



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL REI
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

FABIANO SILVEIRA BICALHO

SISTEMA RECTENNA PARA CARREGAMENTO DE UMA BATERIA LI-ION

Belo Horizonte
2018

FABIANO SILVEIRA BICALHO

SISTEMA RECTENNA PARA CARREGAMENTO DE UMA BATERIA LI-ION

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais em associação ampla com a Universidade Federal de São João Del Rei, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica. Linha de Pesquisa: Eletromagnetismo Aplicado.

Orientadora: Prof. Dra. Úrsula do Carmo Resende.
Coorientador: Prof. Dr. Sandro Trindade Mordente Gonçalves.

Belo Horizonte
2018

B583s Bicalho, Fabiano Silveira
Sistema rectenna para carregamento de uma bateria Li-Ion. /
Fabiano Silveira Bicalho. -- Belo Horizonte, 2018.
140 f. : il.

Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação
Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica em associação ampla com a Universidade
Federal de São João Del Rei, 2018.

Orientador: Profª Drª Úrsula do Carmo Resende
Coorientador: Prof. Dr. Sandro Trindade Mordente Gonçalves

Bibliografia

1.Otimização Matemática. 2.Antenas (Eletrônica). 3. Retificador. I.
Resende, Úrsula do Carmo. II. Centro Federal de Educação
Tecnológica de Minas Gerais. III. Título

CDD 621.43



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL REI
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



Fabiano Silveira Bicalho

“Sistema Rectenna para Carregamento de uma Bateria Li-Ion”

Dissertação nº163 apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - Associação Ampla entre a Universidade Federal de São João Del-Rei e o Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais em 07 de Maio de 2018 como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica, aprovada pela Banca Examinadora constituída pelos professores:

Prof.^a Dr.^a Ursula do Carmo Resende (Orientadora)
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Prof. Dr. Sandro Trindade Mordente Gonçalves (Coorientador)
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

Prof. Dr. Gláucio Lopes Ramos
Universidade Federal de São João Del Rei

Prof. Dr. Fernando José da Silva Moreira
Universidade Federal de Minas Gerais

Prof. Dr. Gláucio Lima Siqueira
Universidade Federal de Minas Gerais

*Aos meus pais, Antônio e Angélica, minha
irmã Andreza e esposa Luciana.*

Agradeço à minha família pelo apoio nesta empreitada em busca da ampliação do conhecimento humano. Especialmente ao meu pai Antônio, minha mãe Angélica e minha irmã Andreza. Agradeço enormemente à minha esposa, Luciana, pelo amor e apoio incondicional e por sempre acreditar em mim. Suas revisões textuais, certamente, deixaram o texto mais compreensível a todos.

Um agradecimento especial à orientadora deste trabalho, professora Dra. Úrsula Resende, pelo trabalho e apoio extremamente profissionais durante toda a pesquisa. Sou grato também ao meu coorientador, professor Dr. Sandro Gonçalves, pela troca de ideias acerca dos temas afins a este trabalho.

Agradeço aos amigos do mestrado do CEFET/MG, em especial Guilherme e Diego, que estiveram comigo durante a jornada.

Obrigado ao CEFET/MG pela disponibilização dos recursos para execução do trabalho e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo suporte financeiro.

“O ignorante afirma, o sábio duvida, o sensato reflete” Aristóteles.

Resumo

Nos últimos anos, a tecnologia de *rectennas* vem recebendo uma atenção crescente de pesquisadores devido à ampliação das possibilidades de sua aplicação no suprimento de energia para as atuais cargas com baixíssimo nível de consumo energético. Dentro desse contexto, este trabalho apresenta uma investigação teórica e experimental acerca da utilização da tecnologia de *rectenna* com o objetivo de carregar eletricamente um modelo de bateria amplamente utilizado em aparelhos eletrônicos, a bateria de Íons de Lítio (Li-Ion). Inicialmente é realizada uma ampla revisão bibliográfica sobre o tema para subsidiar as investigações conduzidas ao longo deste trabalho. O processo de modelagem da *rectenna* foi iniciado pela otimização do conjunto retificador mais carga utilizando o *software* ADS® (Advanced Design Software). Foram manufaturados diferentes protótipos de circuito retificador operando nas frequências de 1,80 e 2,45 GHz e um circuito capaz de operar em ambas as frequências simultaneamente. Um circuito conversor CC-CC *booster* também foi investigado de forma a possibilitar a operação da *rectenna* a partir de níveis baixos de potência de entrada. Neste trabalho, foram empregadas antenas tipo retangulares impressas, simuladas no *software* CST® (*Computer Simulation Technology*) e conectadas ao retificador. As dimensões das antenas foram otimizadas de forma a se obter valores do parâmetro S_{11} abaixo de -10 dB e a maior diretividade possível de forma a possibilitar uma maior coleta da energia eletromagnética. Foram também projetadas e manufaturadas duas lentes eletromagnéticas para compor a *rectenna*, baseadas na tecnologia de metamaterial, de forma a promover uma coleta superior de energia. Por fim, as *rectennas* foram submetidas a testes operacionais de carregamento da bateria de Íons de Lítio. As *rectennas* foram conectadas em paralelo no bloco de corrente contínua dos circuitos com objetivo de se obter o máximo fornecimento de corrente para a bateria.

Palavras-chave: Antenas Impressas, Associação Paralela, Bateria Íons de Lítio, *Booster*, Metamaterial, Otimização, *Rectenna*, Retificador.

Abstract

In the last years rectennas technology has received increasing attention of researchers due to the extension of the possibilities of its application in the supply of energy for the current loads with very low level of energy consumption. In this context, this work presents a theoretical and experimental investigation about the use of rectenna technology with the objective of electrically charging a battery model widely used in electronic devices, the Li-Ion battery. Initially a broad bibliographic review on the subject is carried out to support the investigations conducted in this work. The rectenna modeling process was started by optimizing the rectifier with the load using the ADS® software. Different prototypes of the rectifier circuit were manufactured, operating at the frequencies of 2.45 and 1.80 GHz and a circuit capable of operating at both frequencies simultaneously. A DC-DC booster converter circuit has also been investigated in order to enable rectenna operation from low input power levels. In this work, printed antennas were used, simulated in the software CST®(Computer Simulation Technology) and connected to the rectifier. The dimensions of the antennas were optimized in order to obtain values of parameter S_{11} below -10 dB and the highest possible directivity in order to allow a larger collection of the electromagnetic energy. Two electromagnetic lenses were designed and manufactured to compose the rectenna, based on metamaterial technology, in order to promote a superior collection of energy. Finally, the rectennas were subjected to operational tests of charge of the Lithium Ion battery. The rectennas were connected in parallel in the DC of the circuits in order to obtain the maximum supply of current for the battery.

Keywords: Printed Antennas, Parallel Association, Lithium Ions Battery, Booster, Metamaterial, Optimization, Rectenna, Rectifier.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Demonstração para o público do funcionamento do helicóptero alimentado por <i>rectenna</i> (BROWN, 1984).	26
Figura 2.2 - Trabalho 1: a) dipolos de fio de cobre, b) dipolo de fita em cobre: frequência 3G (PIÑUELA; MITCHESON; LUCYSZYN, 2013).....	28
Figura 2.3 - Trabalho 2: topologias para <i>rectennas</i> após otimização, a) diodo simples em série, b) diodo simples em paralelo, c) ponte de diodos (MARIAN et.al., 2012b).	30
Figura 2.4 - Trabalho 2: diagrama esquemático da <i>rectenna</i> reconfigurável (MARIAN et.al., 2012b)..	31
Figura 2.5 – Trabalho 3: a) Topologia empregada para o retificador, b) Retificador construído (TAN; LIU, 2016).....	32
Figura 2.6 – Trabalho 4: a) Topologia empregada para o retificador, b) <i>Rectenna</i> construída (KANG et. al., 2016).	33
Figura 2.7 – Trabalho 5: a) Desenho representativo da antena Quasi-Yagi, b) Topologia adotada para o circuito retificador (SUN et. al., 2013).	34
Figura 2.8 – Trabalho 6: a) Topologia detalha do circuito RCR, b) Topologia completa com retificador do circuito RCR (SONG et. al., 2017b).	35
Figura 2.9 – Trabalho 7: a) Topologia tradicional da <i>rectenna</i> , b) Nova topologia proposta para <i>rectenna</i> (SONG et. al., 2017a).....	36
Figura 2.10 – Trabalho 7: a) <i>Rectenna</i> construída, b) Esquemático da nova topologia proposta para <i>rectenna</i> (SONG et. al., 2017a).	36
Figura 2.11 – Trabalho 8: 1) celular GSM900, 2) Conjunto de 4 <i>rectennas</i> , 3) Sensor de temperatura/placa RF, 3a) Leitura de tensão, 4) Receptor de RF, 5) Notebook para aquisição de dados (VISSER; POP; VULLERS, 2011).	37
Figura 2.12 – Trabalho 9: topologia básica de funcionamento do circuito proposto (FEZAI et al., 2016).	39
Figura 2.13 – Trabalho 9: a) Circuito para o sistema receptor, b) Topologia adotada para a <i>rectenna</i> (FEZAI et al., 2016).	39
Figura 2.14 – Trabalho 10: a) Antena construída com duas portas e célula solar instada, b) Retificador construído conectado à célula solar (BITO at. al., 2017).....	41
Figura 2.15 – Trabalho 10: a) Topologia do circuito retificador e célula solar, b) Topologia geral do sistema proposto (BITO at. al., 2017).	41
Figura 2.16 – Trabalho 11: topologia básica do circuito <i>booster</i> mais retificador. (VISSER at. al., 2010)	42
Figura 3.1 Diagrama de blocos básico de uma <i>rectenna</i>	46
Figura 3.2 Perfil teórico de carregamento de uma bateria Li-Ion (APLICADA, 2017).....	50
Figura 3.3 Perfis de tensão medidos durante o carregamento da bateria Li-Ion.....	51
Figura 3.4 Perfis de corrente medidos durante o carregamento da bateria Li-Ion	51
Figura 3.5 Curva I x V típica de um diodo comum de silício (MALVINO, 2011).	52

Figura 3.6 Circuitos para simulação dos diodos HSMS2820 (vout_3), HSMS2850 (vout_1) e HSMS2860 (vout_2).....	55
Figura 3.7 $\eta \times V_J$ para o diodo <i>Schottky</i>	57
Figura 3.8 - Conector SMA 3011 do fabricante KLC (KLC CONECTORES, 2011).	58
Figura 3.9 – Circuito equivalente do conector SMA KLC3011.....	59
Figura 3.10 – Topologias de retificador: a) diodo-série, b) diodo- <i>shunt</i> , c) dobrador de tensão simples, d) dobrador múltiplos estágios, e) ponte de diodos.	60
Figura 3.11 – Topologia dobradora de tensão com diodo HSMS-2852 e carga 1000 Ω	63
Figura 3.12 – Resultados medido e simulado para retificador com carga 1000 Ω . a) S_{11} b) carta de Smith.	65
Figura 3.13 – Perfis de carregamento para 5, 10 e 15 mA.....	66
Figura 3.14 – Resultados medido e simulado para retificador com carga 10 k Ω . a) S_{11} b) carta de Smith.	68
Figura 3.15 – Resultados medido e simulado para retificador com carga 100 k Ω . a) S_{11} b) carta de Smith.....	68
Figura 3.16 – Resultados medido e simulado para retificador com carga 1 M Ω . a) S_{11} b)carta de Smith.	69
Figura 3.17 – S_{11} em função da variação da potência de entrada para retificadores projetados para cargas de 1 k Ω , 10 k Ω , 100 k Ω e 1 M Ω	70
Figura 3.18 – Circuito do conversor BQ25504 (ZANON, 2017).....	72
Figura 3.19 – Configuração de medições: retificador-conversor-bateria.....	72
Figura 3.20 – Resultados medido e simulado para retificador R180. a) S_{11} , b) carta de Smith.	74
Figura 3.21 – Circuito do retificador projetado para dupla frequência - ADS®.	75
Figura 3.22 – Topologia construída para o retificador de dupla frequência – dimensões em milímetros.	75
Figura 3.23 – Parâmetros S_{11} do retificador para dupla frequência; m1 (simulado em 1,8 GHz), m2 (simulado em 2,45 GHz), m3 (medido em 1,8 GHz), m4 (medido em 2,45 GHz).	76
Figura 4.1 – Antena 1x245F: dimensões otimizadas.....	82
Figura 4.2 – Antena 2x245F: dimensões otimizadas.....	83
Figura 4.3 – Antena 4x245F: dimensões otimizadas.....	84
Figura 4.4 – Antena 1x180F: dimensões otimizadas.....	85
Figura 4.5– Antena 2x180F: dimensões otimizadas.....	86
Figura 4.6 – Antena 1xDuplaF: dimensões otimizadas.	87
Figura 4.7 – Parâmetros S_{11} da antena transmissora dipolo em 1,80 e 2,45 GHz.....	89
Figura 4.8 – Metodologia para medição da potência recebida pelas antenas.	89
Figura 4.9 – Diagrama de permissividade, permeabilidade e índice de refração (AQUINO, 2008).....	92
Figura 4.10 – Diagrama de raios e refração (a) material comum Mão Direita (MD), (b) metamaterial Mão Esquerda (ME) (AQUINO, 2008).	93
Figura 4.11 – Arranjo de fios finos (ROTMAN, 1962).	93
Figura 4.12 – Ressonadores tipo <i>Split Ring</i> : a) SSR e b) S-SRR.	94

Figura 4.13 – Modelo de circuito do SSR (a) com dois anéis, (b) um anel (SILVA, 2015).....	94
Figura 4.14 – Estrutura de repetição empregando SSR e arranjo de fios finos (AQUINO, 2008).	95
Figura 4.15– Célula metamaterial proposta por (SMITH et. al., 2005).	95
Figura 4.16 – Resultados da estrutura metamaterial proposto em (SMITH et. al., 2005).	96
Figura 4.17 – Células metamateriais após otimização do CST® a)2,45 GHz, b)1,80 GHz.	98
Figura 4.18 – Parâmetros S_{11} e S_{12} da célula projetada para 2,45 GHz.....	99
Figura 4.19 – Parâmetros S_{11} e S_{12} da célula projetada para 1,80 GHz.....	99
Figura 4.20 – $\mu_r \times f$ para célula projetada para operação em 2,45 GHz.....	101
Figura 4.21 – $\epsilon_r \times f$ para célula projetada para operação em 2,45 GHz.	101
Figura 4.22 – $\mu_r \times f$ para célula projetada para operação em 1,80 GHz.....	102
Figura 4.23 – $\epsilon_r \times f$ para célula projetada para operação em 1,80 GHz.	102
Figura 4.24 – Lente eletromagnética para operação em 2,45 GHz.....	104
Figura 4.25 – Lente eletromagnética para operação em 1,80 GHz.....	104
Figura 4.26 – Configuração de medição da potência de entrada das antenas mais lente eletromagnética.	105
Figura 5.1 – Configuração para medição da corrente elétrica entre <i>rectenna</i> e bateria.	108
Figura 5.2 – Configuração para medição da corrente elétrica entregue pela <i>rectenna</i> ao <i>booster</i> e bateria.....	109
Figura 5.3– Filtro impresso após otimização no CST® - dimensões em milímetros.....	112
Figura 5.4– Filtro de microfita manufacturado: resultado simulado.....	112
Figura 5.5– Filtro de microfita manufacturado: resultado medido.	112
Figura 5.6– Configuração de medição da <i>rectenna</i> 1xDupla associada a filtro seletor de frequências.	113
Figura 5.7 – Configuração de medição das <i>rectennas</i> 2x245F e 2x180F em associação com lente eletromagnética.	114
Figura 5.8 – Diagrama esquemático para medição de S_{11} e corrente elétrica fornecida à carga nas ligações a) série, b) paralelo.	116
Figura 5.9 – Parâmetros S_{11} para a ligação a) série e b) paralelo.....	116
Figura 5.10 – Correntes elétricas medidas no <i>software</i> ADS: ligação série (I_Probe1.i) e ligação paralela (I_Probe2.i).....	117
Figura 5.11 – configuração de teste para conexão paralelo das <i>rectennas</i> 4x245F.....	118
Figura 5.12 – Diagrama esquemático para medição da corrente elétrica fornecida à carga nas ligações a) paralelo, b) ligação simples.	119
Figura 5.13 – Correntes elétricas medidas no <i>software</i> ADS: ligação em paralelo (I_Probe1.i) e <i>rectenna</i> simples (I_Probe2.i).	119
Figura 5.14 – Configuração do teste final do sistema <i>rectenna</i> : antenas 2x245F,2x180F, retificadores R245 e R180, lentes eletromagnéticas e conexão em paralelo.	121

