

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

FELIPE AZEREDO QUADROS

**DISPOSITIVO SEM FIO PARA DETECÇÃO DE QUEDAS
ALIMENTADO POR COLHEITA DE ENERGIA E
TRANSFERÊNCIA DE ENERGIA SEM FIO**

Porto Alegre

2017

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

**DISPOSITIVO SEM FIO PARA DETECÇÃO DE QUEDAS
ALIMENTADO POR COLHEITA DE ENERGIA E
TRANSFERÊNCIA DE ENERGIA SEM FIO**

Projeto de Diplomação apresentado ao
Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade
Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos
requisitos para Graduação em Engenharia Elétrica.

ORIENTADOR: Prof Dr. Ivan Muller

Porto Alegre

2017

FELIPE AZEREDO QUADROS

**DISPOSITIVO SEM FIO PARA DETECÇÃO DE QUEDAS
ALIMENTADO POR COLHEITA DE ENERGIA E
TRANSFERÊNCIA DE ENERGIA SEM FIO**

Este projeto foi julgado adequado para fazer jus aos créditos da Disciplina de “Projeto de Diplomação”, do Departamento de Engenharia Elétrica e aprovado em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: _____

Prof. Dr. Ivan Müller, UFRGS

Aprovado em: ____ / ____ / ____

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Ivan Müller, UFRGS

Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Dr. Valner João Brusamarello, UFRGS

Doutor pela Universidade Federal de Santa Catarina

Dr. Eng. Jean Michel Winter

Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer aos meus pais que não mediram esforços para que eu chegasse até aqui. Aos meus amigos que sempre estiveram ao meu lado. Ao meu orientador Prof. Dr. Ivan Muller pela grande ajuda dada ao longo deste projeto. Aos professores pelos ensinamentos. E, por fim, à universidade.

RESUMO

Este trabalho propõe o desenvolvimento de um dispositivo para monitoramento de quedas de pessoas alimentado por duas fontes de energia diferentes. A primeira delas por transferência de energia sem fio através de um *link* indutivo. A segunda por colheita de energia, fazendo uso de um painel fotovoltaico. Fez-se uso de um rádio transceptor de ultrabaixo consumo EnOcean STM300U para a comunicação sem fio com uma estação base, a qual é responsável pelo monitoramento das quedas. Foi utilizado um sensor inercial LSM9DS0 para gerar interrupções no microcontrolador do rádio quando o sensor detecta uma situação de queda. O dispositivo desenvolvido pode ser miniaturizado para tornar-se vestível, de forma que possa ser utilizado como uma tecnologia assistiva à pessoas que necessitam cuidados.

Palavras-chave: Tecnologia Assistiva. Colheita de Energia. EnOcean. Rede de Sensores Sem Fio.

ABSTRACT

This work proposes the development of a device to monitor falls of people fed by two different energy sources. The first one by wireless energy transfer through an inductive link. The second by harvesting energy, making use of a photovoltaic panel. An EnOcean STM300U ultra low-power transceiver was used for wireless communication with a base station, which is responsible for monitoring falls. An LSM9DS0 inertial sensor was used to generate interrupts in the microcontroller of the radio when the sensor detects a drop situation. The developed device can be miniaturized to become wearable, so that it can be used as an assistive technology to those in need of care.

Keywords: Assistive Technology. Power Harvest. EnOcean. Wireless Sensor Network.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Dispositivos para monitoramento de idosos existentes no mercado.....	12
Figura 2 - Possível utilização do projeto dentro de um sistema	13
Figura 3 - Componentes de uma Rede de Sensores sem Fio.....	14
Figura 4 - Supercapacitor	17
Figura 5 - Sensibilidade espectral característica de células solares.....	18
Figura 6 - Célula monocristalina, policristalina e filme fino.....	19
Figura 7 - Sensibilidade espectral característica de células solares.....	20
Figura 8 - <i>Link</i> Indutivo.....	21
Figura 9 - Circuito T equivalente do <i>link</i> Indutivo compensado com a rede capacitiva	22
Figura 10 - Módulo STM300U.....	23
Figura 11 - Diagrama de blocos do EO3000I.....	24
Figura 12 - Comportamento do pino CCO	25
Figura 13 - DolphinStudio.....	25
Figura 14 - LSM9DS0	26
Figura 15 - KXOB22-01X8F.....	27
Figura 16 - Características de Corrente-Tensão em Azul e Potência-Tensão em Vermelho ...	27
Figura 17 - WT-505060-20K2-A10-G	28
Figura 18 - IWAS-3827EC-50	28
Figura 19 - Amplificador de potência usado como <i>driver</i> do <i>link</i> indutivo	31
Figura 20 - <i>Software</i> para encontrar valores de referência para capacitâncias.....	32
Figura 21 - Estação de Carregamento.....	34
Figura 22 - Esquemático completo do circuito para colheita de energia.....	35
Figura 23 - Diagrama de Blocos do Circuito de Colheita de Energia.....	36
Figura 24 - Interrupção por queda livre.....	38
Figura 25 - Fluxograma representando o código principal do rádio	39
Figura 26 - Esquemático de integração do rádio com o acelerômetro	40
Figura 27 - Integração do rádio com o acelerômetro.....	41
Figura 28 - Protótipo	41
Figura 29 - Foto do <i>setup</i> para teste sem rede capacitiva.....	42
Figura 30 - Foto do <i>setup</i> para teste com a rede capacitiva.....	43
Figura 31 - Comparação dos testes.....	44
Figura 32 - Simulação utilizando o NI Multisim™	45
Figura 33 - Curva de carregamento simulada do supercapacitor	45
Figura 34 - Teste de carregamento do supercapacitor pelo PV	46
Figura 35 - Disposição das bobinas para o teste de carregamento supercapacitor pelo PV	47
Figura 36 - Curva de carregamento do supercapacitor.....	48
Figura 37 - Circuito para teste de consumo do rádio e acelerômetro	49
Figura 38 - Esquemático circuito <i>low-side</i>	49
Figura 39 - Testes e intervalos de consumo medidos.....	50
Figura 40 - Consumo do STM300 informado pelo fabricante	52

Figura 41 - Curva de descarga do supercapacitor	53
Figura 42 - Teste de detecção de Queda.....	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características Elétricas do KXOB22-01X8F.....	27
Tabela 2 - Características das Bobinas indicadas pelos fabricantes.....	28
Tabela 3 - Parâmetros de entrada do <i>software</i>	33
Tabela 4 - Valores de Capacitância obtidas no <i>software</i>	33
Tabela 5 - Valores de Capacitância utilizadas.....	33
Tabela 6 - Resumo dos valores obtidos no teste de consumo	52

LISTA DE ABREVIATURAS

EDLC: *Electrical Double Layer Capacitors* (Capacitor de Dupla Camada Elétrica)

ESR: *Equivalent Serie Resistance* (Resistencia Série Equivalente)

PDL: *Power Delivered to Load* (Potência Entregue à Carga)

PV: *Photovoltaic* (Células Fotovoltáicas)

RSSF: Rede de Sensores Sem Fio

WPT: *Wireless Power Transfer* (Transferência de Energias sem fio)

WSN: *Wireless Sensos Network* (Rede de Sensores Sem Fio)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	14
2.1	REDE DE SENSORES SEM FIO.....	14
2.1.1	Nó sensor.....	15
2.1.2	Nó sorvedouro.....	15
2.1.3	Estação Base.....	15
2.1.4	Aplicações.....	15
2.2	<i>ENERGY HARVESTING</i>	16
2.3	SUPERCAPACITORES.....	17
2.4	CÉLULAS FOTOVOLTAICAS (PV).....	19
2.5	TRANSFERÊNCIA DE ENERGIA SEM FIO - WPT.....	21
3	MATERIAS UTILIZADOS.....	23
3.1	STM300U.....	23
3.1.1	Modos de Operação.....	24
3.1.2	Charge Control Output (CCO).....	24
3.1.3	DolphinStudio.....	25
3.2	SENSOR INERCIAL.....	26
3.3	PAINEL SOLAR.....	27
3.4	BOBINAS TX E RX.....	28
3.5	DIMENSIONAMENTO E ESCOLHA DO SUPERCAPACITOR.....	29
4	DESENVOLVIMENTO.....	31
4.1	DESENVOLVIMENTO DO <i>LINK</i> INDUTIVO.....	31
4.1.1	Driver.....	31
4.1.2	Rede de Compensação.....	32
4.2	COLHEITA DE ENERGIA.....	35
4.2.1	Etapa de Retificação.....	36
4.2.2	Chave de controle de Armazenamento.....	37
4.2.3	Proteção das Fontes.....	37
4.2.4	Proteção de Subtensão.....	37
4.2.5	Proteção de Sobretensão.....	37
4.3	DESENVOLVIMENTO DO SENSOR DE QUEDA.....	38

4.3.1 Detecção de queda	38
4.3.2 Firmware	39
4.3.3 Hardware.....	40
5 TESTES PRÁTICOS E RESULTADOS.....	42
5.1 TESTE DA REDE DE COMPENSAÇÃO	42
5.2 SIMULAÇÃO DO CIRCUITO DE COLHEITA DE ENERGIA.....	45
5.3 CARREGAMENTO DO SUPERCAPACITOR PELO PV	46
5.4 CARREGAMENTO DO SUPERCAPACITOR POR WPT.....	47
5.5 TESTE DE CONSUMO.....	49
5.5.1 Curva de descarga do supercapacitor	53
5.6 ESTAÇÃO BASE E ENSAIOS DE QUEDA.....	54
6 CONCLUSÕES.....	55
6.1 TRABALHOS FUTUROS	56
REFERÊNCIAS	57
ANEXO A: CÓDIGO PRINCIPAL DO FIRMWARE DO RÁDIO	60

1 INTRODUÇÃO

Quedas e suas lesões resultantes constituem um problema enfrentado em países onde ocorre expressivo envelhecimento populacional. As quedas ocorrem devido à perda de equilíbrio postural e podem ser decorrentes tanto de problemas primários do sistema osteoarticular e/ou neurológico quanto de uma condição clínica adversa que afete secundariamente os mecanismos do equilíbrio e estabilidade. Alguns estudos prospectivos indicam que 30% a 60% da população da comunidade com mais de 65 anos eventualmente sofre uma queda a cada ano e metade sofre quedas múltiplas. Aproximadamente 40% a 60% destes episódios levam a algum tipo de lesão, sendo 30% a 50% de menor gravidade, 5% a 6% lesões mais graves (não incluindo fraturas) e 5% de fraturas. (BUKSMAN et al., 2008).

Na maioria das situações de queda, a principal fonte de lesões é devida ao alto impacto. Ocasionalmente, o resgate médico atrasado pode piorar a situação. Isso significa que, quanto mais rápido o resgate possa vir, menores os riscos que os lesionados enfrentarão. Isso enfatiza a importância de monitorar os indivíduos em risco de queda, detectar quedas e implementar estratégias preventivas para minimizar o risco de quedas ao alocar uma intervenção adequada e oportuna quando possível.

A miniaturização da eletrônica possibilitou o desenvolvimento de componentes de baixo consumo de energia, e assim dispositivos eletrônicos portáteis com extensa autonomia. Esse progresso da tecnologia, trouxe mais possibilidades para nos ajudar a proteger os idosos. Hoje em dia já existe uma gama de dispositivos no mercado (Figura 1). Esses dispositivos monitoram o acontecimento de quedas, sono, pressão arterial, batimentos cardíacos e até mesmo possuem um botão de emergência para o caso de o idoso querer pedir ajuda.

Figura 1 - Dispositivos para monitoramento de idosos existentes no mercado.



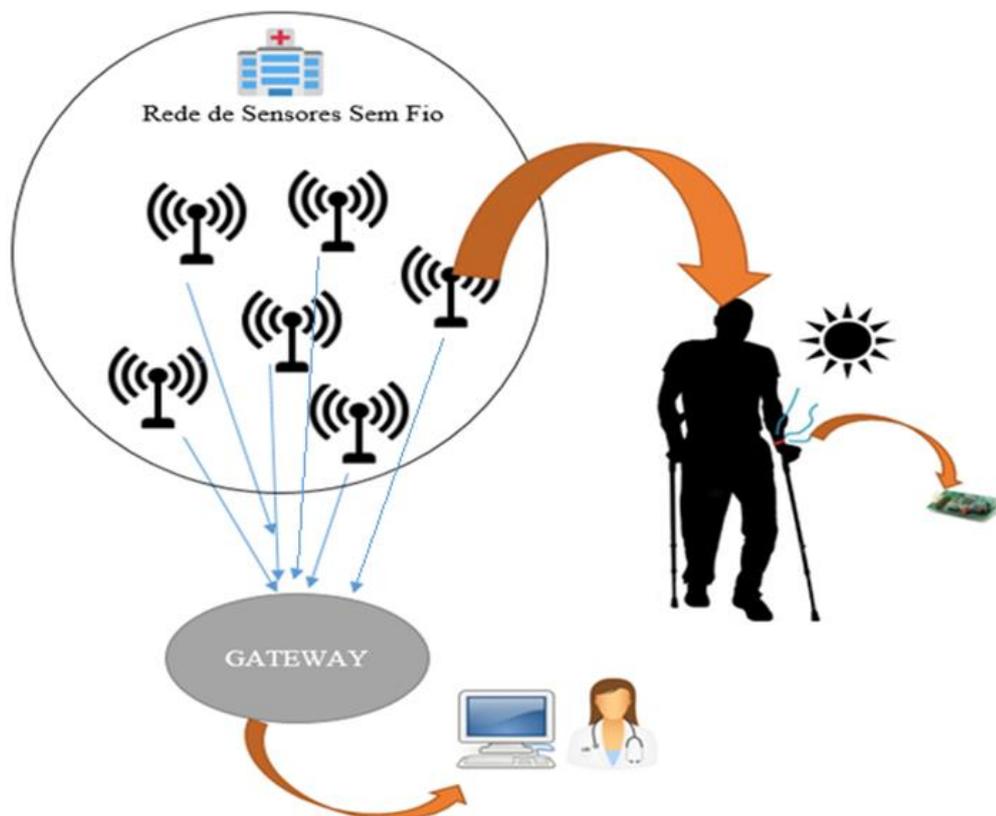
Fonte: Adaptado pelo autor baseado em IRISSENIOR, 2017

Dado o problema exposto e a apresentação de soluções já existentes, propõe-se neste trabalho, o desenvolvimento de um protótipo de um sistema computacional para monitoramento de indivíduos em risco de quedas.

O dispositivo conta com um sistema de colheita de energia, onde a mesma é proveniente de transferência de energia sem fio (WPT – *Wireless Power Transfer*) e de um painel fotovoltaico tipo *indoor* (PV – *Photovoltaic*).

O dispositivo utiliza rádio frequência para comunicação em ultrabaixo consumo (Tecnologia EnOcean), e comporta-se como um nó sensor de uma rede de sensores sem fio (RSSF ou WSN – *Wireless Sensors Network*) que pode ser implementada, por exemplo, em um hospital, asilo, clínica de fisioterapia ou até mesmo na casa da pessoa monitorada.

A Figura 2 representa o sistema dentro de um possível contexto.



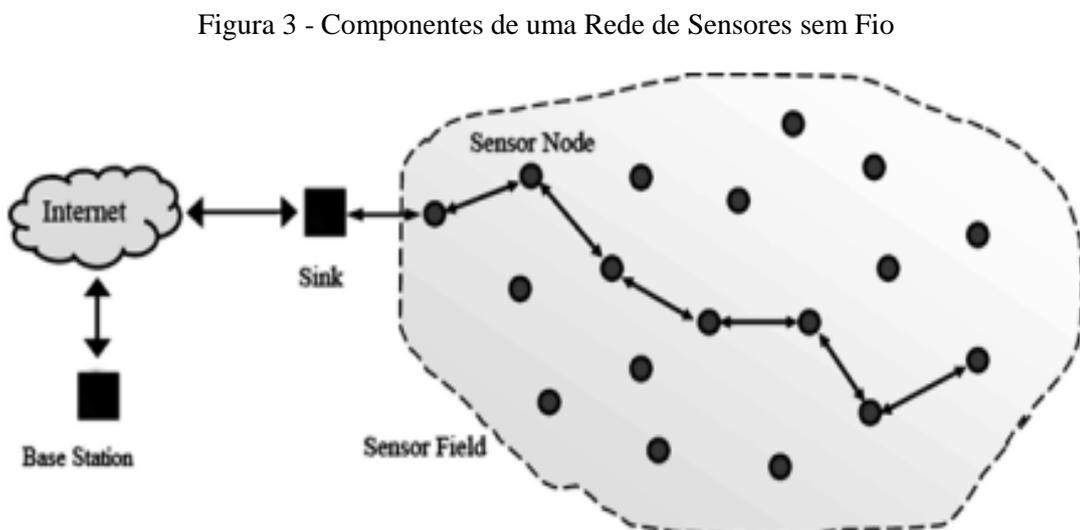
Fonte: Elaborado pelo Autor (2017)

2 REVISÃO DE LITERATURA

Como passo inicial para o desenvolvimento deste projeto, é necessário introduzir e definir os conceitos utilizados para fundamentar a base do trabalho. Primeiramente apresenta-se uma básica introdução às RSSF's. Após isso, é exposto o conceito de “*Energy Harvesting*” (colheita de energia, em inglês) e supercapacitores. E por fim, é mostrado um pouco a respeito das fontes de energia utilizadas. Com isso o leitor está apto a entender o processo de desenvolvimento do trabalho.

2.1 Rede de Sensores sem Fio

As redes de sensores sem fio permitem a comunicação entre dispositivos por meio da propagação ondas eletromagnéticas. Elas oferecem mobilidade, velocidade e necessitam menor manutenção do que as redes cabeadas. (WILAMOWSKI; IRWIN, 2011).



