais diversas aplicações. A EnOcean foi fundada em 2001 como uma spin-off da Siemens AG.

Existem diversas formas de captação de energia do ambiente, porém as três mais significantes são energia solar (luminosa), energia cinética (movimento) e a energia térmica. A energia cinética ou do movimento utilizada nesses pequenos dispositivos de comunicação sem fio é a energia produzida no momento em que o usuário pressiona ou solta um botão. As principais vantagens

desse forma da obtenção de energia são a disponibilidade de utilização de botões simples e pequenos e a capacidade de mais de 50.000 ciclos de utilização.

As células solares são os principais exemplos de formas de captação de energia luminosa que associadas a sistemas de armazenamento podem fornecer energia para sistemas com até 24 horas de operação, mesmo com tamanhos reduzidos. A energia térmica é uma outra alternativa de obtenção de energia simples. Com um *peltier*, as pequenas diferenças de temperatura já são suficientes para fornecer energia para diversos dispositivos eletrônicos.

As diferenças de temperaturas podem fornecer uma grande quantidade de energia. O resfriamento de apenas uma gota de água em 1° Celsius libera energia para a transmissão de cerca de 20 mil telegramas sem fio com os dispositivos EnOcean. Isso é suficiente para operar não apenas um sensor sem fio, mas até mesmo vários transmissores sem fio. A energia é fornecida por geradores térmicos(*peltier*).

A captação de energia deve ser atrativa economicamente. Encontra –se elementos termelétricos padrões em caixas frias, por exemplo, onde os conteúdos são arrefecida pela corrente. A EnOcean, por exemplo, inverte o efeito: o conteúdo de resfriamento fornece energia a um sensor. Os *peltiers* possuem um custo baixo, porém têm uma desvantagem, pois produzem apenas pequenas tensões de cerca de 10 mV por grau Kelvin. Entretanto, um módulo sensor EnOcean, precisa de uma tensão de alimentação típica de 3 V. Um novo tipo de conceito de conversor foi criado e preparado para a produção em série: ECT 310 conversor DC / DC da EnOcean, onde um otimizado oscilador otimizado já começa a ressoar acima de 10 mV de tensão de entrada. Em 20 mV ou mais (i.e., cerca de 2 ° C), gera uma tensão de saída útil de mais do que 3 V. Na figura 3.1 podemos ver o exemplo de um circuito transmissor alimentado por um *peltier*.

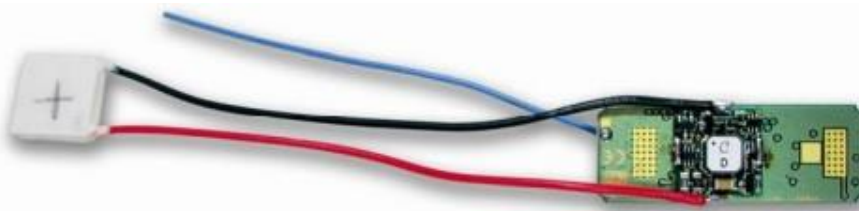


Figura 3.1: Transmissor alimentado por energia térmica

Uma forma de obtenção de energia do meio que é muito útil em equipamentos de transmissão é por meio da energia mecânica no ato de pressionar um botão. Geralmente, todo equipamento transmissor possui um botão que é utilizado para iniciar e terminar uma transmissão.

Utilizando, basicamente, uma mola e uma bobina é possível extrair energia do movimento de acionamento e soltura do botão. Um exemplo deste tipo de dispositivo é o ECO 200 da EnOcean. Toda vez que a mola do ECO 200 é acionada, gera-se uma indução eletromagnética. Produz-se um pulso de tensão curto que dura alguns milissegundos. Parte da energia mecânica é convertida em energia eléctrica, que é o suficiente para transmitir um sinal de comutação ao longo de uma distância de algumas centenas de metros, por exemplo. Podemos ver o ECO 200 na figura a seguir.



Figura 3.2: Transmissor alimentado por energia cinética

Existem várias possibilidades de aplicações para esse tipo de transmissor alimentado por pulsos de energia gerados por indução eletromagnética, como transmissores de mão, uma variedade de switches industriais e a confecção de armadilhas, para o meio militar. Transmissores de mão equipados com esse sistema podem ser utilizados para controlar os mais diversos dispositivos.

As células ou módulos fotovoltaicos são capazes de converter a luz do Sol diretamente em eletricidade. Antes usadas quase que exclusivamente no espaço, as células fotovoltaicas estão sendo cada vez mais utilizadas em diversas aplicações, desde calculadoras até carros e casas.

Células fotovoltaicas são constituídas por semicondutores, como o silício, que é atualmente o mais comum. Basicamente, quando a luz atinge a célula, uma certa quantidade dela é absorvida pelo material semicondutor. Dessa forma, a energia da luz absorvida é transferida para o semicondutor. A energia, por sua vez, “arranca” os elétrons fracamente ligados, permitindo que eles possam fluir livremente. As células fotovoltaicas também possuem um ou mais campos elétricos que forçam os elétrons livres, pela absorção da luz, a fluir em um certo sentido, caracterizando o surgimento de uma corrente elétrica.

A EnOcean possui células solares com alta eficiência. Na parte da frente, os módulos solares possuem uma cobertura de vidro, que protege a camada fotovoltaica dos efeitos do meio ambiente e do tempo. Na parte de trás, possui contatos para a conexão elétrica. Essas células solares podem ser combinadas com circuitos transmissores como na figura abaixo.



Figura 3.3: Transmissor alimentado por energia solar

3 PROJETO

Nesta seção, serão abordados os parâmetros técnicos dos componentes envolvidos no projeto do dispositivo PTT. Conforme foi dito, deu-se prioridade a componentes de ultra-baixo consumo, que viabilizassem os requisitos do projeto. O microcontrolador usado, STM32L152RCT6, está descrito na seção 3.1 e, para informações mais detalhadas, recomenda-se a consulta ao *datasheet*. O transceptor escolhido foi o Si 4464, tratado na seção 3.2, e também recomenda-se a consulta ao *datasheet* para mais informações. A seção 3.3 fornece informações sobre a modulação escolhida, FSK e a seção 3.4 trata dos códigos corretores de erro, em especial do BCH. Informações mais detalhadas sobre ambos os assuntos podem ser encontradas no livro “Sistemas de Comunicação Analógicos e Digitais”, de Simon Haykin. Na seção 3.5 são abordados os principais conceitos sobre antenas e propagação, bem como o estudo de alguns modelos na faixa de frequências. Recomenda-se a consulta ao *datasheet* dos equipamentos e ao livro “*Antenna Theory: Analysis and Design*”, de C. Balanis. Por fim, a seção 3.6 conta com o estudo de duas baterias da família de baterias de lítio. Para uma abordagem mais detalhada, consultar os *datasheets* e o livro “*Battery Reference Book*”, de T. R. Crompton.

3.1 MICROCONTROLADOR

Os microcontroladores estão presentes em inúmeros dispositivos utilizados atualmente. A automação e o controle de periféricos, por exemplo, são as principais aplicações da utilização dessa ferramenta em sistemas embarcados (do inglês *embedded system*) em que o microcontrolador está inserido no produto.

O microcontrolador é um sistema computacional completo, constituído por uma CPU (Central Processor Unit), um sistema de clock, memória de dados e programa, portas de I/O (Input/Output), módulos de temporização, conversores A/D (Analógicos e Digitais) e diversas outras utilidades, todos integrados em um mesmo componente.

Existem diversos tipos de microcontroladores no mercado mundial, porém os núcleos da empresa inglesa ARM (*Advanced RISC Machines*) merecem um destaque especial. Os microcontroladores ARM tornaram-se líderes no mercado de sistemas embarcados devido ao baixo consumo de energia, eficiência de códigos, alto desempenho, baixo custo e disponibilidade de ferramentas gratuitas.

Este projeto tem como microcontrolador o STM32L152RCT6, um dispositivo de ultrabaixo consumo de potência, da linha de produtos ARM Cortex-M3. Os microcontroladores da família STM32L15XX incluem dispositivos em três tipos de pacotes, de 48 a 100 pinos. Dependendo do dispositivo escolhido, diferentes conjuntos de periféricos estão envolvidos. Isso nos fornece uma ampla gama de aplicações que envolvem ultrabaixo consumo de potência: equipamentos médicos, aplicações em controle e interface com usuário, GPS, sistemas de alarme, sensores com e sem fio, etc.



Figura 3.4: Placa de desenvolvimento do microcontrolador STM32L152RCT6

O STM32L152RCT6 incorpora o poder de conectividade do USB, com a alta performance do núcleo ARM Cortex-M3, 32 bits, RISC, operando a uma frequência de 32MHz, com unidade de proteção de memória (MPU), memória flash de até 128Kbytes e memória RAM de até 16Kbytes e uma vasta gama de I/Os e periféricos.

O dispositivo contém interfaces de comunicação padrão e avançada: até dois SPIs, três USARTs e um USB. Ele oferece até 20 canais capacitivos de sensoriamento para adicionar funcionalidades para qualquer aplicação. Ele inclui

ainda um clock e conjunto de registradores que se mantêm energizados em situação de stand-by. Há ainda um controlador LCD integrado que permite conduzir até 8 LCDs multiplexados com contraste independente da voltagem de alimentação. O STM32L152RCT6 opera de 1.8 a 3.6V de alimentação, com BOR de 1.65 a 3.6V. Disponível de -40 a 85°C de temperatura, podendo estender até 105°C em situação de baixa potência dissipada.

Sete modos de baixa potência são fornecidos para obter o melhor compromisso entre o baixo consumo de energia, pequeno tempo de inicialização curto e disponibilidade de recursos para iniciar.

Considere o modo SLEEP. Nesse modo, apenas a CPU é interrompida. Todos os periféricos continuam a operar e podem despertar a CPU quando ocorre evento/interrupção.

Temos o modo RUN de baixa potência, que é alcançado com um oscilador RC definido com um relógio mínimo (65 kHz), a execução a partir da SRAM ou a memória Flash, e regulador interno em modo de baixa energia para minimizar a corrente de funcionamento do mesmo. Neste modo, a frequência do clock e o número de periféricos habilitados são ambos limitados.

O modo SLEEP de baixa potência é alcançado, ao entrar no modo de sleep com o regulador de voltagem interna no modo de baixa voltagem para minimizar a corrente operando no regulador. Neste modo, a frequência do clock e o número de periféricos são limitados. Quando o despertar é acionado por um evento ou interrupção, o sistema passa para o modo run com o regulador acionado.

O modo STOP com RTC atinge o menor consumo de energia, mantendo a RAM, o conteúdo do registro e o clock de tempo real. Todos os relógios estão parados, o PLL, MSI RC, HSI RC e osciladores de cristal HSE são desativados. A LSE ou LSI ainda são executadas. O regulador de tensão está no modo de baixa energia. O dispositivo pode ser acordado deste modo por qualquer linha EXTI, em 8 us.

Já o modo STOP sem RTC atinge o menor consumo de energia, mantendo a RAM e o conteúdo do registro. Todos os relógios estão parados, o PLL, MSI RC, HSI e LSI RC, LSE e osciladores de cristal SMS estão desativados. O regulador de tensão está no modo de baixa energia. O dispositivo pode ser acordado de modo Parar por qualquer da linha EXTI, em 8 uS.

Há ainda o modo STANDBY com RTC, usado para alcançar o menor consumo de potência e clock de tempo real. O regulador de tensão interna é desligado de modo que toda a tensão de core seja desligada. O PLL, MSI RC, HSI RC e osciladores de cristal HSE também estão desligado. A LSE ou LSI ainda está em execução. Depois de entrar no modo de standby, a RAM e registro conteúdo são perdido, com exceção de registros no circuito de espera (lógica de despertar, IWDG, RTC, LSI, LSE Cristal 32K osc, RCC_CSR). O dispositivo sai do modo standby em 60 uS quando um reset externo (pino NRST), um IWDG, uma borda de subida em um dos três pinos WKUP, alarme RTC, caso de violação RTC, ou evento RTC despertar ocorre.

Por fim, temos o modo STANDBY sem RTC, usado para alcançar o menor consumo de potência. A tensão interna do regulador está desligada de modo que a tensão do core esteja desligada. O PLL, MSI, RC, HSI e LSI RC e os osciladores de cristal HSE e LSE também estão desligados. Depois de entrar no modo standby, a RAM e o registro de conteúdo serão perdidos, exceto para os registros em a lógica de circuitos de espera (despertar, IWDG, RTC, LSI, LSE Cristal 32K OSC, RCC_CSR). O dispositivo sai do modo de espera em 60 uS quando um reset externo (pino NRST) ou um bordo crescente sobre uma das três pinos WKUP ocorre.

3.2 TRANSCCEPTOR

Os transceptores Si446x, da Silicon Laboratories, são dispositivos de alta performance, baixa corrente cobrindo as bandas de frequência sub-GHz, de 119 a 1050 MHz. Os rádios são parte da família EZRadioPRO, que inclui uma linha completa de transmissores, receptores e transceptores, operando em uma vasta gama de aplicações. Todos os componentes oferecem considerável sensibilidade, de -126dBm, atingindo correntes ativas e de standby de extremamente baixas. O transceptor usado no projeto, Si4464, inclui ótimo ruído de fase, bloqueio e seletividade para banda estreita. A seletividade do canal adjacente de 60dB, com 12,5kHz de espaçamento de canal garante uma recepção robusta.

A figura abaixo, esquematiza os estados primários do Si4464.