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Trabalho 7: resultados obtidos (SONG et. al., 2017b).	36
Tabela 2.2 - Tipo de antena, tipo de retificador e resultado obtido das <i>rectennas</i> descritas na Seção 2.3.....	44
Tabela 3.1 Características básicas da bateria Li-Ion Polímero (APLICADA, 2017).....	48
Tabela 3.2 Características da bateria escolhida.....	48
Tabela 3.3 Resultados das simulações feitas com os diodos <i>Schottky</i> HSMS2820, HSMS2850, HSMS2860.	55
Tabela 3.4 Parâmetros fixos do modelo de diodo.	57
Tabela 3.5 – Resultados de carregamento da bateria a partir do retificador otimizado para carga de 1000 Ω	67
Tabela 3.6 – Resultados de carregamento da bateria com variação de carga.	69
Tabela 3.7 – Resultados de carregamento da bateria com conversor BQ25504.....	72
Tabela 3.8 – Resultado de carregamento da bateria com retificador R180.	74
Tabela 3.9 – Resultado de carregamento da bateria com retificador RDupla.....	77
Tabela 4.1 – Resultados simulados das antenas sob teste (SHARMA; WADKAR, 2015).....	80
Tabela 4.2 – Resultados simulados das antenas sob teste.....	88
Tabela 4.3 – Potências recebidas pelas antenas com e sem emprego de lente eletromagnética.....	105
Tabela 5.1 – Resultados medidos das <i>rectennas</i> sob teste.	108
Tabela 5.2– Resultados medidos das <i>rectennas</i> e <i>booster</i> sob teste.	109
Tabela 5.3 – Resultados medidos da <i>rectenna</i> 1xDupla sem e com o emprego do filtro de microfita.	113
Tabela 5.4– Correntes fornecidas pelas <i>rectennas</i> com e sem o emprego de lente eletromagnética.	115
Tabela 5.5 – Resultados de carregamento a partir da <i>rectenna</i> 4x245F: sem e com ligação em paralelo.....	118
Tabela 5.6 – Resultados comparativos para o carregamento da bateria Li-Ion.	121

LISTA DE ABREVIações

ADS – *Advanced Design System*
AG – Algoritmo Genético
ANATEL – Agência Nacional de Telecomunicações
CA – Corrente Alternada
CC – Corrente Contínua
CI – Casamento de Impedâncias
CST – *Computer Simulation Technology*
EA – Eletromagnetismo Aplicado
GEA – Grupo de Eletromagnetismo Aplicado
HFSS – High Frequency Electromagnetic Field Simulation
HP – *Hewlett Packard Associates*
IoT – *Internet of Things* (Internet das Coisas)
Li-Ion – Íons de Lítio
MD – Mão Direita
ME – Mão Esquerda
RCR – Rede de Compressão de Resistência
RF – Rádiofrequência
RK – Runge-Kutta
SMD – *Surface Mounting Device*
SRR – *Split Ring Resonator*
SSF – Superfície Seletora de Frequências
S-SRR – *Square Split Ring Resonator*
PMP – Ponto de Máxima Potência
TESF – Transmissão de Energia Sem Fios
UHF – *Ultra High Frequency*
VHF – *Very High Frequency*

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
1.1. Contextualização do problema.....	16
1.2. Objetivos	19
1.3. Metodologia	20
1.4. Contextualização da pesquisa	21
2. ESTADO DA ARTE SOBRE RECTENNAS	24
2.1. Breve Histórico sobre TESH.....	24
2.2. Trabalhos e estudos sobre <i>Rectennas</i>	27
2.3. Considerações finais.....	43
3. CIRCUITO RETIFICADOR E CARGA	44
3.1. Sistema <i>rectenna</i>	45
3.2. Escolha da Carga	47
3.3. Baterias Li-Ion.....	48
3.3.1. Carregamento/Descarregamento das baterias Li-Ion.....	49
3.3.2. Perfil de carregamento da bateria Li-Ion.....	50
3.4. Circuito Retificador.....	52
3.4.1. Diodo	52
3.4.2. Modelo do conector	58
3.4.3. Topologias para circuitos retificadores de <i>rectennas</i>	59
3.4.4. Projeto e análise do circuito retificador	62
3.4.5. Medição de carregamento da bateria utilizando retificador e conversor <i>booster</i> .	71
3.4.6. Retificador para 1,80 GHz e Dupla Frequência (1,80/2,45 GHz).....	73
3.5. Considerações Finais.....	77
4. ANTENAS	79
4.1. Antenas Impressas	79
4.2. Antenas Impressas Retangulares.....	81
4.2.1. Projeto e otimização das antenas	81
4.2.2. Resultados medidos e simulados das antenas.....	87
4.3. Metamateriais.....	91
4.4. Projeto de Célula Metamaterial.....	96
4.5. Projeto de Lentes Eletromagnéticas com Metamaterial	103
4.6. Considerações Finais.....	106

5. SISTEMA RECTENNA COMPLETO	107
5.1. Testes de carregamento	107
5.2. Propostas de Melhoria das Condições de Carregamento.....	110
5.2.1 Filtro de frequências.....	111
5.2.2 <i>Rectenna</i> com uso de lente eletromagnética	114
5.2.3 Conexões Série e Paralelo	115
5.3. Operação Otimizada de um Sistema <i>Rectenna</i>	120
5.4. Considerações Finais.....	122
CONCLUSÃO	124
6.1. Trabalhos Futuros.....	126
REFERÊNCIAS.....	127
Apêndice A.....	136
Apêndice B.....	140
Apêndice C.....	143
Apêndice D.....	148

1. INTRODUÇÃO

1.1. Contextualização do problema

Atualmente, para atender à crescente demanda mundial por energia, fontes fósseis, principalmente o carvão e derivados do petróleo, ainda são os principais meios empregados para geração de energia elétrica. No Brasil, um país com matriz energética ainda majoritariamente hidrelétrica, nos últimos anos, cresceu o uso de termelétricas movidas por tais fontes fósseis devido a ciclos irregulares de chuvas e, por consequência, queda nos níveis dos reservatórios de água. Em função do emprego crescente de tais fontes fósseis em todo o planeta, está em curso o incremento expressivo da concentração de gases causadores do efeito estufa na atmosfera terrestre. A elevação da temperatura global vem causando alterações no clima, com aumento de ocorrências de grandes desastres climáticos, tais como furacões, inundações, secas severas etc., causando grandes perdas humanas e econômicas. Em contrapartida, também há uma demanda crescente da comunidade internacional pela utilização de fontes limpas e renováveis de energia como maneira de reduzir, ou mesmo interromper, o aumento da temperatura global em razão dos gases do efeito estufa. Nesse contexto, diferentes tipos de novas fontes de energia têm sido propostas, investigadas e construídas para atender grandes blocos de consumo: solar (fotovoltaica e aquecimento), eólica, geotérmica, marítima, biogás, fusão nuclear, dentre outras (Energética E., 2017). Entretanto, para o emprego de tais fontes, grandes somas de recursos financeiros e humanos são requeridos, necessitando de programas governamentais de incentivo e participação de consórcios bem estruturados para a sua construção.

Nesse âmbito, outros tipos de fontes energéticas, fundamentalmente projetadas para atendimento a pequenos blocos de carga, também vêm ganhando destaque no cenário científico e comercial. Uma dessas novas fontes, capaz de alimentar cargas de baixíssimo porte, é o reaproveitamento de energia eletromagnética disponível no ambiente. No momento atual, a disponibilidade dessa forma de energia está crescendo devido a forte tendência de maior utilização de meios sem fio para comunicação. Roteadores de internet de alto ganho, operando sob o protocolo Wi-Fi, já são uma realidade em vários ambientes internos e externos, enquanto redes de antenas de celulares cobrem cidades inteiras,

disponibilizando, de maneira ininterrupta, sinais eletromagnéticos em grandes áreas. Em um meio onde existe uma onda eletromagnética propagando, existe uma densidade de potência disponível dada por (SADIKU, 2012):

$$\mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{H} \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right], \quad (1.1)$$

onde \mathbf{S} é o vetor densidade de potência líquida, \mathbf{E} é o vetor intensidade de campo elétrico e \mathbf{H} é o vetor intensidade de campo magnético.

Essa densidade de potência disponível pode ser aproveitada para geração de energia elétrica, bastando para tal, realizar sua captação e posterior conversão de sinal. Assim, com a intenção de se aproveitar a energia das ondas eletromagnéticas propagando em um meio, surge o conceito de antena retificadora, ou *rectenna*, um dispositivo capaz de converter o sinal em radiofrequência (RF) trafegando em um meio, em um sinal em corrente contínua (CC) com intuito de alimentar alguma carga elétrica (ZHANG, 2013) e (BROWN, 1984).

A *rectenna*, projetada para operar a partir da coleta da energia eletromagnética disponível no ambiente, enquadra-se na categoria de reaproveitamento de energia. Em tal aplicação não existem fontes de sinal RF exclusivamente dedicadas para a *rectenna*, mas sim, fontes que são projetadas para os serviços de telecomunicações. A *rectenna*, então, aproveita uma parcela de energia que não seria utilizada, a energia eletromagnética a partir de tais fontes, para alimentar cargas de baixíssimo consumo energético.

São várias as cargas de baixo consumo que estão surgindo atualmente e que atendem aos requisitos para serem alimentadas por uma *rectenna*. Sensores, microcontroladores, lâmpadas e sinalizadores, pequenos motores e dispositivos de comunicação são candidatos naturais para aplicação da *rectenna*. Tais dispositivos, muitas vezes, são concebidos e fabricados para utilização na Internet das Coisas ou mais comumente utilizada na versão em inglês, *Internet of Things* (IoT) (JOSE, et.al., 2015). Em tal aplicação, uma rede de dispositivos eletrônicos de baixo consumo opera de forma ininterrupta, fornecendo ao usuário informações relevantes do meio ambiente, tais como temperatura, umidade, acidez etc. A troca de informações entre os aparelhos e o usuário ocorre normalmente sem fios, com uso da rede *Wi-Fi* ou

Bluetooth. Como são aparelhos eletroeletrônicos, tais dispositivos precisam operar a partir de uma fonte elétrica, tradicionalmente, baterias. Entretanto, baterias, a partir do uso prolongado dos aparelhos, precisam ser recarregadas ou mesmo substituídas, o que em grandes instalações, pode necessitar de um plano custoso de manutenção. Nesse cenário, a tecnologia *rectenna* surge como uma alternativa promissora para alimentar tal perfil de carga de forma constante e ininterrupta, dado que as ondas eletromagnéticas normalmente estão disponíveis no ambiente durante o dia inteiro.

Porém, ainda são inúmeros os desafios técnicos e econômicos que a tecnologia da *rectenna* necessita transpor para ser uma alternativa viável e comercial de fonte de energia elétrica. As dificuldades relacionadas ao comportamento não linear de alguns de seus blocos constitutivos, em destaque para conversão RF-CC, dificultam de sobremaneira o projeto e a previsibilidade operacional de todo o sistema. Problemas relacionados às características elétricas dos materiais elétricos, operando em altas frequências, podem ocorrer devido a divergências entre seus parâmetros fornecidos nos catálogos e os efetivamente obtidos durante a operação como *rectenna*. Muitas vezes tais materiais, concebidos para operar em altas frequências, são de difícil acesso, necessitando de importação, além de também possuírem um custo elevado. As dificuldades constitutivas citadas são ainda agravadas pelo maior desafio entre todos: o baixo nível de energia eletromagnética presente nos ambientes internos e externos que pode ser efetivamente aproveitado. Os valores de campo elétrico e magnético em tais locais são inclusive regulados por norma específica, tais como as diretrizes da Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL) para exposição a campos elétricos, magnéticos e eletromagnéticos (BRASIL, 2002). Esta característica intrínseca de baixíssima disponibilidade de energia obriga que o projeto de uma *rectenna* seja, sucessivamente, otimizado em busca de uma maior coleta de energia e com o máximo de eficiência possível entre os seus diversos blocos operacionais.

A partir das dificuldades apresentadas, o carregamento de uma bateria é uma escolha natural e promissora para ser alimentada por uma *rectenna*, operando a partir do reaproveitamento de energia eletromagnética disponível no ambiente. Mesmo um baixo valor de corrente elétrica circulando continuamente durante um longo tempo deve ser capaz de carregar ou reduzir o descarregamento da bateria

quando em operação. Um desafio adicional neste caso é que a tensão de saída do sistema deve ser, pelo menos, maior que a tensão de circuito aberto da bateria. Várias *rectennas* operando em conjunto podem multiplicar a capacidade de fornecimento de energia viabilizando, assim, um maior carregamento da bateria. A partir da equação (1.1), nota-se também que o aumento da área efetiva acarreta o aumento da potência disponível na entrada da *rectenna*. Tal característica pode ser aproveitada para incrementar a capacidade de fornecimento de energia do sistema *rectenna* com o uso de antenas de maiores dimensões e diretividade.

1.2. Objetivos

Este trabalho tem por objetivo geral a avaliação teórica e experimental da aplicabilidade da tecnologia *rectenna* para alimentação de uma carga elétrica amplamente disponível no mercado: uma bateria utilizada em um celular do tipo *smartphone*. Para efetivação desse objetivo, são necessárias que várias etapas sejam atendidas para que o sistema possa operar de maneira mais eficiente e otimizada. As principais etapas investigadas neste trabalho são:

- Revisão bibliográfica acerca do estado da arte atual sobre a tecnologia *rectenna* e seu emprego em aplicações práticas de engenharia.
- Escolha da carga e posterior modelagem do comportamento da impedância desta carga.
- Avaliação do modelo de diodo mais adequado para a utilização no trabalho.
- Avaliação das topologias de circuitos retificadores mais indicadas para aplicação em uma *rectenna*.
- Simulações dos dispositivos propostos neste trabalho utilizando *softwares* ADS® e CST®.
- Caracterização minuciosa dos parâmetros permissividade elétrica ϵ_r e tangente de perdas δ do substrato de fibra de vidro, FR4.
- Elaboração de rotinas de cálculo de potencial de barreira do diodo HSMS-2850 e parâmetros constitutivos das lentes eletromagnéticas utilizando o *software* Matlab®.