Fonte: AHMED et al., 2015

A Figura 3 mostra uma rede de sensores típica que compreende:

2.1.1 Nó sensor

Os nós sensores são responsáveis pela coleta de dados e roteamento desta informação para um nó sorvedouro. Os nós sensores são formados tipicamente por alguns componentes: um sensor, um processador, uma fonte de energia (alimentação direta, bateria, sistema de colheita de energia, etc.) e um transceptor.

2.1.2 Nó sorvedouro

Um nó sorvedouro tem a tarefa específica de receber, processar e armazenar dados dos outros nós sensores, sendo chamado também de nó coletor. Ele serve para reduzir o número total de mensagens que precisam ser enviadas, reduzindo, assim, a energia total requisitada pela rede.

2.1.3 Estação Base

Uma estação base, em contraste com um nó sensor, possui muito mais poder computacional, memória maior e muitas vezes está conectado a uma fonte de energia mais potente. Ela é a parte em que os dados coletados são armazenados e transformados em informações úteis para o usuário final, fornecendo uma interface para o usuário interagir localmente ou até mesmo enviando os dados para um servidor remoto através da Internet, no contexto da Internet das Coisas.

2.1.4 Aplicações

Segundo (AHMED et al., 2015) o avanço das RSSF's oferece novas oportunidades nos sistemas de saúde. No método tradicional, o paciente deve consultar um médico em intervalos regulares e relatar os sintomas ao médico. Mas, em um rede sem fio doméstica inteligente, os dados são coletados com base em especificações fisiológicas e estes fornecem registros contínuos para auxiliar no diagnóstico médico. Este método também é usado para medicina de emergência e preventiva.

2.2 Energy Harvesting

Os nós sensores de uma RSSF podem ser alimentados com energia provinda do ambiente, logo, em redes com alto número de nós sensores, torna-se significativo e econômico alimentar esses dispositivos dessa forma, evitando-se o gasto com baterias e substituição das mesmas. Apesar deste trabalho desenvolver apenas um nó sensor, este conceito será aplicado, sendo assim a colheita de energia será uma das fontes de alimentação do dispositivo.

São diversas as fontes de energia disponíveis no ambiente, como por exemplo, luz, calor e movimento. Para que a energia possa ser utilizada, ela deve primeiro ser convertida em carga ou corrente elétrica. Como exemplo, através de conversores de energia apropriados, como células solares ou elementos *Seebeck*. A seguir, um supercapacitor pode ser utilizado como um armazenador de energia para que forneça os picos de potência necessário para transmitir e receber dados através de uma RSSF (BACH, 2011).

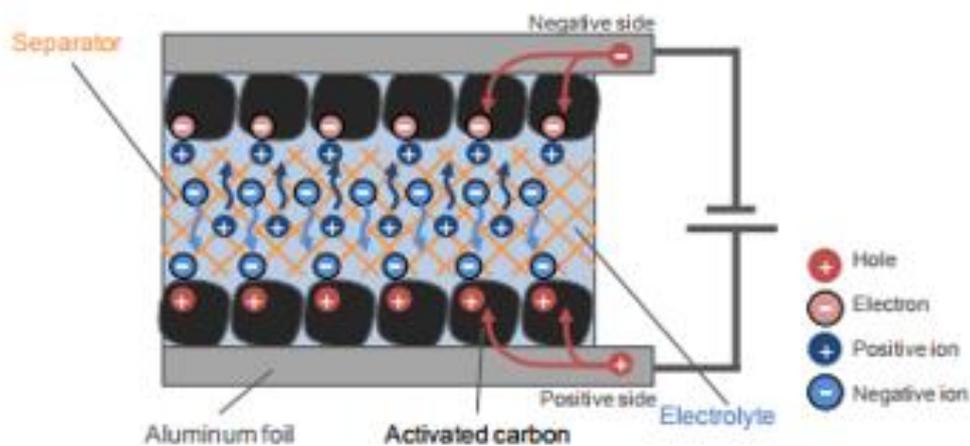
Para a colheita de energia, são usados dois tipos de armazenamentos: um de curto prazo (capacitor de baixa capacitância), para funcionamento em situações em que há energia abundante no ambiente; e um de longo prazo (supercapacitor), para situações em que a energia seja escassa por longos períodos. O armazenamento curto é carregado rapidamente, já o longo, carrega lentamente, mas uma vez carregado, pode fornecer uma grande capacidade para o momento em que não há energia disponível no ambiente. (BACH, 2011)

2.3 Supercapacitores

Os supercapacitores mais comuns são os chamados de EDLCs - *Electrical Double Layer Capacitors*, e diferem dos capacitores tradicionais por suas altas capacitâncias. Eles são comumente usados para armazenar energia em nós sensores de RSSF's ou como *backup* de memórias. Além disso, os supercapacitores possuem algumas vantagens, pois apresentam maior densidade de potência que as baterias, não requerem circuitos especiais de carga e tem uma longa vida operacional. (WEDDELL et al., 2011)

Segundo (MURATA MANUFACTURING, 2017) ao contrário dos capacitores cerâmicos ou capacitores eletrolíticos, os supercapacitores não têm dielétrico convencional entre os eletrodos positivos e negativos. Em vez disso, ele possui um eletrólito (sólido ou líquido) com íons positivos e íons negativos (Figura 4). Um estado elétrico chamado "camada elétrica dupla" funciona como um dielétrico e proporciona a alta capacitância. Ele é um par de elétrons e íons positivos ou um par de 'lacunas elétricas' e íons negativos que se formaram nas superfícies dos eletrodos. O valor de capacitância de um supercapacitor é proporcional à superfície de seus eletrodos. Dessa forma, para obter-se uma alta capacitância, em muitos casos, é utilizado carbono poroso como material para o eletrodo, pois possuem uma área de superfície elevada.

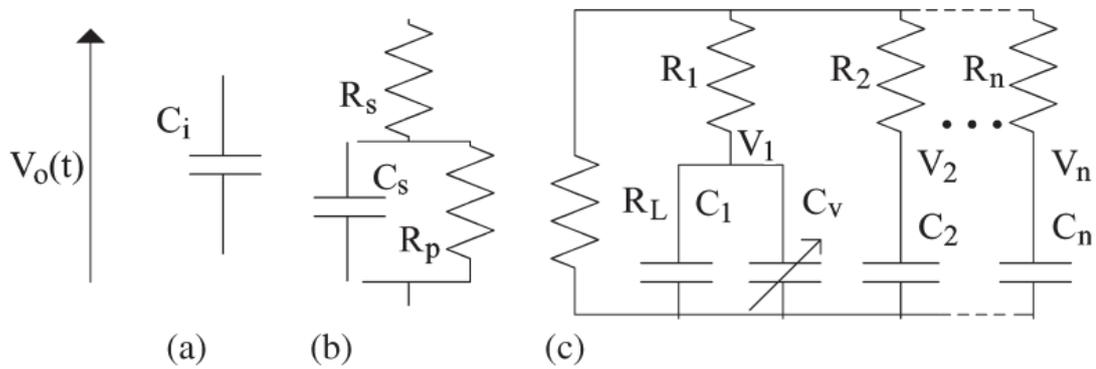
Figura 4 - Supercapacitor



Fonte: MURATA MANUFACTURING, 2017

Conforme mostrado em (WEDDELL et al., 2011), o supercapacitor pode ser modelado eletricamente de três formas. A primeira, de uma forma ideal, como o comportamento de capacitores convencionais ideais (C_i na Figura 5a). A segunda como uma capacitância ideal junto com uma resistência série equivalente (ESR) e uma resistência paralela equivalente (C_s , R_p e R_s respectivamente na Figura 5b). Uma terceira forma é apresentada na Figura 5c, que é modelo mais completo composto por n ramificações.

Figura 5 - Sensibilidade espectral característica de células solares

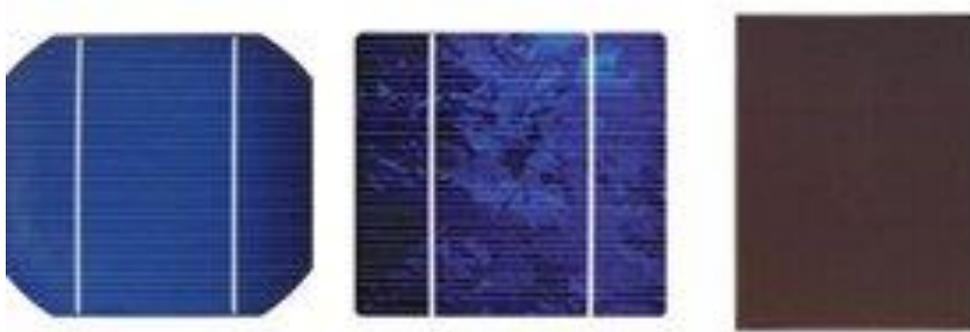


Fonte: WEDDELL et al, 2011

2.4 Células Fotovoltaicas (PV)

Um dos exemplos mais comuns de conversores de energia é a célula solar. Sua eficiência depende da intensidade da luz, da radiação espectral de uma fonte de luz e de sua tecnologia (BACH, 2015). Atualmente, estão disponíveis comercialmente três tipos de painéis fotovoltaicos (Figura 6): os constituídos por células fotovoltaicas de silício policristalino, os de células de silício monocristalino e os de células de silício amorfo (ou filme fino).

Figura 6 - Célula monocristalina, policristalina e filme fino



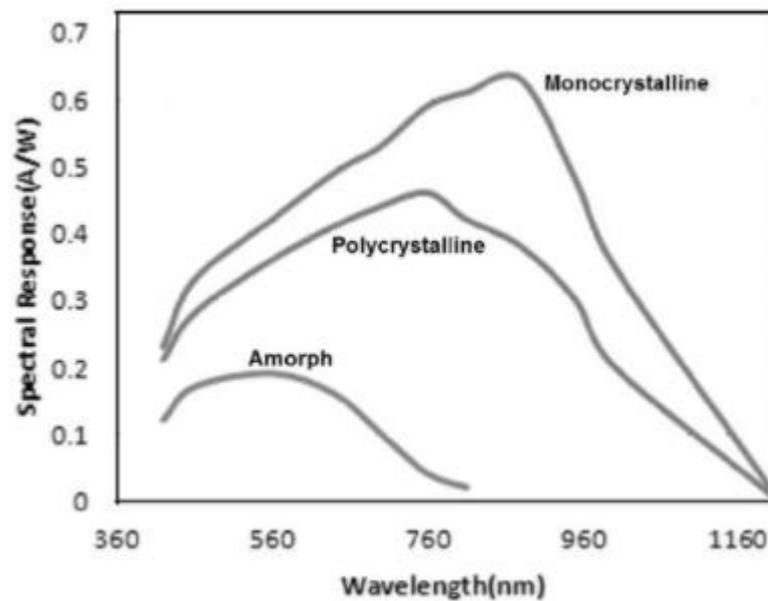
Fonte: SUNFLOWER SOLAR, 2017

Os painéis solares monocristalinos possuem a eficiência mais alta dentre as tecnologias comercialmente viáveis atualmente. A eficiência dos painéis solares monocristalinos está hoje entre 14% e 21%. Estes tendem a funcionar melhor do que painéis solares policristalinos em condições de pouca luz. (PORTAL SOLAR, 2017).

Embora as células solares poli e monocristalinas convencionais sejam cerca de duas vezes mais eficientes para condições de luz ótimas (ao ar livre), células amorfas são, de longe, melhores em baixos níveis de luz (interior), que é o que mostra a Figura 7. Assim, na comparação em um ciclo energético de 24 horas, elas são melhores, porque também são eficientes em luz artificial fraca, luz do início da manhã ou luz noturna. (BACH, 2015)

A Figura 7 apresenta uma comparação da resposta espectral, que segundo (POURAKBAR SAFFAR, 2014) é um parâmetro que determina a taxa de portadores coletados em relação ao fluxo de fótons para um determinado comprimento de onda. Existem picos de resposta espectral para células solares de silício amorfo em 600nm e para silício monocristalino em 900 nm, o que condiz com o que foi dito anteriormente sobre o tipo de luz incidente e a eficiência conforme o tipo de silício.

Figura 7 - Sensibilidade espectral característica de células solares



Fonte: POURAKBAR SAFFAR, 2014

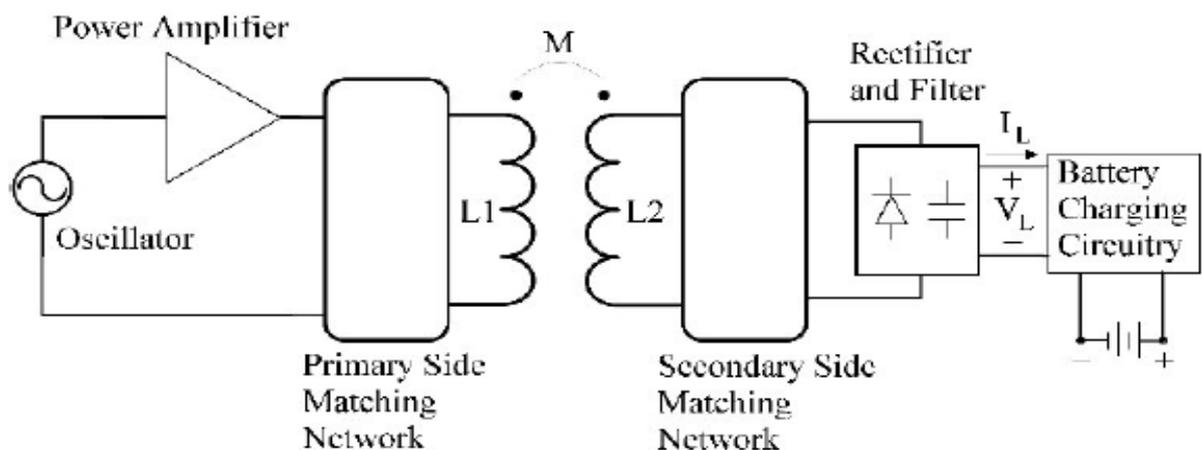
2.5 Transferência de Energia sem fio - WPT

A segunda fonte de energia deste trabalho é provinda da transferência de energia sem fio que Segundo (PORTO, 2015) é uma técnica para transferir energia para dispositivos remotos. A técnica WPT tem sido utilizada em várias aplicações, como implantes biomédicos, RFID, e eletrônicos de consumo, em estações de recarga para dispositivos móveis. Esta técnica também é usada em aplicações de alta potência, como método de recarga de baterias de veículos elétricos.

As redes de sensores sem fio podem tirar proveito da transferência de energia sem fio. Existem casos em que o nó sensor está em um local de difícil acesso ou por algum motivo, não é possível efetuar a troca de baterias. Desta forma, o uso de um sistema WPT e colheita de energia pode ser uma solução.

A transferência de energia sem fio é realizada por duas bobinas acopladas magneticamente, que são representadas por duas indutâncias, $L1$ (bobina primária ou TX) e $L2$ (bobina secundária ou RX) e uma indutância mútua M , como mostrado na Figura 8.

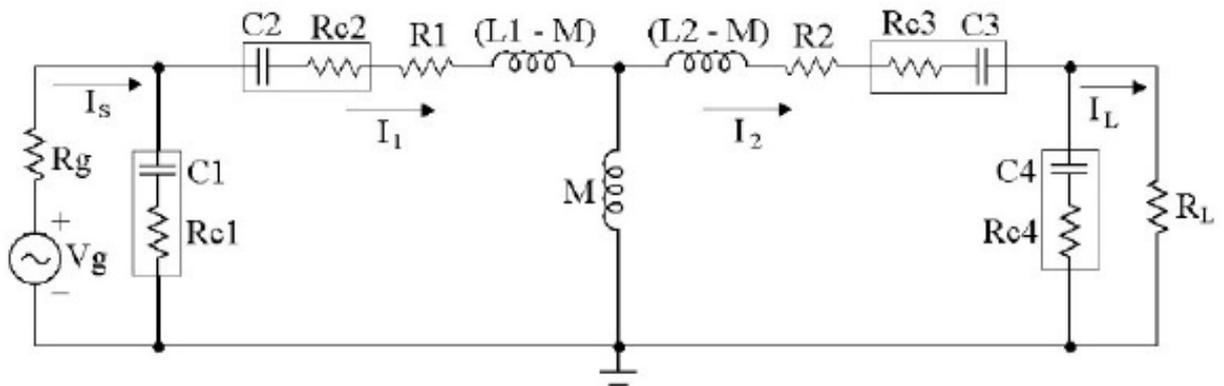
Figura 8 - Link Indutivo



Fonte: PORTO, 2015

Para compensar a reatância indutiva do *link* e para melhorar a potência fornecida à carga, é colocada uma rede de capacitores entre a fonte de tensão e a bobina primária, e outra rede de capacitores é colocada entre a bobina secundária e a carga. Um link indutivo compensado por quatro capacitores é apresentado na Figura 9. Onde C_x é a capacitância de cada capacitor da rede e R_{cx} é sua a resistência série equivalente.