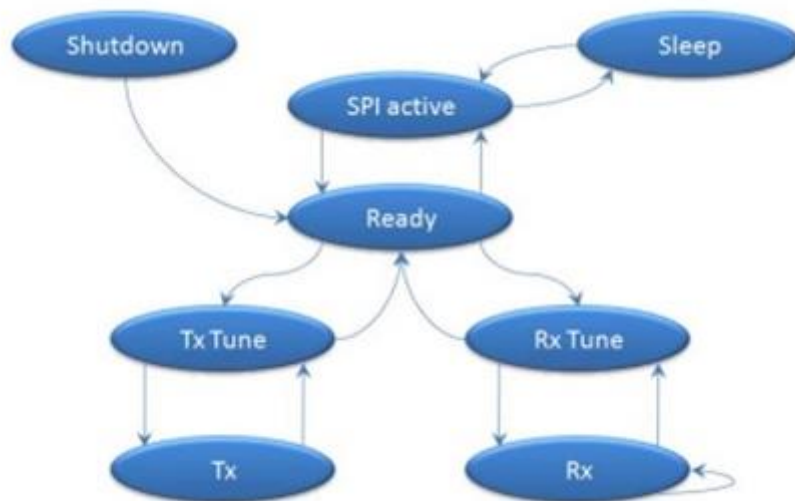


Figura 3.5: Diagrama de estados do Si4464

O estado de SHUTDOWN é o de menor consumo de corrente do dispositivo, com valor nominal menor que 30nA. Esse estado é alcançado ao ativar o pino SDN. Nesse caso, os conteúdos dos registradores são perdidos e não acessam o SPI. Ao sair do estado de shutdown, será iniciado um POR (power on reset), juntamente com as calibrações iniciais. Após o POR, o comando POWER_UP é requerido para inicializar o rádio. O pino SDN deve ser mantido pressionado por pelo menos 10us, permitindo aos capacitores descarregar.

O estado de STANDBY tem o menor consumo de corrente, com exceção do estado de shutdown, porém sua resposta é bem mais rápida para os modos TX e RX. Em muitos casos, esse estado pode ser usado como o estado de menor potência. Nele, os valores dos registradores são mantidos, com todos os blocos desabilitados. O SPI é acessível, mas qualquer evento SPI, incluindo FIFO R/W, irá habilitar um oscilador interno e automaticamente mudar para o estado de SPI ativado. Se uma interrupção ocorrer, os registradores de interrupção devem ser lidos para alcançar o mínimo consumo de energia do modo.

O estado SLEEP é o mesmo que o estado standby, com a diferença que o tempo de wake-up e um clock de 32kHz estão habilitados. A fonte para o clock de 32kHz pode ser tanto um oscilador RC de 32kHz, periodicamente calibrado ou um oscilador de 32kHz usando cristal externo XTAL. O SPI é acessível durante esse modo, mas um evento SPI habilitará um oscilador interno e automaticamente moverá para o estado de SPI ativado. Após um evento SPI, será necessário um re-comando para o dispositivo voltar para o modo SLEEP. Se uma interrupção ocorrer, os registradores de interrupção devem ser lidos para atingir consumo mínimo de potência para esse modo.

No estado de SPI ativado, o SPI e um oscilador de boot up estão ativados. Após as transações SPI, tanto durante o standby quanto durante o sleep, não retornarão automaticamente para esses estados. Um comando “Change State” API será necessário para retornar.

O estado READY é projetado para dar um rápido tempo de transição para os estados TX ou RX, com consumo de corrente razoável. Nesse modo, o cristal oscilador permanece ativado, reduzindo o tempo requerido para trocar para o modo TX ou RX.

A tabela abaixo mostra cada um dos modos de operação, com o tempo necessário para atingir o modo ou RX ou TX, bem como o consumo de corrente de cada um dos modos. Os destaques em vermelho correspondem aos valores utilizados na simulação de temporização e consumo do projeto, conforme detalhado na seção 4.

Tempo de Resposta e Consumo de Corrente para cada Estado de Operação*			
Estado/Modo	Tempo de Resposta para		Corrente no Estado/Modo
	TX	RX	
Estado Shutdown	15 ms	15 ms	30 nA
Estado Standby	440 μ s	440 μ s	50 nA
Estado Sleep	440 μ s	440 μ s	900 nA
Estado SPI Ativado	340 μ s	340 μ s	1.35 mA
Estado Ready	126 μ s	122 μ s	1.8 mA
Estado TX Tune	58 μ s	----	8 mA
Estado RX Tune	----	74 μ s	7.2 mA
Estado TX	----	138 μ s	18 mA @ +10 dBm
Estado RX	130 μ s	75 μ s	10 ou 13 mA

*Nota: As temporizações para os estados de transição Tx -> RX e RX -> TX podem ser reduzidas a 70 us, se usar o modo Zero-IF

Figura 3.6: Resposta no tempo e consumo de corrente – Si4464

3.3 MODULAÇÃO FSK

A modulação FSK (Frequency Shift Keying) é um tipo de modulação digital, cuja frequência é deslocada, em função da informação da mensagem. Consiste em variar a frequência da onda portadora de acordo com a informação que será transmitida. A figura abaixo, ilustra a técnica para o caso simples binário.

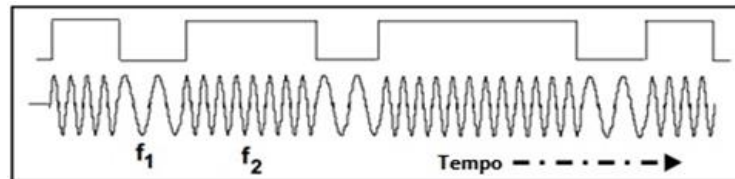


Figura 3.7: Forma de onda FSK, derivada de uma mensagem binária

Conceitualmente, o transmissor consiste de dois (ou mais) osciladores em frequências f_1 e f_2 , com apenas um sendo conectado à saída em um dado tempo, conforme mostrado na figura abaixo. A menos que haja uma relação especial entre as frequências oscilantes e o clock, haverá descontinuidades de fase abruptas na forma de onda durante a transmissão da mensagem.

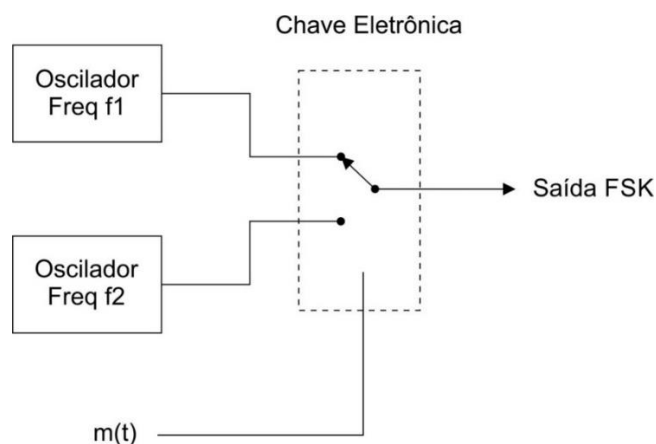


Figura 3.8: Esquema conceitual de um modulador FSK

Essa modulação é muito útil nos microprocessadores, pois é possível enviar mensagens com a capacidade de verificação e correção automática de erros. É uma modulação com boa imunidade ao ruído comparada a modulação ASK (*Amplitude Shift Keying*).

3.4 CÓDIGOS CORRETORES DE ERROS

Na comunicação sem fio, a taxa de erros de transmissão é muito superior que na comunicação guiada. Desse modo, surge a necessidade de se criar rotinas eficientes para detecção e correção de erros.

Existem algoritmos que apenas detectam erros e, após a detecção, fazem com que o transmissor envie novamente o pacote que conteve erro. Para tanto, é incluída alguma redundância ao final de cada bloco, capaz de detectar a presença de erro. Essa é uma técnica razoável, quando se trata de comunicação com fio, onde a taxa de erros é baixa e a retransmissão não ocuparia banda considerável.

Por outro lado, para a comunicação sem fio, faz-se necessário o uso de código que não apenas detecte, como também corrija os erros. Nesse caso, é incluído número bastante superior de redundância, capaz de detectar o bit errado. Obviamente, a complexidade desse tipo de algoritmo é superior quando comparado ao anterior, além de diminuir a taxa de dados efetiva. Porém, a economia de banda e a redução de potência na retransmissão justificam seu uso.

Nesse ponto, cabe comentar que, na comunicação sem fio, por razões estatísticas, os erros ocorrem freqüentemente em rajadas. Isso gera vantagens e desvantagens em relação aos erros isolados. Uma grande vantagem é que os erros tendem a se concentrar sobre um pequeno número de pacotes, de forma que a maior parte do que foi transmitido é recuperado com sucesso. Por outro lado, erros em rajada são mais difíceis para se corrigir.

Um bom algoritmo para corrigir o tipo de erro apresentado acima é o BCH. Devido à sua complexidade, não será implementado nesse trabalho, mas será discutido na seção 6.2. Na seção 6.1, por sua vez, é apresentado o método de correção de Hamming, cuja implementação está presente na seção 8. Este é um código tradicional, bastante usado e de desempenho razoavelmente bom.

Antes de partirmos para o estudo de ambas as técnicas, é importante apresentar um conceito de bastante utilidade: distância de Hamming. A distância de Hamming entre duas palavras é o número de bits em que as palavras código diferem entre si. A distância de Hamming do código completo é encontrada localizando-se as duas palavras de código cuja distância de Hamming é mínima. Para a detecção de n erros, é preciso que o código tenha uma distância de

Hamming de pelo menos $n+1$, de modo que n erros não transformem uma palavra válida em outra palavra válida. Para a correção de n erros, a distância de Hamming do código deve ser de no mínimo $2n+1$. Desse modo, garante-se a que a palavra válida pode ser detectada univocamente.

3.4.1 CÓDIGO DE HAMMING

Esse método é capaz de corrigir erros quando a distância de Hamming alcança o limite teórico mais baixo para correção. Para implementação do algoritmo, os bits da palavra código são numerados da esquerda para a direita, começando com o bit 1, seguido do 2... Os bits cuja posição é uma potência de dois são preenchidos com bits de verificação, a serem calculados. Os demais, são preenchidos com bits da mensagem. Note que, nesse caso, a palavra transmitida será alguns bits maior que a mensagem original.

Cada bit de verificação amarra a paridade de um conjunto de bits a ser par ou ímpar, dependendo da variação do método que se pretende aplicar. Esse conjunto de bits é referenciado pelo expoente da potência de dois da posição que o bit de verificação ocupa.

No receptor, é calculada a paridade de cada grupo de bits e verifica-se se é par (ou ímpar). Esse procedimento é realizado para todos os grupos relativos aos bits de verificação. Os bits que contém erro irão indicar, por meio da soma de seus expoente, qual bit exatamente está errado.

Cabe ressaltar que o método de Hamming é capaz de corrigir erros simples. Para corrigir erros em rajada é preciso recorrer ao uso de matrizes de transmissão. Nesse caso m palavras códigos são organizadas, com uma palavra por linha. Ao invés de transmitir as palavras em ordem natural, da esquerda para a direita, com essa técnica, transmitem-se os bits das colunas. Ao final da transmissão da primeira coluna, tem início a transmissão da segunda. Desse modo, se ocorrer um erro em rajada de extensão m , no máximo um bit de cada palavra será afetado, sendo o método de Hamming capaz de corrigir esse erro.

3.5 ANTENAS

Uma antena é um condutor que transporta um pulso de corrente alternada. Esta gera um campo eletromagnético variante no tempo. Quando outro condutor é colocado próximo, tal variação de campo eletromagnético irá induzir uma corrente elétrica no segundo condutor. Se esse condutor for suficientemente longo, irá irradiar boa parte da potência no meio.

3.5.1 ANTENAS E PROPAGAÇÃO

Conceitos Básicos de Antenas

A antena funciona como a interface entre os elementos do sistema que guiam a onda e o meio de propagação. Entre os requisitos que as antenas devem satisfazer podemos destacar:

1. Deve ter uma característica de emissão (ou recepção) conhecida. Em determinada situação convém que a energia seja emitida (ou recebida) uniformemente em todas as direções; em outras se necessita o efeito diretivo.
2. A emissão ou a recepção das ondas eletromagnéticas não deve ser acompanhada por um consumo inútil de energia em perdas ôhmicas na estrutura da antena. Em outras palavras, a antena deve ter o mais alto rendimento possível.

Os parâmetros das antenas podem ser divididos em duas categorias: primários e secundários. Nos primários pode-se incluir o diagrama de radiação, a resistência de radiação, a eficiência e o coeficiente de reflexão (ou impedância de entrada). Entre os parâmetros secundários se encontram a largura de feixe do lobo principal, o nível de lóbulos secundários (laterais) e a faixa de frequência de operação (largura de banda). No caso mais geral, a curva característica de radiação envolve o produto de três fatores, como visto na equação 3.1, em que se multiplica o módulo, o vetor relativo e a componente complexa:

$$\mathbf{F}(\theta, \varphi) = F(\theta, \varphi)\mathbf{p}(\theta, \varphi)e^{j\Phi(\theta, \varphi)} \quad (3.1)$$

Uma grande classe de antenas é aquela constituída por fios condutores. Na maioria dos casos práticos, pode-se desprezar a seção transversal e tratá-lo como condutor filamental.