- Otimização de todos os circuitos retificadores propostos e posterior manufatura.
- Avaliação do emprego de circuitos conversores CC-CC em um sistema de reaproveitamento de energia via *rectenna*.
- Avaliação do emprego de retificadores operando em dupla frequência em um sistema *rectenna*.
- Avaliação das antenas mais indicadas para execução do reaproveitamento da energia eletromagnética.
- Melhorias na coleta de energia das antenas: otimização da diretividade e uso de lentes eletromagnéticas.
- Estudo teórico-experimental acerca do emprego das lentes eletromagnéticas utilizando superfície metamaterial.
- Estudo das topologias série e paralelo para conexão de várias *rectennas*.
- Investigação acerca da operação da *rectenna* carregando uma bateria em um sistema possuindo dupla frequência de operação.

1.3. Metodologia

Após uma breve apresentação do assunto neste capítulo, este trabalho inicia-se no Capítulo 2 através de uma revisão bibliográfica acerca das mais recentes pesquisas, abordagens e aplicações envolvendo *rectennas*. Uma etapa importante inicialmente realizada no Capítulo 3 é a modelagem elétrica da carga para verificação comportamental durante um carregamento elétrico. Após a modelagem da carga, o conjunto constituído por retificador e carga é simulado e otimizado no *software* ADS®. Tal conjunto é caracterizado por uma grandeza elétrica fundamental em um projeto de uma *rectenna*: impedância de entrada. A impedância de entrada é o valor de impedância que um determinado trecho de linha de transmissão mais a carga apresentam-se frente a uma fonte geradora. Com o valor da impedância de entrada modelada e estabelecida, o projeto e a posterior otimização do circuito pode ser implementada de forma a se obter um resultado mais preciso e eficiente possível. Em todo o texto, a comparação entre os resultados simulados e medidos são, sistematicamente, realizados de forma a construir um *know-how* de manufatura.

Após a validação da melhor topologia de retificador e do modelo de carga, são investigadas novas soluções para a obtenção de um maior nível de corrente elétrica na saída da *rectenna*. A utilização de um circuito *booster*, conversor CC-CC para aumentar a tensão de saída é investigada e testada, seguida pelo projeto e otimização de um circuito retificador operando em dupla frequência.

Em seguida às soluções de melhorias propostas para o conjunto retificador-carga, no Capítulo 4 as antenas são analisadas e também submetidas a processo de otimização de seus parâmetros de forma a possibilitar uma maior coleta da energia RF. O *software* CST® é utilizado para o projeto básico e as subsequentes otimizações. Neste trabalho, as antenas escolhidas são do tipo retangular impressa e suas dimensões são otimizadas com relação a dois parâmetros fundamentais: parâmetro S_{11} e diretividade na frequência de projeto. Lentes eletromagnéticas constituídas por superfícies metamateriais são investigadas para obtenção de uma diretividade ainda maior nas antenas.

No Capítulo 5 são realizados os testes operacionais completos das *rectennas* projetadas durante todo o trabalho. As melhores e mais promissoras configurações são testadas e são investigadas maneiras de se conectar várias *rectennas* através da conexão série ou conexão paralela. No Capítulo 6 é apresentada a conclusão do trabalho, considerações finais e propostas para trabalhos futuros. As fotos dos dispositivos construídos apresentando os melhores resultados encontram-se agrupados no Apêndice C.

1.4. Contextualização da pesquisa

O Grupo de Eletromagnetismo Aplicado (GEA) do CEFET-MG tem como objetivo principal a investigação de soluções para problemas de eletromagnetismo e o desenvolvimento de equipamentos eletromagnéticos. Dentre os dispositivos eletromagnéticos investigados pelo GEA, destaca-se a *rectenna*, objeto de estudo desta dissertação, que pretende dar continuidade aos desenvolvimentos realizados pelo grupo, por meio de uma investigação computacional e experimental de cada parte constituinte da *rectenna*. Alguns dos trabalhos desenvolvidos pelo GEA a respeito de *rectennas* e suas partes constituintes são:

- *Wireless Power Transmission Using a Rectenna* (PEREIRA et. al., 2013).

- Estudo teórico e experimental de um sistema de conversão e transmissão de energia usando *rectennas* (CAMPOS, 2014).
- Estudo teórico e experimental de um sistema para transmissão de energia sem fio utilizando *rectenna* (PEREIRA, 2014).
- *Numerical Simulation using FDTD Method to Estimate Return Loss for Ultra-Wideband Antennas Built with High Loss FR-4* (MILAGRE et. al., 2015).
- *Improvements on Excitation of Microstrip Antennas Using FDTD-CPML Method* (GONÇALVES, et. al., 2015).
- *FDTD-CPML Method Applied to analysis of a Novel UWB Microstrip Antenna* (GONÇALVES, et. al., 2016).
- *Mutual Coupling Analysis in Fractal Microstrip Antenna Arrays* (SOARES, 2016).
- *Sierpinski carpet fractal microstrip arrays for energy harvesting applications* (SOARES, RESENDE, GONÇALVES, 2016).
- Sistema de Reaproveitamento de Energia Utilizando Conjunto de Antenas *Microstrip* (BRANDÃO, ZANON, RESENDE, 2016).
- *Study of Different Geometries of Microstrip Antennas of High Gain for use in Energy Harvesting Systems* (BRANDÃO, et. al., 2016).
- *A Novel Circular Fractal Microstrip Antenna Array for Energy Harvesting* (SOARES, et. al., 2016a).
- *Improvements on Electric Field Excitation for FDTD-UPML Applied on a Novel High-Resonant Antenna Geometry built in FR-4 Substrate* (SOARES, et. al., 2016b).
- Sistema para reaproveitamento da energia eletromagnética usando *rectennas* (BRANDÃO, 2017).
- *Parallel Association of Rectennas for Electromagnetic Energy Harvesting* (BRANDÃO, et. al., 2017).
- *Analysys of Input Power Dependency for Rectennas* (BICALHO, RESENDE, BRANDÃO, 2017).
- Otimização e Investigação Comportamental de Antenas Dipolo Operando em um Sistema *Rectenna* (BICALHO, RESENDE, CORREA, 2017).

- Otimização, Análise e Construção de um Retificador de Baixíssima Potência para Aplicações em Transmissão de Energia Sem Fio e Colheita de Energia (DA SILVA, R., 2017).

2. ESTADO DA ARTE SOBRE RECTENNAS

Neste capítulo é apresentado um breve histórico da Transmissão de Energia Sem Fios (TESF) e um estudo do estado da arte sobre a tecnologia de *rectennas*, contemplando as configurações e topologias mais promissoras para antenas, circuitos retificadores e aplicações práticas.

2.1. Breve Histórico sobre TESH

A TESH foi inicialmente concebida a partir dos trabalhos experimentais de Michael Faraday sobre indução magnética, realizados em 1831. Experimentalmente, Faraday descobriu que, ao circular corrente elétrica em uma bobina A próxima de uma bobina B, sem nenhum tipo de conexão elétrica entre elas, ocorria o surgimento de corrente elétrica na bobina B por um curto período de tempo. Também na ocorrência de um desligamento do circuito de alimentação da bobina A, circulava por um breve instante de tempo uma corrente na bobina B. Ademais, foi verificado que o sentido de circulação da corrente elétrica na bobina B ocorria em função do ligamento ou desligamento da bobina A (ZHANG, 2013).

Com o objetivo de verificar se o fenômeno observado era apenas de natureza elétrica, Faraday também aproximou um ímã permanente próximo às bobinas e constatou que, enquanto o ímã se mantinha em movimento, ocorria a circulação de corrente elétrica nas bobinas. O sentido observado da corrente elétrica era em função da aproximação ou afastamento do ímã em relação às bobinas. Além disso, foi verificada a circulação de correntes nas bobinas quando essas eram movimentadas em relação ao ímã permanente, validando, assim, a reciprocidade do evento.

Após as verificações experimentais citadas, Faraday elaborou o conceito de indução eletromagnética, a Lei da Indução de Faraday, na qual a variação do fluxo magnético em um determinado circuito acarreta o surgimento de corrente elétrica nesse mesmo circuito. Posteriormente, a partir dos trabalhos de Faraday e Ampère, Maxwell elaborou a forma corrigida da Lei Circuital de Ampère com a inclusão da contribuição da corrente de deslocamento, explicando, portanto, os recém-descobertos fenômenos de propagação de ondas eletromagnéticas (SADIKU, 2012).

Heinrich Hertz, em 1888, com o intuito de aperfeiçoar a então recém-descoberta propriedade da indução eletromagnética, provou experimentalmente que a rápida oscilação de correntes elétricas por meio do faiscamento em um dispositivo elétrico era capaz de gerar ondas eletromagnéticas. Essas ondas, quando atingiam um circuito com uma bobina em circuito aberto, também produziam o surgimento de correntes elétricas, evidenciando, dessa forma, a reformulação da equação de Ampère proposta por Maxwell.

Após os trabalhos de Hertz, foi Nikola Tesla, no início do século XX, quem efetivamente começou a pesquisar e a experimentar os dispositivos para a implementação da TESH como uma solução viável de engenharia para toda a população (TESLA, 1901). Em sua Torre de Wardenclyffe, Tesla obteve com sucesso a transmissão de energia a partir de uma bobina ressonante em 150 kHz alimentada por uma fonte de 300 kW (TESLA, 1902). Todavia, os trabalhos de Tesla sobre TESH não prosperaram devido à baixa eficiência do sistema, inexistência de equipamentos de alta potência e de alta frequência na época e dificuldades financeiras.

Durante a Segunda Guerra Mundial (1939 a 1945), foram desenvolvidos os tubos de alta potência de micro-ondas que, mais tarde, seriam aproveitados para os primeiros trabalhos em TESH envolvendo micro-ondas e circuitos retificadores. Desse modo, foi possível, na década de 1950, o início da fase moderna da TESH por meio dos trabalhos empreendidos na *Raytheon Company* (BROWN, 1984), onde pela primeira vez foi projetada e construída uma aeronave estacionária (helicóptero) alimentada por feixe de micro-ondas. Nesse experimento, as ondas foram criadas mediante tubos capazes de gerar algumas centenas de quilowatts com comprimento de onda de 10 cm. A captação da energia foi realizada utilizando antenas filamentosas do tipo dipolo de meia onda. Cada antena foi conectada a um conjunto série de retificadores e, por fim, o elemento antena-retificador foi conectado em paralelo com outros conjuntos antena-retificador, formando, portanto, uma matriz de conexão.

Foi assim formulado o conceito fundamental do conjunto antena e retificador, denominado *rectenna* (BROWN, 1984). A *rectenna* instalada no helicóptero era constituída por 4480 diodos do tipo IN82G, com potência máxima de saída de 270 W. Devido ao enorme sucesso na mídia após a demonstração do funcionamento do

helicóptero (Figura 2.1), a empresa norte-americana *HP (Hewlett Packard Associates)* contribuiu para o projeto com a doação de algumas amostras dos então recém-desenvolvidos diodos *Schottky HPA 2900*. Tais diodos se mostraram bem melhores que os convencionais anteriormente empregados, sendo capazes de operar com maior eficiência e com maiores valores de potência associados.

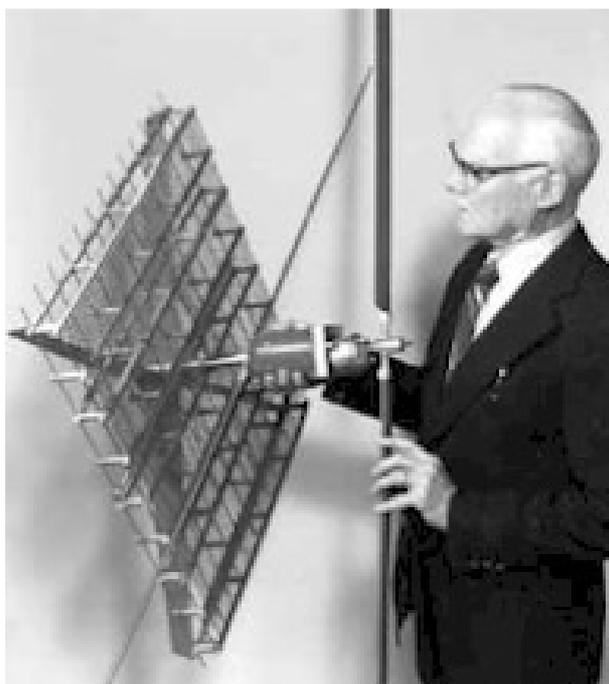


Figura 2.1. Demonstração para o público do funcionamento do helicóptero alimentado por *rectenna* (BROWN, 1984).

Conforme descrito por Brown (1984), os requisitos fundamentais para a plena operação de um sistema de Transmissão de Energia Sem Fios são: alta eficiência, baixo custo, alta confiabilidade, pequenas dimensões e peso. Um dispositivo ou equipamento que opere sem a necessidade de uma conexão permanente por meio de fios, cabos e baterias possui vantagens expressivas frente aos tradicionais sistemas. Algumas dessas vantagens obtidas são as reduções das dimensões físicas dos dispositivos, menores temperaturas de trabalho e eliminação de custos com fiação, cabeamento e vias para cabos (eletrodutos, eletrocalhas etc.). Entretanto, o principal benefício é a total eliminação do uso de baterias, quando possível, ou sistemas que, permanentemente, estejam carregando as baterias, garantindo assim, um maior tempo sem necessidade de recarga.

Estruturalmente, as diversas tecnologias para aplicação da TESH se encontram compreendidas em uma das seis grandes categorias resumidas em (JEREMIAH & CHUKWUEMEKA, 2017). As categorias citadas são: acoplamento indutivo (mesmo princípio de funcionamento dos transformadores), transmissão eletromagnética (utilizando feixe de lasers), transmissão via campo magnético evanescente (utilização do campo próximo de bobinas para transmissão de energia), transmissão via acoplamento ressonante indutivo (transmissão de energia utilizando bobinas ressonando em uma mesma frequência), transmissão via indução eletrostática (transmissão de energia a partir do gradiente de campo elétrico) e, por fim, a transmissão de energia via micro-ondas. À aplicação deste trabalho, um sistema sem fios via *rectenna* para carregamento de uma bateria de Íon-Lítio típica de aparelhos celulares, enquadra-se na última categoria citada acima e será amplamente discutida e detalhada.

Na seção seguinte desse capítulo é realizada uma compilação contendo os principais trabalhos abordando os diversos parâmetros teóricos e construtivos acerca das *rectennas*. São priorizados os trabalhos mais recentes para compor um estado da arte atualizado sobre o tema desta pesquisa.

2.2. Trabalhos e estudos sobre *Rectennas*

Acerca da TESH e das *rectennas*, existem pelo menos duas filosofias básicas para o funcionamento do sistema: utilização de fonte(s) dedicada(s) (transmissão direta de energia) e utilização da energia presente no ambiente provida por fonte(s) não dedicada(s). Esta última, por não possuir fonte dedicada, opera normalmente com níveis baixíssimos de potência, da ordem de μW o que, muitas vezes, limita o seu emprego. Esta segunda filosofia de operação é normalmente denominada reaproveitamento, coleta ou reciclagem da energia.