Figura 9 - Circuito T equivalente do *link* Indutivo compensado com a rede capacitiva



Fonte: PORTO, 2015

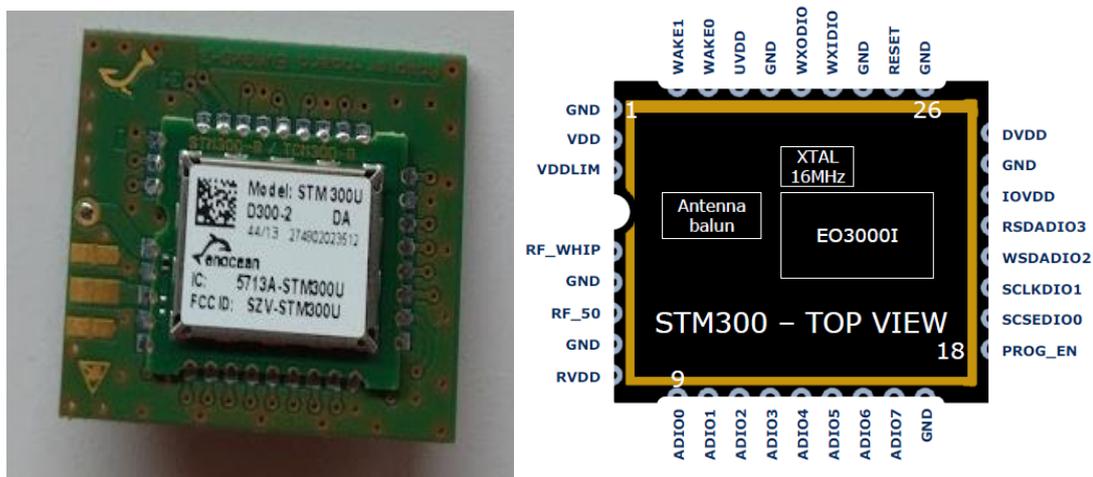
3 MATERIAS UTILIZADOS

Uma vez exposta a base teórica necessária para entendimento do trabalho, esta seção apresenta os materiais importantes para o desenvolvimento do dispositivo.

3.1 STM300U

Para realizar a comunicação sem fio utilizou-se o STM300U (Figura 10), que é um módulo transceptor de ultrabaixo consumo em conformidade com o padrão EnOcean que opera na faixa de 902,875 MHz (Sub-GHz).

Figura 10 - Módulo STM300U

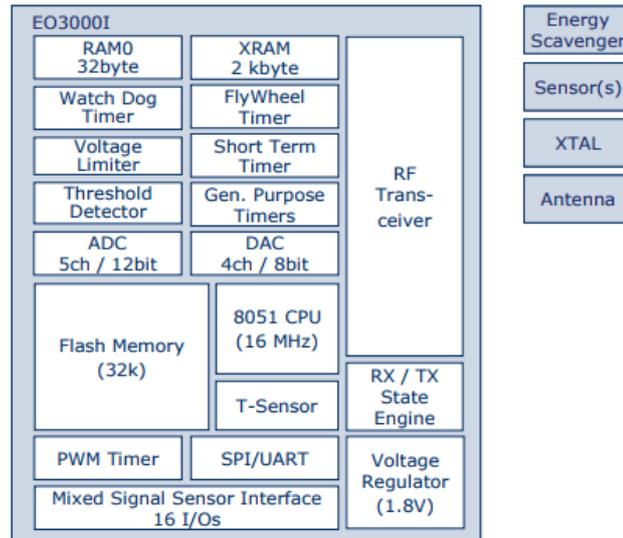


Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

O módulo utiliza o *System On Chip* (SoC) eo3000i, que compreende em um transceptor RF, um núcleo microcontrolador 8051 com periféricos, 32kB FLASH, 2kB RAM e vários blocos exclusivos para gerenciamento de energia como vemos no diagrama de blocos da Figura 11.

O módulo STM300U tem previamente configurado, de acordo com o padrão EnOcean, um comportamento pré-estabelecido. Porém, é possível alterar o seu *Firmware* e programar os seus periféricos da maneira que for conveniente para uma nova aplicação.

Figura 11 - Diagrama de blocos do EO3000I



Fonte: ENOCEAN, 2017

3.1.1 Modos de Operação

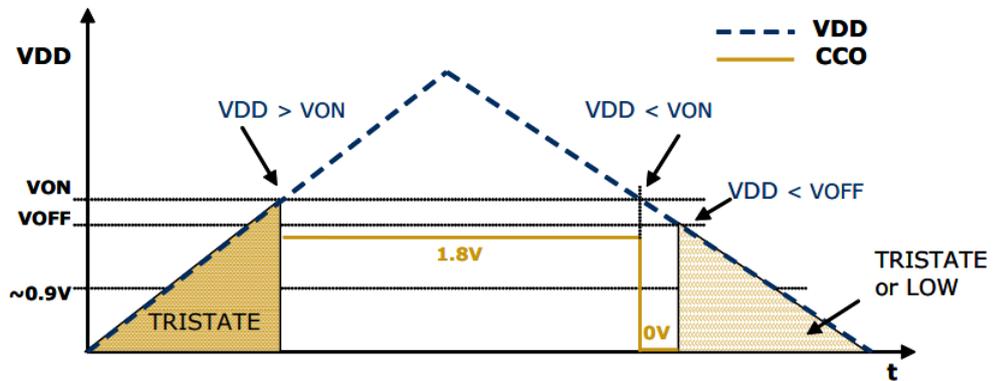
Além de um modo “OFF”, o eo3000i possui um modo ativo (modo CPU) e quatro modos *stand-by/sleep*. Os quatro modos utilizam vários temporizadores e fontes de *clock* diferentes. Desta forma, é possível selecionar a estratégia mais econômica em função dos requisitos da aplicação.

3.1.2 Charge Control Output (CCO)

O módulo STM 300U possui um pino que fornece um sinal indicador de detecção de alimentação. Seu comportamento pode ser visto na Figura 12.

Ao começar a ser alimentado, o pino fica em *tristate* até que a tensão de alimentação VDD seja maior que V_{ON} (*threshold*, tipicamente 2,45V), então o sinal de CCO vai para nível alto. Se, então, o sinal cair abaixo de V_{ON} , o sinal de CCO vai para nível baixo, e, se continuar caindo e ficar abaixo de V_{OFF} (tipicamente 1,9V), o CCO fica em nível baixo ou *tristate*.

Figura 12 - Comportamento do pino CCO

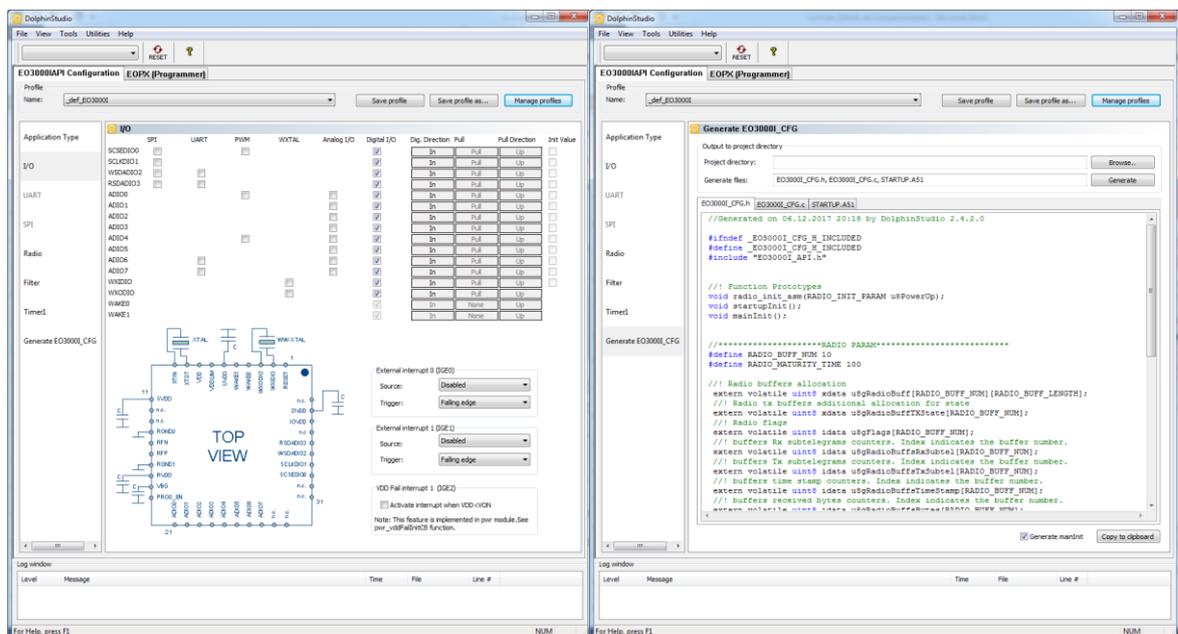


Fonte: ENOCEAN, 2017

3.1.3 DolphinStudio

O *software* DolphinStudio é uma ferramenta de desenvolvimento que permite ao usuário uma fácil programação e configuração do eo3000i. Ele apresenta diversas utilidades, entre elas, gerar os arquivos que são necessários incluir na pasta do projeto do *firmware* para ocorrer o funcionamento correto das portas, *timers* e outros periféricos do módulo.

Figura 13 - DolphinStudio



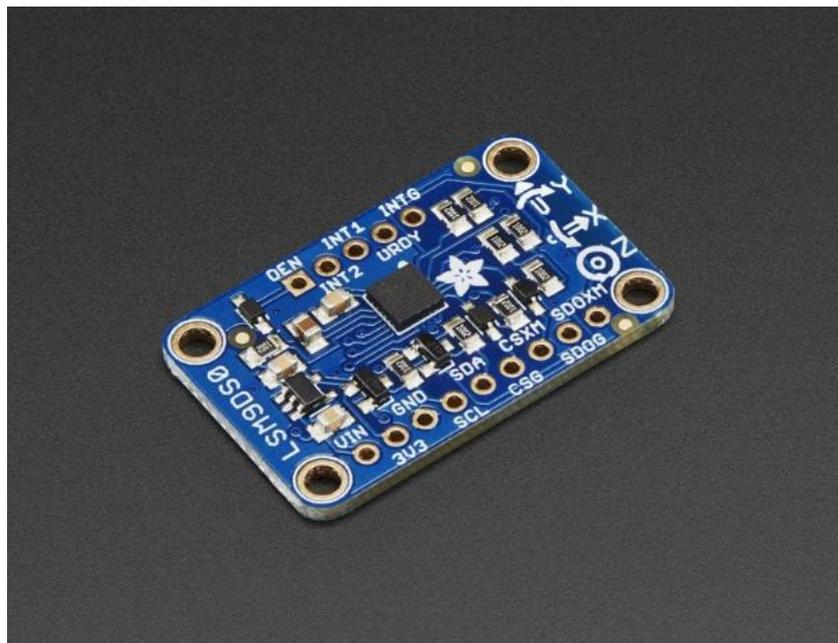
Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

3.2 Sensor Inercial

Para realizar a detecção de queda, foi utilizado o LSM9DS0 da STmicroelectronics (Figura 14), que é um sistema que combina acelerômetro, giroscópio e magnetômetro. O LSM9DS0 tem escala selecionável de $\pm 2g/\pm 4g/\pm 6g/\pm 8g/\pm 16g$ para o acelerômetro, $\pm 245/\pm 500/\pm 2000$ dps (graus por segundo) para o giroscópio e $\pm 2/\pm 4/\pm 8/\pm 12$ Gauss para o magnetômetro.

O LSM9DS0 inclui um barramento de comunicação serial I²C que suporta o modo de comunicação padrão (100 kHz) e modo rápido (400 kHz). O sistema pode ser configurado para gerar sinais de interrupções em pinos dedicados e seus sensores podem ser ligados ou desligados separadamente possibilitando, assim, um gerenciamento aprofundado de energia.

Figura 14 - LSM9DS0



Fonte: ADAFRUIT, 2017

3.3 Painel Solar

Para realizar a colheita de energia solar, foi utilizado o KXOB22-01X8F (Figura 15) que é uma painel solar extremamente leve e compacto da linha IXOLAR™ SolarBITS da IXYS. Esse PV é feito de silício monocristalino e suas características elétricas são apresentadas na Tabela 1 e Figura 16.

Figura 15 - KXOB22-01X8F



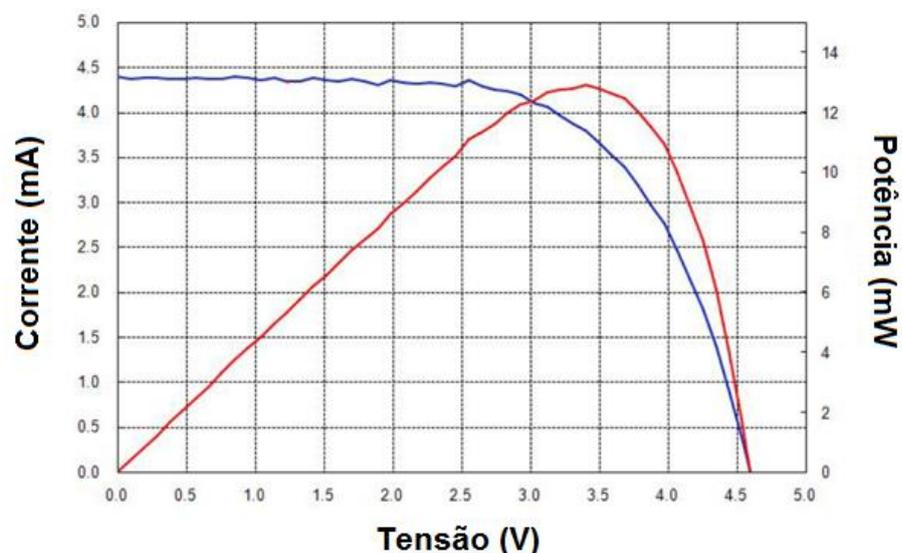
Fonte: IXYS CORPORATION, 2016

Tabela 1 - Características Elétricas do KXOB22-01X8F

Tensão de Circuito Aberto (V)	Corrente de Curto Circuito (mA)	Tensão Típica @P _{mpp} (V)	Corrente Típica @P _{mpp} (mA)
4,7	4,4	3,4	3,8

Fonte: (IXYS CORPORATION, 2016)

Figura 16 - Características de Corrente-Tensão em Azul e Potência-Tensão em Vermelho



Fonte: IXYS CORPORATION, 2016

3.4 Bobinas TX e RX

Para o desenvolvimento do *link* indutivo, foram utilizadas como bobina transmissora, modelo WT-505060-20K2-A10-G da TDK Corporation (Figura 17) e o modelo IWAS-3827EC-50 da Vishay (Figura 18) como bobina receptora.

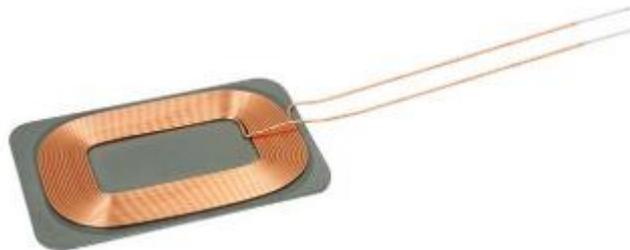
A Tabela 2 apresenta uma comparação entre os valores de indutância própria e resistência intrínsecas informadas pelos seus respectivos fabricantes.

Figura 17 - WT-505060-20K2-A10-G



Fonte: TDK CORPORATION, 2012.

Figura 18 - IWAS-3827EC-50



Fonte: VISHAY, 2016

Tabela 2 - Características das Bobinas indicadas pelos fabricantes

Bobina	Indutância (μH)	Resistencia ($\text{m}\Omega$)
RX	24 @ 100khz	100
TX	10,7 @ 200khz	183

Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

3.5 Dimensionamento e escolha do supercapacitor

Uma maneira simples para dimensionar o supercapacitor é calcular a energia necessária para suportar o pico de energia necessário para transmitir utilizando a Equação 1.

$$E = \frac{1}{2} C (V_{inicial}^2 - V_{final}^2) \quad (1)$$

onde, E é a energia [J], C é a capacitância [F], $V_{inicial}$ tensão [V] do supercapacitor logo antes do “burst” de potência e V_{final} [V] logo depois. Com o objetivo de chegar no valor de capacitância, isola-se C , obtendo:

$$C = \frac{2E}{(V_{inicial}^2 - V_{final}^2)} \quad (2)$$

Entretanto, esta só é uma boa aproximação se a Equação 3 é válida. Isto é, a queda de tensão causada pela corrente consumida durante a transmissão vezes a ESR do capacitor for muito menor que V_{final} :

$$I_{Load} \times ESR \ll V_{final} \quad (3)$$

onde, I_{Load} é a corrente de carga [A] e ESR é a resistência série equivalente do supercapacitor [Ω].

O cálculo dado pela Equação 4 leva em consideração essa queda. Ele considera a corrente consumida de modo que o supercapacitor descarrega e a tensão nele cai, mas essa corrente de carga permanece constante.

$$V_{final} = V_{inicial} - (I_{load} \times ESR) - (I_{load} \times \frac{\Delta T_{load}}{C}) \quad (4)$$

onde, ΔT_{Load} é variação tempo [s] em que se deu a variação de tensão.

Agora, um supercapacitor pode ser selecionado com C e ESR adequados para suportar a carga para o tempo de duração necessário.

Ao buscar um supercapacitor no mercado, tentou-se encontrar um componente de baixo custo, que apresentasse um valor baixo de ESR e que a tensão fosse próxima da tensão de operação do STM300U. Dessa forma, o escolhido foi o SCCR12E105SRB da AVX, um supercapacitor de 1F, 3V e ESR de 860 mΩ.

Verificou-se o tempo para uma variação de 2,9V a 2,3V era suficiente para pelo menos uma transmissão com duração de 10 ms e consumo de 40 mA.

$$2,3 = 2,9 - (0,04 \times 0,860) - (0,04 \times \frac{T_{load}}{1}) \quad (5)$$

$$T_{load} \approx 14s \quad (6)$$

De acordo com as Equações 5 e 6, obteve-se um tempo de 5s, o que equivale a 350 transmissões de 40ms. Isso quer dizer que o supercapacitor escolhido está superdimensionado, garantindo que o mesmo mantenha um nível operacional do sensor para 350 detecções de queda.