Seja R_p a resistência devida a perdas ôhmicas. A potência dissipada por aquecimento será:

$$P_p = \frac{|I|^2 R_p}{2} \quad (3.2)$$

Seja a resistência de radiação:

$$R_r = 80\pi^2 \left(\frac{dz}{\lambda}\right)^2 \quad (3.3)$$

A potência média radiada será:

$$P_r = \frac{1}{2} |I_A|^2 R_r \quad (3.4)$$

A eficiência de radiação é dada por:

$$e_r = \frac{P_r}{P_r + P_p} = \frac{R_r}{R_r + R_p} \quad (3.5)$$

Antena Dipolo

O dipolo elétrico é um condutor cilíndrico de comprimento L_1+L_2 e raio A , alimentado nos pontos de corte por um gerador em alta frequência. Quando os comprimentos dos braços são iguais ($L_1=L_2$), o dipolo é simétrico.

A radiação máxima geralmente está orientada no plano transversal $\Theta=\pi/2$. A largura do diagrama de radiação é normalmente caracterizada pelo ângulo de abertura $\Delta\Theta$, em cujos limites a intensidade de campo não é menor que a intensidade de campo na direção de máxima radiação dividida por raiz de dois. Esse ângulo de abertura é denominado de largura de feixe de meia potência.

Diagrama de radiação

Na fórmula 3.1, fator real positivo $F(\theta, \varphi)$ é a curva característica de radiação (diagrama direcional) de amplitude do campo. Esse fator é normalizado de modo que $\max[F(\theta, \varphi)]=1$.

A representação espacial da superfície total do diagrama de amplitude é bastante complexa e, por isso, é comum se apresentar planos convenientes desse diagrama. Quando as antenas são direcionais, se utilizam pares de seções perpendiculares, que passam pela direção de radiação máxima. A figura 3.9 ilustra esse conceito.

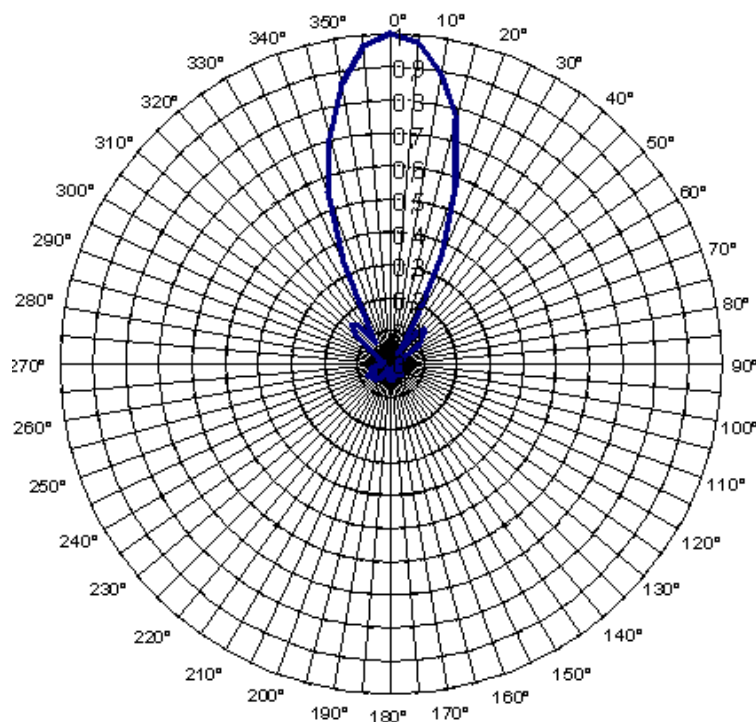


Figura 3.9: Diagrama de radiação em duas dimensões

Área Efetiva

Existem quatro condições para se aproveitar o máximo de potência recebida na carga:

1. A superposição exata da direção do máximo do diagrama de radiação com a direção de chegada da onda plana;
2. A redução ao mínimo das perdas ôhmicas de potência na antena e na rede de casamento;
3. A adaptação exata da polarização da antena com a polarização da onda incidente;

4. A adaptação da antena com a linha de transmissão e o uso de uma carga casada.

Por área efetiva da antena se considera a magnitude da frente de onda plana, da qual a antena recupera e transmite para a carga a potência recebida na direção do máximo do diagrama de radiação e para as condições de casamento de polarização e ausência de perdas ôhmicas.

Diretividade e Ganho

A quantidade de potência radiada que é concentrada no plano normal do dipolo elementar pode ser estimada por meio da diretividade. A diretividade é determinada pela relação entre a magnitude do vetor de Poynting em uma dada direção e o vetor de Poynting médio sobre a superfície de uma esfera envolvendo a antena (para distâncias iguais nos dois casos).

A diretividade de uma antena é dada pela relação da máxima intensidade de radiação para a intensidade de radiação média. Para uma antena isotrópica, a diretividade é unitária. Esta é a menor diretividade que uma antena pode apresentar.

O ganho de uma antena (com referência à fonte isotrópica sem perdas) depende da diretividade e da eficiência da antena.

$$G = eD \text{ (dBi)}$$

e: fator de eficiência ($0 \leq e \leq 1$)

dBi: ganho relativo ao radiador isotrópico

(3.6)

Relação Frente-Costas

A relação frente-costas é uma comparação entre o nível do feixe principal da antena com relação ao nível do lóbulo traseiro. Quanto maior o valor medido da relação frente-costas, melhor a isolamento na parte posterior da antena. Esse parâmetro é importante no estudo da interferência de sinais provenientes de outra antena.

Largura de Banda

Como em um sistema de comunicações se utilizam sinais com determinada largura de banda, um parâmetro importante das antenas é a sua largura de banda de freqüências de operação, em cujos limites os outros parâmetros da antena não excedem valores permitidos estabelecidos por requisitos técnicos.

Os limites da banda de freqüências de operação são determinados por qualquer um dos parâmetros dependentes da freqüência. Convencionalmente se considera de banda estreita as antenas com banda de freqüências de operação menor que 10% da freqüência nominal.

As antenas de banda larga podem ter uma largura de banda desde 10% até 50% da largura nominal. As antenas com bandas maiores, da ordem de uma ou várias oitavas, se denominam multibanda. E, finalmente, se a relação dos limites superior e inferior chega a 5:1 ou maior, a antena pode ser considerada independente da freqüência.

Temperatura de Ruído

Quando se estima a qualidade de uma antena receptora, se deve comparar a potência do sinal recebido com a potência total de ruído na entrada do receptor. Normalmente, o ruído externo, recebido pela antena do espaço em redor é o dominante. Esse ruído é originado por:

1. Perturbações atmosféricas e industriais, isto é, descargas elétricas;
2. Emissão de ruídos de fonte extraterrestres (cósmicas);
3. Radiação térmica da superfície terrestre;
4. Radiação de calor da troposfera e da ionosfera.

Propagação no Espaço Livre

Quando a antena está localizada no espaço livre, isto é, remota da terra e de qualquer obstrução, a densidade de potência é igual a:

$$S = \frac{P_T G_T}{4\pi d^2}$$

P_T : Potência total radiada

G_T : Ganho da antena transmissora na direção da receptora

d : Distância de observação

(3.6)

A potência disponível na antena receptora:

$$P_R = SA_{ef} = \frac{P_T G_T}{4\pi d^2} A_{ef} = \frac{P_T G_T}{4\pi d^2} \frac{\lambda^2 G_R}{4\pi} \quad (3.7)$$

Usando relação fundamental conhecida como equação de Friis:

$$\frac{P_R}{P_T} = G_T G_R \left[\frac{c}{4\pi f d} \right]^2 \quad (3.8)$$

A perda de propagação no espaço livre é convenientemente expressa em dB:

$$L_F = 10 \log \frac{P_R}{P_T} = 10 \log G_T + 10 \log G_R - 20 \log f + 147,6 \quad (3.9)$$

A equação mostra que a propagação no espaço livre obedece a lei do inverso da distância ao quadrado, de modo que a potência diminui em 6dB quando a distância do enlace dobra (ou se reduz em 20dB por década).

Do mesmo modo, as perdas no caminho aumentam com o quadrado da frequência de transmissão, tal que as perdas também aumentam de 6dB quando a frequência dobra.

Antenas com altos ganhos podem ser utilizadas para diminuir essas perdas. Essas antenas são relativamente fáceis de construir para frequências na faixa de VHF e superiores. Isso fornece uma solução para enlaces fixos ponto a ponto, mas não para enlaces móveis em VHF ou UHF nos quais a cobertura omnidirecional é necessária.

Propagação na Atmosfera

Existem dois modos principais de propagação das ondas eletromagnéticas entre o transmissor e o receptor: a onda terrestre, que se propaga diretamente do transmissor ao receptor, e a onda celeste, que caminha até a camada eletricamente condutora da atmosfera (ionosfera) e é refletida de volta pra terra.

Comunicações em longas distâncias ocorrem principalmente por meio das ondas celestes, e as transmissões em curtas distâncias e todas as comunicações em UHF ocorrem por meio das ondas terrestres.

Quando uma frente de onda encontra um obstáculo ou uma descontinuidade que não é grande em comparação com o comprimento de onda, pode-se utilizar o Princípio de Huygens para se obter uma solução para o problema.

Esse princípio sugere que cada ponto de uma frente de onda atua como uma fonte de frentes de onda secundárias que se combinam para produzir uma nova frente de onda na direção de propagação.

3.5.2 ANTENNA MATRIX: 434 MHz

Alguns parâmetros são críticos no projeto de uma antena. Para se medir o ganho utiliza-se a comparação entre a potência de radiação de um dipolo e a potência da antena. Como os dipolos em geral são mais eficientes, o ganho deve ser negativo. Quanto maiores os valores de ganho, mais a antena se aproxima de um dipolo, o que é uma característica desejável.

O diagrama de radiação é um ponto fundamental no projeto de uma antena, visto que ele oferece os pontos de nulo, bem como a distribuição do campo eletromagnético. É interessante que a antena tenha um diagrama omnidirecional, isto é, perpendicular ao eixo do condutor.

A polarização de uma antena oferece informação sobre a orientação de sua radiação. Deseja-se que, num mesmo sistema de comunicação, os componentes apresentem a mesma polarização.

A impedância da antena é outro fator decisivo. É ele que influencia na quantidade de potência que será refletida. É interessante que se tenha uma antena casada com o restante do sistema para minimizar reflexões. Cabe dizer ainda que a impedância depende da posição relativa entre a antena e o plano de terra.

Foi estudado um conjunto de nove tipos de antenas single-ended de 50Ω , na faixa de 434 MHz, da Silicon Labs, das famílias EZRadio e EZRadioPRO. A partir das ferramentas de desenvolvimento, é possível testar a performance com diferentes tipos de antenas e encontrar a melhor solução em termos de formato, tamanho, custo e eficiência.

Dentre os modelos estudados, temos que o seguinte se aplica as famílias de rádio EZRadio e EZRadioPRO; RF Pico Boards equipadas com Si4464 podem ser usadas com essas antenas; os conectores RF são casados em 50Ω ; as placas são equipadas com conectores fêmea SMA; a largura dos painéis é de 41mm. A figura 3.10 ilustra uma configuração de medição para uma antena da família.



Figura 3.10: Configuração de medição dos parâmetros de uma antena da família estudada

Cada antena estudada tem vantagens e desvantagens, dependendo do contexto em que será usada.

A *Medium Size Printed IFA Around the PCB Circumference* (WES0071-01-APF434M-01) trata-se de uma antena monopolo impressa de baixo custo. O ganho máximo desse dispositivo é de aproximadamente 0.3dBi, com a estrutura PCB + Pico Board + placa mãe. É sensível ao *hand effect*, sendo que este pode melhorar a radiação se cobrir apenas a área do circuito. A figura abaixo ilustra seu circuito.

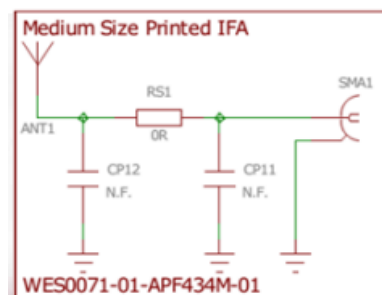


Figura 3.11: Circuito da antena impressa IFA (WES0071-01-APF434M-01)

A *Ceramic Antenna* (WES0072-01-AM434D-01) geralmente requer um circuito relativamente grande, com gaps preenchidos com metal terra-rara. É uma boa alternativa, com alto ganho e menor tamanho que qualquer antena impressa. Contudo, seu custo é maior. São construídas com dielétricos, tal que o *hand effect* tem menor influência. A figura abaixo ilustra seu circuito.

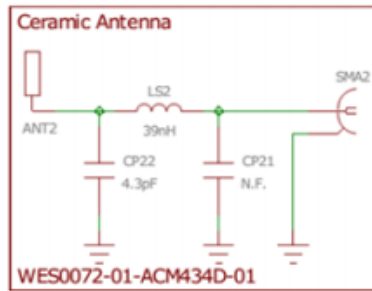


Figura 3.12: Circuito da antena de cerâmica (WES0072-01-AM434D-01)

A *Medium Size (Wire) Helical Antenna* (WES0074-01-AWH434M-01) é um tipo popular, pequeno e de baixo custo. Seu ganho é menor devido ao menor comprimento, embora seja melhor que o ganho de uma antena impressa. O monopolo é sensível ao *hand effect*. A figura abaixo ilustra seu circuito.