O trabalho de (PIÑUELA; MITCHESON; LUCYSZYN, 2013), identificado neste texto como Trabalho 1, apresentou um estudo e uma metodologia inseridos na categoria de reaproveitamento da energia empregando uma *rectenna*. Em tal trabalho foram efetuadas medições sistematizadas dos níveis de energia provenientes das fontes de RF presentes na parte externa de todas as 270 estações de metrô da cidade de Londres, Reino Unido. A investigação demonstrou que, dado os baixíssimos níveis de energia de entrada disponíveis para essa aplicação, a

eficiência do sistema de reaproveitamento e o valor mínimo da tensão de operação foram elementos fundamentais para o desempenho adequado da *rectenna*. As faixas de frequências identificadas como possíveis candidatas para o reaproveitamento da energia foram o DTV (470-610 MHz), GSM900 (925-960 MHz), GSM1800 (1805-1880 MHz), 3G (2110-2170 MHz) e Wi-Fi (2400-2500 MHz). Em geral, as medições demonstraram que o valor médio de densidade de potência disponível a partir de tais fontes situa-se abaixo de 100 nW/cm². Devido ao objetivo principal do trabalho ser a captação da energia presente no meio proveniente de várias direções, os autores escolheram dois modelos básicos de antenas omnidirecionais, conforme ilustrado na Figura 2.2: antena do tipo dipolo de fio e antena construída a partir de fita de cobre, ambas projetadas para cada frequência específica de operação. Todas as antenas foram simuladas utilizando o *software* CST® e obtiveram um ganho direcional entre 4,32 e 4,76 dBi. Os valores de S₁₁ simulados e medidos situaram-se bastante próximos entre si, para uma impedância de entrada de 50 Ω para posterior conexão com circuito retificador. A partir dos valores de energia disponíveis no ambiente, mais os ganhos simulados para as antenas, foi possível calcular o valor esperado do total de potência disponível na saída das antenas. Os valores situaram-se entre alguns poucos μW até o máximo de 30μW.

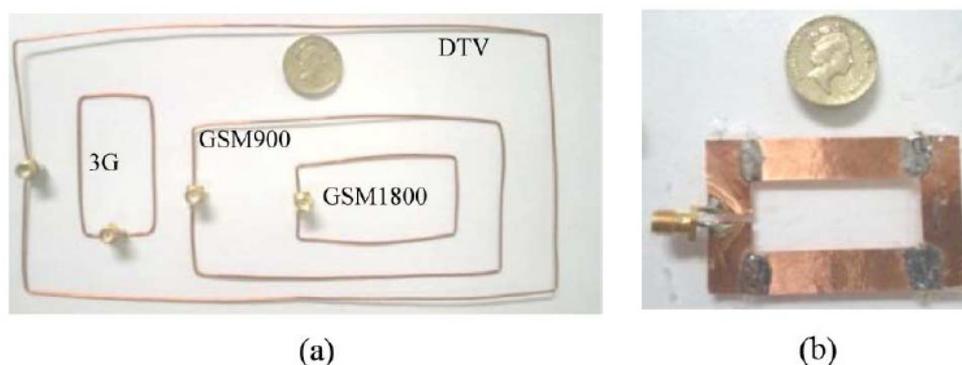


Figura 2.2. - Trabalho 1: a) dipolos de fio de cobre, b) dipolo de fita em cobre: frequência 3G (PIÑUELA; MITCHESON; LUCYSZYN, 2013).

Após os valores de potência disponibilizados pelas antenas, o circuito retificador foi projetado e otimizado no *software* ADS® utilizando o diodo SMS7630, configuração dobrador de meia-onda, conectado à respectiva antena através de um

circuito tipo L (indutor série com diodo e *stub* em curto-circuito) para casamento de impedância em 50Ω . Para a obtenção de uma tensão CC com menor *ripple* possível, foi conectado um capacitor em paralelo com a carga com elevado valor de capacitância, $100 \mu\text{F}$. Considerando que diodos possuem o comportamento da impedância de operação variando em função da frequência e potência de entrada, os autores adotaram como estratégia de otimização, inicialmente fixar a potência de entrada em -20 dBm e então encontrar o valor otimizado para a carga em cada frequência de operação. A função objetivo adotada para a otimização de todo o circuito retificador foi um valor de S_{11} abaixo de -10 dB . Apesar de todos os protótipos construídos obterem S_{11} abaixo de -10 dB , os circuitos projetados para frequências mais elevadas obtiveram os piores resultados (GSM1800 e 3G), fato que os autores atribuíram à presença de correntes harmônicas de elevada ordem. Para a conexão com uma carga que necessite de um valor estável de tensão, nesse caso um diodo emissor de luz, os conjuntos *rectennas* foram conectados a conversores de tensão CC-CC, modelo BQ25504 da *Texas Instruments Incorporated*. O conversor necessita de um valor mínimo de 330 mV em sua entrada para começar a operar e pode elevar a tensão na saída até um valor máximo de $5,3 \text{ V}$ a partir de ajustes em divisores de tensão resistivos. Após entrada em operação, o circuito permanece funcionando desde que a tensão de entrada se mantenha em no mínimo 80 mV . Além dos testes básicos com os conjuntos *rectennas*-conversores operando apenas em uma frequência, também foram efetivados testes com *rectennas* e conversores trabalhando em todas as frequências propostas ao mesmo tempo. Conforme informado pelos autores, o sistema *rectenna* utilizando a conexão em paralelo entre os dispositivos, mais o auxílio dos conversores CC-CC, foi o que obteve o melhor desempenho dentre todos os testados.

Dadas as características não lineares de operação dos circuitos retificadores trabalhando com sinal de alta frequência na entrada, o trabalho identificado como Trabalho 2 (MARIAN et.al., 2012b), aborda inicialmente a eficiência de diferentes topologias de retificadores em função da potência de entrada. Após processo de otimização dos circuitos no *software* ADS®, as *rectennas* foram construídas conforme Figura 2.3 e submetidas a ensaios operacionais. A topologia diodo simples em série utilizou o diodo HSMS2850 – *Avago* (barreira de potencial de 150 mV), conectado a uma carga de $2,4 \text{ k}\Omega$ com os seguintes resultados na saída: 400 mV

com potência de entrada de -15 dBm, 2,1 V com potência de entrada de 0 dBm, 3,75 V com potência de entrada de 10 dBm. A segunda topologia, diodo simples em paralelo utilizou o diodo HSMS2860 – Avago (barreira de potencial de 350 mV), conectado a uma carga 750 Ω com os seguintes resultados: 335 mV, $P_{in} = -15$ dBm, 1,45 V com $P_{in} = 10$ dBm, 4 V com $P_{in} = 20$ dBm. A terceira associação, diodo em ponte, foi efetivada com a utilização do diodo HSMS2820 – Avago, conectado a uma carga de 200 Ω com os seguintes resultados: 1,1V, $P_{in} = -15$ dBm, 4,2 V com $P_{in} = 20$ dBm, 9,3 V com $P_{in} = 30$ dBm.

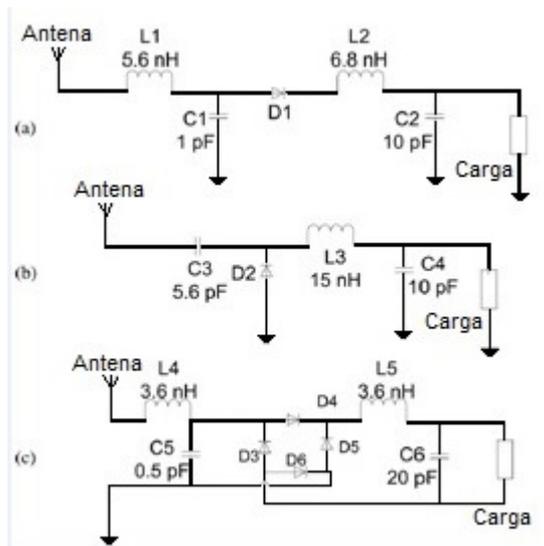


Figura 2.1 - Trabalho 2: topologias para *rectennas* após otimização, a) diodo simples em série, b) diodo simples em paralelo, c) ponte de diodos (MARIAN et.al., 2012b).

Na busca por um único sistema *rectenna* que opere de forma eficiente em uma ampla faixa de potências de entrada, também foi proposta no Trabalho 2 uma configuração de controle que a partir da leitura da potência de entrada, atue sobre um conjunto de chaves ligadas às *rectennas* previamente projetadas. Tal proposta foi chamada de *rectenna* reconfigurável. A leitura da potência RF de entrada é feita com a utilização de um detector RF passivo que entrega um valor de corrente CC proporcional à potência de entrada, enquanto as chaves são comandadas via circuito comparador lógico de três estados. A *rectenna* com diodo em série é ativada via chave controlada para potências menores que 1 dBm, com eficiência máxima de 50% em -3 dBm. Para potências entre 1 e 15 dBm, foi ativada a *rectenna* com diodo paralelo, com eficiência máxima de 68%. Para potências acima de 15 dBm, é a *rectenna* com diodos em ponte a ativada, com eficiência máxima de 80% para uma

potência de 23 dBm. A configuração ajustável foi capaz de entregar à carga um valor de energia de 40,65 J. O circuito proposto é apresentado na Figura 2.4.

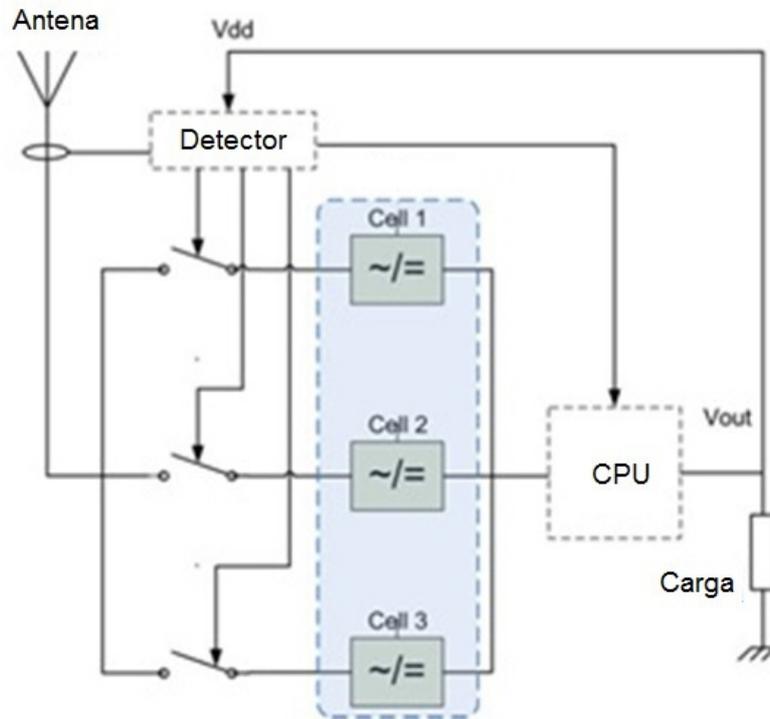


Figura 2.2 - Trabalho 2: diagrama esquemático da *rectenna* reconfigurável (MARIAN et.al., 2012b).

O trabalho identificado como Trabalho 3 (TAN; LIU, 2016) propôs um retificador destinado a operar em uma faixa bastante elevada de frequência, 10 GHz. Na busca por um processo computacionalmente menos custoso para otimização dos circuitos, os autores desenvolveram um sistema linear de equações para modelagem do comportamento dos diodos em um circuito dobrador de tensão. Os valores da impedância dos diodos, tensão de saída na carga, assim como a eficiência de conversão obtida pelas equações propostas, foram comparados com os resultados obtidos via *software* ADS®. Os resultados informados foram satisfatórios, com boas aproximações em todas as medições efetuadas. Os diodos utilizados foram do tipo HSMS-2862 – *Avago*, e capacitores de 5,6 e 20 pF para o circuito retificador-dobrador de tensão, conectados através de linhas otimizadas em microfita para obtenção de casamento de impedâncias. As medições finais indicaram que a melhor eficiência obtida para o circuito retificador-dobrador foi de 72%, tensão na carga de 4,8 V, operando em 10 GHz, com potência de entrada de

87 mW (19,4 dBm). Os circuitos construídos, assim como o desenho da topologia adotada estão apresentados na Figura 2.5.

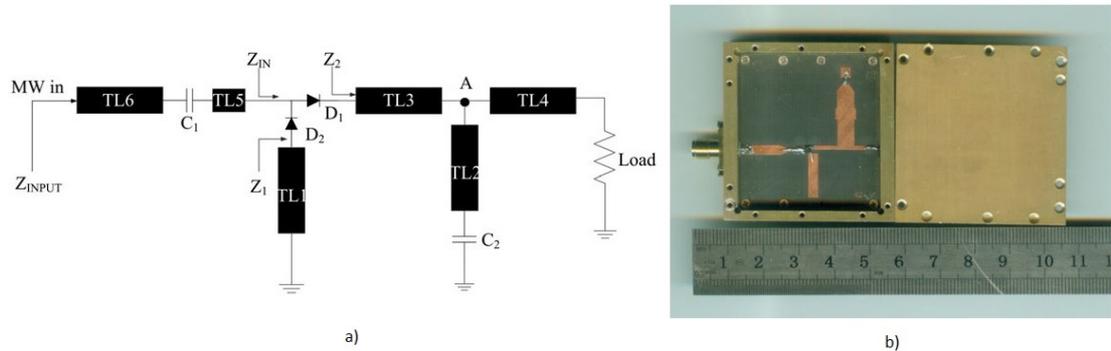


Figura 2.3 – Trabalho 3: a) Topologia empregada para o retificador, b) Retificador construído (TAN; LIU, 2016).

O trabalho listado como 4 (KANG et. al., 2016) propôs uma topologia de *rectenna* de maneira a possibilitar a implementação da rejeição de ondas harmônicas diretamente entre a antena e o circuito retificador. Assim, o circuito projetado para operar com máxima eficiência na frequência de 2,45 GHz, também possui um filtro de ondas harmônicas projetado para suprimir a segunda e terceira componentes da onda fundamental. Os conjuntos antena, supressor de harmônicos e retificador foram construídos em faces diferentes de um mesmo substrato, *Taconic RF-35*, com permissividade relativa de 3,5 e tangente de perdas de 0,0018. O modelo de antena escolhido foi do tipo *slot* circular, projetado para radiar na frequência fundamental de 2,45 GHz. O circuito retificador foi elaborado com diodos HSMS-8202 – *Avago* e construído segundo a topologia apresentada na Figura 2.6. O resultado medido da *rectenna* em operação, alimentando um carga de 1 k Ω e com potência de entrada de 10 dBm foi uma eficiência de 70,2% e tensão de saída de aproximadamente 3 V.

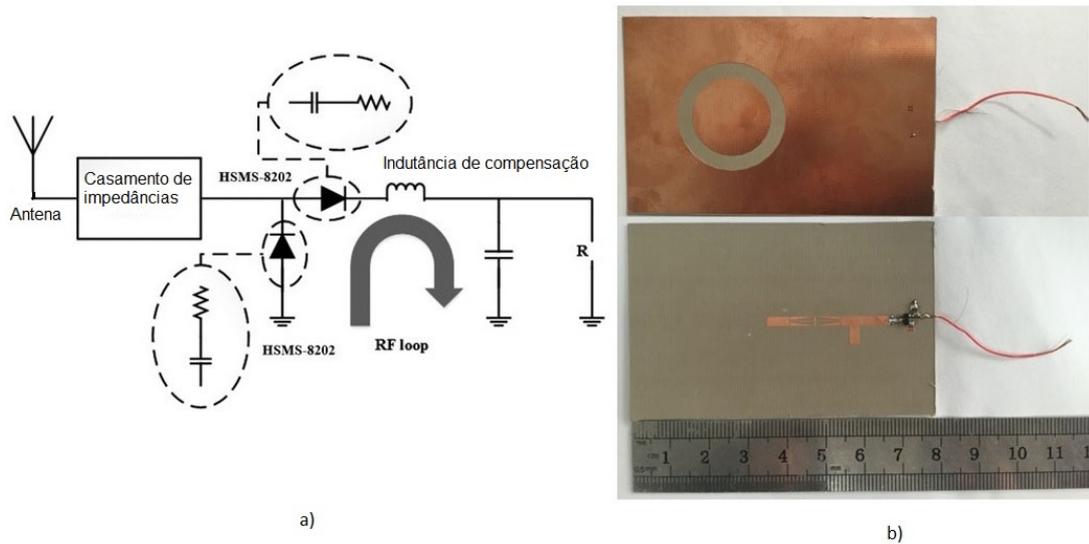


Figura 2.4 – Trabalho 4: a) Topologia empregada para o retificador, b) *Rectenna* construída (KANG et. al., 2016).