4 DESENVOLVIMENTO

O desenvolvimento prático do trabalho é composto de três partes: a primeira é a unidade de carregamento, a qual é composta pelo *link* indutivo; a segunda é o circuito de colheita de energia, o qual é responsável pelo armazenamento das energias provenientes do *link* indutivo e do PV; e a última parte é a integração/comunicação entre rádio e o sensor inercial.

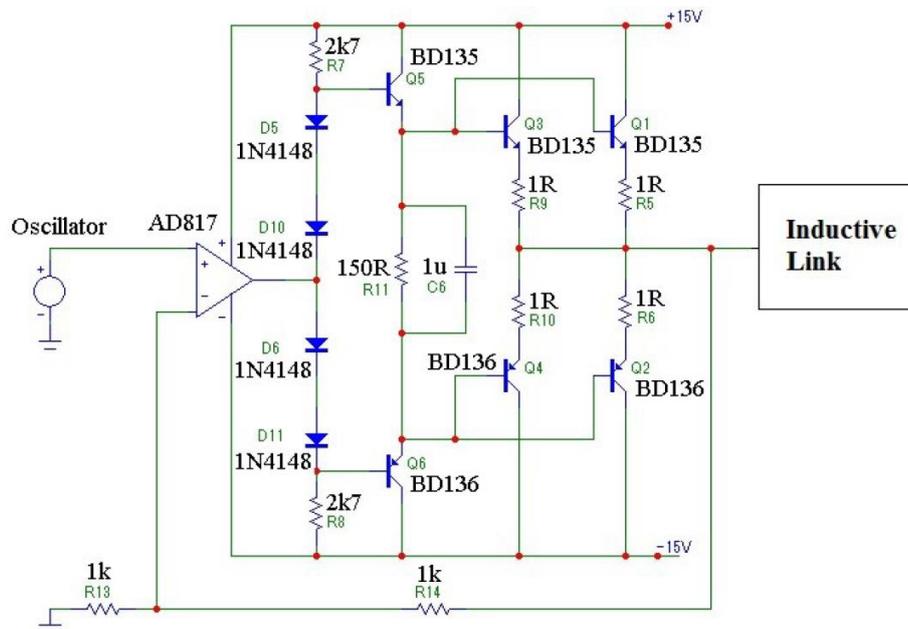
4.1 Desenvolvimento do *Link* Indutivo

O *link* indutivo possibilita o carregamento dinâmico do sistema, de forma que o indivíduo que o estiver usando possa carregar o dispositivo ao aproximá-lo de uma estação de carregamento, onde fica a bobina transmissora do sistema WPT.

4.1.1 Driver

Devido a potência de saída exigida pela carga, foi construído um circuito amplificador de potência para acionamento da bobina de TX, replicado de (PORTO, 2015), que é mostrado na Figura 19.

Figura 19 - Amplificador de potência usado como *driver* do *link* indutivo



Fonte: PORTO, 2015

4.1.2 Rede de Compensação

Com objetivo de obter a máxima potência a ser entregue à carga (PDL), foi utilizado um *software* que utiliza um algoritmo de busca baseado no método Monte Carlo (AZAMBUJA, 2013) para aproximar os melhores valores das capacitâncias da rede de compensação.

Figura 20 - *Software* para encontrar valores de referência para capacitâncias

The software interface, titled "Wireless Power Capacitor Network", is used for calculating reference values for capacitances. It features several input and output sections:

- Constantes (Constants):**
 - L_Prim: 0,0000240
 - L_Sec: 0,0000107
 - R_Prim: 0,100
 - R_Sec: 0,183
 - R_Fonte: 0,1
 - Tensao_Fonte: 5,0
 - Freq: 150000
 - k_acop: 0,2
 - R_Carga: 210
 - Iteracoes: 20000000
 - Perc_ESR: 0,15
 - Rea_Carga: 0,0
- Resultados (Results):**
 - Cap_C1: 0,000000051000
 - Cap_C2: 0,000000043000
 - Cap_C3: 0,000000680000
 - Cap_C4: 0,000000082000
 - Resistor_C1: 0,031206851587
 - Resistor_C2: 0,037012777463
 - Resistor_C3: 0,002340513869
 - Resistor_C4: 0,019409139401
 - Potencia: 9,350215367959553
 - Eficiencia: 0,723240924953199
- Cal_Pot_e_Efic (Calculate Power and Efficiency):**
 - CapC1_F: 0,000000047
 - CapC2_F: 0,000000047
 - CapC3_F: 0,000000047
 - CapC4_F: 0,000000047
 - Ind_L1_H: 0,0002184
 - CapC1_F: 0,0003114
 - CapC2_F: 1,8
 - CapC3_F: 2,276
 - CapC4_F: 0,1
 - Ind_L1_H: 5,0
 - Ind_L2_H: 50000
 - R_Ind_L1: 0,04
 - R_Ind_L2: 47
 - R_s: 0,15
 - Vs_RMS: 0,0
 - Freq_Hz: [input field]
 - k_: [input field]
 - RL_: [input field]
 - ESR_perc: [input field]
 - XL_: [input field]
 - Potencia_Saida: [input field]
 - Potencia_W: [input field]
 - Eficiencia_Saida: [input field]
 - Eficiencia_Sistema: [input field]

Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

Na Tabela 3 encontram-se os parâmetros de entrada que foram utilizados no *software*.

Tabela 3 - Parâmetros de entrada do *software*

Parâmetro	Valor
L_Prim	0,0000240
L_Sec	0,000107
R_Prim	0,100
R_Sec	0,183
R_Fonte	0,1
Tensao_Fonte	5
Freq	150000
K_acop	0,2
R_Carga	210
Iterações	20000000
Perc_ESR	0,15
Reat_Carga	0

Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

Os valores de capacitâncias que maximizam a PDL encontram-se na Tabela 4. Vale salientar que a numeração dos capacitores corresponde às mesmas apresentada na Figura 9.

Tabela 4 - Valores de Capacitância obtidas no *software*

Cap_C1	Cap_C2	Cap_C3	Cap_C4
51 pF	43 nF	680 nF	82 nF

Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

Os valores de capacitância que de fato foram utilizados no projeto, estão presentes na Tabela 5.

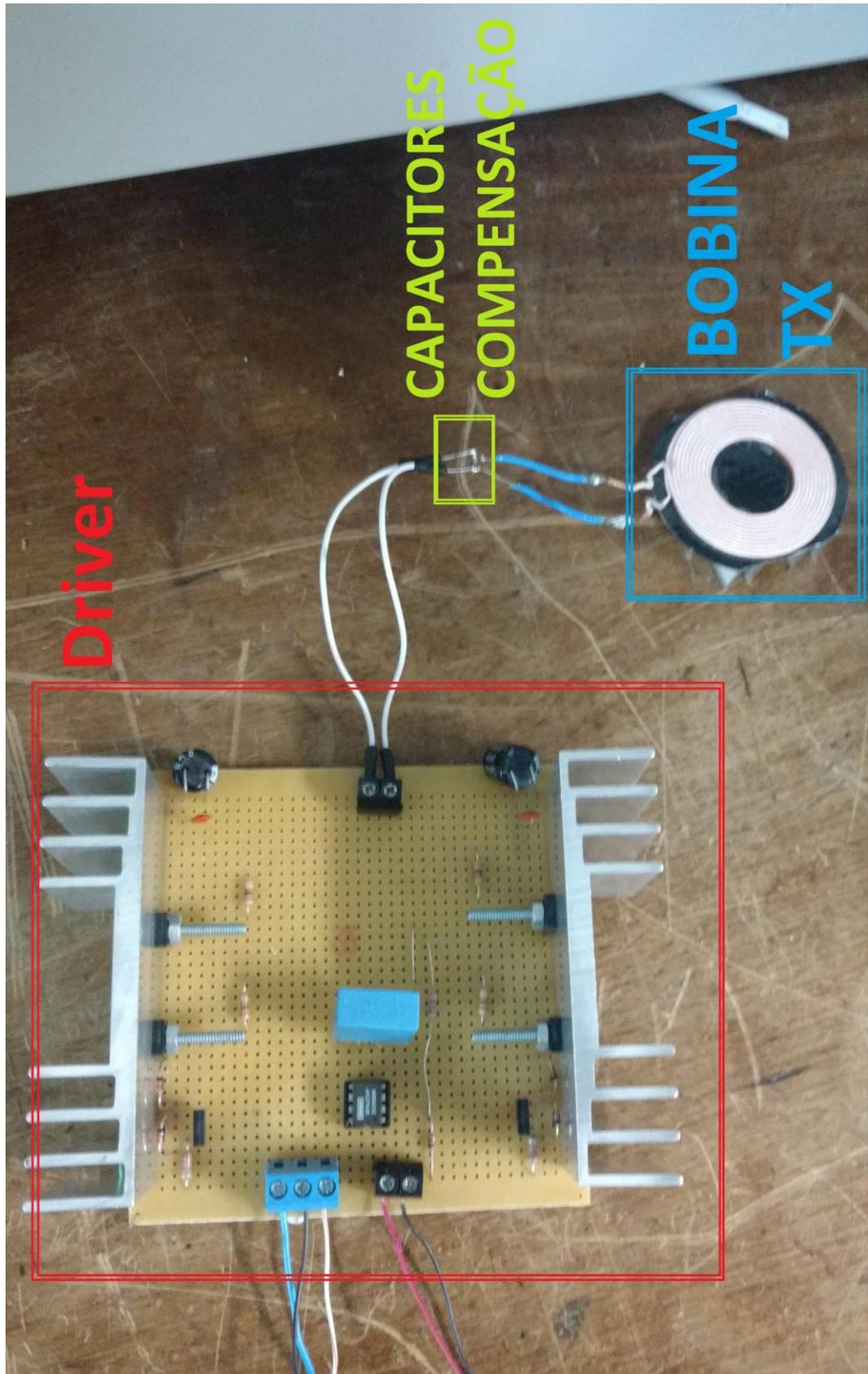
Tabela 5 - Valores de Capacitância utilizadas

Cap_C1	Cap_C2	Cap_C3	Cap_C4
51 pF	43 nF	10 uF	75 nF

Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

A Figura 21 mostra uma foto do protótipo de estação carregadora desenvolvido.

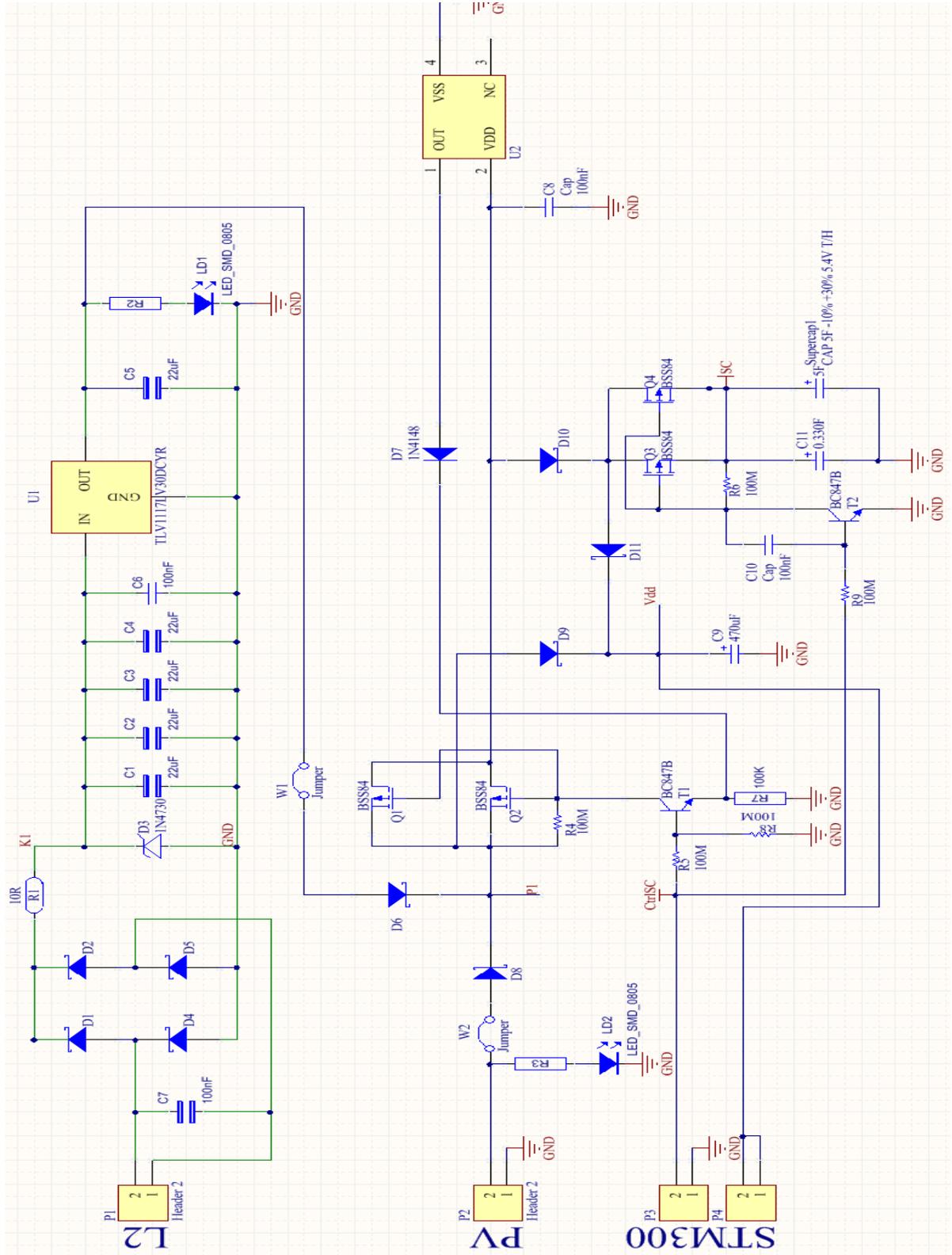
Figura 21 - Estação de Carregamento



Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

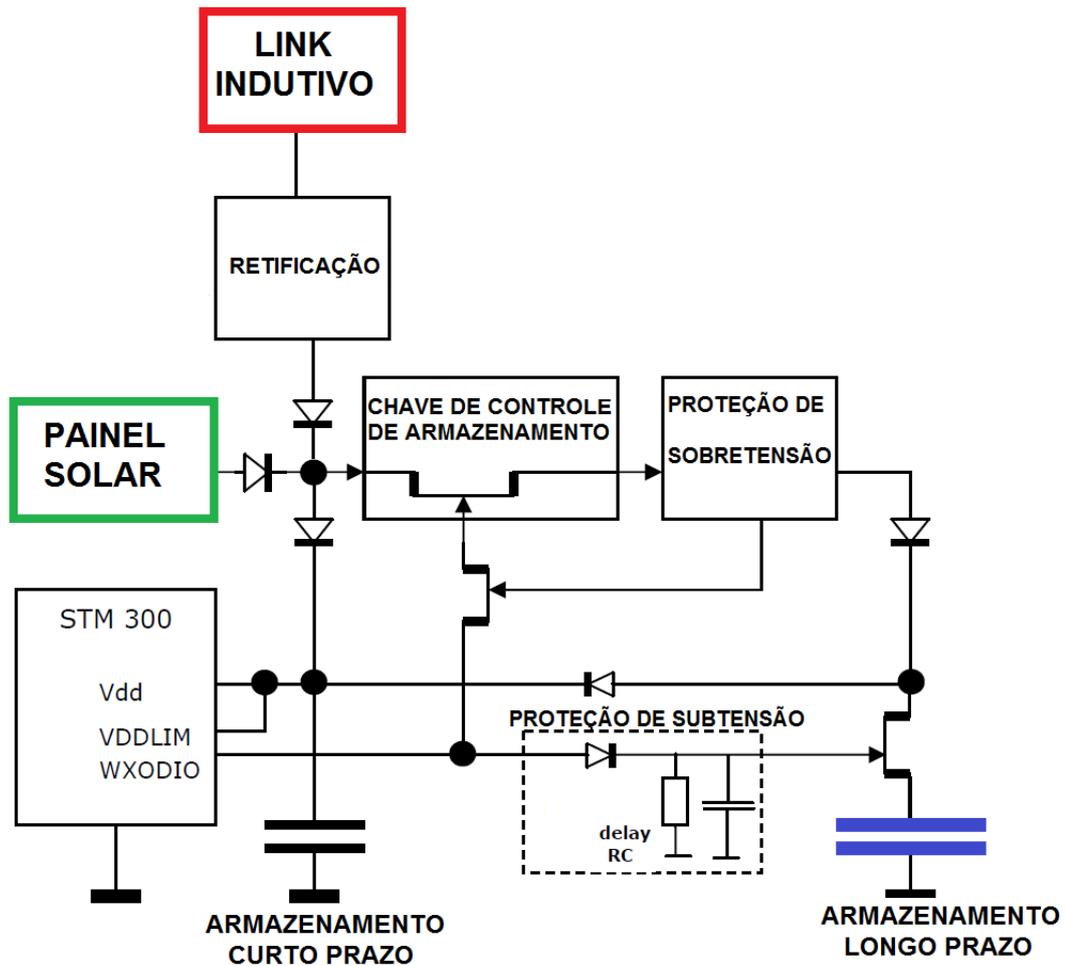
4.2 Colheita de Energia

Figura 22 - Esquemático completo do circuito para colheita de energia



Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

Figura 23 - Diagrama de Blocos do Circuito de Colheita de Energia



Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

O circuito para colheita de energia da Figura 22 foi baseado em (BACH,2011), com o acréscimo de uma etapa de retificação e está representada por um diagrama de blocos na Figura 23. Segue a seguir, uma explicação acerca da funcionalidade de cada etapa do circuito.