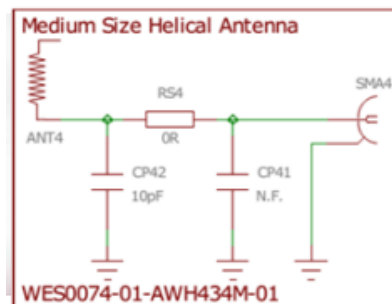


Figura 3.13: Circuito da antena *Medium Size Wire Helical* (WES0074-01-AWH434M-01)

Os modelos *Panic Button IFA* (WES0076-01-APL434-01) e *Panic Button ILA* (WES0075-01-APF434P-01) refere-se a um tipo de antena pequena, de baixíssimo custo. Sua posição em relação ao circuito PCB permite que ela tenha a maior eficiência de radiação possível, com facilidade de sintonização da impedância. Devido aos tamanhos, o ganho é baixo. A figura abaixo ilustra seu circuito.

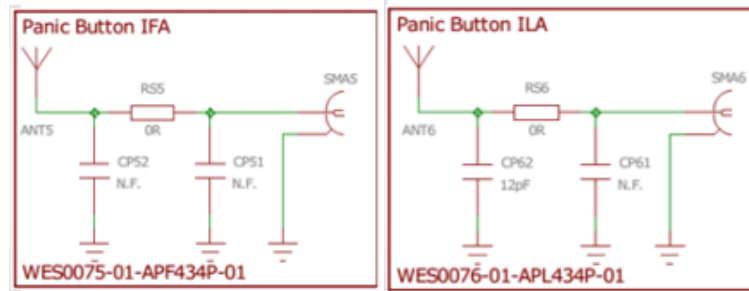


Figura 3.14: Circuito das antenas *Panic Button IFA* (WES0076-01-APL434-01) e *Panic Button ILA* (WES0075-01-APF434P-01)

O *Printed Meander Monopole* (WES0077-01-APN434D-01) é uma alternativa impressa de baixo custo e reduzido tamanho. Porém, requer uma área destinada à antena, que é maior que o típico. Em contrapartida, ela pode apresentar maior ganho. O dispositivo é sensível ao *hand effect*.

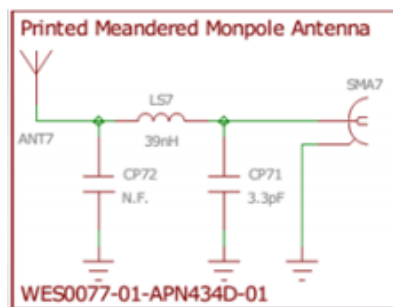


Figura 3.15: Circuito da antena *Printed Meander Monopole* (WES0077-01-APN434D-01)

O modelo *Small Size Printed ILA in Dedicated Small Antenna Area* (WES0078-01-APL434S-01): Antena usada quando há grande limitação de espaço. O ganho é bastante limitado, mas pode aumentar com a presença de uma mão ou objeto de metal. A figura abaixo ilustra seu circuito.

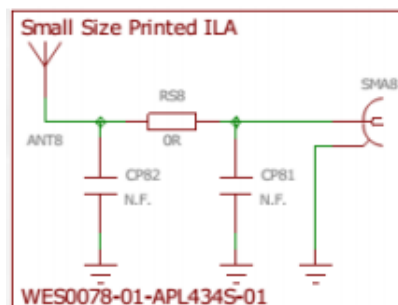


Figura 3.16: Circuito da antena *Small Size Printed ILA* (WES0078-01-APL434S-01)

A *Balanced IFA in Dedicated Bigger Antenna Area* (WES0073-01-APB434D-01) tem a vantagem de que o diagrama de radiação não é muito influenciado pelo tamanho do PCB. Devido a isso, seu desempenho é quase o mesmo com ou sem o Pico Board e a placa mãe. Infelizmente, o dispositivo é sensível ao *hand effect*. A figura abaixo ilustra seu circuito.

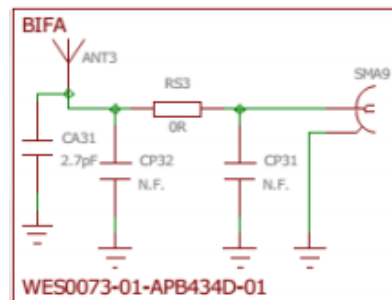


Figura 3.17: Circuito da antena *Balanced IFA* (WES0073-01-APB434D-01)

O estudo mais detalhado dos modelos apresentados nos levou à escolha do dispositivo WES0071-01-APF434M-01 (Medium Sized Printed IFA) como referência para construção da antena para nosso dispositivo. Foram considerados parâmetros importantes, como impedância, ganho e diagrama de radiação. As figuras abaixo refletem os resultados que buscamos alcançar com nossas próprias medições. Tomamos como base as especificações técnicas do modelo, e almejamos encontrar referências para testes práticos. Apresentamos abaixo os resultados de medição dos principais parâmetros dessa antena, conforme previsto pelo fabricante. A impedância medida até 1,5 GHz encontra-se esquematizada na figura 3.18. Nessa medição, levou-se em conta a presença da placa-mãe e o *hand effect*.

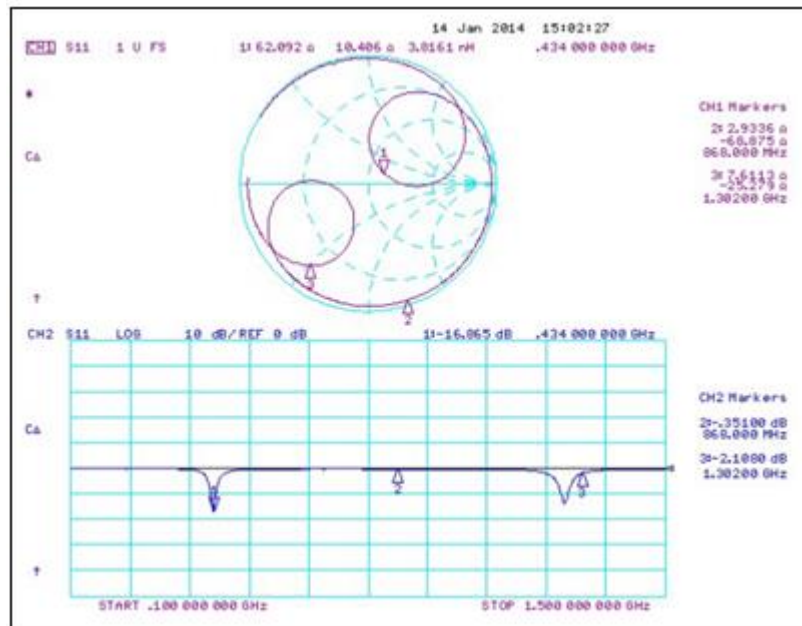


Figura 3.18: Medição da impedância até 1,5GHz, considerando o *hand effect* para o modelo WES0071-01-APF434M-01

O ganho da antena é calculado tanto pela medição da potência radiada, quanto pela potência entregue à antena. A figura 3.19 reflete o resultado de um resultado conduzido em baixo nível de potência e $V_{DD} = 2.9V$. Repare que o ganho está concentrado na frequência central de 434 MHz, que é a faixa de nosso interesse.

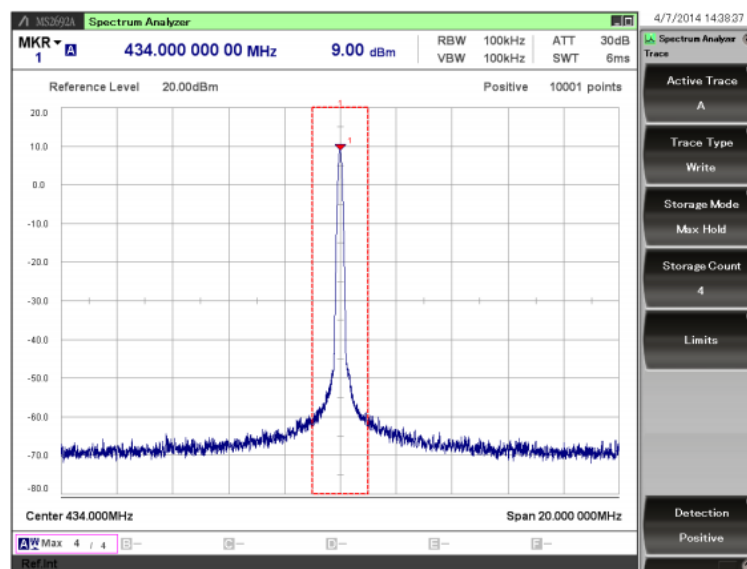


Figura 3.19: Curva do ganho em baixo nível de potência para o modelo WES0071-01-APF434M-01

É ainda interessante a análise decorrente dos diagramas de radiação do dispositivo em questão. Inicialmente, note a convenção adotada para o posicionamento espacial da antena a figura 3.20.

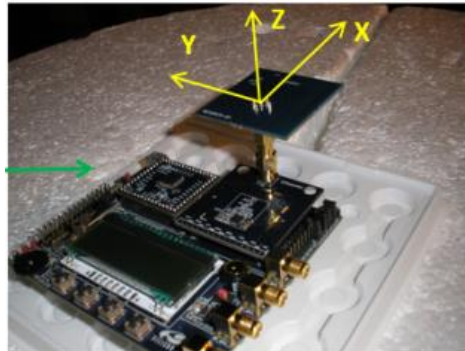


Figura 3.20: Referência para os eixos de orientação das medições efetuadas para o modelo WES0071-01-APF434M-01

No plano XY podemos notar uma radiação omnidirecional, conforme apresentado na figura 3.21, característica adequada para nosso projeto, uma vez que o dispositivo PTT estará constantemente se movendo. Desse modo, seria difícil alinhar os lóbulos principais, caso houvesse. Nos planos XZ e YZ, encontramos padrões análogos, porém com menos ganho.

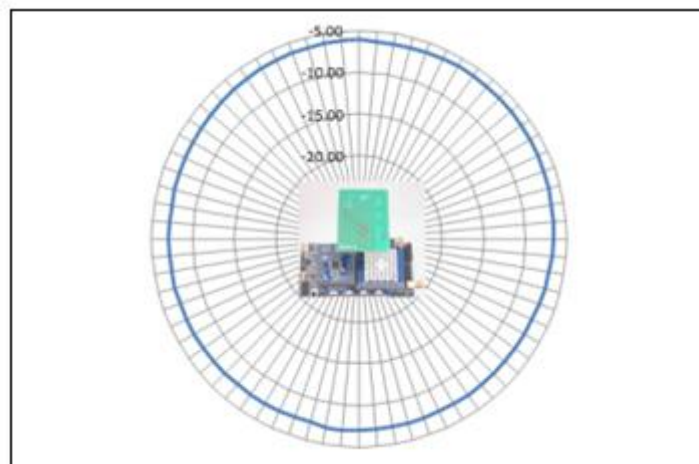


Figura 3.21: Diagrama de radiação no plano XY para o modelo WES0071-01-APF434M-01

3.6 BATERIA

Os rápidos avanços no desenvolvimento e miniaturização de dispositivos eletrônicos geraram uma demanda crescente por fontes de energia leves, compactas, de alta performance e capazes de operar sob uma vasta gama de condições. As baterias de lítio, capazes de fornecer grandes quantidades de energia, tornaram-se foco de atenção e estudo como fonte altamente satisfatórias para suprir as exigências operacionais.

O termo “baterias de lítio” descreve uma família de baterias que usam lítio como anodo, e diferem no material do catodo, no projeto da célula e nas características mecânicas. Cada bateria possui suas peculiaridades, possuindo diferentes capacidades, densidades de energia, temperaturas de operação, confiabilidade e segurança.

Diferente das aplicações tradicionais, que requerem uma corrente continuamente estável, as aplicações sem fio exigem um padrão de uso altamente variante no tempo. Quando o circuito rádio é ativado, a corrente exigida, dependendo da tecnologia usada, tende a ser muito mais alta que a taxa média. Desse modo, é preciso levar em conta a corrente de pico fornecida na escolha da bateria.

3.6.1 CR 2032

A CR2032 é uma bateria do tipo lítio/dióxido de manganês (Li/MnO_2) caracterizada por alta densidade de energia, alta taxa de descarga, segurança, peso reduzida, alta voltagem, descarga plana, vasto intervalo de temperaturas de operação, alta resistência mecânica e capacidade de operação em altas altitudes.

O anodo desse dispositivo é composto de lítio puro (Li), metal de grande potencial elétrico por unidade de massa. Seu catodo é o dióxido de manganês (MnO_2), composto de alta condutividade, resultando em alta voltagem de operação. Possui ainda grande estabilidade, garantindo alta confiabilidade e performance, mesmo após longos períodos de armazenamento. O componente

eletrolítico da bateria é um solvente orgânico, ao qual se mistura sal de metal alcalino, resultando em uma solução estável, não pressurizada, de alta performance e segurança. Consideramos, para nosso projeto, a bateria em moeda, cuja estrutura está esquematizada na figura 3.22.

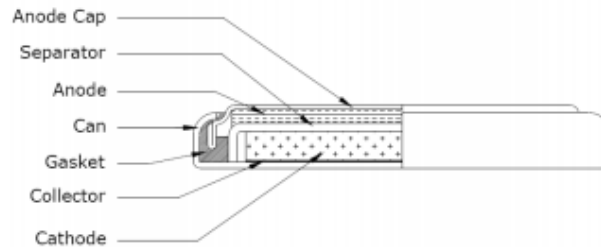


Figura 3.22: Estrutura interna de uma bateria de Li/MnO_2 do tipo moeda

Complementando a figura 3.22, a figura 3.23 ilustra as dimensões da bateria CR2032. Note que seu tamanho reduzido foi mais um aspecto positivo que nos levou à escolha desse dispositivo como primeira opção para nossas simulações. Considera-se ainda a questão do custo reduzido desse modelo, ideal, portanto, para uma aplicação de larga escala, conforme planejamos.