O trabalho 5 (SUN et. al., 2013) buscou alimentar um sistema *rectenna* por meio do conceito de reaproveitamento da energia de RF presente no ambiente. Após medições feitas dos níveis de energia presentes no Campus da Universidade de Cingapura, foram escolhidas como fontes as faixas de frequências GSM-1800 (1805 – 1880 GHz) e UMTS-2100 (2110 – 2170 GHz). Dado o nível de energia medido, entre -25 e -15 dBm para ambas as faixas, o trabalho buscou a conexão otimizada entre um arranjo com alto ganho de antena tipo Quasi-Yagi, simulada no software HFSS® (*High Frequency Electromagnetic Field Simulation*) e fabricada sobre o substrato tipo *RT/Duroid 5870* (permissividade elétrica relativa de 2,3) com o circuito retificador, fabricado sobre substrato *RT/Duroid 5880* (permissividade elétrica relativa de 2,2). O arranjo de antenas obteve ganhos diretivos de 10,9 e 13,3 dBi em 1,84 e 2,14 GHz respectivamente. O circuito retificador utilizou um diodo tipo HSMS-2852 – *Avago*, configuração dobrador de tensão, conectado à carga resistiva por meio de um filtro para passagem apenas da componente CC do sinal retificado. O circuito foi otimizado para operar nas frequências de 1,85 e 2,15 GHz, utilizando também um circuito para casamento de impedâncias entre o conjunto diodo-filtro-carga e o conjunto de antenas para 50Ω em 1,85 e 2,15 GHz. A *rectenna* completa, operando no reaproveitamento simultâneo das frequências projetadas obteve uma eficiência global entre 16,6 e 43%, conforme a potência de entrada era aumentada. A tensão de saída foi de 484 mV para a melhor situação, valor já suficiente para

alimentar algum circuito de gerenciamento de energia, tal como um *booster*. O modelo da antena Quasi-Yagi construída e a topologia do circuito retificador estão apresentados na Figura 2.7.

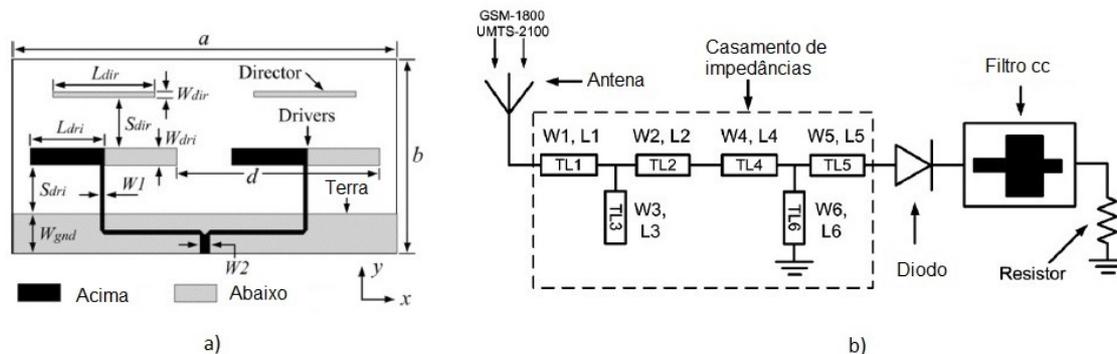


Figura 2.5 – Trabalho 5: a) Desenho representativo da antena Quasi-Yagi, b) Topologia adotada para o circuito retificador (SUN et. al., 2013).

O trabalho 6 (SONG et. al., 2017b) apresenta duas novas soluções para *rectenna*, operando a partir de uma antena banda larga de frequências: a) Manutenção de uma alta eficiência na conversão RF-CC, mesmo sob a condição de variação da carga utilizando uma Rede de Compressão de Resistência (RCR), ou *Resistance Compression Network*; b) Uma nova técnica para eliminação de circuitos de casamento de impedância. A RCR proposta pelos autores, combinada com um circuito para casamento de impedâncias utilizando componentes passivos (indutâncias e capacitores), foi capaz de manter uma eficiência de conversão RF-CC acima de 40%, para uma potência de entrada de -10 dBm e uma faixa larga de frequências, entre 0,5 – 0,9 GHz. A topologia adotada está apresentada na Figura 2.8. Entretanto, na medida em que mais componentes eletrônicos foram acrescentados ao circuito, maiores dificuldades de projeto, custo e fabricação foram adicionados. Uma solução inicialmente apresentada no Trabalho 6 é a implementação de *rectennas* de banda larga ou multibanda utilizando a conexão direta entre uma antena com valor de impedância igual ao conjugado da impedância de entrada do circuito retificador. O detalhamento da técnica é realizado em outro trabalho, denominado como Trabalho 7 neste texto.

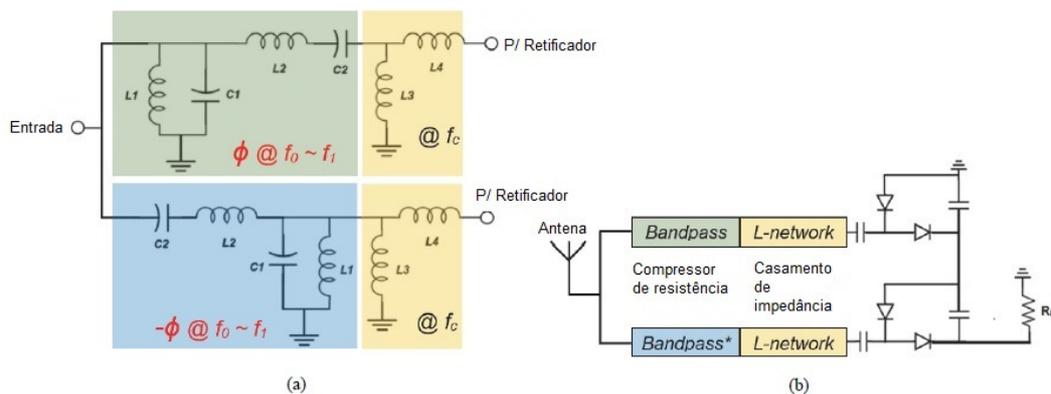


Figura 2.6 – Trabalho 6: a) Topologia detalha do circuito RCR, b) Topologia completa com retificador do circuito RCR (SONG et. al., 2017b).

O trabalho 7 (SONG et. al., 2017a) propôs uma topologia de *rectenna* por meio de um método, cujo princípio baseia-se na conexão entre antena e circuito retificador sem a utilização de um bloco para casamento de impedância entre tais elementos. A impedância do circuito retificador normalmente possui um comportamento expressivamente não linear, dependendo de variáveis externas tais como potência de entrada, frequência de operação e valor da carga, necessitando, portanto, de algum meio para casamento de impedâncias com a antena receptora. O objetivo principal do trabalho foi eliminar o circuito para casamento de impedâncias através da conexão de uma antena com impedância de entrada possuindo um valor complexo conjugado com relação à impedância do retificador, obtendo, portanto, o circuito casado para 50 Ω. Tal dispositivo se mostrou útil principalmente para *rectennas* que operam com multifrequências ou banda larga, já que nesses casos, os tradicionais circuitos para casamento de impedância costumam ser de elevada complexidade de projeto e dificuldade de construção. Conforme reportado, a impedância típica dos circuitos retificadores varia em uma faixa de 20 até 400 Ω na parte real e entre 0 e -700 Ω na parte imaginária. A partir de tal fato, foi proposta a utilização de uma antena que propicie tal configuração conjugada de impedâncias, a antena dipolo assimétrica. A antena e o circuito retificador foram construídos sobre o mesmo substrato, *Rogers RT6002*, com permissividade elétrica relativa de 2,94 para operação nas bandas de frequência GSM1800 e UMTS2100. Foram construídos e testados quatro diferentes modelos de *rectennas* com diferentes modelos de diodo *Schoktty* na busca de verificar se a topologia proposta funciona para diferentes

modelos de diodo. Todos os retificadores também foram construídos utilizando a configuração do diodo em paralelo, um indutor série de 47 nH para bloqueio de componentes CA geradas pelo diodo e um capacitor de 100 nF em paralelo com a carga para estabilização da tensão CC. Na Figura 2.9 são apresentadas as topologias tradicional e a proposta no Trabalho 7, enquanto na Figura 2.10 são apresentados o protótipo construído e a configuração básica do retificador. Os resultados obtidos estão resumidos na Tabela 2.1, na qual podem ser verificados os valores elevados de eficiência da *rectenna*, a partir de 60%, nas melhores condições para cada tipo de diodo.

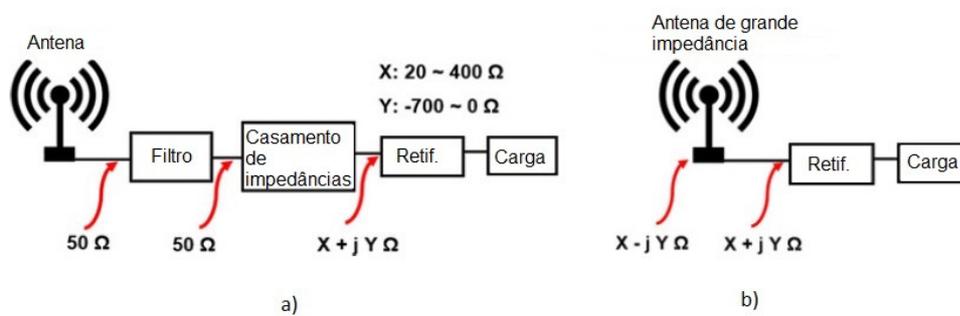


Figura 2.7 – Trabalho 7: a) Topologia tradicional da *rectenna*, b) Nova topologia proposta para *rectenna* (SONG et. al., 2017a).

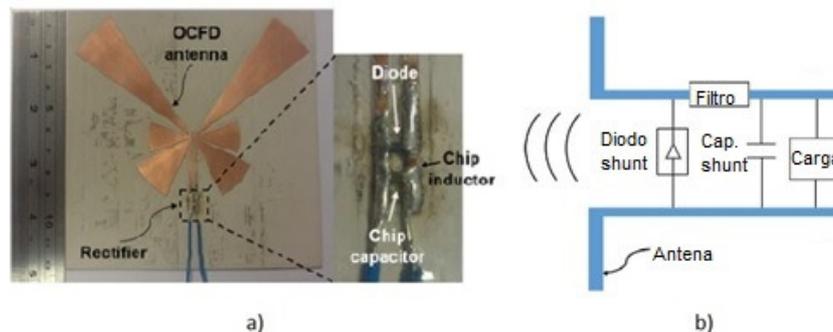


Figura 2.8 – Trabalho 7: a) *Rectenna* construída, b) Esquemático da nova topologia proposta para *rectenna* (SONG et. al., 2017a).

Diodo	Impedância simulada (Ω)	Potência de entrada (dBm)	Eficiência máxima	Faixa ótima de resistência (Ω)
SMS7630	173 – j36	0 dBm	60%	250 – 1500
HSMS2850	325 – j57	5 dBm	65%	200 – 2000
HSMS2860	349 – j166	10 dBm	70%	200 – 2500
HSMS2820	82 – j145	20 dBm	75%	250 – 3000

Tabela 2.1 - Trabalho 7: resultados obtidos (SONG et. al., 2017b).

O trabalho 8 (VISSER; POP; VULLERS, 2011) propôs a utilização de um sistema *rectenna* operando a partir da energia emitida por um celular GSM900, com potência máxima de saída de 2W, e potência média de 250 mW para alimentar um sensor de temperatura em conjunto com uma placa de comunicação RF. O sensor de temperatura utilizado foi o modelo integrado ao microcontrolador de baixo consumo (3 μ W em 2V) MSP430 – *Texas Instruments*. A placa de RF escolhida foi a nRF2401 – *Nordic Semiconductor*, também de baixo consumo. Após ajustes para uma operação otimizada do conjunto sensor-RF, o consumo total estimado foi de 10 μ W, trabalhando com uma tensão de 4 V. Após análise das possíveis condições operativas de uma *rectenna*, foi observado que os níveis de potência e tensão mínimos apenas seriam atingidos sem a utilização de um conversor CC-CC *booster*, se fossem utilizadas antenas de alto ganho (Yagi-Uda, 10 dBi) e associações de *rectennas*. As ligações foram efetivadas na parte CC de cada uma das *rectennas*. Os retificadores foram construídos utilizando o diodo *Schottky* HSMS-2850 – *Avago*, na topologia dobradora de tensão e foram diretamente conectados às respectivas antenas sem a necessidade de casamento de impedância, dado que as antenas foram projetadas com impedância complexo conjugada da impedância do retificador. O conjunto de *rectennas* conseguiu alimentar a carga prevista com 4,04V, possibilitando, portanto, a leitura da temperatura pelo sensor e transmissão de dados a cada 7 segundos pela placa RF para um *notebook*. Todo o sistema em operação se encontra na Figura 2.11.

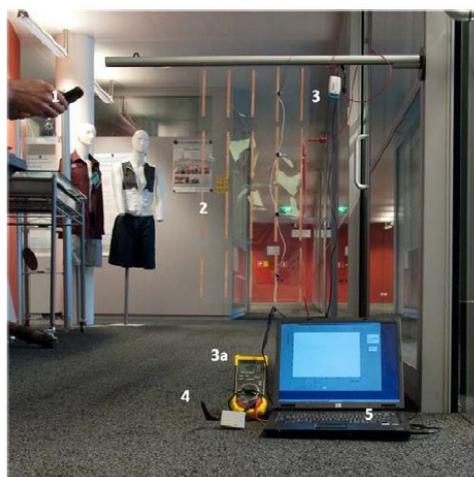


Figura 2.9 – Trabalho 8: 1) celular GSM900, 2) Conjunto de 4 *rectennas*, 3) Sensor de temperatura/placa RF, 3a) Leitura de tensão, 4) Receptor de RF, 5) Notebook para aquisição de dados (VISSER; POP; VULLERS, 2011).

O trabalho 9 (FEZAI et al., 2016) sugeriu um circuito baseado em *rectenna* para obtenção da redução do consumo de energia do modo *stand-by* de aparelhos eletroeletrônicos, tal como um televisor. Tal proposta, apresentada na Figura 2.12, está em consonância com as normas europeias para limitar consumo de energia, na qual para o caso de televisores, estabeleceu consumo máximo de 0,3 W para o modo *stand-by*. A tecnologia baseia-se na utilização de um emissor de RF operando entre 2,40-2,48 GHz, capaz de realizar a transmissão eficiente de energia e um receptor com uma *rectenna* para conversão do sinal RF para CC ligado a uma chave utilizada para energização do aparelho. O emissor, além de enviar a energia RF responsável pela energização do receptor e da chave, também envia um Protocolo de Internet, que funciona como gatilho para operação da chave. Dadas às características dimensionais básicas de um ambiente residencial, foi estabelecida a distância de operação de 5 metros entre emissor e receptor, causando, portanto, perdas por atenuação do sinal em torno de 54 dB.