4.2.1 Etapa de Retificação

A bobina RX é conectada no conector P1. Esta recebe o sinal proveniente do *link* indutivo. Este sinal é senoidal, e para carregar os capacitores, é necessário que o mesmo passe por uma ponte retificadora (diodos D1, D2, D4 e D5) e por uma etapa de regulação (D3 - Zener 3,9V e U1 - TLV1117LV30DCYR), a fim de manter o sinal DC estável em 3V independentemente da carga acoplada. Foram adicionados também capacitores (C1 a C6) com a finalidade de diminuir o *ripple* da onda retificada.

4.2.2 Chave de controle de Armazenamento

As energias providas do PV e/ou WPT são armazenadas ou pelo supercapacitor C7 ou pelo capacitor C9.

Os transistores PMOS Q1 e Q2 são responsáveis pelo chaveamento do tipo de armazenamento. Esta troca é feita pelo uso do pino CCO do MCU, cujo funcionamento foi explicitado na seção 3.1.8. Uma vez que VDD atinge a tensão de *threshold*, o sinal de CCO vai para nível alto e, então, T1, Q1 e Q2 são ativados e o supercapacitor é carregado. Quando VDD cai abaixo de V_{ON} , a fonte de energia é trocada automaticamente de volta para o armazenamento de curto prazo.

4.2.3 Proteção das Fontes

Os diodos Schottky (D6, D8, D9 e D10) são uma proteção às fontes de energia, pois forçam o capacitor e o supercapacitor a alimentar somente o STM300U. A corrente não circula em direção às fontes em situações que elas têm nível de tensão inferior ao dos capacitores. O diodo D11 impede que o supercapacitor descarregue no capacitor de menor capacitância.

4.2.4 Proteção de Subtensão

A transmissão realizada pelo rádio gera um certo consumo, e o mesmo provoca uma queda de tensão no elemento de armazenamento. Certos tipos de supercapacitores não podem ser descarregados completamente, e para evitar isso uma proteção foi adicionada.

Quando a tensão das fontes fica abaixo de V_{ON} , CCO vai à zero, mas o par PMOS Q3 e Q4 somente vai se desligar quando C10 for totalmente carregado. Após isso, as portas de Q3 e Q4 ficam em nível alto, de modo a desacoplar o supercapacitor do capacitor de carregamento rápido, impedindo que ele descarregue por completo.

4.2.5 Proteção de Sobretensão

Segundo (MARS, 2010; BATTERY UNIVERSITY, 2017) operar o capacitor em sua tensão nominal reduz sua vida útil, no caso do supercapacitor utilizado: 3V. Assim, utiliza-se o circuito integrado S-1000C29-M5T1x (U2) que é um detector de tensão de 2,9V. Assim que a tensão no ânodo do diodo excede o limite de 2,9V, o detector de tensão gera um nível alto

em sua saída, que está conectada ao emissor de T1. A base de T1 tem tensão de polarização mais baixa do que o emissor e, portanto, o transistor fica cortado. Isso significa que Q1 e Q2 também estão cortados e, assim, a fonte de energia está desligada e o supercapacitor está protegido.

Para o desenvolvimento do protótipo proposto, foi elaborada uma placa de circuito impresso (PCB) através do software Altium Designer. A placa foi desenvolvida de modo a ser possível utilizá-la em outros projetos, em andamento e futuros.

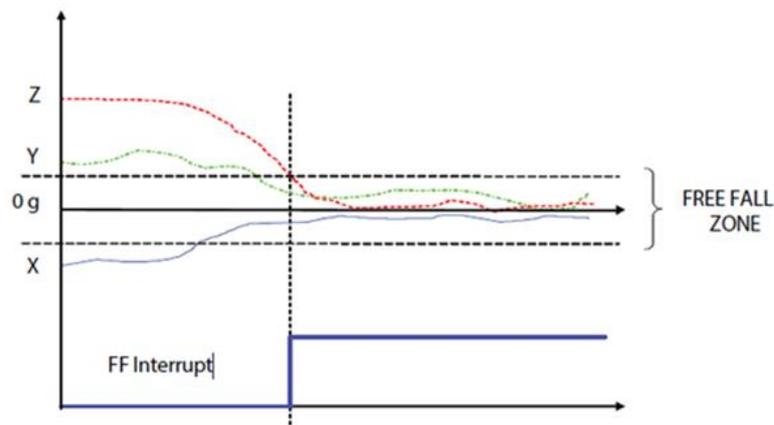
4.3 Desenvolvimento do sensor de queda

4.3.1 Detecção de queda

Com o avanço na tecnologia dos sensores de movimento, como os acelerômetros e giroscópios, diversos métodos e algoritmos para detecção de queda estão sendo estudados. Um dos métodos comumente usados é o da Transformada Discreta de Wavelet (DWT) (KHANDOKER et al., 2016) que transforma os sinais do acelerômetro e detecta quedas de acordo com a frequência do sinal. Outro método usado é o que faz uso do modelamento por *Signal Vector Magnitude* (ZHANG, T. et al, 2006). Empregado em conjunto com *machine learning* ele utiliza a soma da magnitude dos vetores de aceleração (X, Y e Z) para distinguir movimentos de alta intensidade (queda) dos movimentos cotidianos.

O método utilizado neste trabalho se baseia no fato de que quando um objeto está em queda livre, tem sua aceleração em cada eixo tendente a zero. Assim, o acelerômetro utilizado é configurado para gerar uma interrupção quando a aceleração dos três eixos estão, ao mesmo tempo, dentro de uma faixa (entre zero e um limiar).

Figura 24 - Interrupção por queda livre



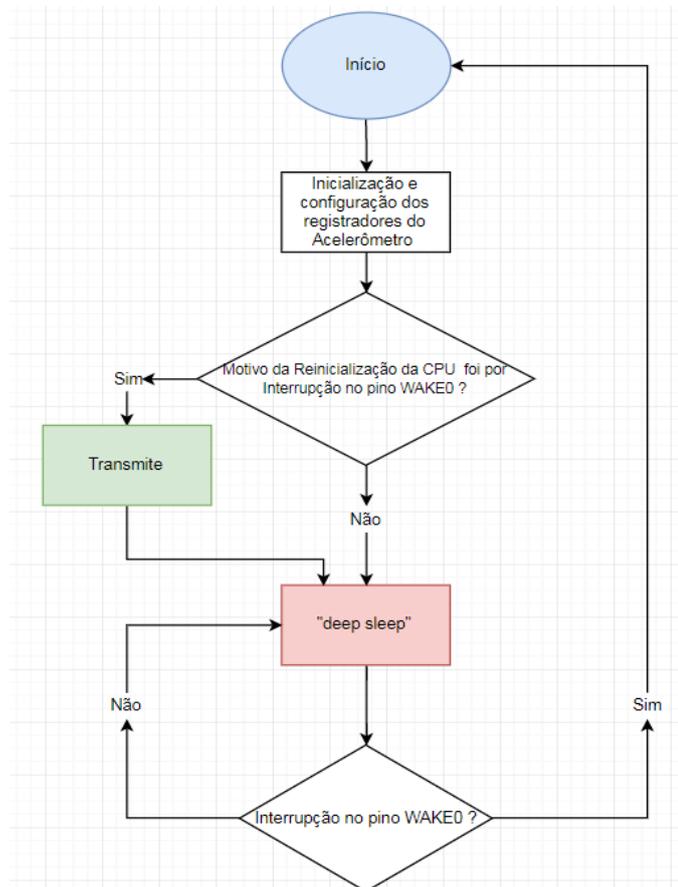
Fonte: STMICROELETRONICS, 2017

Uma vez apresentado o método para detecção de queda, será agora exposto o desenvolvimento do *firmware*.

4.3.2 Firmware

O algoritmo desenvolvido para o *firmware* do rádio é apresentado no Anexo A. Primeiramente, através da comunicação I²C, o LSM9DS0 é configurado: são ligados os sensores acelerômetros dos eixos X, Y e Z; é configurada a escala $\pm 2g$; é configurada a taxa de amostragem ODR (*output data rate*) para 3,125 Hz; é ativada a interrupção conjunta dos 3 eixos e, por fim, é feita a configuração do *threshold*. Após esta etapa de configuração do acelerômetro, é feita uma identificação da fonte de *reset* da CPU, assim é possível determinar se o *reset* foi causado pela interrupção gerada pelo acelerômetro no pino WAKE0 do STM300U. Caso isso seja verdade, uma transmissão é feita, indicando assim a queda da pessoa. Caso contrário nada acontece e então o rádio volta ao "*Deep Sleep Mode*". A Figura 25 apresenta um fluxograma que representa as etapas essenciais do algoritmo.

Figura 25 - Fluxograma representando o código principal do rádio

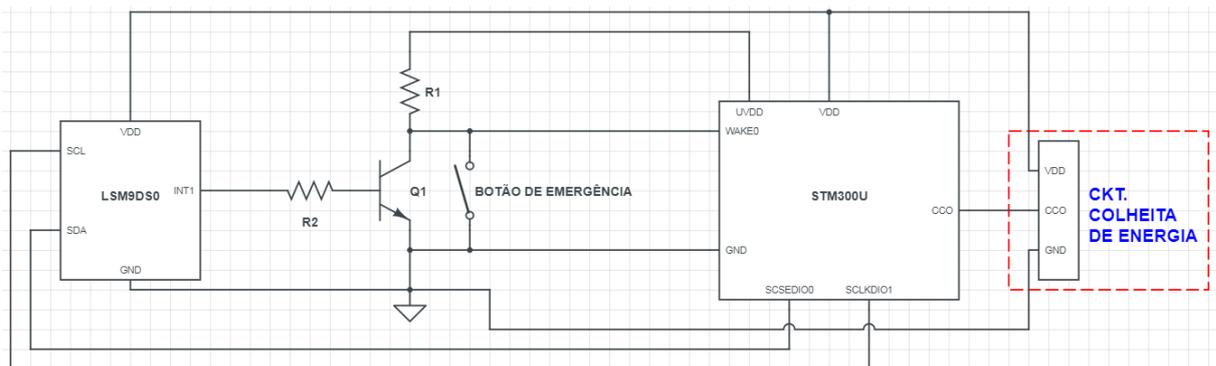


Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

4.3.3 Hardware

Pelo fato do pino WAKE0 do STM300 usar a tensão UVDD (1,8V) como referência e o LSM9DS0 gerar no pino de interrupção (INT1) um sinal 3,3V, implementou-se o circuito da Figura 26, como forma de integração entre rádio e acelerômetro. Desta forma, pode-se detectar qualquer variação no pino de interrupção com o uso do transistor NPN e, assim, não danificar o STM300U. Foi também inserido um *push-button*. Desta forma, uma interrupção pode ser gerada manualmente e ser usada como uma alternativa (botão de emergência). Entende-se que uma pessoa usando o dispositivo possa querer informar que está passando mal, ou quer se comunicar com a estação base. Apertar o botão é uma forma de chamar a atenção da pessoa responsável pelo monitoramento que se encontra na estação base.

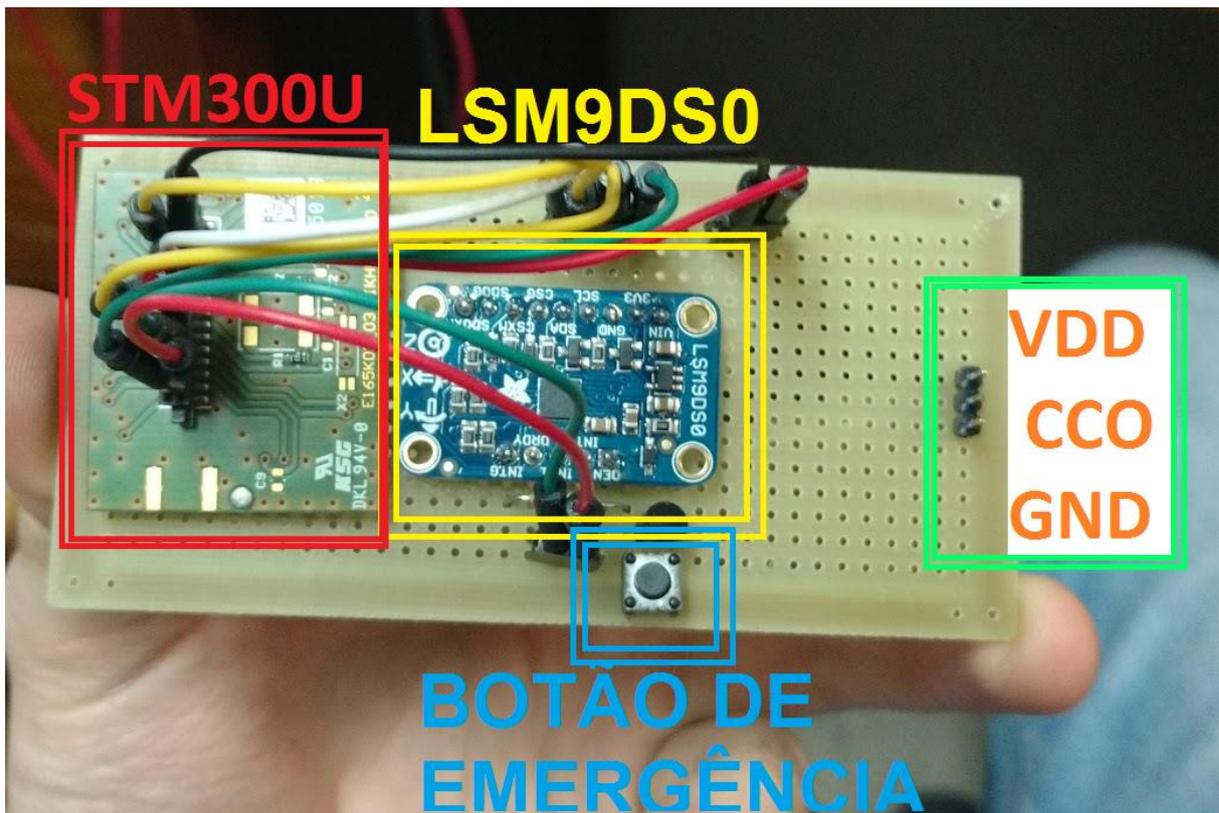
Figura 26 - Esquemático de integração do rádio com o acelerômetro



Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

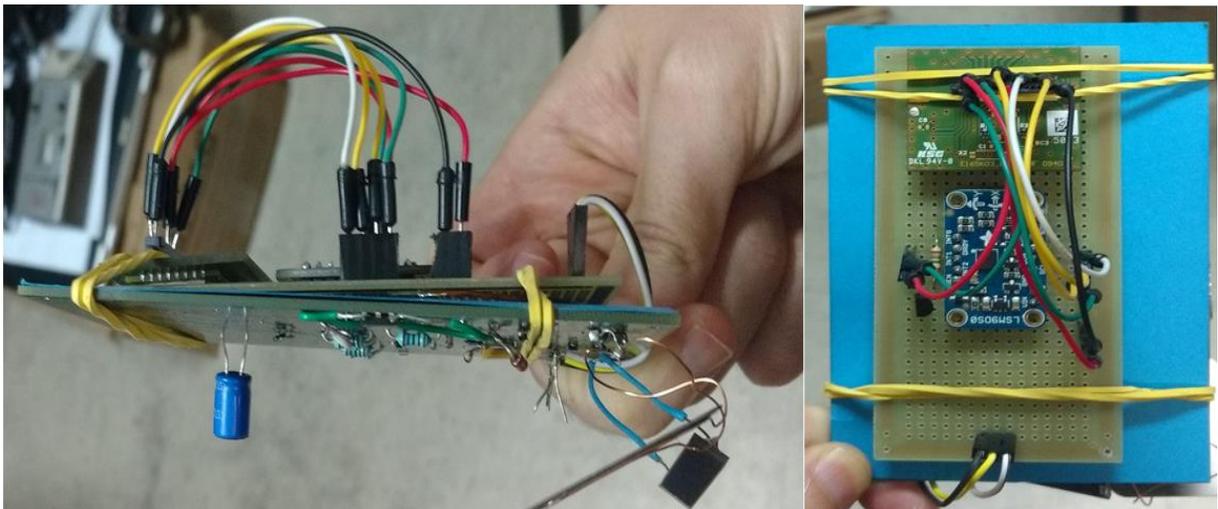
A Figura 27 apresenta a integração rádio, acelerômetro e botão, e a Figura 28 mostra o dispositivo final que é a união entre rádio, acelerômetro, botão e circuito responsável pela colheita de energia.