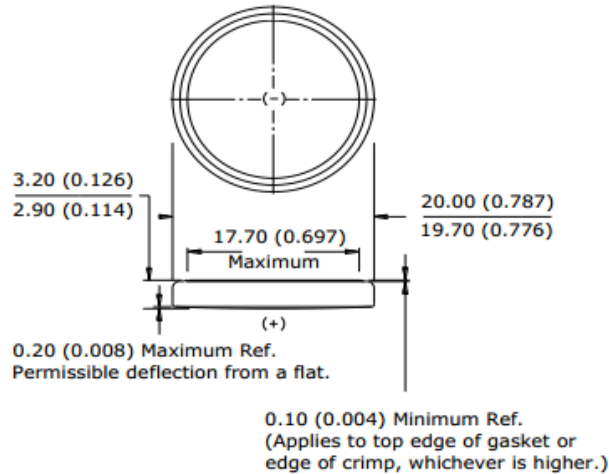


Figura 3.23: Dimensões da bateria CR2032, em mm (inches)

Foi realizada ainda uma análise mais detalhada das curvas características da CR2032, de acordo com os dados apresentados no *datasheet*, de forma que pudéssemos entender melhor seu comportamento. A figura 3.24 mostra a curva de decaimento da voltagem com o tempo, considerando uma solicitação contínua da bateria. Note que a voltagem nominal é 3V, sendo que a voltagem de operação

depende da taxa de descarga e da temperatura. A curva é plana durante a maior parte do tempo, apresentando decaimento ao final do tempo de vida. Esse decaimento gradual indica quando a bateria está atingindo o limite de seu tempo de uso.

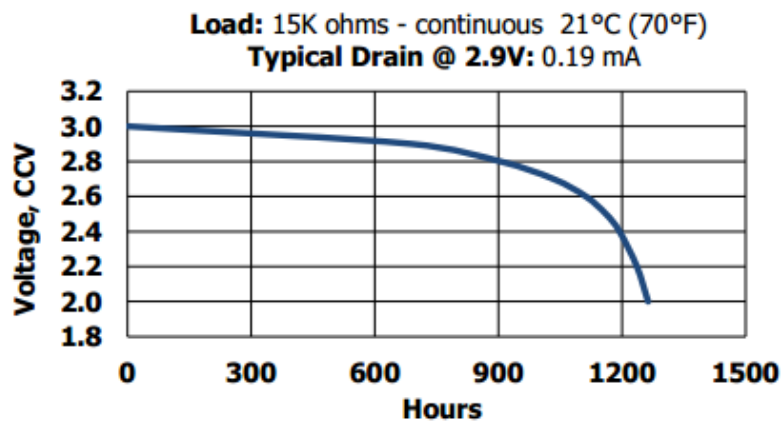


Figura 3.24: Curva de descarga contínua da bateria CR2032

A figura 3.25 representa a curva da voltagem instantânea da bateria durante um alto pulso de corrente. Temos que a resistência interna da bateria causa uma queda imediata na voltagem, proporcional à corrente entregue. E a voltagem da bateria continua decaindo em função da polarização do processo eletroquímico.

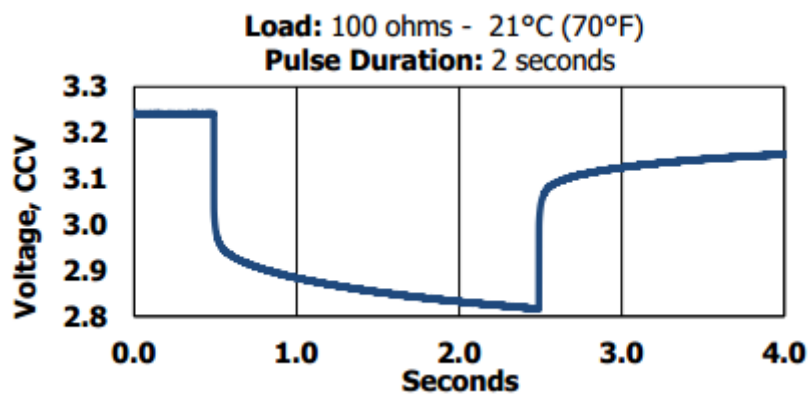


Figura 3.25: Característica do pulso da bateria CR2032

3.6.2 XL-210F

A bateria XL-210F é fabricada pelo Xeno Energy, sendo um dispositivo que tem como anodo o Litio (Li) e como catodo o clorido tionil ($SOCl_2$). Sua estrutura está ilustrada na figura 3.26.

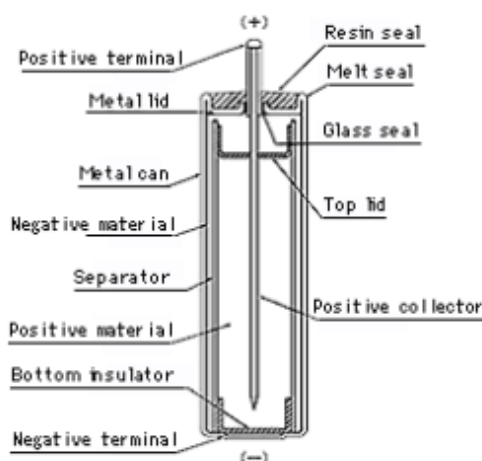


Figura 3.26: Estrutura interna de uma bateria de $Li/SOCl_2$

A bateria de $Li/SOCl_2$ apresenta menor perda por descarga do que as baterias convencionais. Isso acontece porque é formada uma membrana de lítio e clorido sobre a superfície negativa, bloqueando a reação com o material positivo. A voltagem de operação depende da taxa de descarga e da temperatura. Ao iniciar a primeira descarga da bateria, é possível que a membrana formada ofereça uma redução temporária da voltagem.

A figura 3.27 é a curva da voltagem fornecida em função do tempo, considerando o uso contínuo da bateria. Repare que a o comportamento da curva é plano durante a maior parte do tempo de vida, o que é uma característica altamente desejável.

De modo geral, a bateria XL-210F oferece uma performance mais otimizada que o modelo CR2032, apresentada acima. Ela provê ao sistema grande capacidade de armazenamento, alta voltagem de operação (sendo plana na maior parte do tempo), alta confiabilidade e segurança, e maior corrente de pico. Em contra partida, o modelo XL-210F apresenta-se como solução mais custosa, além de suas dimensões não serem tão compactas quanto o modelo

anterior. Na seção 4, ao descrevermos as metodologias e resultados alcançados, há uma discussão mais detalhada das implicações da escolha de cada bateria para nosso projeto.

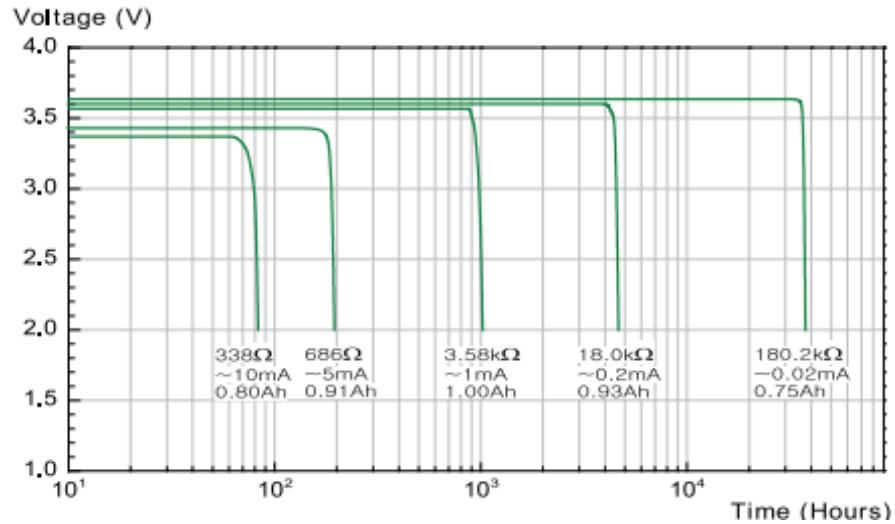


Figura 3.27: Curva de descarga contínua da bateria XL-210F, à temperatura de 20°C

A bateria de $Li/SOCl_2$ é feita de materiais inorgânicos quimicamente estáveis e isolados do ar por uma proteção hermética. Dessa maneira, ela apresenta características de armazenamento superiores às convencionais.

4 METODOLOGIA E RESULTADOS

Conforme apresentado, o objetivo deste trabalho é determinar a viabilidade do projeto de um dispositivo transceptor PTT (*push-to-talk*), para uso operacional, de ultra-baixo consumo de energia, para durar cinco anos sem troca de bateria. Para tanto, abordamos duas vertentes: o uso de uma bateria como fonte de energia ou a captação de energia do meio (*energy harvesting*). Para adentrarmos nos detalhes de nosso trabalho, é importante compreender a parte conceitual do projeto, conforme representada pela figura 4.1.

Note que nosso dispositivo será acionado através de um botão, acoplado ao corpo ou armamento do combatente. Ao ser pressionado, o botão aciona o circuito responsável pelo envio do pacote. O pacote será enviado com a informação de iniciar a transmissão, para o rádio do combatente, que, após receber tal informação, iniciará a comunicação com outro equipamento. Todo esse processo será alimentado ou por uma bateria ou por captação de energia do meio. O processo de finalização da transmissão seria análogo.

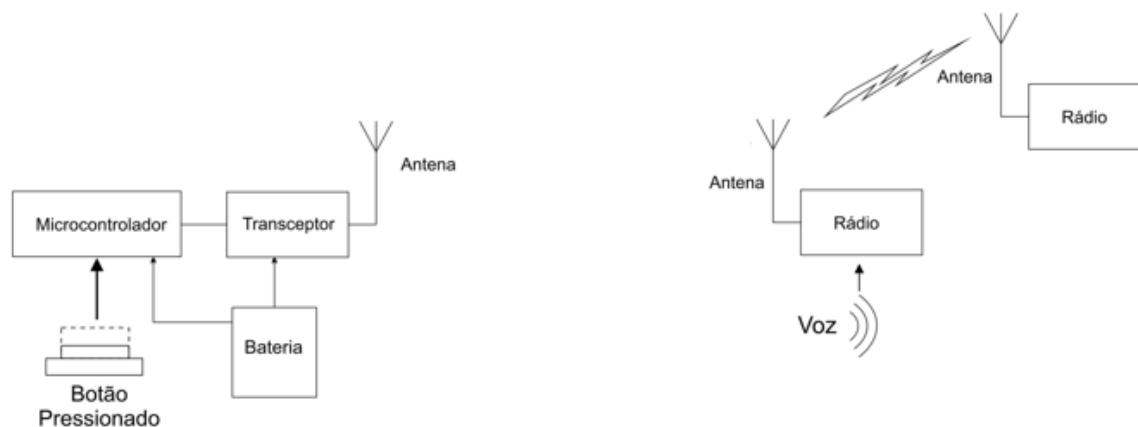


Figura 4.1: Representação conceitual do projeto

De acordo com o que foi apresentado na seção 3.2, foi utilizado o transceptor Si4464 da Silicon Labs®, que atende a vários requisitos do projeto como alta performance, baixa corrente e faixa de operação adequada. Durante as especificações de tipo de modulação e frequência de operação, por exemplo, foi utilizado o programa *Wireless Development Suite (WDS)* versão 3.2.6.0.

No programa podemos selecionar o tipo de transceptor e definir uma série de parâmetros como a frequência base, espaçamento do canal, tipo de modulação e taxa de dados, como mostra a figura 4.2. A utilização desse programa nas especificações do projeto foi importante, pois o próprio WDS alerta a impossibilidade de utilização de uma determinada configuração, caso ela não seja adequada. Se o usuário tentar utilizar a frequência base de 350 MHz, por exemplo, o programa informa a incompatibilidade e sugere a utilização de frequências nas faixas de 117 até 319 MHz ou 353 até 639 MHz.

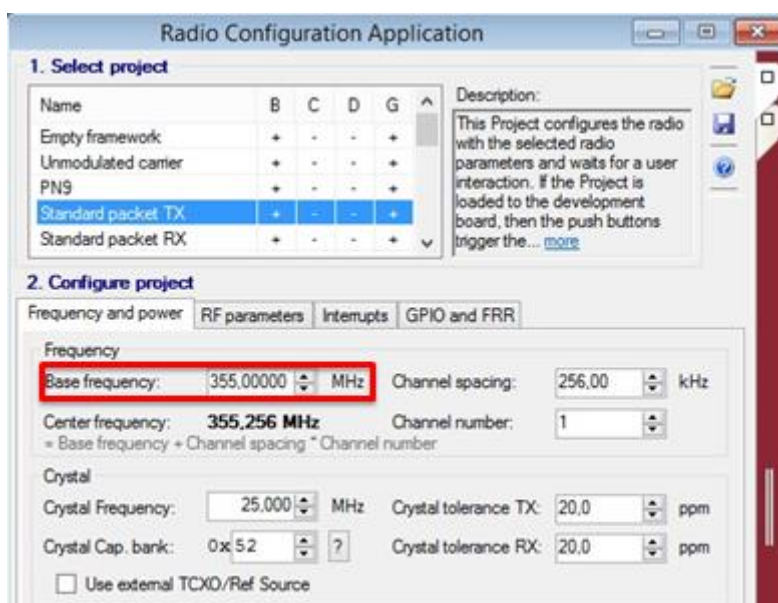


Figura 4.2: Interface do programa WDS, indicando a escolha dos parâmetros do projeto

O WDS disponibiliza uma série de projetos pré-configurados de pacote de transmissão, recepção e bidirecional padrão, transmissão e recepção direta, teste de distância, transmissão e recepção de pacotes longos, e várias outras opções de modo de operação. Ao final do processo, pode-se gerar o *header file* de configuração do rádio.