Como a chave de acionamento precisa de um mínimo de 200 mV para operar, a potência mínima de entrada na *rectenna* instalada no receptor deveria ser de -22 dBm, fornecido por um emissor com potência limitada em 2,5 W (34 dBm) durante um tempo de 20 ms. As antenas implementadas nos circuitos emissor e receptor foram do tipo planar Yagi-Uda modificada, construídas sobre um substrato FR4 (fibra de vidro) com quatro camadas, com permissividade elétrica relativa $\epsilon_r = 4,4$ e tangente de perdas $\delta = 0,025$. Foram utilizados elementos parasitas (linhas impressas sobre o substrato) e componentes SMD (indutor e capacitor) para adequação dos parâmetros requeridos, com ganho final de 5,7 dBi na direção principal (0°) e um mínimo de 0 dBi entre $\pm 30^\circ$. A *rectenna* no lado receptor foi construída utilizando diodos HSMS2852 – Avago, na configuração série paralelo em conjunto com capacitores e indutores para casamento de impedâncias e filtragem de sinais indesejáveis. A topologia do circuito retificador e o diagrama de blocos do circuito receptor são apresentados na Figura 2.13.

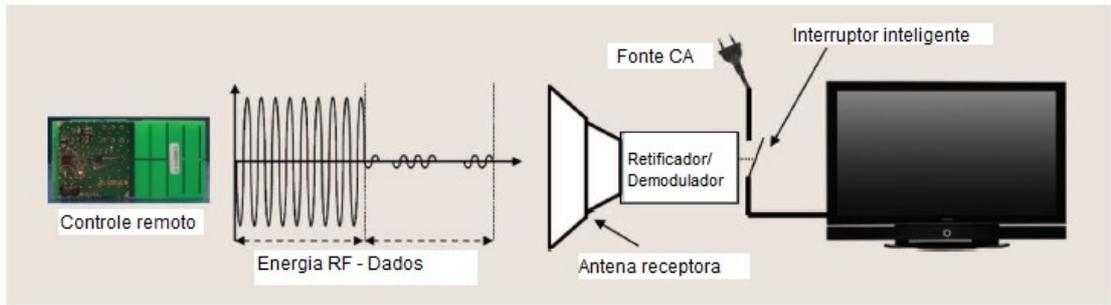
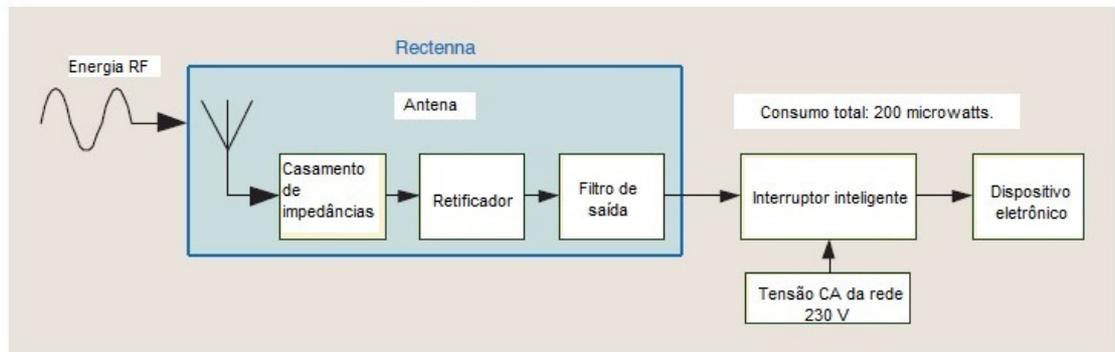
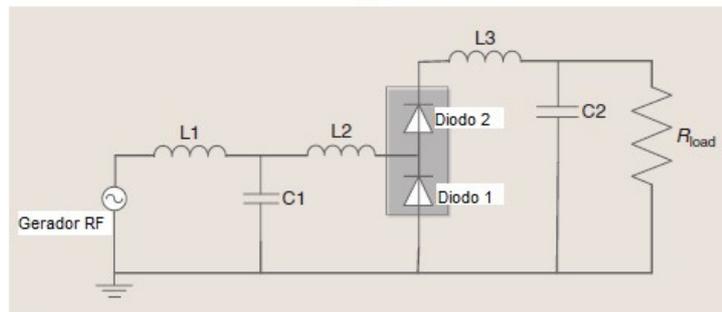


Figura 2.10 – Trabalho 9: topologia básica de funcionamento do circuito proposto (FEZAI et al., 2016).



a)



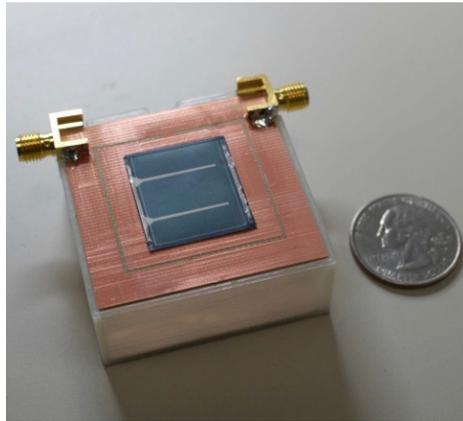
b)

Figura 2.11 – Trabalho 9: a) Circuito para o sistema receptor, b) Topologia adotada para a *rectenna* (FEZAI et al., 2016).

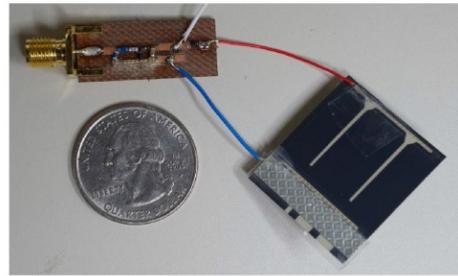
O trabalho 10 (BITO et al., 2017) indicou um circuito híbrido para reaproveitamento da energia com utilização simultânea da energia RF e energia solar para aplicações destinadas a sensores sem fios e IoT, especificamente um microcontrolador recebendo leituras de sensores sem fios. Considerando que os níveis de densidade potência RF disponíveis no ambiente são de baixíssimo valor, da ordem de $\mu\text{W}/\text{cm}^2$, a alimentação e, principalmente, a partida de um microcontrolador diretamente por tal energia pode se tornar inviável, necessitando, portanto, de algum auxílio externo. Assim, além da energia proveniente das ondas

de RF, é proposta também a ligação em paralelo de uma célula solar, capaz de incrementar o nível de tensão CC total e assim, ser possível iniciar um circuito conversor CC-CC a partir do total repouso (*cold-start*). A topologia do sistema proposto consiste na utilização uma antena quadrangular impressa sobre substrato FR4, com 7,4 dBi de diretividade para reaproveitamento da energia RF operando em 2,45 GHz, conectada a um circuito para casamento de impedâncias e subsequente retificador. O retificador, ligado em paralelo com a célula solar através de um diodo série, alimenta o conversor CC-CC BQ25504 - *Texas Instruments*, um supercapacitor de 1470 μF para armazenagem de energia, uma chave *MOSFET*, um microcontrolador MSP430 e por fim, uma placa para comunicação RF, CC2500. A célula solar utilizada foi a *Power Film* MP3-25, capaz de fornecer uma tensão de 3 V quando submetida a irradiação solar de 100 mW/cm^2 .

O circuito retificador utilizou a configuração dobrador de tensão com diodos *Schottky* SMS7630, casado com a antena através de um circuito com indutores de 1,0 e 1,8 nH. Com o módulo RF operando isoladamente, foi possível a energização do *booster* CC-CC no modo *cold-start* (330 mV) com uma potência de entrada mínima de -12,6 dBm. Quando operando também em conjunto com a célula solar, a potência de entrada RF mínima para operar o conversor foi reduzida para -15,6 dBm, validando assim, a ligação proposta. O conjunto necessita da célula solar apenas para realizar o início da operação do conversor. Após a partida inicial, a tensão mínima necessária para operar reduz para 80 mV, valor no qual o sistema RF consegue suprir isoladamente. Os protótipos da antena construída conjuntamente com a célula solar e o circuito retificador estão apresentados na Figura 2.14, enquanto a topologia dos circuitos utilizados e a topologia geral do sistema estão na Figura 2.15.

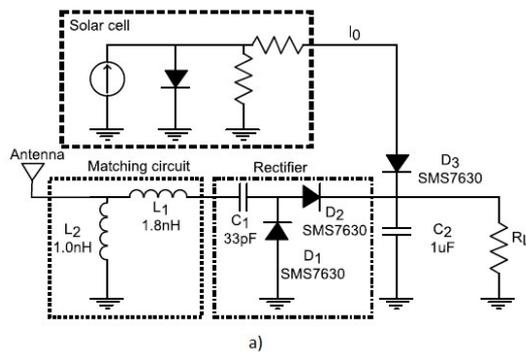


a)

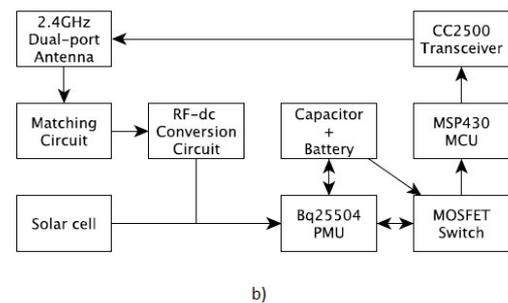


b)

Figura 2.12 – Trabalho 10: a) Antena construída com duas portas e célula solar instalada, b) Retificador construído conectado à célula solar (BITO at. al., 2017).



a)



b)

Figura 2.13 – Trabalho 10: a) Topologia do circuito retificador e célula solar, b) Topologia geral do sistema proposto (BITO at. al., 2017).

O trabalho 11 (VISSER at. al., 2010) recomendou a utilização de um sistema *rectenna* capaz de reaproveitar a energia do ambiente para efetuar o carregamento de uma bateria do tipo Li-Ion (Íons de Lítio). Inicialmente, os autores analisaram o comportamento teórico de um único diodo *Schottky* HSMS-2850 via método Runge-Kutta (RK). Aplicando o método RK, na frequência de 2,45 GHz, e utilizando o modelo elétrico básico do diodo, foi possível traçar um gráfico comportamental da impedância de entrada do diodo alimentando uma carga $R_L C_L$ versus a potência de entrada. Entretanto, quando o valor da constante de tempo $R_L C_L$ superou em várias ordens de grandeza o valor do período da onda RF de entrada, o método RK mostrou-se ineficaz, sendo utilizando então, o método Ritz-Galérkin, o qual relaciona a tensão V_0 de saída com a potência de entrada na antena, P_{in} . A análise final da tensão de saída para vários valores de carga, para uma faixa de potências de

entrada abaixo de 0 dBm, área de interesse para o reaproveitamento de energia, demonstrou que apenas um diodo *Schottky* não era capaz de atender aos requisitos mínimos de operação, com uma tensão de saída extremamente baixa. Assim, os autores propuseram, como maneira de aumentar o valor da tensão de saída, a utilização de um circuito retificador dobrador de tensão, associado a um circuito *booster*, conforme apresentado na Figura 2.16. Para uma operação eficiente de todo o sistema, a impedância da antena receptora da *rectenna* deve estar casada com a impedância de entrada do conjunto *booster*-retificador-carga, garantindo, assim, que o sistema opere no Ponto de Máxima Potência (PMP). Foram construídos dois modelos de antenas, uma do tipo retangular impressa e outra do tipo dipolo dobrado para operação no sistema *rectenna*. As *rectennas* construídas foram capazes de carregar uma bateria de Li-Ion, com tensões entre 3-4,2V para uma tensão de entrada no *booster* tão baixa quanto 0,22 V.

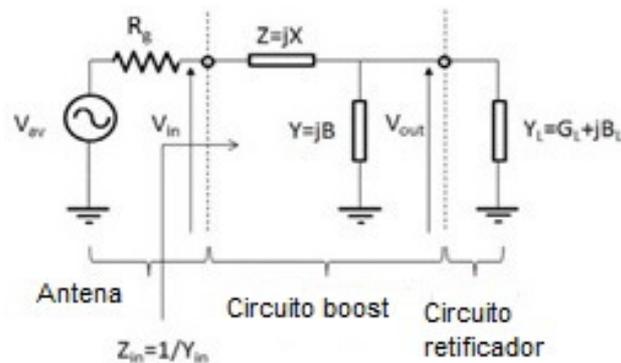


Figura 2.14 – Trabalho 11: topologia básica do circuito *booster* mais retificador (VISSER et. al., 2010).

Outros trabalhos recentemente desenvolvidos também tratam do carregamento de baterias via *rectenna*. No Trabalho 12 (GUDAN et. al., 2014), foi realizado o projeto e a otimização de um sistema *rectenna* para o aproveitamento da energia RF do ambiente em 2,4 GHz para carregamento de uma bateria tipo NiMH (*Nickel Metal Hybrid Battery*). Dado que os níveis de energia são baixos, a otimização da *rectenna*, em uma configuração de retificador dobrador de tensão, foi efetivada para uma potência de entrada de -20 dBm, associada a um conversor CC-CC para elevação da tensão de saída. Para uma potência de entrada de -19,1 dBm, a *rectenna* foi capaz de entregar à bateria uma energia de 421 nJ durante um tempo de carregamento de 1 minuto. Outro trabalho, denominado 13 (ALI;

NALLAGOWNDEN; ZAKARIA, 2015), foi elaborado para carregamento de uma bateria via *rectenna* a partir da frequência 900 MHz do sistema GSM de telefonia móvel. Através de um circuito retificador dobrador com três estágios, conectado a uma antena patch ressonando em 900 MHz, o sistema foi capaz de entregar para a carga (bateria) um valor de tensão de 5 V a partir de uma entrada CA com apenas 30 mV de pico. O Trabalho 14 (AHN, 2011), utilizando um conjunto de antena retangular impressa 4 x 4, circuito retificador com diodo HSMS-2862 associado a um conversor CC-CC, foi capaz de alimentar uma bateria do tipo Li-Ion para suprir o dispositivo *Zigbee*, tipicamente empregado em soluções de telecomunicações. O circuito foi projetado para operar a partir da frequência de entrada de 2,13 GHz, utilizada no sistema CDMA. Para uma distância de até 12 metros a partir da fonte de transmissão, a *rectenna* foi capaz de suprir as necessidades energética do *Zigbee*, com uma corrente de saída de 1,7 mA e 80,9% de eficiência total.

2.3. Considerações finais

Neste capítulo foi apresentado um estudo atualizado sobre trabalhos que empregam a antena retificadora, ou *rectenna*, para a TESH e o reaproveitamento da energia eletromagnética. Pode-se verificar que várias estratégias vêm sendo empregadas para o aumento da eficiência da conversão do sinal RF em sinal CC a partir das fontes disponíveis no ambiente de forma a ser possível alimentar pequenas cargas, tais como baterias e dispositivos e sensores utilizados em IoT.

Na Tabela 2.2 encontram-se resumidos as principais características das *rectennas* abordadas nesse capítulo. Nos trabalhos com mais de um resultado, foi selecionado o melhor quociente para compor a tabela.