Figura 27 - Integração do rádio com o acelerômetro



Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

Figura 28 - Protótipo



Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

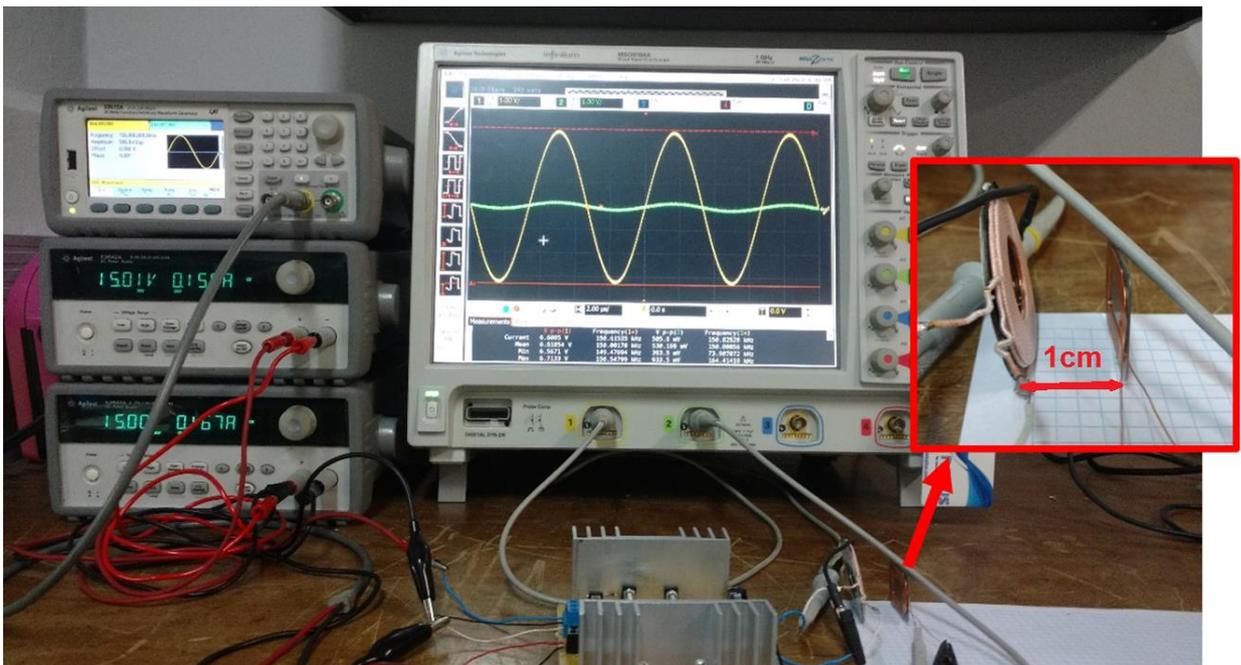
5 TESTES PRÁTICOS E RESULTADOS

Com o intuito de provar o funcionamento do protótipo, esta seção apresenta os testes realizados, bem como os resultados neles obtido.

5.1 Teste da Rede de Compensação

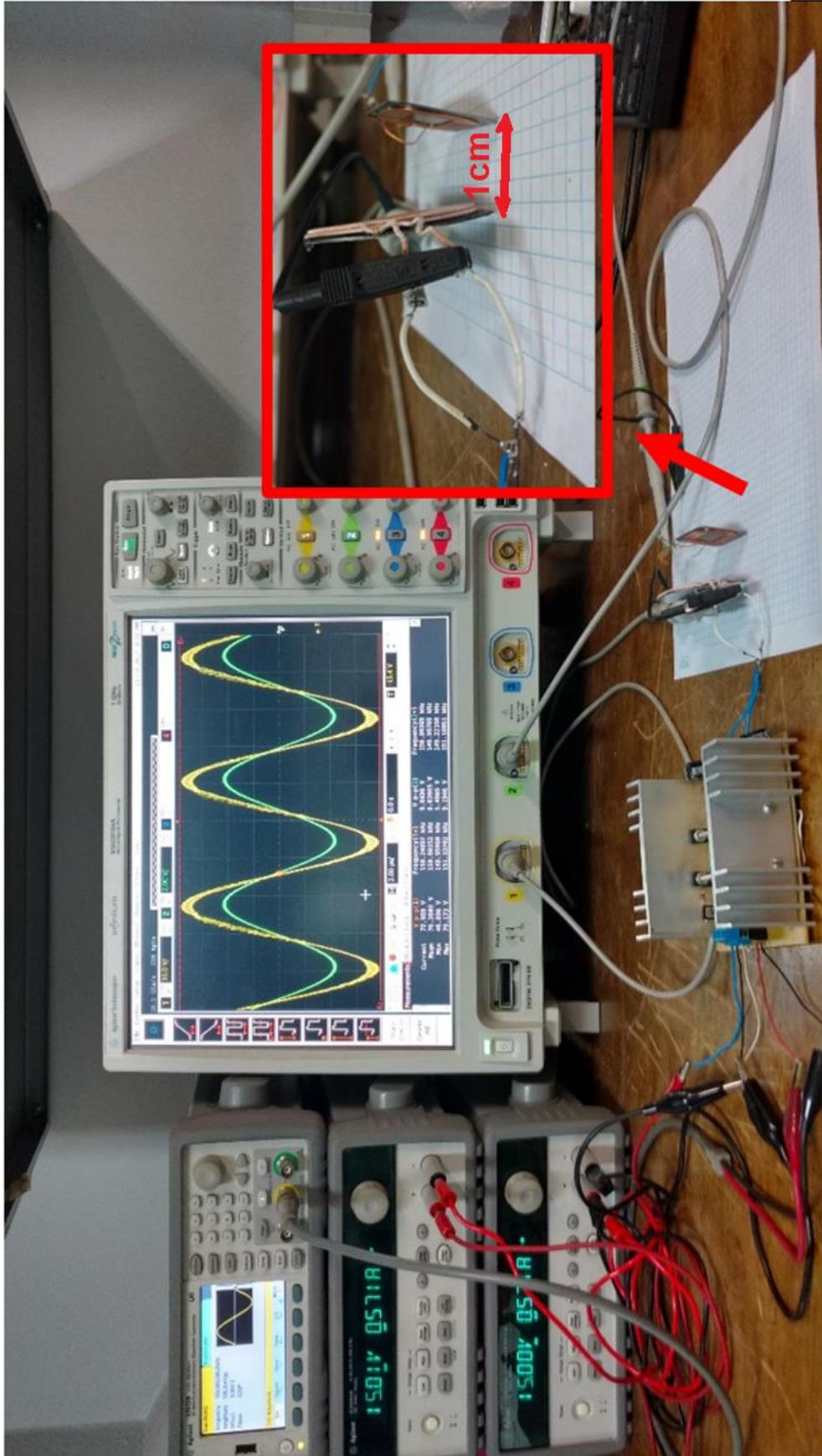
Para validar o funcionamento da compensação da reatância indutiva, foram estruturados dois testes. Em ambos foram colocadas as bobinas RX e TX a uma distância de 1 cm uma da outra e foi medida a tensão de circuito aberto em RX. No primeiro teste (Figura 29) foi montado o *link* indutivo sem os capacitores de compensação e no segundo teste (Figura 30) no mesmo *link* foram soldados os capacitores da Tabela 4 de acordo a Figura 9.

Figura 29 - Foto do *setup* para teste sem rede capacitiva



Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

Figura 30 - Foto do *setup* para teste com a rede capacitiva



Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

Mesmo com um dos capacitores da rede de compensação um pouco acima do valor calculado, pode se ver pelas Figuras 31(a) e 31(b), que é obtida uma tensão maior na bobina RX utilizando a rede capacitiva, o que comprova uma maior entrega de potência ativa à carga.

Figura 31 - Comparação dos testes



(a)



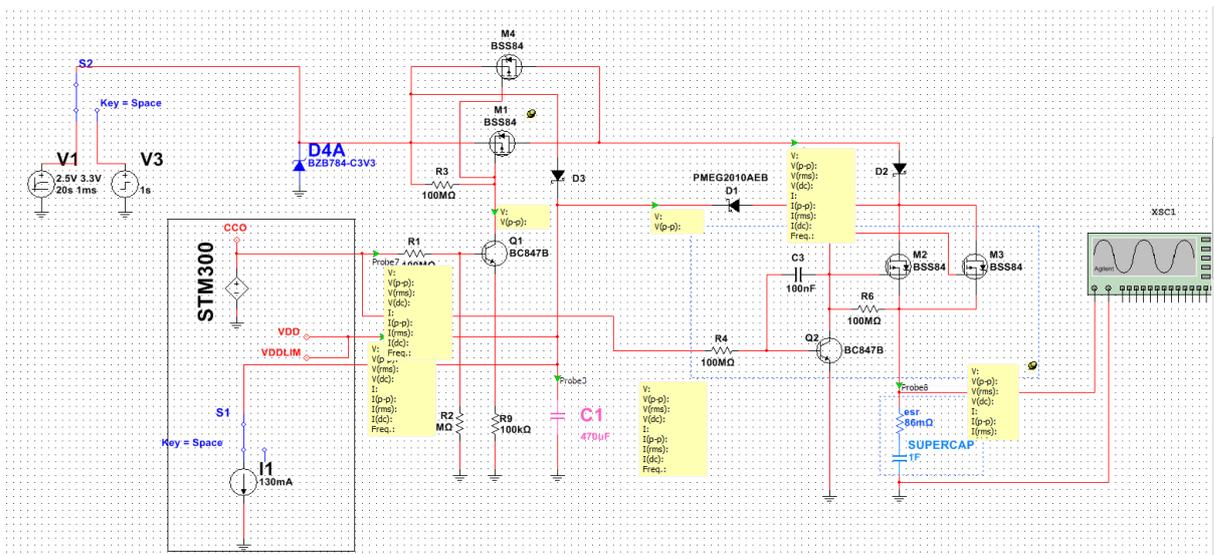
(b)

Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

5.2 Simulação do Circuito de Colheita de Energia

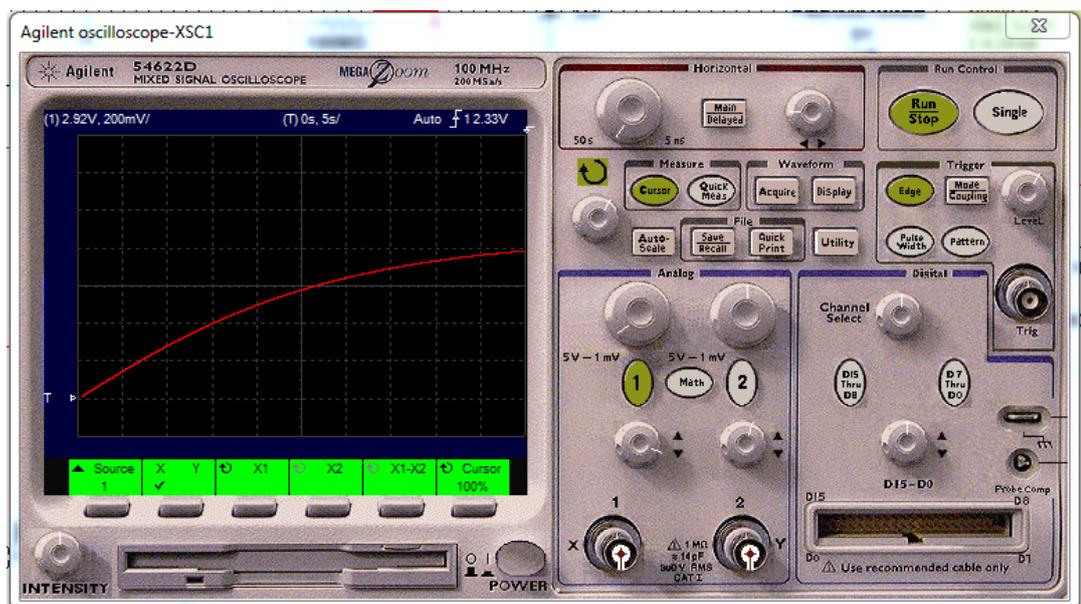
Utilizando o *software* NI Multisim™ foi possível realizar a simulação do circuito de colheita de energia (Figura 32). O supercapacitor foi carregado de 2,3V a 3V, e a curva de carregamento se encontra na Figura 33, onde o tempo de carregamento ficou por volta 50 segundos.

Figura 32 - Simulação utilizando o NI Multisim™



Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

Figura 33 - Curva de carregamento simulada do supercapacitor

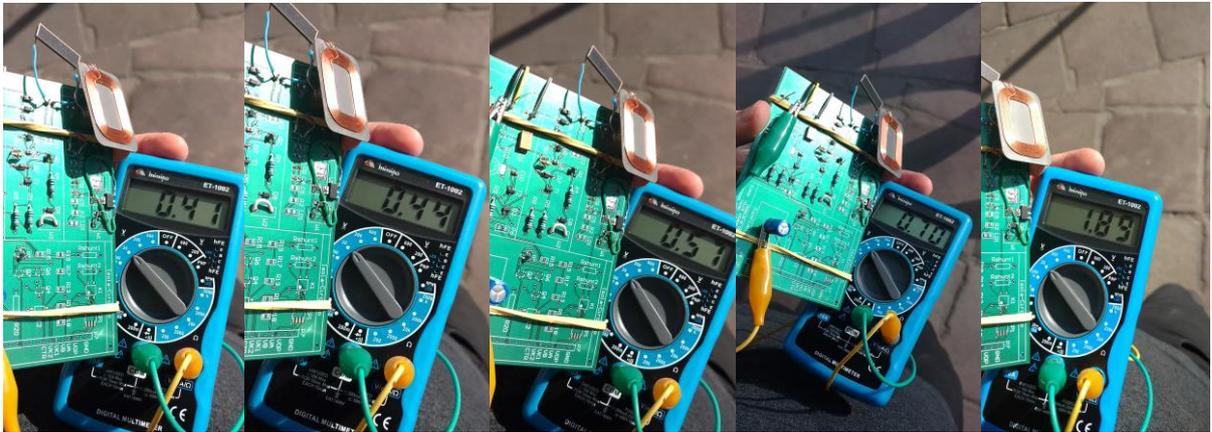


Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

5.3 Carregamento do supercapacitor pelo PV

Apesar do fabricante indicar em seu *datasheet* que o PV possui boa eficiência com luz proveniente de ambientes internos, o KXOB22-01X8F não conseguiu fornecer a tensão mínima necessária para funcionamento do STM300U em condições de luz artificial. Por isso não foi possível obter-se uma curva de carregamento em laboratório. Entretanto, em testes realizados na rua com luz solar natural (Figura 34), o PV se mostrou eficiente e conseguiu fornecer o nível de tensão necessário para o funcionamento do rádio e carregamento do supercapacitor.

Figura 34 - Teste de carregamento do supercapacitor pelo PV



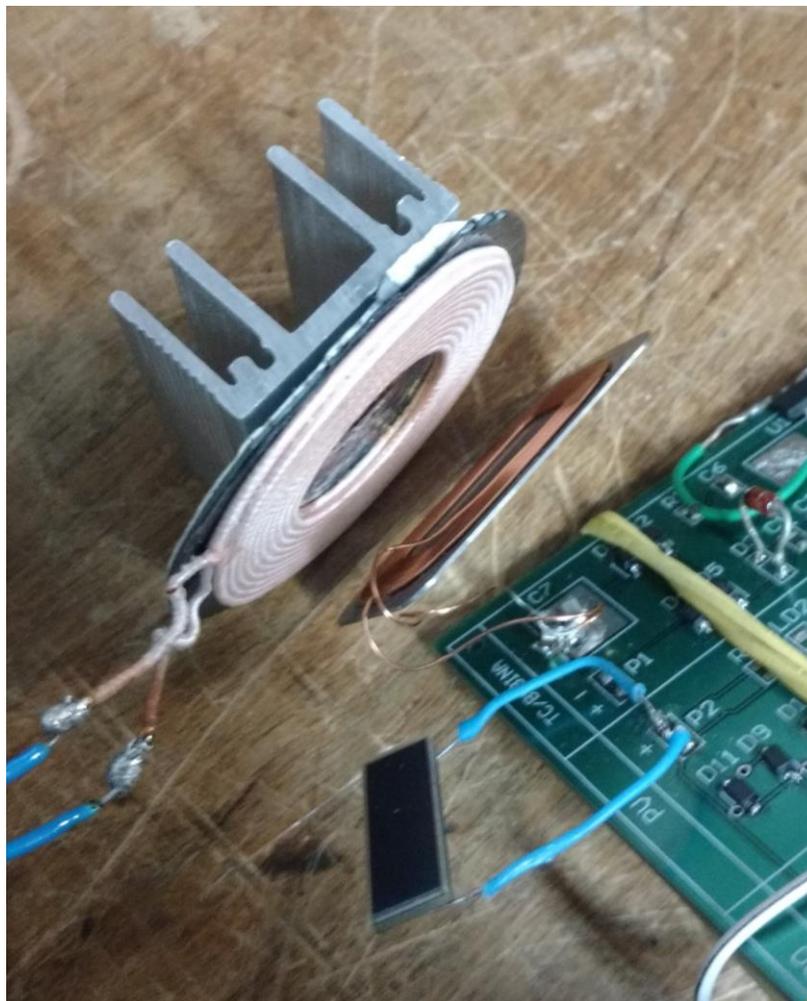
Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

5.4 Carregamento do supercapacitor por WPT

Para realizar o teste de carregamento do supercapacitor pelo *link* indutivo, as bobinas TX e RX foram posicionadas próximas (em torno de 0,5 cm), como pode ser visto na Figura 35. Assim, o supercapacitor foi carregado de 2,3V - tensão mínima para funcionamento do STM300U - até 2,82V, um pouco antes da proteção de sobretensão agir.