Como foi mencionado anteriormente, o projeto tem como finalidade verificar a viabilidade de desenvolver um dispositivo PTT transmissor de ultra-baixo consumo de energia alimentado por bateria, ou por energia do ambiente ou ambos. O primeiro passo feito para levantar parâmetros para fundamentar o projeto foi a determinação do consumo de energia do circuito, constituído, basicamente, pelo botão de acionamento, microcontrolador e transceptor.

Para isso, foi utilizado o simulador STMCubeMX V1.0 versão 4.3.0, disponibilizado pela STMicroelectronics®, e o esquemático base de um dispositivo transceptor utilizando Si446x, que pode ser encontrado no *datasheet* do mesmo, conforme a figura 4.3 a seguir.

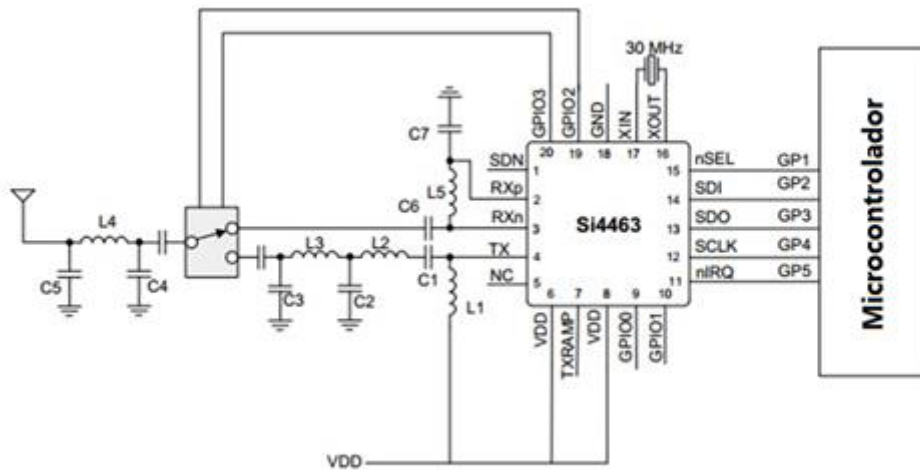


Figura 4.3: Esquemático base de um dispositivo transceptor utilizando o Si446x

Como pode ser visto no esquemático do circuito, são necessárias cinco portas GPIO do microcontrolador para operar o dispositivo. Dessa forma, ao definir as configurações no simulador STMCubeMX, foram selecionadas cinco portas GPIO, conforme ilustrado na figura 4.4.

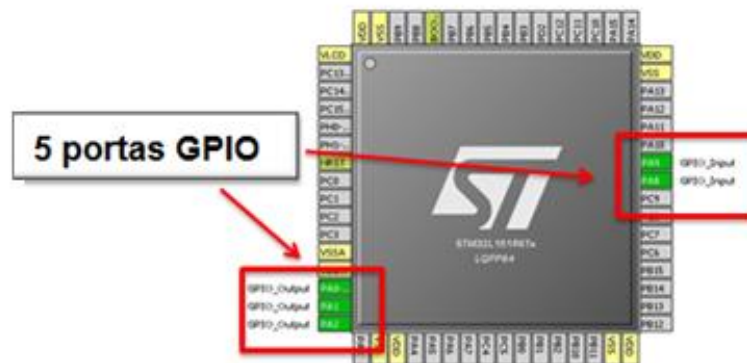


Figura 4.4: Seleção de cinco portas GPIO no microcontrolador do projeto

Em seguida, foi necessário fazer os cálculos dos tempos de operação dos estados do microcontrolador, com base em seu próprio *datasheet*, nos dados do Si4464 e nas especificações do projeto. O dispositivo será projetado tal que seu ciclo de operação alterne entre o modo Standby e o modo Run. Enquanto o dispositivo não estiver sendo utilizado, ele estará no modo *Standby*. Note que a escolha de tal ciclo se mostra vantajosa para o ciclo de vida da bateria, levando em conta que seu *duty cycle* é alto.

A proporção entre os dois estados será dada por uma estimativa do uso do dispositivo em operação. Como almeja-se projetar um dispositivo PTT para uso em operações militares, a taxa média de utilização do aparelho é decisiva para os parâmetros projetados. Para efeitos de um primeira aproximação, considera-se que o dispositivo será solicitado uma vez a cada dois minutos.

Após levarmos em conta todas as temporizações envolvidas, estimamos que a proporção entre os dois modos de operação gere o consumo de corrente conforme representado pela figura 4.5. Note que a parte em vermelho do gráfico se refere ao consumo durante o modo de Standby e a parte em azul, é o consumo estimado durante o modo Run.

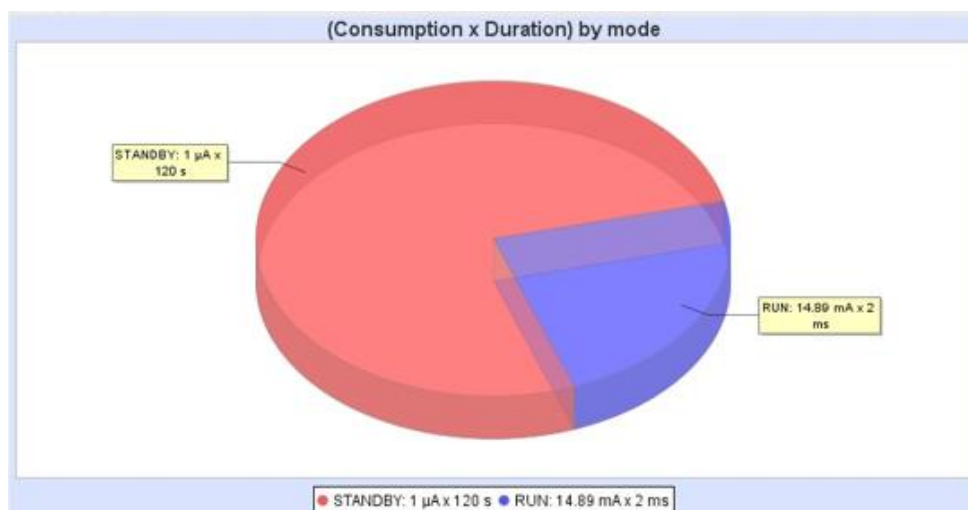


Figura 4.5: Proporção entre o consumo no modo *Standby* e no modo *Run*

A taxa de transmissão requisitada pelo projeto é de 256 kbps. O pacote com informação possui 128 bits e existem mais 48 bits de *overhead* para preâmbulo e correção de erros, formando um pacote final de 176 bits. Dividindo o tamanho do pacote a ser transmitido pela taxa de bits, temos que são necessários

0,6875 ms para realizar a transmissão desse pacote na taxa determinada. Antes de entrar no modo de transmissão, o Si4464 passa 440 μ s para sair do modo *Standby* para o modo de transmissão ou de recepção. Tal valor pode ser determinado pela consulta ao *datasheet* do equipamento, conforme exposto na seção 3.2. Portanto, somamos aos 0,6875 ms o valor de 0,44 ms e temos que o microcontrolador ficará 1,128 ms no modo *Run*.

O *clock* de operação mínimo, levando em conta a taxa de dados, seria de 256 kHz. Buscando acelerar os ciclos de operação, de forma a reduzir o tempo, e mantendo a relação de compromisso com o consumo, foi determinado que o microcontrolador operará com um *clock* de 2 MHz. O valor utilizado no *clock* foi o que, dentro das faixas disponíveis pelo microcontrolador, mostrou a melhor relação de compromisso entre velocidade de processamento e consumo de corrente. No STMCubeMX, pode-se definir as características de cada estado de operação do equipamento. Define-se, por exemplo, o estado em que o transceptor passa do modo de transmissão para recepção. Nesse modo de operação o microcontrolador está em *Run*, num modo de consumo baixo, o *clock* selecionado de 2 MHz e o tempo de duração de 138 μ s.

Na simulação foram utilizadas as portas GPIO A, que já incluem as cinco portas necessárias para nosso projeto. E, durante esse período de operação, além da corrente consumida pelo microcontrolador, no campo "*Adicional Consumption*" foi acrescentada a corrente utilizada pelo Si4464. A consulta ao *datasheet* do transceptor, conforme explicado na seção 3.2, indica que o valor de tal corrente é de 18 mA.

Foi feita a simulação do consumo de energia do circuito saindo do modo *Standby* para o modo *Run* no momento em que o botão for pressionado (passos 1 e 2). Em seguida, o microcontrolador entra no modo *Standby* novamente, enquanto o Si4464 passa para o modo de transmissão e efetua a transmissão (passos 3 e 4), o transceptor passa para o modo de recepção e recebe a confirmação de transmissão do pacote (passos 5 e 6). Posteriormente, volta para o modo *Standby* (passo 7). Todos esses passos podem ser vistos na figura 4.6 junto ao gráfico de consumo de corrente por tempo.

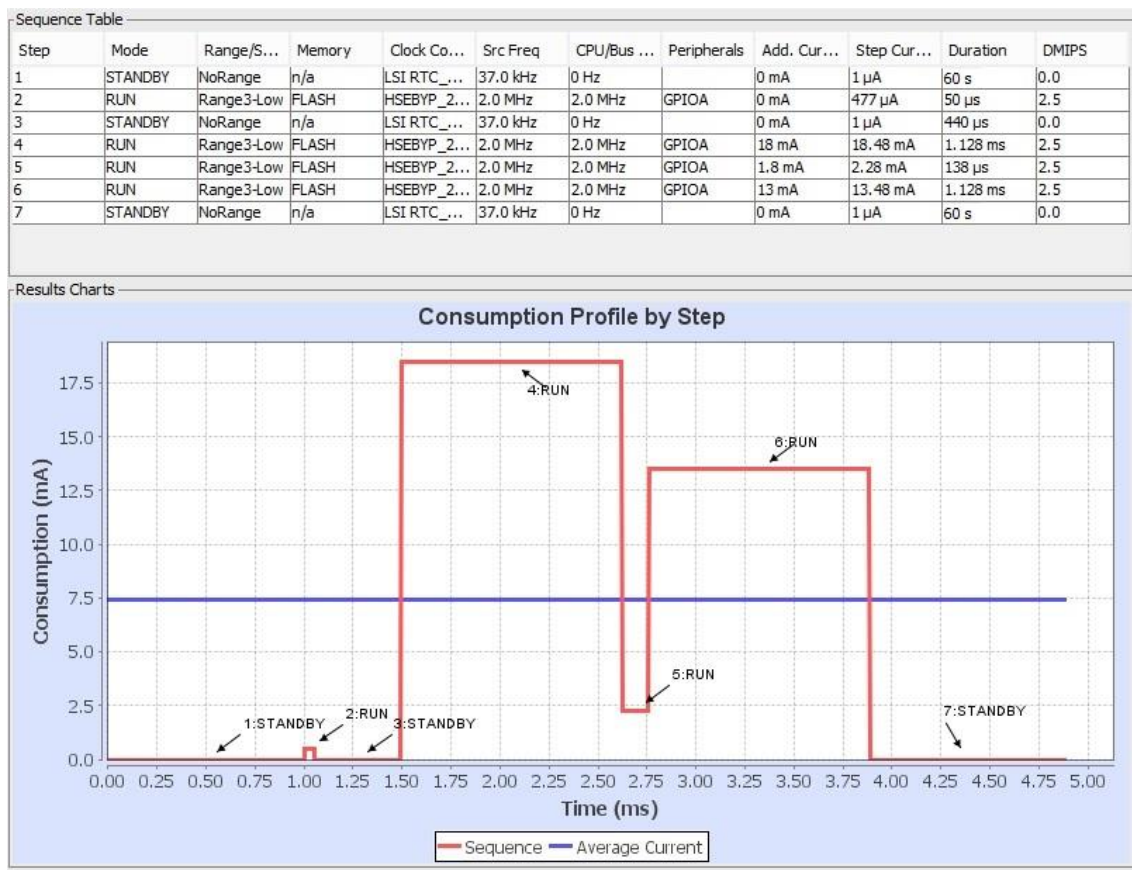


Figura 4.6: Definição do ciclo de operação e consumo de corrente por tempo

Após as determinações e configurações de todos os passos, pode-se escolher qual bateria seria utilizada no projeto. O STMCubeMX disponibiliza uma grande quantidade de tipos de bateria e há a opção de criar uma bateria de acordo das necessidades de um determinado dispositivo. Um tipo de bateria que é muito interessante para o projeto são as baterias pequenas do tipo moeda.

Após uma vasta pesquisa, em que levou-se em conta características favoráveis ao projeto, como capacidade, densidade de energia, temperaturas de operação, confiabilidade, segurança, dimensões e custo, decidiu-se pelo uso do modelo CR2032. Maiores detalhes técnicos acerca desse dispositivo podem ser encontrados na seção 3.6.1. Na figura 4.7 apresentamos os principais parâmetros dessa bateria, determinantes para a simulação de seu consumo nas condições de nosso projeto.