Trabalho	Tipo de antena	Topologia Retificador	Frequência de operação	Potência de entrada	Saída/Eficiência
Trabalho 1	Dipolo: fio e fita de cobre	Associação paralela de dobradores de tensão + <i>booster</i>	0,47 – 2,5 GHz (associação)	3 – 50 nW/cm ²	92,2 uW / ~ 40%
Trabalho 2	Conexão a gerador de RF	Ajustável a partir da potência de entrada	0,8 – 2,5 GHz	- 30 até 30 dBm	40,65 J/ Eficiência variável, com máximo de 80%
Trabalho 3	Conexão a gerador de RF	Dobrador de tensão	10 GHz	19,4 dBm	4,8 V / 78%
Trabalho 4	<i>Slot</i> circular impressa	Dobrador de tensão	2,45 GHz	10 dBm	3V / 70,2%
Trabalho 5	Quasi-Yagi impressa	Dobrador de tensão	1,85/2,15 GHz	-25 até – 15 dBm	484 mV / 43%
Trabalho 6	Antena banda larga	Configuração banda larga	0,5 – 0,9 GHz	-10 dBm	40%
Trabalho 7	Dipolo assimétrica	Diodo shunt	1,8 – 2,1 GHz	20 dBm	75%
Trabalho 8	Yagi-Uda	Dobrador de tensão	0,9 GHz	~10 uW	4,04V
Trabalho 9	Yagi-Uda	Dobrador de tensão mais indutores e capacitores	2,4-2,48 GHz	-22 dBm	200 mV
Trabalho 10	Quadrangular impressa	Dobrador de tensão mais célula solar	2,45 GHz	-15,6 dBm	330 mV
Trabalho 11	Antenas patch e dipolo	Dobrador de tensão mais <i>booster</i>	2,45 GHz	< 0 dBm	3 – 4,2 V
Trabalho 12	Antena dual-polarizada	Dobrador de tensão mais <i>booster</i>	2,4 GHz	-19,1 dBm	421 nJ (1 minuto)
Trabalho 13	Antena patch	Dobrador de tensão com 3 estágios multiplicadores	0,9 GHz	Não informado	5 V
Trabalho 14	Antena patch 4x4	Dobrador de tensão mais <i>booster</i>	2,13 GHz	Não informado	1,7 mA / 80,9%

Tabela 2.2 - Tipo de antena, tipo de retificador e resultado obtido das *rectennas* descritas na Seção 2.3.

3. CIRCUITO RETIFICADOR E CARGA

Neste capítulo são discutidos os requisitos básicos de projeto e operação do circuito retificador trabalhando em conjunto com a carga escolhida: uma bateria de celular do tipo Li-Ion. Inicialmente são descritas as características construtivas e elétricas mais relevantes referentes ao funcionamento nominal da bateria. A partir de tais características, o circuito retificador, junto ao bloco para casamento de impedâncias, é projetado de modo a obter um circuito operando de maneira mais eficiente possível. As características construtivas básicas do retificador, tais como a escolha dos diodos e capacitores mais adequados e as topologias de circuitos existentes são detalhadas com intuito de propiciar o direcionamento mais adequado ao projeto proposto neste trabalho.

Os resultados obtidos por meio de simulações são comparados com os obtidos por meio de medições de maneira a construir uma metodologia mais confiável de simulação e manufatura do circuito retificador. Tal comparação é de extrema relevância, dadas às dificuldades técnicas inerentes à operação de um circuito elétrico operando em alta frequência e com a presença de componentes com comportamento elétrico não linear, tais como os diodos.

A topologia retificadora com melhor desempenho é então empregada para alimentação da carga a partir de um gerador de altas frequências para, assim, validar e verificar todo o processo de projeto e otimização. Também é investigado o uso de um conversor *booster* CC-CC entre o retificador e a carga para possibilitar a melhoria operacional do sistema. O circuito retificador é novamente projetado e otimizado em tal configuração e, após a manufatura, são apresentados os resultados operacionais obtidos. Por fim, um circuito retificador operando em duas frequências também é projetado, otimizado e manufaturado de forma a propiciar a retificação da energia RF presente nas seguintes frequências: 1,80 e 2,45 GHz. As fotografias dos retificadores que melhor se comportaram nas investigações realizadas estão apresentadas no Apêndice C.

3.1. Sistema *rectenna*

A *rectenna* é um dispositivo eletrônico de duas portas que fundamentalmente trabalha com pequenos blocos de energia, recebendo e convertendo o sinal RF na

entrada em um sinal CC retificado na saída. Em aplicações envolvendo reaproveitamento da energia eletromagnética do ambiente, os níveis de energia disponíveis são extremamente reduzidos, com valores de densidade de potência na faixa de alguns poucos $\mu\text{W}/\text{cm}^2$. Assim, para obtenção de uma saída com energia suficiente para operar ou carregar algum circuito eletrônico de baixo consumo, um sistema operando de forma mais eficiente possível é um requisito fundamental.

Na Figura 3.1, é apresentado o conceito básico de uma *rectenna* através de um diagrama de blocos. Cada bloco possui uma importância crítica para a operação eficiente de todo o sistema, necessitando, portanto, de uma análise criteriosa do comportamento elétrico e tipos de topologias para a conexão entre os blocos. Pequenas perdas acumuladas em cada um deles, quando somadas, tornam-se relevantes e então, podem inviabilizar a operação adequada da *rectenna*.

Após a escolha criteriosa dos diversos elementos construtivos que compõe a *rectenna*, dos dispositivos utilizados para conexão entre blocos, seguida pela análise dos parâmetros que influem em suas grandezas de saída (potência, corrente e tensão), a *rectenna* deve ser capaz de cumprir com o objetivo proposto, operar a partir de uma fonte exclusiva em alta frequência ou a partir do reaproveitamento da energia eletromagnética disponível no ambiente.

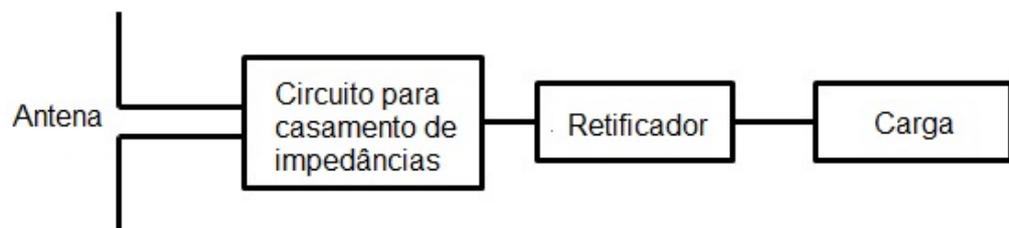


Figura 3.1 Diagrama de blocos básico de uma *rectenna*.

Em uma *rectenna*, o circuito retificador possui uma impedância de entrada comportando-se de maneira não linear, diretamente influenciado pelo nível de potência de entrada, frequência de operação e tipo da carga conectada. Assim, por possuir múltiplos parâmetros que influem no desempenho final, o circuito retificador é o bloco mais complexo de ser otimizado em uma *rectenna*.

Baseando-se nestas considerações, neste trabalho, a investigação realizada é inicializada pelo projeto do circuito retificador a partir da escolha de sua topologia

básica, uma carga previamente determinada e faixas de frequências e potências de entrada. O projeto visa otimizar a impedância de entrada do conjunto retificador e carga para um valor compatível para posterior conexão a uma antena receptora. Assim, tal conexão deve permitir o trabalho da *rectenna* de maneira mais eficiente possível, capaz de entregar uma energia CC em níveis adequados de tensão e corrente e com maior estabilidade, itens desejados para alimentar qualquer carga elétrica.

A escolha e a modelagem adequada da carga também é um componente fundamental para o melhor funcionamento da *rectenna*. A priori, devem ser escolhidas cargas que necessitem de um baixo valor de energia, dado que a densidade de potência disponível a partir de ondas eletromagnéticas é de baixíssimo valor, não sendo capaz de suprir aplicações que demandem de uma corrente elétrica elevada. Desse modo, a primeira ação para o projeto da *rectenna* diz respeito à escolha e modelagem da carga.

3.2. Escolha da Carga

Neste trabalho, o objetivo principal é a alimentação de uma carga prática a partir dos baixos valores de energia eletromagnética disponíveis no ambiente. Assim, os sistemas *rectenna* investigados foram projetados e otimizados para carregar, da forma mais eficiente possível, uma típica bateria Li-Ion Polímero (Íons de Lítio), normalmente utilizada em aparelhos celulares, *notebooks* e dispositivos de comunicação. A escolha de uma bateria Li-Ion como carga se deve ao fato de que o processo de carregamento requer somente a circulação constante de uma corrente elétrica a partir do retificador em direção à bateria. O tempo necessário para o carregamento deverá ser tão longo quanto menor for a corrente circulante. Em um sistema de reaproveitamento de energia, qualquer que seja o valor de corrente injetada na bateria provocará, se não o total carregamento, uma diminuição do consumo, o que em si, já consiste em um benefício. Entretanto, o objetivo deste trabalho ultrapassa tal condição e busca prover soluções técnicas viáveis para o carregamento pleno ou parcial da bateria.

3.3. Baterias Li-Ion

A bateria de Li-Ion é tipicamente utilizada em celulares e *notebooks* devido a sua característica de alta densidade de energia e peso reduzido quando comparada com outras tecnologias. Em celulares, é utilizada a tecnologia Li-Ion Polímero, uma versão atualizada na tradicional Li-Ion, que permite a fabricação da bateria com uma geometria mais fina, adequada às dimensões reduzidas desses aparelhos. O Lítio é o mais leve de todos os metais utilizados em baterias, capaz de fornecer a maior densidade de energia por peso.

Enquanto as baterias de Li-Ion possuem uma densidade de energia entre 110-160 Wh/kg, baterias do tipo NiCd (Níquel Cádmio) possuem 45-80 Wh/kg, do tipo NiMh (Níquel Metal Hidreto) possuem 60-120 Wh/kg e baterias chumbo-ácidas possuem 30-50 Wh/kg (APLICADA, 2017). A tecnologia Li-Ion foi inicialmente empregada pela fabricante de produtos eletrônicos *Sony* a partir de 1991 e desde então, vem sendo melhorada para melhor atender as questões de segurança e capacidade de energia. A bateria de Li-Ion Polímero, utilizada neste trabalho, está disponível no mercado desde o ano de 1999. Algumas de suas características básicas encontram-se na Tabela 3.1.

Parâmetro	Valor
Densidade de energia (Wh/kg)	100 - 130
Resistência interna (mΩ)	150 - 250
Tensão da célula (V)	3,6 - 4,2
Tempo para recarga rápida (hrs)	2 - 4
Temperatura durante descarga (C°)	0 - 60

Tabela 3.1 Características básicas da bateria Li-Ion Polímero (APLICADA, 2017).

Neste trabalho, a bateria escolhida é do modelo EB42516LU da empresa *Samsung*, fabricada em 18/01/2015, sendo possível conferir seus dados de placa resumidos na Tabela 3.2 e fotografia apresentada no Apêndice C, Figura C.3.

Parâmetro	Valor
Capacidade de corrente	1500 mA
Tensão nominal	3,8 V
Tensão nominal de carregamento	4,3 V

Tabela 3.2 Características da bateria escolhida.

3.3.1. Carregamento/Descarregamento das baterias Li-Ion

Os ciclos típicos de carregamento e descarregamento das baterias Li-Ion são processos fundamentais para o projeto de um sistema que seja capaz de carregar tais baterias de forma correta e segura. A tensão nominal mínima das baterias Li-Ion encontra-se normalmente entre os valores de 3,0 e 3,3 V, podendo ser menor que 3,0 V em situações onde a bateria ficou muito tempo sem operar ou a devido a condições diferentes de temperatura ou umidade.

São normalmente projetadas para um valor de tensão de fim de carga em torno de 3,9-4,2 V, faixa a partir da qual há a estabilização da tensão após a operação de dispositivos internos de proteção contra sobrecarga. O perfil comportamental teórico de um carregamento é apresentado na Figura 3.2. Verifica-se que, para um valor idealmente constante de corrente elétrica, o comportamento da tensão da bateria x tempo é linearmente crescente desde a tensão mínima até um valor máximo, ponto a partir da qual a corrente elétrica começa a sofrer redução até chegar a 0 A.

Com relação ao descarregamento, baterias de Li-Ion possuem uma proteção interna contra correntes elevadas, normalmente um fusível que abre para o caso de excesso de corrente e volta a fechar após um tempo previamente programado. Tal dispositivo é baseado na tecnologia *Polyswitch* que comporta-se como uma alta resistência no caso de excessivas correntes. Quando a corrente circulante apresentando alto valor é cessada, o fusível *Polyswitch* retorna ao estado original de condução, permitindo um novo fluxo de corrente (APLICADA, 2017).

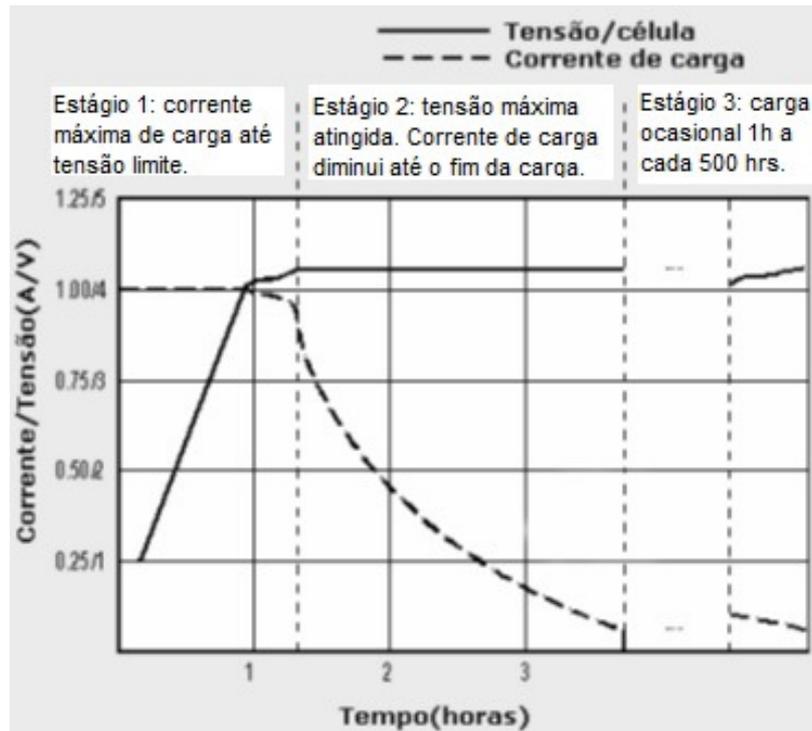


Figura 3.2 Perfil teórico de carregamento de uma bateria Li-Ion (APLICADA, 2017).

3.3.2. Perfil de carregamento da bateria Li-Ion

As baterias de Li-Ion Polímero utilizadas em celulares e aparelhos eletrônicos necessitam ser recarregadas rotineiramente após o uso de maneira a garantir um nível de tensão adequado para o correto funcionamento destes dispositivos. Vários são os circuitos e aparelhos disponíveis no mercado para realização desta tarefa de carregamento. Neste trabalho, é simulado e construído um circuito para carregamento baseado no regulador de tensão LM7805, do fabricante *Fairchild Semiconductor* (BRAGA, 2017). Os detalhes constitutivos e de funcionamento do circuito de carregamento empregado encontram-se no Apêndice A deste trabalho. Também foi utilizado um carregador universal de baterias facilmente encontrado em estabelecimentos comerciais. Após simulação e testes apresentados no Apêndice A, foram realizados os ensaios de carregamento da bateria Li-Ion utilizando os dois circuitos, com monitoramento da corrente e da tensão durante o carregamento. Os resultados obtidos estão apresentados nas Figuras 3.3 e 3.4.