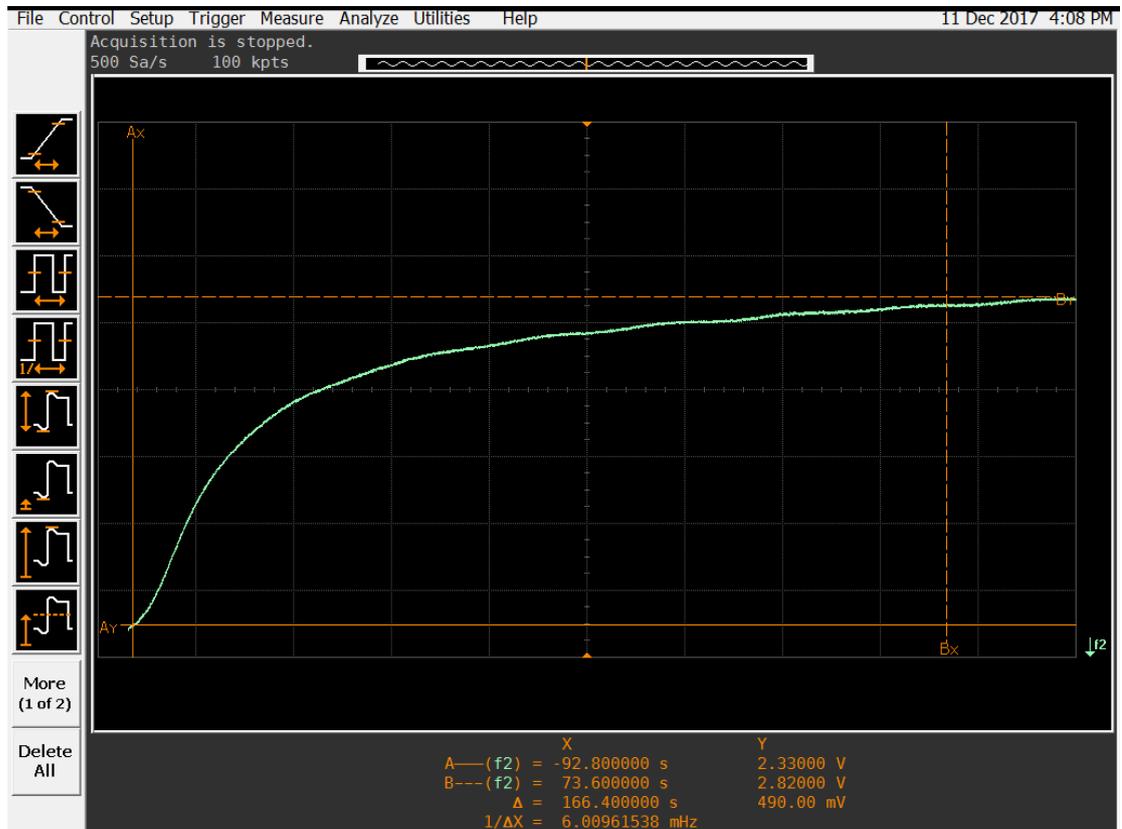
Na Figura 36 encontra-se a curva real obtida, onde pode-se observar um tempo próximo de 170 segundos para o carregamento. Este tempo foi 3,4 vezes maior que a simulação.

Figura 35 - Disposição das bobinas para o teste de carregamento supercapacitor pelo PV



Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

Figura 36 - Curva de carregamento do supercapacitor



Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

5.5 Teste de Consumo

Realizou-se um estudo de consumo do sistema rádio/acelerômetro, durante um ciclo de transmissão, por meio de um circuito de instrumentação de corrente do tipo *low-side*. (Figura 37)

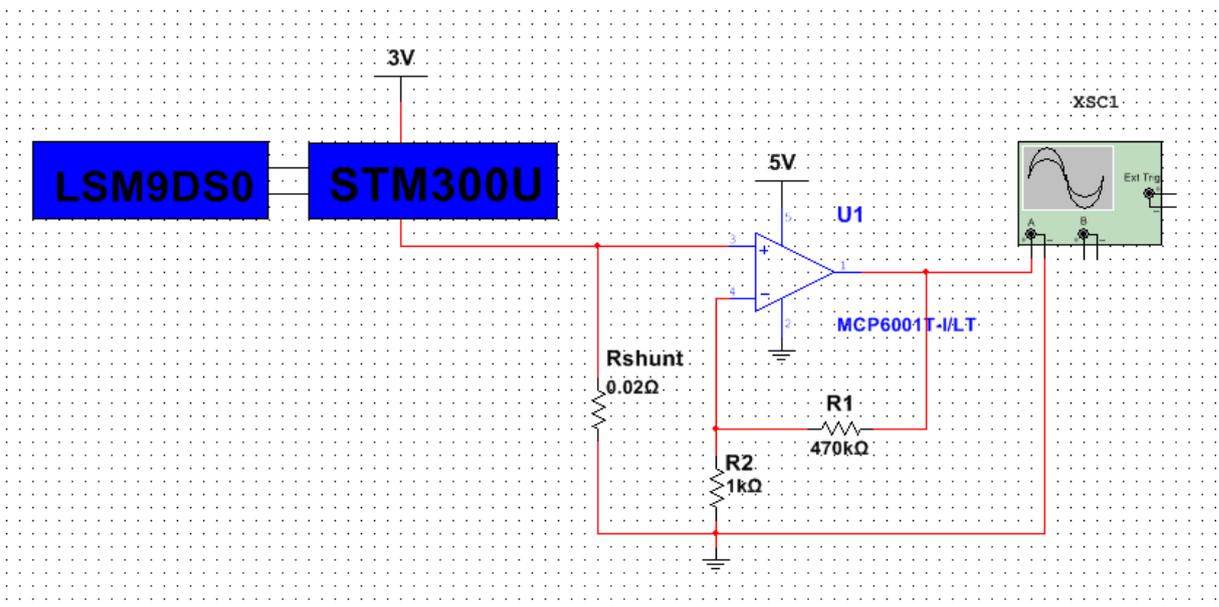
Figura 37 - Circuito para teste de consumo do rádio e acelerômetro



Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

O circuito é composto por um resistor *shunt* de $0,02\Omega$ de precisão (1%) e um amplificador operacional MCP6001, utilizado na configuração não inversora com ganho de 471. Seu esquemático se encontra na Figura 38, e a equação que retorna o consumo está descrita na Equação 7:

Figura 38 - Esquemático circuito *low-side*



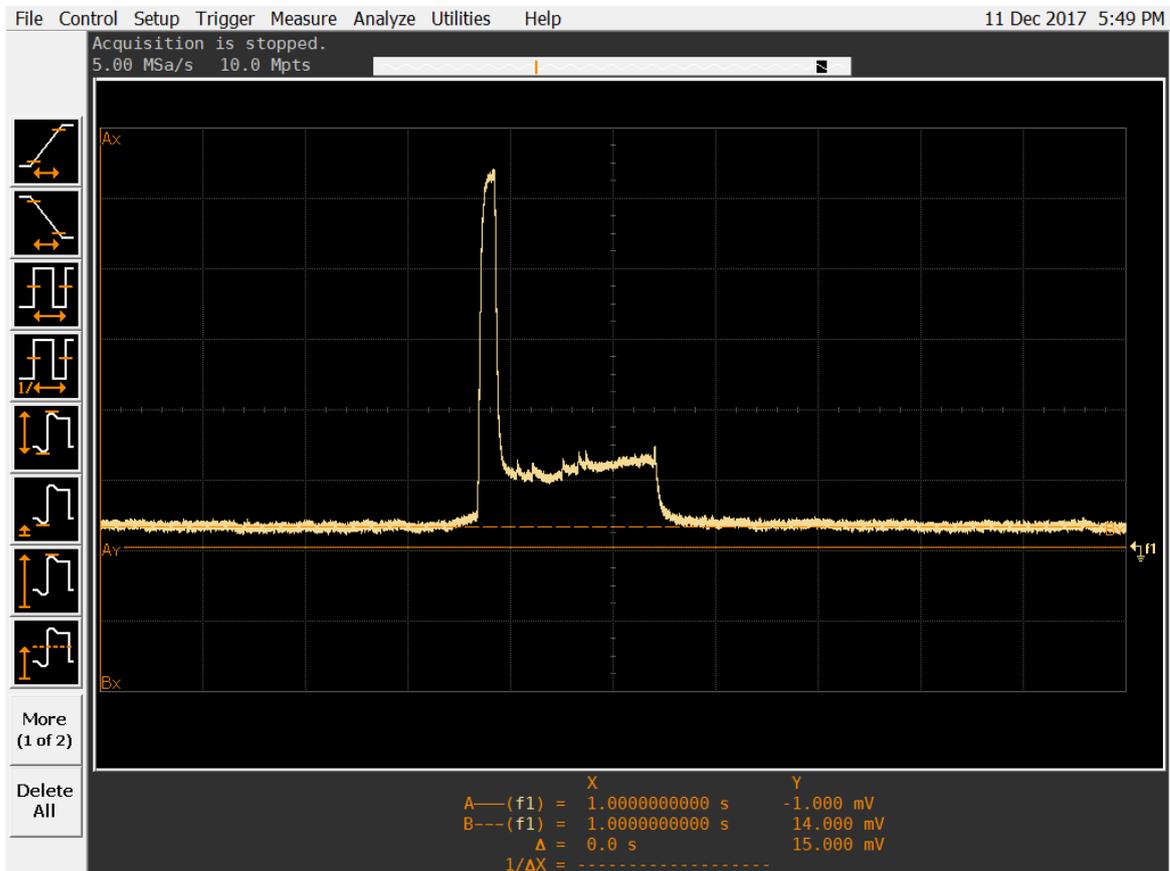
Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

$$I_{\text{rádio}} = \frac{V_{\text{osc}}}{G \times R_{\text{shunt}}} = \frac{V_{\text{osc}}}{\left(1 + \frac{470 \times 10^3}{1 \times 10^3}\right) \times 0,02} = 0,106 \times V_{\text{osc}} \quad (7)$$

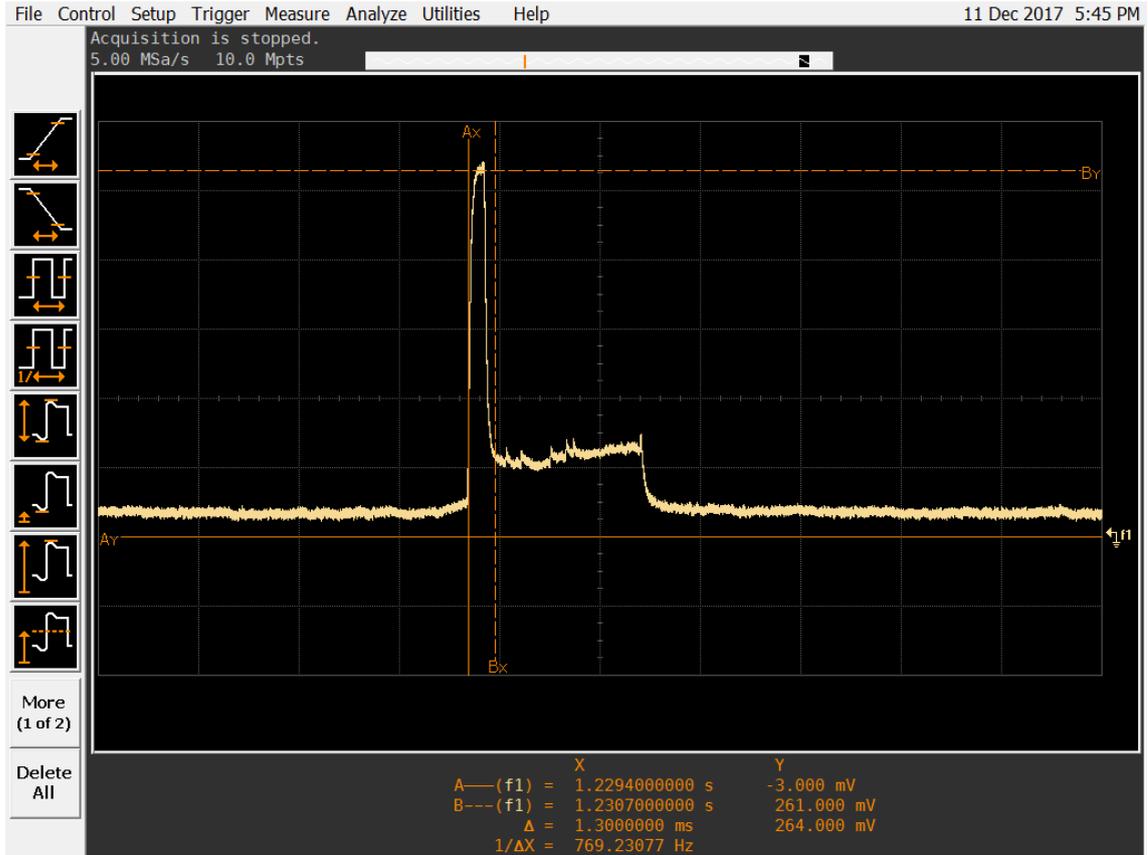
onde $I_{\text{rádio}}$ é a corrente encontrada [A], G o ganho não inversor [V/V], V_{osc} a tensão medida pelo osciloscópio [V] e R_{shunt} a resistência *shunt* do circuito de instrumentação [Ω].

O teste de consumo deu-se durante o apertar do botão de emergência. Assim, uma transmissão foi realizada, e o consumo obtido com o uso do osciloscópio e da Equação 7.

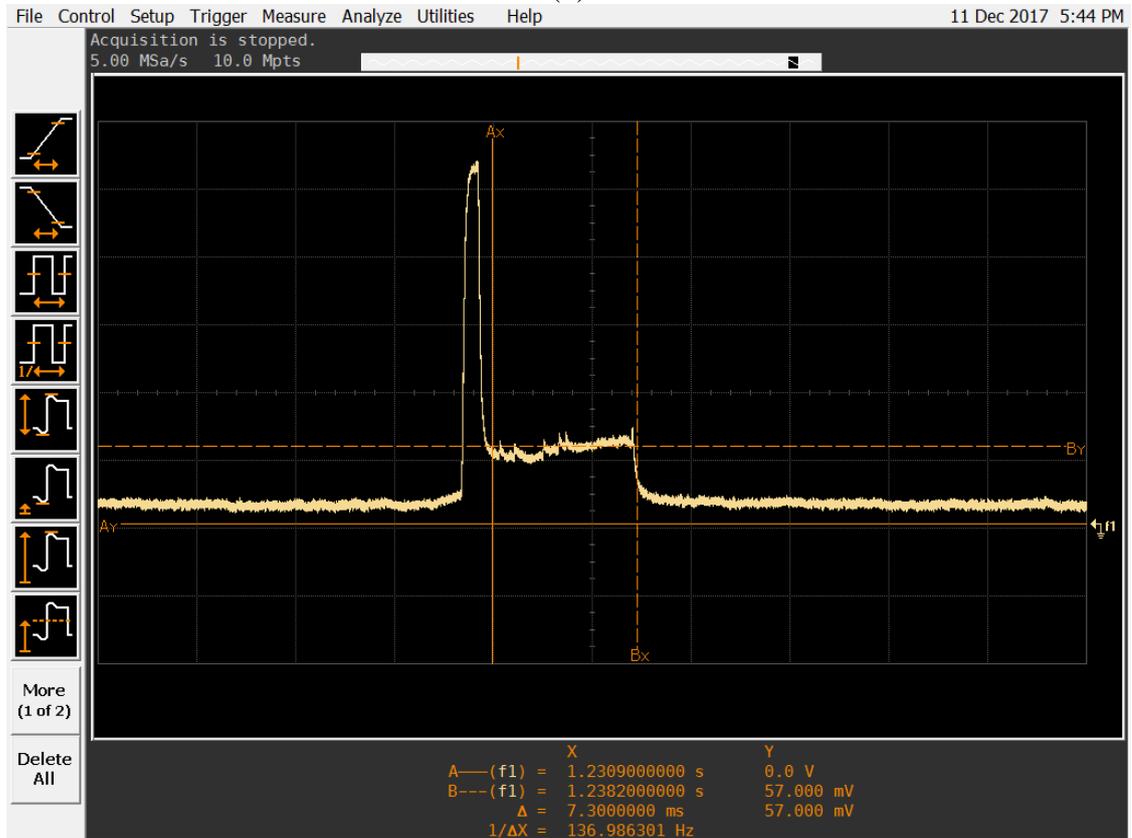
Figura 39 - Testes e intervalos de consumo medidos



(a)



(b)



(c)

Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

Tabela 6 - Resumo dos valores obtidos no teste de consumo

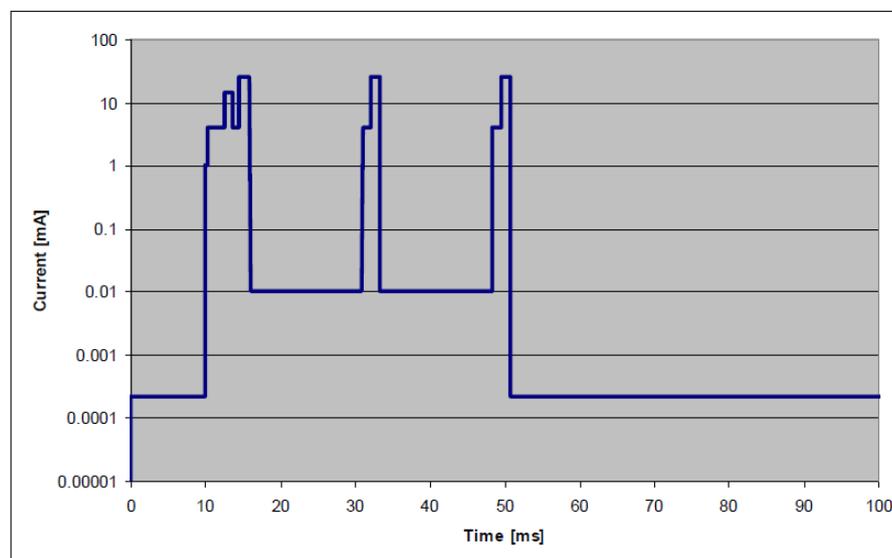
Intervalo	Tensão (mV)	Consumo – Equação 7 (A)	Tempo (ms)
1 - Figura 39 (a)	15	0,0016	-
2 - Figura 39 (b)	264	0,028	1,3
3 - Figura 39 (c)	57	0,006	7,3

Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

Pela análise da Figura 39 e da Tabela 6, pode-se concluir que o intervalo 1 corresponde ao período onde o rádio está em *deep sleep mode*. Já o intervalo 2 corresponde ao intervalo em que é feita a transmissão, e o último intervalo, é onde a CPU encontra-se em modo ativo (*active mode*).