Figura 4.7: Principais parâmetros técnicos do modelo de bateria CR2032

Após simulação, o programa fornece como resultado o tempo estimado de duração da bateria considerando, incluindo, o tempo de descarga. No caso da CR2032, esse tempo seria de 15 anos, 3 meses, 21 dias e 6 horas. Porém o programa faz um alerta de risco no projeto como mostra a figura 48. Esse alerta ocorre devido baixa corrente contínua que a bateria pode fornecer, nesse caso de 3 mA. Esse problema poderia ser resolvido com a utilização de capacitores para atingir a corrente necessária.



Figura 4.8: Duração estimada para a bateria CR2032 e alerta de incompatibilidade com o projeto

Uma outra solução seria utilizar uma bateria capaz de fornecer uma corrente suficiente para o funcionamento do dispositivo. Foi feita uma pesquisa sobre algumas empresas que vendem baterias alto desempenho e que atendessem às exigências do projeto. A empresa que melhor atendeu as necessidades do projeto foi a XenoEnergy© com as baterias de Lítio-tionilo.

As baterias de lítio de tionilo são menos conhecidas, mas são importantes fontes de energia industrial e não-recarregável como fonte de alimentação principal ou subsidiária. Além disso, a demanda está crescendo continuamente, graças ao comportamento da tensão única, a resistência à temperatura, menor

auto-descarga, boa estrutura de segurança e durabilidade em comparação com outras baterias. Maiores detalhes técnicos podem ser encontrados na seção 3.6.2.

Entre as baterias disponíveis, a que mais se adequou foi a XL-201F, pois é bem semelhante a CR-2032, em relação as suas dimensões (por ser uma bateria do tipo moeda), além de fornecer alto desempenho, confiabilidade e custo razoável. A figura como ilustra a figura 4.9 apresenta os principais parâmetros desse modelo, essenciais para a estimativa de seu tempo de operação.

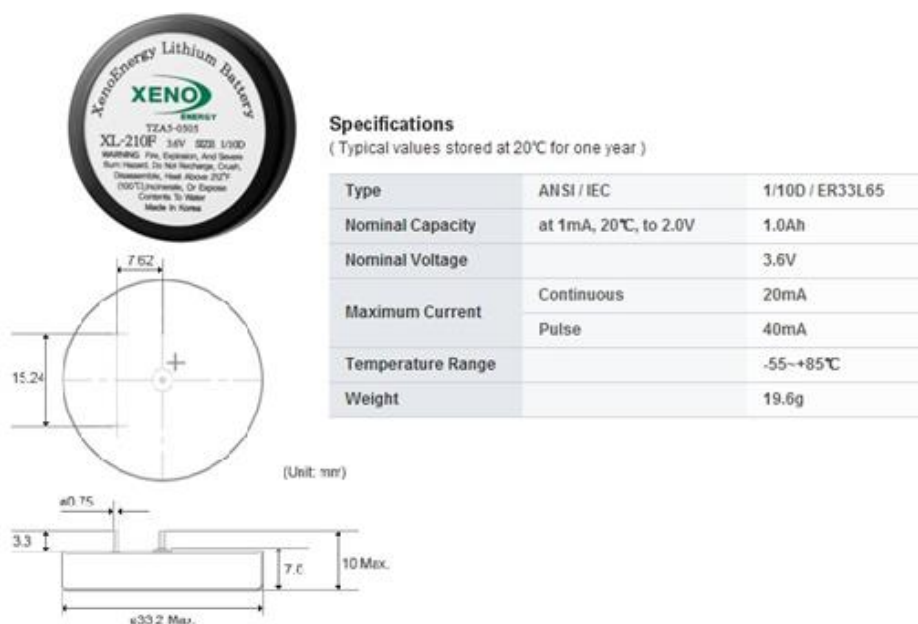


Figura 4.9: Principais parâmetros técnicos do modelo de bateria XL-210F

Além do tamanho reduzido, a XL-201F está de acordo com as necessidades de corrente e voltagem com uma certa margem de segurança. Desse modo, foi criada uma bateria no programa STMCubeMX para fazer a simulação do uso da mesma com o circuito. O resultado da simulação mostrou que com essa bateria o tempo de duração da mesma seria de 7 anos, 6 meses, 7 dias e 15 horas. Vale frisar que a situação analisada é a pior possível, na qual o dispositivo é utilizado mais vezes do que ele, provavelmente, será utilizado e potência de transmissão é a máxima.

Na figura 4.10 a seguir, pode-se notar que o resultado do tempo de duração mencionado acima não apresenta nenhum tipo de alerta pelo programa, logo a XL-210F atende às necessidades do projeto.

Results Summary	
Total Sequence Time	600 s
Battery Life Estimation	7 years , 7 months , 27 days & 17 hours

Figura 4.10: Duração estimada para a bateria XL-210F

Após as simulações com a bateria, foi feito um estudo de viabilidade de utilização de energia do ambiente para alimentação do dispositivo, explorando o conceito de *energy harvesting*. O mecanismo de obtenção de energia do ambiente mais favorável ao dispositivo em questão é o de obtenção de energia por movimento. Nesse caso, o movimento é o de pressionar e soltar o botão para iniciar e terminar a transmissão do rádio.

Foi feito um estudo do dispositivo PTM 330 associado ao ECO 200, ambos da EnOcean. O PTM 330 é o circuito formado pelo microcontrolador, transceptor e antena. O ECO 200 é o dispositivo que fornece energia ao PTM 330 por meio da indução eletromagnética gerada pelo acionamento da mola, conforme foi explicado anteriormente. O PTM 330 é de grande interesse como estudo para nosso projeto. Trata-se de um dispositivo capaz de enviar pacotes de informação sem uso de bateria. Isto é, ele é capaz de funcionar usando apenas a energia do meio, sendo, portanto, uma aplicação bastante eficiente do conceito de *energy harvesting*.

Para melhor compreensão da capacidade do dispositivo, a EnOcean fornece uma interface que permite monitorar os pacotes recebidos, medindo sua potência de chegada, bem como sua distribuição no tempo. Fornece ainda ferramentas que permitem fazer uma análise estatística do padrão de transmissão. Na figura 4.11, pode-se observar como é feita a associação dos dispositivos.



Figura 4.11: Associação dos dispositivos de *energy harvesting* da EnOcean

Foram feitas várias medições para analisar com mais detalhes as características desse transceptor da EnOcean, uma vez que os *datasheets* fornecidos pela empresa são incompletos em algumas informações. As primeiras medições foram feitas com o Analisador de Sinal N9010 EXA da Agilent Technologies. As configurações de tal equipamento para medição dos dados necessários estão representadas na figura 4.12 abaixo.



Figura 4.12: Medição com o Analisador de Sinal N9010 EXA da Agilent Technologies

Foram feitas medidas do espectro na faixa de 902,875 MHz, que é a frequência de operação do PTM 330. Para tanto, o equipamento foi alimentado por pulsos do ECO 200 e configurado para adequada visualização dos pulsos. É possível identificar na figura 4.13 abaixo, a transmissão de dois pacotes de dados. Tal transmissão ocorre com um intervalo de 27,52 ms como mostra a diferença dos marcadores um e dois. Em seguida, foi feita outra medição para medir o tempo de duração dos pulsos.

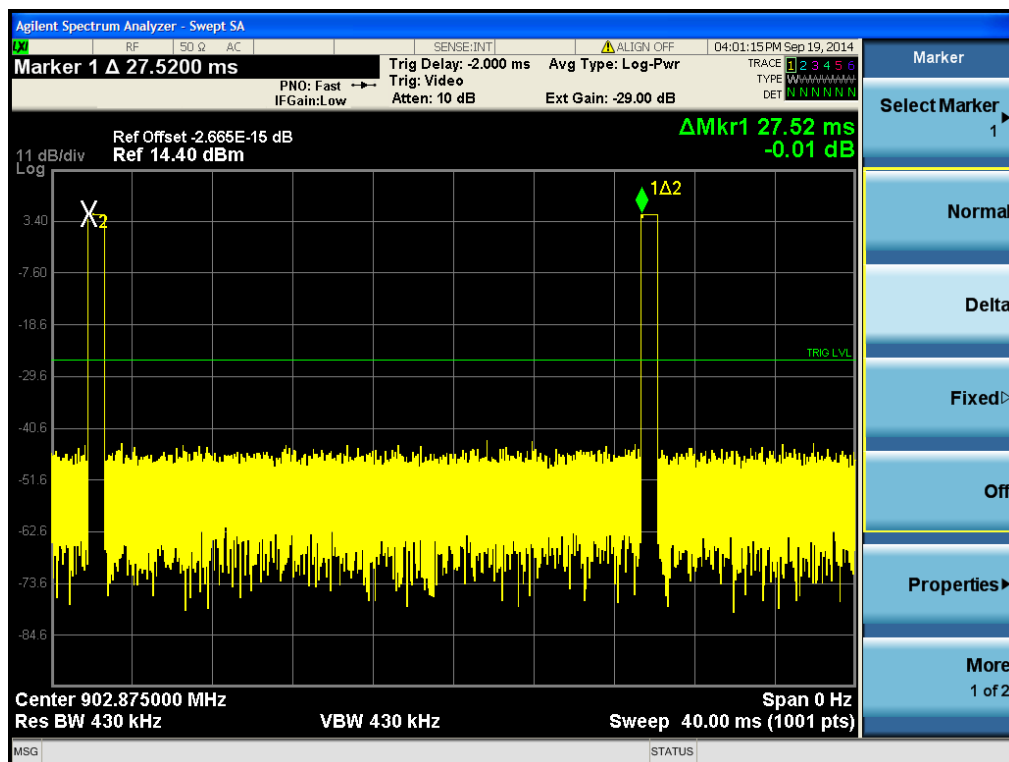


Figura 4.13: Transmissão de dois pacotes de dados, usando o PTM 330

Na figura 4.14 a seguir, pode-se ver o pulso de transmissão com mais detalhes e fazer a medição do tempo de transmissão de um pacote com mais precisão. Nesse caso, o tempo de transmissão de um pacote é de 797,867 μ s. Com o dado do *datasheet* do PTM 330 sobre a taxa de transmissão, podemos calcular o tamanho do pacote. Nesse caso, a taxa de transmissão é de 125 kbps, logo cada pacote possui, aproximadamente, 99 bits.

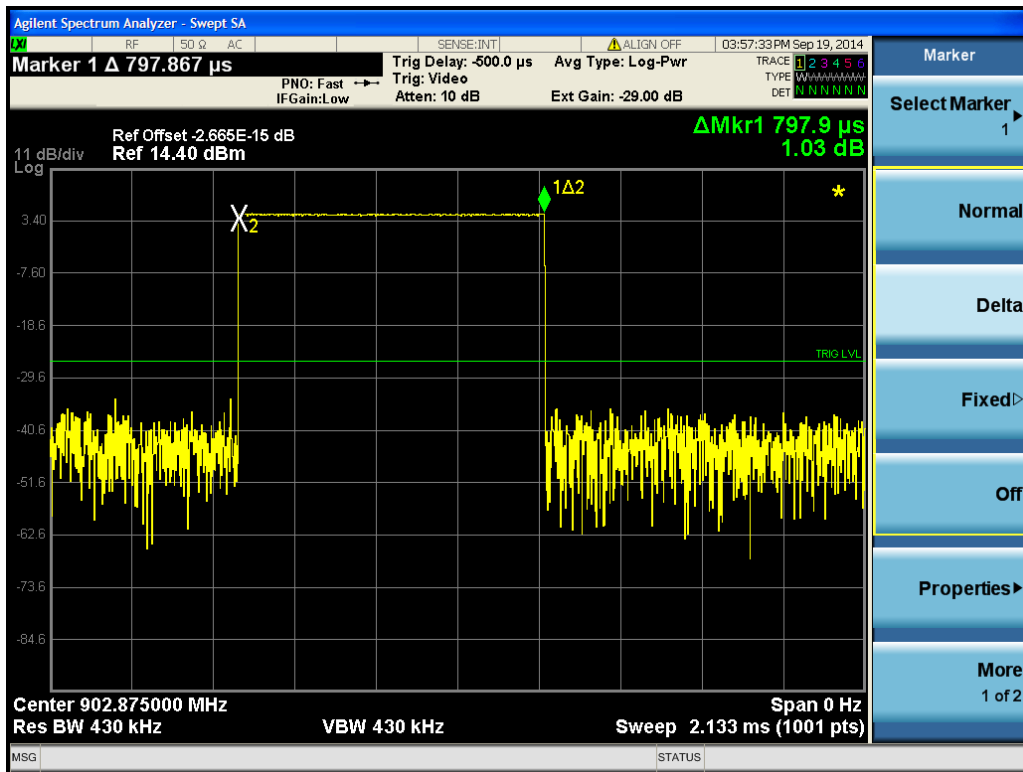


Figura 4.14: Detalhe na transmissão de um pacote usando o PTM330

Foram feitas outras medições, mas dessa vez apenas do ECO 200. Foi utilizado o osciloscópio DSO-X 3034A da Agilent Technologies, representado na figura 4.15, para medir a voltagem de saída do dispositivo em questão. As medições foram feitas com um carga de $1,4 \text{ k}\Omega$ ligada nos terminais do ECO 200 que simula a alta impedancia do circuito.

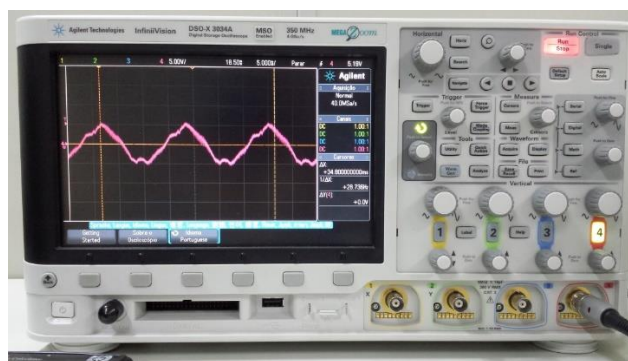


Figura 4.15: Medição com o Osciloscópio DSSO-X 3034A da Agilent Technologies

Na figura 4.16 abaixo, pode-se observar a curva obtida no osciloscópio, na qual a voltagem máxima atingida foi de 12,7 V. Utilizando uma das ferramentas disponíveis no DSO-X 3034A, calculou-se a integral do gráfico no tempo, obtendo-se como resultado o valor de 9,7169 mVs. Dividindo esse valor pela carga utilizada na medição foi encontrado um valor de 1,928 nAh, que é a quantidade de A.h que o dispositivo ECO 200 usa para transmissão de seu pacote. Tal valor serve como boa referência para nosso projeto.

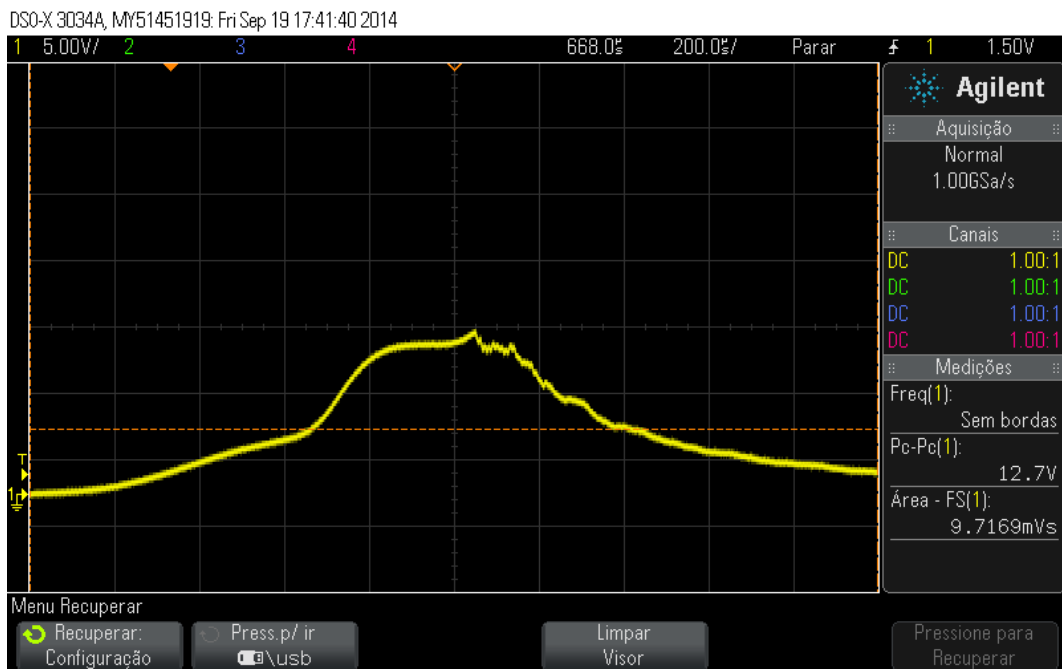


Figura 4.16: Curva da voltagem pelo tempo de um pulso do ECO 200

Para nosso projeto, até agora, consideramos que o transceptor iria usar sua potência máxima de 10dBm, requisitando uma corrente de 18mA. No entanto, levando em conta o tempo de duração do pulso, isso nos levaria a uma demanda de A.h que o dispositivo de *energy harvesting* não conseguiria suprir. Portanto, foi necessário aliviar as exigências iniciais, considerando a nova potência do transmissor de 0dBm. Note que o rádio desenvolvido pela IMBEL, para o qual o dispositivo PTT está sendo projetado, possui alta sensibilidade, da ordem de -100dBm. E, levando-se em conta que o dispositivo ficará posicionado junto ao combatente, a uma distância razoavelmente próxima do rádio. Portanto, ao assumirmos a nova potência como 1mW, atendemos os requisitos do projeto, bem como aliviamos a demanda sobre equipamento de *energy harvesting*.

Posteriormente, prosseguimos com os cálculos, cujos pontos principais serão ressaltados aqui. O equipamento de *energy harvesting* é capaz de fornecer aproximadamente $1,928 \text{ } \eta\text{Ah}$, conforme a integral calculada sob o pulso. Mas isso nos dá $1,928 \text{ } \eta\text{Ah} \cdot 3600 \text{ s/h} = 6,94 \text{ } \mu\text{As}$. Por outro lado, temos que o pacote transmitido exige $2\text{mW} \cdot 797,867 \text{ } \mu\text{s} = 1,6 \text{ } \mu\text{J}$. Mas levamos em conta, nessa nova fase do projeto, uma potência de transmissão de 1mW . Portanto, teremos uma exigência de $1,6 \text{ } \mu\text{As}$.

Desse modo, para que a transmissão seja possível, o equipamento de *energy harvesting* deve ter uma eficiência mínima de aproximadamente 23% (isto é, $\eta = 1,6\mu\text{J}/6,94\mu\text{J} = 0,23$). Consideramos que essa é uma exigência razoável quanto à eficiência do equipamento. E, caso tal exigência seja cumprida, torna-se viável o emprego da captação de energia do meio como forma de geração de energia para nosso projeto.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo o projeto conceitual de um dispositivo transceptor PTT (push-to-talk) para emprego operacional, de ultra-baixo consumo de potência, feito para durar cinco anos sem substituição de bateria. Para tanto, foi realizado um longo estudo de viabilidade, em que se considerou seleção de dispositivos de ultra-baixo consumo, como o microcontrolador STM32L152RCT6 e o transceptor Si4464.

Para a alimentação do dispositivo, foram abordadas duas vertentes: o uso de uma bateria como fonte e/ou a captação de energia do meio (*energy harvesting*). Após definição do ciclo de operação, estabelecimento da proporção de uso e simulação do consumo, foi possível constatar que a bateria CR2032, embora apresente alta performance e características favoráveis, mostrou-se incompatível com nosso projeto, pelo valor de corrente de pico exigida.

A bateria XL-210F, por sua vez, consegue suprir as demandas do projeto, possui dimensões razoavelmente compactas e cumpre a exigência de corrente de pico. Dessa forma, é possível projetar o dispositivo PTT usando uma bateria como fonte de energia.

O passo seguinte, envolvendo o conceito inovador de *energy harvesting*, alvo de nosso projeto, foi realizado através de medições próprias realizadas em laboratório e estimativas de eficiência. Considerando que há uma eficiência de aproximadamente 25% do dispositivo de *energy harvesting*, seria viável o projeto apenas com captação de energia do meio. No entanto, existem métodos de aprimorar a análise, através da diminuição do tamanho do pacote, redução da potência do transceptor e do uso de dispositivos de maior eficiência.

Por fim, foram sugeridos próximos passos para complementação e otimização do projeto, bem como indicações de outras aplicações que podem ser desenvolvidas com o conceito de *energy harvesting*.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Após chegarmos aos resultados de nosso projeto, vislumbramos passos futuros que podem ser trilhados no sentido de complementar e otimizar o que foi realizado. Notamos, em relação ao uso dos dispositivos de *energy harvesting*, que algumas variações podem ser executadas no projeto. Neste sentido, pode-se considerar a possibilidade de diminuir o tamanho do pacote, reduzir a potência do transceptor ou pesquisar dispositivos de maior eficiência, com a finalidade de permitir uma melhor performance no uso da energia do meio. É possível explorar também outras formas de captação, como energia solar ou diferença de temperatura, pelo efeito Peltier.

Com relação ao projeto da antena, foram apresentados os principais parâmetros a serem considerados, bem como modelos comerciais para a frequência de operação. No entanto, sugerimos, como continuação, o desenvolvimento de um dispositivo que atenda melhor ao projeto, principalmente no que diz respeito às dimensões. Citamos também a possibilidade de maior aproveitamento das vantagens trazidas pelo código BCH, estudado na seção 3.4, e de grande importância para o desempenho do dispositivo PTT.

Por fim, consideramos algumas aplicações mais específicas a serem desenvolvidas, como a utilização do dispositivo para outros empregos militares. Por exemplo, na construção de armadilhas que funcionem através da emissão de pacotes de informação, usando a energia do meio.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BEEBY, S. e WHITE, N. **Energy Harvesting for Autonomous Systems, 1ª ed.** Artech House, 2010.
- CATRENE. **Energy Autonomous Systems: Future Trends in Devices, Technology, and Systems, 1ª ed.** CATRENE, 2009.
- KAZIMERSKI, T. J. e BEEBY S. **Energy Harvesting Systems: Principles, Modeling and Applications, 1ª ed.** Springer, 2011.
- ENOCEAN. **Energy for free – wireless technology without battery.** Disponível em < file:///C:/Users/C%C3%ADntia%20Fernanda/Downloads/wp_energyfor free_ en.pdf > 2006. Acesso em 26 jun. 2014
- ENOCEAN. **EnOcean Technology – Energy Harvesting Wireless.** Disponível em < file:///C:/Users/C%C3%ADntia%20Fernanda/Downloads/WP_EnOcean_ Technology_en_Jul11%20(1).pdf > 2011. Acesso em 26 jun. 2014
- ENOCEAN. **ECO310 – Powering From Temperature Difference.** Disponível em < file:///C:/Users/C%C3%ADntia%20Fernanda/Downloads/wp_ECT_310_nov 10_en.pdf >, 2010. Acesso em 26 jun. 2014
- ENOCEAN. **Pushbutton Transmitter Device.** Disponível em < file:///C:/Users/C%C3%ADntia%20Fernanda/Downloads/PTM_210x_PTM_21 5_User_Manual_Jul2014_04.pdf >, 2014. Acesso em 26 jun. 2014
- ENOCEAN. **Radio Sensor Powered by a Mini Sollar Cell.** Disponível em < file:///C:/Users/C%C3%ADntia%20Fernanda/Downloads/wp_stm110_en.pdf >, 2008. Acesso em 26 jun. 2014
- MELO, C. e FREIRE, R. **Sistemas Autônomos e Inteligentes de Robótica.** 2013
- STMICROELECTRONICS. **STM32L15XX/6/8/B- Ultra-low-power 32-bit MCU ARM-based Cortex-M3.** Disponível em < http://www.st.com/web/en /resource/technical/document/datasheet/CD00277537.pdf>. Acesso em 12 abr. 2014
- SILICON LABS. **Si4464/63/61/60 - High-Performance, Low-Current Transceiver.** Disponível em < http://www.silabs.com/Support% 20Documents /TechnicalDocs/Si4464-63-61-60.pdf >. Acesso em 12 abr. 2014
- EMONA INSTRUMENTS. **Frequency Shift Keying.** Disponível em < http://www .ele.uri.edu/courses/ele436/labs/newhandouts_09/D1-07_FSK-frequency_shift _keying.pdf >, 2005. Acesso em 29 jul. 2014

- HAYKIN, S. **Sistemas de Comunicação Analógicos e Digitais, 4ª ed.** Bookman, 2004.
- BALANIS, A. C. **Antenna Theory: Analysis and Design, 3ª ed.** Wiley, 2005.
- SOARES, A. J.M. e COSTA SILVA, F., **Antenas e Propagação.** Disponível em <<http://www.py3po.com.br/documentos/antenasepropagacao.pdf>>. Acesso em 25 ago. 2014.
- SILICON LABS. **434 MHZ Single-Ended Antenna Matrix Selection Guide.** Disponível em <<https://www.silabs.com/Support%20Documents%2fTechnical Docs%2fAN849.pdf>>. Acesso em 27 ago. 2014
- SILICON LABS. **434 MHZ Single-Ended Antenna Matrix Measurement Reports.** Disponível em <<https://www.silabs.com/Support%20Documents %2fTechnicalDocs%2fAN850.pdf>>. Acesso em 27 ago. 2014
- CROMPTON, T. R. **Battery Reference Book, 3ª ed.** Newnes, 2000.
- DURACELL. **Lithium/ Manganese Dioxide.** Disponível em <http://ww2.duracell.com/media/enUS/pdf/gtcl/Technical_Bulletins/Lithium%20T echnical%20Bulletin.pdf>. Acesso em 10 jul. 2014
- NORDIC SEMICONDUCTOR. **High Pulse Drain Impact on CR2032 Coin Cell Battery Capacity.** Disponível em <XXX>. Acesso em 10 jul. 2014
- ENERGIZER. **Energizer CR2032 Datasheet.** Disponível em <<https://www.dmcinfo.com/Portals/0/Blog%20Files/High%20pulse%20drain%20impact %20on%20CR2032%20coin%20cell%20battery%20capacity.pdf>>. Acesso em 10 jul. 2014
- MAXELL. **Lithium Thionyl Chloride Battery.** Disponível em <http://biz.maxell .com/en/product_primary/?pci=9&pn=pb0004>. Acesso em 28 jul. 2014
- XENO ENERGY. **XL-210F Specifications.** Disponível em <<http://www.xenousa .com/pdf/210FC.pdf>>. Acesso em 28 jul. 2014