O gráfico de consumo, mostrou-se bem coerente em termos de forma de onda, pois comportou-se do mesmo jeito que o da Figura 40, retirado do *datasheet* do STM300U, onde o fabricante apresenta um gráfico de consumo para 3 transmissões.

Figura 40 - Consumo do STM300 informado pelo fabricante



Fonte: ENOCEAN, 2017

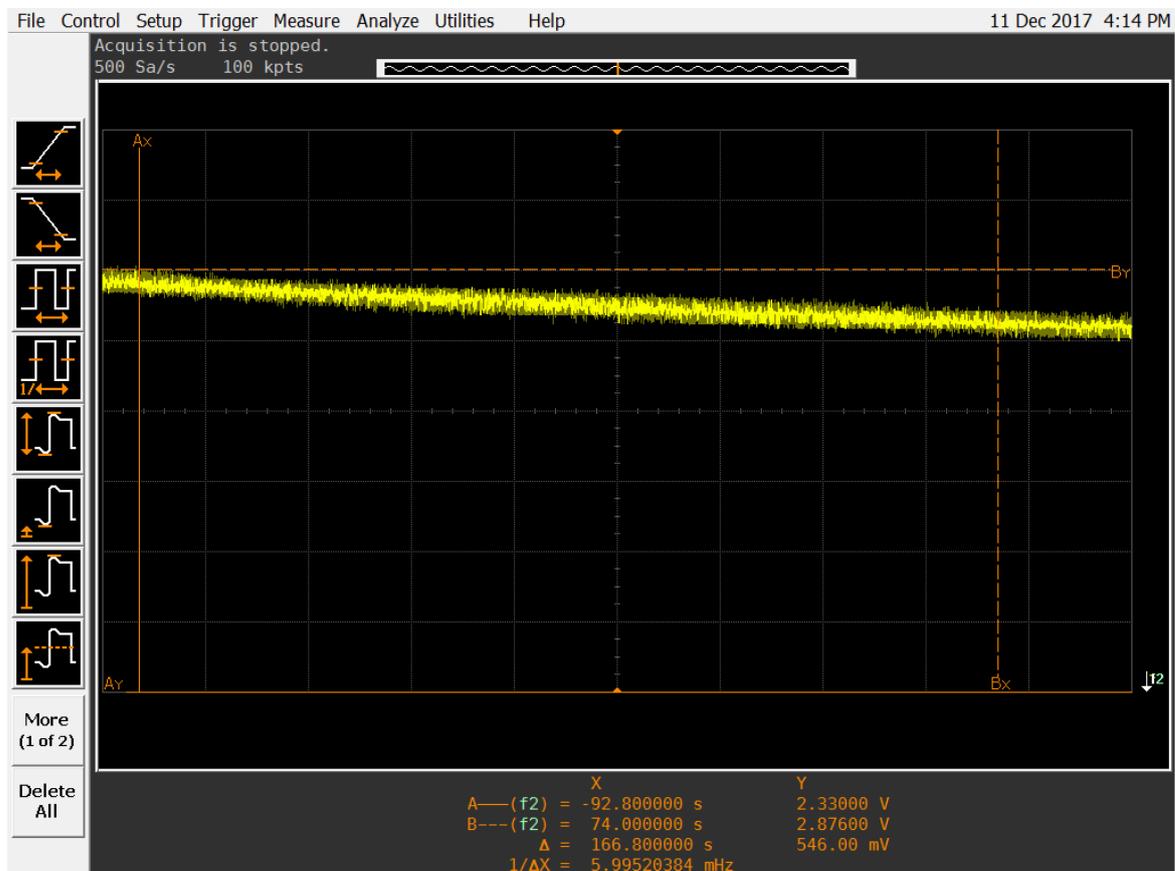
Em *deep sleep* o rádio está cerca de 10.000 vezes o esperado pelo *datasheet*. Isso ocorre por conta do consumo considerável do acelerômetro, isto é, ele faz parte do sistema e acaba consumindo bastante, uma vez que sua taxa de amostragem está aproximadamente em 3 Hz (a menor possível).

5.5.1 Curva de descarga do supercapacitor

Uma vez mostrado que o sistema apresenta um consumo elevado devido a amostragem do acelerômetro é importante apresentar a consequência disso, ou seja, a curva de descarga do supercapacitor.

Pela Figura 41 pode-se ver que o supercapacitor apresenta uma queda perto de 550mV para um intervalo de aproximadamente 170s.

Figura 41 - Curva de descarga do supercapacitor



Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

5.6 ESTAÇÃO BASE E ENSAIOS DE QUEDA

Para realizar ensaios de detecção de queda, foi usado e configurado o USB 300U como nó coletor e *gateway*. Dessa forma ele recebe os sinais de RF emitidos pelo nó sensor de queda e converte-os em comunicação serial na estação base. Assim através da interface gráfica DolphinView é possível analisar e interpretar os dados recebidos pelo USB300U.

Uma vez que o protótipo do nó sensor mãos é operacional, é possível simular algumas quedas como apresenta a Figura 42, que mostra uma queda e exatamente o momento de uma transmissão.

Figura 42 - Teste de detecção de Queda

The figure displays three sequential screenshots of the DolphinView Advanced 3.6.2.0 software interface, showing the Telegram Log table during a drop test. The interface includes a menu bar (File, View, Window, Help), a toolbar with 'Connect [F5]', 'Disconnect [F6]', and 'Firmware Download' buttons, and a main data table. The table columns are: Direction, Port, Date Time, ID, RORG, Data, OptionalData, Status, dBm, Subtel, DestinationID, Security, and TimeDiff. The data shows a sequence of transmissions from COM4 at 20:34:12 to 20:34:29. The final row at 20:34:31 is highlighted with a red box, indicating a drop event.

Direction	Port	Date Time	ID	RORG	Data	OptionalData	Status	dBm	Subtel	DestinationID	Security	TimeDiff.
→	COM4	2017-11-21 20:34:12.	018826E2	RPS	00		A0	-85	1	FFFFFFFF		00:00:54.643
→	COM4	2017-11-21 20:34:17.	018826E2	RPS	00		A0	-85	1	FFFFFFFF		
→	COM4	2017-11-21 20:34:25.	018826E2	RPS	00		A0	-76	1			
→	COM4	2017-11-21 20:34:28.	018826E2	RPS	00		A0	-78	1			
→	COM4	2017-11-21 20:34:29.	018826E2	RPS	00		A0	-78	1			
→	COM4	2017-11-21 20:34:31.	018826E2	RPS	00		A0	-82	1			

Fonte: Elaborado pelo autor (2017)

6 CONCLUSÕES

Este trabalho propôs o desenvolvimento de um sensor alimentado por colheita de energia e WPT para monitoramento de quedas de pessoas.

O projeto se mostrou funcional, visto que o objetivo principal - detecção de quedas - foi alcançado. Entretanto, o sistema acabou interpretando certos movimentos de forma errônea. Isso se deve ao método utilizado (seção 4.3.1), pois certos movimentos bruscos acabam tendo a mesmas características cinéticas que uma queda e movimentos muito lentos acabam não sendo detectados pelo sistema. Uma possível solução para redução de detecções incipientes é o desenvolvimento de um algoritmo que considere a combinação de sinais do acelerômetro, giroscópio e magnetômetro.

Um ponto importante que se deve destacar é o alto consumo do sistema, de 1,6 mA em *deep sleep mode*. Tal fato deve-se ao excessivo consumo do LSM9DS0, que mesmo com sua taxa de amostragem reduzida, filtros e demais sensores desligados, mostrou-se um sensor não ideal para uma aplicação *low power*. Apesar de ele ter um modo *sleep*, ele não é capaz de gerar interrupções quando está nesse modo. Para efeito de melhoria do projeto, seria interessante escolher um sensor que pudesse gerar um sinal mesmo dormindo ou que tivesse um consumo bem menor, como um sensor auxiliar para despertar o principal.

Quanto as fontes de energia pode-se dizer que a alimentação através do *link* indutivo funcionou a contento, diferentemente da colheita de energia utilizando energia solar, pois o PV se mostrou ineficiente com luz artificial. Sabendo-se que o dispositivo tem o objetivo de monitorar pessoas com risco de queda, e é de se imaginar que as mesmas não saem à rua com frequência, a escolha de um PV de silício amorfo seria mais adequada, pois possibilitaria que o carregamento do sensor pudesse ser feito com luz de um ambiente fechado e não somente com intensa luz solar, que foi o que aconteceu utilizando o KXOB22-01X8F.

Vale ressaltar também que apesar deste trabalho desenvolver e analisar somente um sensor de queda, é possível aumentar o número de nós sensores, construindo assim uma verdadeira rede de sensores sem fio que pode ser implementada em um hospital por exemplo. E também é possível desenvolver uma aplicação para integrar os dados recebidos com um banco dados na nuvem e assim aplicar o conceito de IoT ao sistema.

6.1 TRABALHOS FUTUROS

Este é um trabalho que pode ter adição de recursos, otimização de consumo e melhorias no desenvolvimento, portanto segue alguns pontos para trabalhos futuros:

- Inclusão de um monitor cardíaco *low power*;
- Substituição do PV monocristalino por um PV amorfo;
- Substituição do acelerômetro por um *low power*, ou uso de sensor auxiliar;
- Redução do tamanho da PCB de forma a tornar o sistema vestível;
- Desenvolvimento de uma aplicação para enviar dados para nuvem

REFERÊNCIAS

ADAFRUIT. **Adafruit 9-DOF Accel/Mag/Gyro+Temp Breakout Board - LSM9DS0**. < <https://www.adafruit.com/product/2021>>. Acesso em: 5 Jun. 2017.

AHMED, J. Y. S. et al. **RFID-WSN Integrated Architecture for Energy and Delay-Aware Routing**. 1. Springer Singapore, 2015. XII, 89 ISBN 978-981-287-414-6.

AZAMBUJA, R. et al. **Full four capacitor circuit compensation for inductive power transfer**. 2013 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), 2013, 6-9 May 2013. p.183-187.

BACH, C. **STM 300 ENERGY STORAGE — Design Considerations: ENOCEAN: 7** p. Feb. 2011. Disponível em: < http://www.enocean.com/fileadmin/redaktion/pdf/app_notes/AN208_STM_300_Energy_Storage_Feb2011.pdf>. Acesso em: 18 set. 2017.

_____. **ECS 300/310 Solar Panel - Design Considerations: ENOCEAN: 3** p. Sep. 2015. Disponível em: < http://www.enocean.com/fileadmin/redaktion/pdf/app_notes/AN207_ECS310_ECS320_SOLAR_PANEL_Sep_2015.pdf>. Acesso em: 18 set. 2017.

BATTERY UNIVERSITY. **BU-209: How does a Supercapacitor Work?**. Disponível em: < http://batteryuniversity.com/learn/article/whats_the_role_of_the_supercapacitor>. Acesso em: 8 nov. 2017.

BUKSMAN, S. et al. **Quedas em Idosos: Prevenção**. 2008. Disponível em: < <http://sbgg.org.br/wp-content/uploads/2014/10/queda-idosos.pdf> >. Acesso em: 7 mar. 2017.

ENOCEAN. **DOLPHIN Core Description V1.1**. 27 p. Jul. 2017. Disponível em: < https://www.enocean.com/fileadmin/redaktion/pdf/tec_docs/Dolphin_Core_Description_V1.1.pdf>. Acesso em: 8 nov. 2017.

IRISSENIOR. **IrisSenior – Sua vida mais segura ao alcance de um botão**. Disponível em: < <http://www.irissenior.com.br/>>. Acesso em: 28 abril 2017.

IXYS CORPORATION. **IXYS Preliminary KXOB22-01X8F**. 6 p. Jun. 2016 < http://ixapps.ixys.com/DataSheet/KXOB22-01X8F_Nov16.pdf>. Acesso em: 25 nov. 2017.

MARS, P. **Using a Small Solar Cell and a Supercapacitor in a Wireless Sensor**. 2010. Disponível em: < <https://www.sensormag.com/components/using-a-small-solar-cell-and-a-supercapacitor-a-wireless-sensor> >. Acesso em: 28 nov. 2017.

MURATA MANUFACTURING. **Murata Supercapacitor Technical Note**. muRata: 39 p. < https://www.murata.com/~//media/webrenewal/products/capacitor/edlc/techguide/electrical/edlc_technical_note.pdf >. Acesso em: 8 nov. 2017.

PORTAL SOLAR. **Tipos De Painel Solar Fotovoltaico**. Disponível em: < <https://www.portalsolar.com.br/tipos-de-painel-solar-fotovoltaico.html>>. Acesso em: 28 nov. 2017.

PORTO, R. W. et al. **Design and characterization of a power transfer inductive link for wireless sensor network nodes**. 2015 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC) Proceedings, 2015, 11-14 May 2015. p.1261-1266.

POURAKBAR SAFFAR, A.; DELDADEH BARANI, B. **Thermal effects investigation on electrical properties of silicon solar cells treated by laser irradiation**. 2014. 184-187.

STMICROELECTRONICS. **AN3308: LIS3DH: MEMS digital output motion sensor ultra-low-power high-performance 3-axis “nano” accelerometer**. 59 p. Jun. 2017 Disponível em: < www.st.com/resource/en/application_note/cd00290365.pdf >. Acesso em: 10 nov. 2017.

SUNFLOWER SOLAR. **Qual é a diferença entre policristalino e monocristalino célula filme amorfo fino solar?** Disponível em: < http://www.sunflower-solar.com/index_pt.php?act=content&scheduler_id=2029>. Acesso em: 28 nov. 2017.

TDK CORPORATION. **WT-505060-20K2-A10-G PRODUCT SPECIFICATION**. 8 p. Dec. 2012 Disponível em: < <https://media.digikey.com/pdf/Data%20Sheets/TDK%20PDFs/WT-505060-20K2-A10-G.pdf>>. Acesso em: 15 ago. 2017.

VISHAY. **Wireless Charging Receiving Coil/Shield**. 2 p. Aug. 2016 Disponível em: < <http://www.vishay.com/docs/34338/iwas3827.pdf>>. Acesso em: 15 ago. 2017.

WEDDELL, A. S. et al. **Accurate Supercapacitor Modeling for Energy Harvesting Wireless Sensor Nodes**. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, v. 58, n. 12, p. 911-915, 2011. ISSN 1549-7747.

WILAMOWSKI, B. M.; IRWIN, J. D. **Industrial communication systems**. 2nd. Boca Raton, Florida: CRC Press, 2011. ISBN 9781439802816 (hbk. alk. paper).

ZHANG, T. et al. **Fall Detection by Wearable Sensor and One-Class SVM Algorithm**. In: HUANG, D.-S.; LI, K., *et al* (Ed.). Intelligent Computing in Signal Processing and Pattern Recognition: International Conference on Intelligent Computing, ICIC 2006 Kunming, China, August 16–19, 2006. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2006. p.858-863. ISBN 978-3-540-37258-5.

ANEXO A: CÓDIGO PRINCIPAL DO FIRMWARE DO RÁDIO

```

EO3000I_CFG.c  main.c
1  #include "EO3000I_API.h"
2  #include "EO3000I_CFG.h"
3  #include "i2c.h"
4
5  code uint8 VERSION_APP[] = {0xE0,'V','E','R','S','I','O','N',1,0,1,0,'A','D','E','E','P','S','L','E','E','P',0x00,0xE0};
6  CFG_AREA xdata cfg_at_CFG_ADDR;
7
8  void main()
9  {
10     WAKE_TYPE data u8Wake;
11     RESET_TYPE data u8ResetSrc;
12     TEL_RADIO_TYPE rTel;
13
14     //inicia portas para correta comunicação i2c
15     mainInit();
16
17     //configura os registrados do Acelerometro
18     WriteByte( LSM9DS0_Accel , INT_CTRL_REG_M , 0x0B);
19     WriteByte( LSM9DS0_Accel , CTRL_REG0_XM , 0x02);
20     WriteByte( LSM9DS0_Accel , CTRL_REG1_XM , 0x17);
21     WriteByte( LSM9DS0_Accel , CTRL_REG2_XM , 0xC1);
22     WriteByte( LSM9DS0_Accel , CTRL_REG3_XM , 0x20);
23     WriteByte( LSM9DS0_Accel , INT_GEN_1_REG , 0x2A);
24     WriteByte( LSM9DS0_Accel , INT_GEN_1_THS , 0x1F);
25
26     //recebe qual foi a fonte de reset
27     pwr_getSystemReset(&u8ResetSrc);
28
29     //caso reset = mudança no pino Wake0 -> transmite
30     if (u8ResetSrc == WAKE_PINO_RESET )
31     {
32         rTel.trps.u8Choice = RADIO_CHOICE_RPS;
33         rTel.trps.u32Id = 0;
34         rTel.trps.u8Status = 0;
35         rTel.trps.u8Data = 1;
36         rTel.trps.u8Length = RADIO_DEC_LENGTH_RPS;
37         radio_ulpPrepareTelegram(&rTel,NULL);
38         radio_ulpSend3SubTels();
39     }
40     //entra em deep sleep mode
41     pwr_timerSleep(WAKE0_PIN_CFG_WAKE_FLAG, &u8Wake);
42
43     //não devemos chega aqui. caso aconteça o pino ADIO7 fica piscando
44     while(1)
45         {io_togDigital(ADIO_7); time_wait(500);};
46 }

```