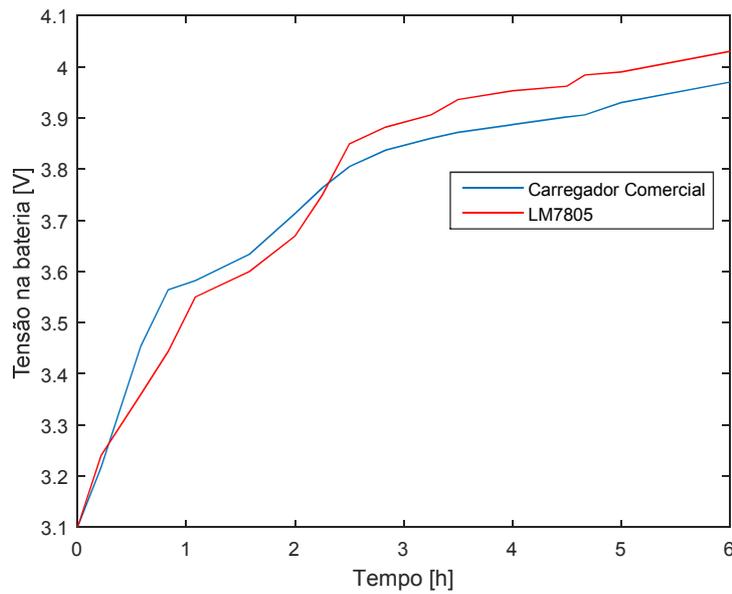


Figura 3.3 Perfis de tensão medidos durante o carregamento da bateria Li-Ion.

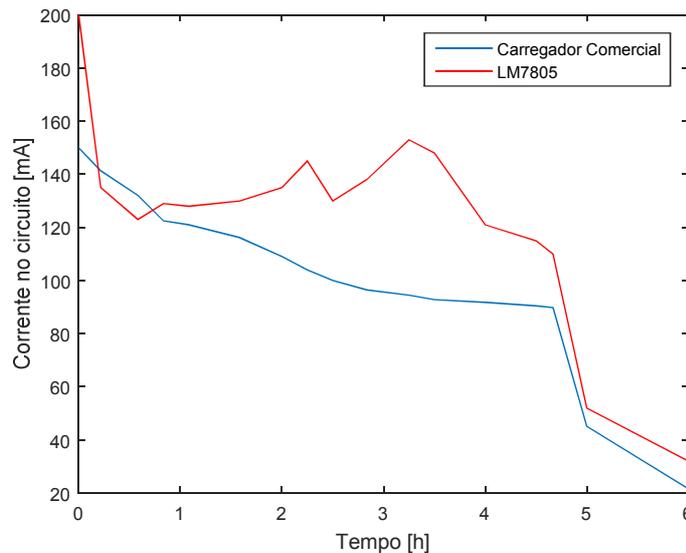


Figura 3.4 Perfis de corrente medidos durante o carregamento da bateria Li-Ion

Analisando as Figuras 3.3 e 3.4, constata-se que o comportamento dos resultados experimentais é semelhante ao comportamento teórico apresentado na Figura 3.1, ou seja, tensão crescente e corrente decrescente conforme o transcorrer do tempo. Verifica-se pela Figura 3.4 que o circuito com o LM7805 foi capaz de entregar um valor médio de corrente superior ao carregador comercial, apresentando também, durante a energização, uma rápida corrente transitória, com pico medido de 200 mA. O valor da corrente elétrica em ambos os casos tende a

zero com o decorrer do tempo, na medida em que a tensão na bateria aproxima-se de seu valor máximo.

3.4. Circuito Retificador

Nesta seção é apresentado o projeto básico e a análise de simulação e experimental do circuito retificador empregado nas *rectennas* investigadas nesse trabalho. São abordados tópicos sobre os diodos, topologias de circuitos retificadores e comportamento do circuito retificador sob diversas condições operacionais. As simulações são realizadas no *software* ADS® e os resultados obtidos são comparados com os resultados de medição dos circuitos manufaturados.

3.4.1. Diodo

O principal componente eletrônico de qualquer circuito retificador é o diodo, elemento responsável por permitir a condução da corrente elétrica em apenas um sentido, atuando assim, como uma chave ora aberta, ora fechada. No entanto, o diodo é um dispositivo que apresenta comportamento não linear, tal como apresentado na Figura 3.5 para um diodo de silício comum (MALVINO, 2011).

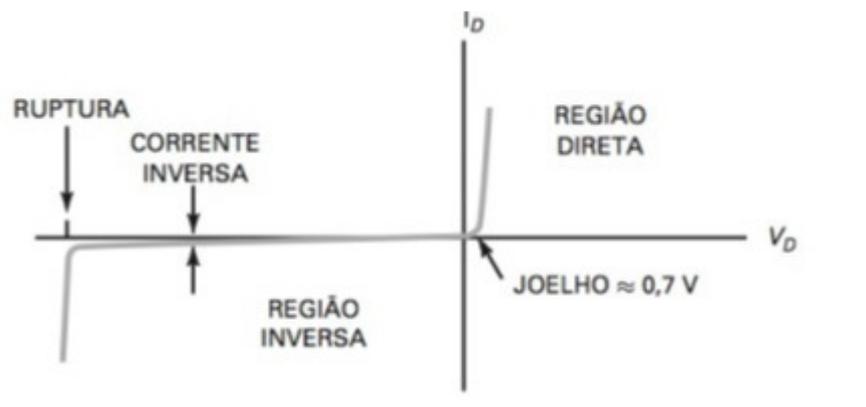


Figura 3.5 Curva I x V típica de um diodo comum de silício (MALVINO, 2011).

O diodo empregado em um retificador é, portanto, um elemento crítico ao correto funcionamento do circuito e sua escolha adequada perfaz um passo fundamental para o seu projeto. Considerando que a *rectenna* possui em sua

entrada baixíssimos valores de energia propagando em alta frequência, os diodos comuns à base de silício, com tensão de barreira de 0,7 V, não são os mais adequados. Nessas condições, os diodos comuns não conseguem entrar em operação com a mesma velocidade do sinal de entrada, deformando, assim, o sinal retificado de saída. Para contornar tal problema, em aplicações envolvendo altas frequências são utilizados os diodos tipo *Schottky*. Os diodos *Schottky* são construídos para operar em altas frequências e possuem um valor menor de tensão de barreira de potencial, característica que é bastante desejável para operação em uma *rectenna*.

Nos mais recentes trabalhos envolvendo *rectennas*, o emprego de diodos de dois principais fabricantes vem se destacando, *Skyworks* e *Avago* (SONG et. al., 2017a). Neste trabalho, foram inicialmente estudados os diodos do fabricante *Avago*, série HSMS-285X e HSMS-286X. Tais modelos foram escolhidos por estarem disponíveis no conjunto de bibliotecas fornecido pelo *software* ADS® e também no laboratório de EA do CEFET/MG. As características construtivas e elétricas das famílias dos diodos citados são apresentadas no Apêndice B.

Dessa maneira, a partir do *software* ADS®, inicialmente, são realizados dois conjuntos de simulações utilizando os diodos HSMS2850 e HSMS2860 para verificação do comportamento da tensão de saída de ambos para diferentes valores de potência de entrada e frequência. Também é utilizado para simulação o diodo HSMS2820 para incrementar a base de comparação.

Todos os circuitos simulados e construídos neste trabalho utilizaram a fibra de vidro FR4, como substrato devido ao seu custo ser bastante inferior frente a outros materiais e devido a sua maior disponibilidade para aquisição. Entretanto, ao contrário de outros substratos que possuem certificação dos parâmetros elétricos fornecida pelos fabricantes, o FR4 precisa ser minuciosamente caracterizado em laboratório de maneira a não se obter erros entre os circuitos simulados e construídos. A partir dos métodos de verificação e validação desenvolvidos em (BRANDÃO, 2017), foram determinados os seguintes parâmetros para as placas empregadas neste trabalho: permissividade relativa $\epsilon_r=4,3$ e tangente de perdas $\delta=0,01$.

Os circuitos foram simulados segundo a configuração apresentada na Figura 3.6 e utilizam o método *Harmonic Balance* (AGILENT TECHNOLOGIES, 2006). Tal

método foi empregado por possibilitar a obtenção de resultados de tensão e corrente em função do tempo. A topologia aplicada em todas as simulações foi a de circuito retificador de meia onda simples, tipo série. Tal topologia foi escolhida devido à sua simplicidade em detrimento a outras topologias mais complexas, empregando, assim, um único diodo. Os circuitos foram simulados utilizando três diferentes valores de frequência na entrada: 1,50, 2,45 e 5,80 GHz. A frequência de 2,45 GHz é normalmente utilizada pelos roteadores *Wi-Fi*, a fonte de potência RF que se deseja aproveitar neste trabalho. A frequência de 5,80 GHz também vem sendo aplicada em alguns roteadores de internet recentemente lançados no mercado, enquanto a frequência de 1,50 GHz possui um valor intermediário para avaliação das frequências normalmente utilizadas pela telefonia celular, entre 0,90 e 2,10 GHz.

A maior frequência simulada, 5,80 GHz, possui um período de 172 ps. Um cálculo simplificado da constante RC do circuito operando nesta frequência, resulta em um capacitor mínimo de 17,2 fF quando conectado a uma carga de 10 k Ω . De maneira a simular o circuito com uma saída CC com bastante estabilidade e com o menor nível de flutuação possível, foram empregados capacitores de 1 nF em todas as simulações. O valor da carga foi estabelecido em 10 k Ω por se caracterizar como uma carga típica para aplicações de IoT, em que os valores de corrente envolvidos são normalmente pequenos e com cargas possuindo elevadas impedâncias.

Inicialmente, os circuitos foram simulados para uma potência de entrada fixa de -10 dBm e para as três frequências previamente citadas. A potência de -10 dBm foi escolhida por ser um valor tipicamente encontrado nos ambientes com a presença de sinal RF. Posteriormente, foram realizadas simulações utilizando os valores de potência de entrada de -20, -10 e 0 dBm para uma mesma frequência, 2,45 GHz, de modo a verificar o comportamento dos circuitos em função da variação destas potências. Os resultados obtidos de tensão sobre a carga estão resumidos na Tabela 3.3.

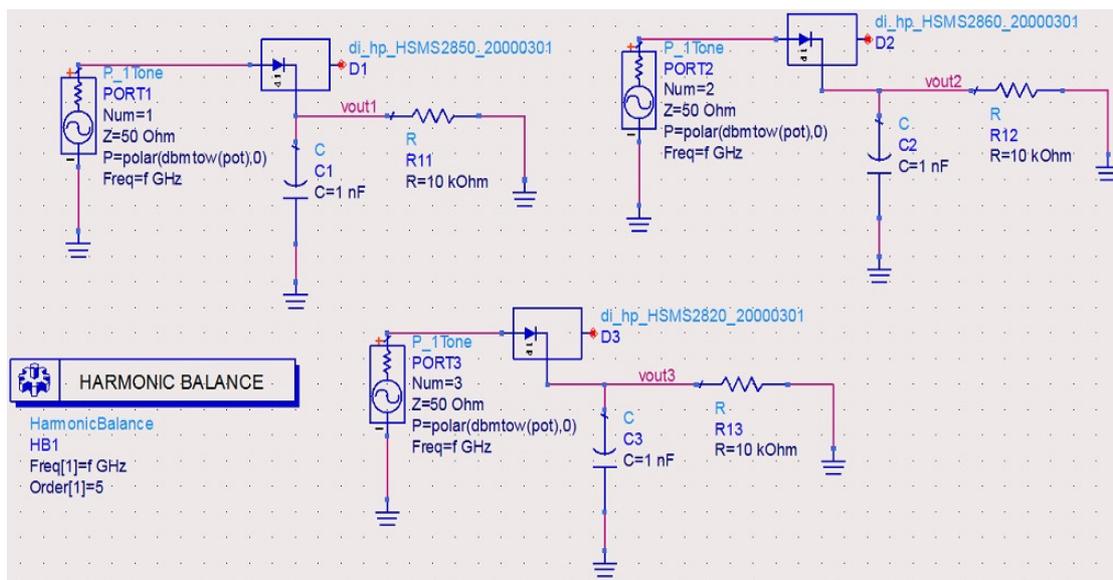


Figura 3.6 Circuitos para simulação dos diodos HSMS2820 (vout_3), HSMS2850 (vout_1) e HSMS2860 (vout_2).

Vout para Pin = -10 dBm			
Frequência	HSMS 2820	HSMS 2850	HSMS 2860
1,5 GHz	18,99 mV	106,9 mV	34,61 mV
2,45 GHz	20,54 mV	112,8 mV	40,43 mV
5,8 GHz	2,38 mV	150,3 mV	88,30 mV
Vout para f = 2,45GHz			
Pin	HSMS 2820	HSMS 2850	HSMS 2860
-20 dBm	0,00029 mV	0,018 mV	0,001 mV
-10 dBm	20,0 mV	113,0 mV	40,0 mV
0 dBm	0,348 mV	0,489 mV	0,404 mV

Tabela 3.3 Resultados das simulações feitas com os diodos *Schottky* HSMS2820, HSMS2850, HSMS2860.

Analisando os resultados resumidos na Tabela 3.3, verifica-se que o diodo HSMS-2850 obteve o melhor desempenho em todas as simulações realizadas, seguido pelo HSMS-2860. O diodo HSMS-2820 apresentou um desempenho inferior quando comparados aos outros, excluindo-se, portanto, futuras investigações com tal modelo. Verifica-se também que, para potência de entrada de -20 dBm, valor da

ordem de grandeza que pode estar disponível no ambiente para reaproveitamento, o valor da tensão de saída é bastante reduzido, limitando, portanto, a aplicação de *rectennas* apenas para cargas de baixíssimo consumo energético. Verificou-se também pelos valores simulados, que o diodo HSMS-2850 apresenta um desempenho melhor para as frequências mais elevadas, entretanto, testes com protótipos manufaturados devem ser realizados para confirmar os resultados obtidos.

Uma característica que torna o diodo HSMS-2850 mais vantajoso frente ao diodo HSMS-2860 é o menor nível de tensão de barreira V_J que ele apresenta. Conforme informado no *datasheet* e apresentado no Apêndice B, o diodo HSMS-2850 possui um valor de V_J entre 150 e 250 mV, enquanto o diodo HSMS-2860 possui valores de V_J maiores, entre 250 e 350 mV. A eficiência total de um diodo *Schottky* η é um parâmetro de vital importância em uma *rectenna* e pode ser avaliada conforme equação (3.1) (MCSPADDEN, FAN, & CHANG, 1998), (GONÇALVES, 2016):

$$\eta = \frac{1}{1+A+B+C} \quad (3.1)$$

onde,

$$A = \frac{R_L}{\pi R_S} \left(1 + \frac{V_J}{V_0}\right)^2 \left[\alpha \left(1 + \frac{1}{2 \cos^2 \alpha}\right) - \frac{3}{2} \tan \alpha \right], \quad (3.2)$$

$$B = \frac{R_S R_L C_J^2 w^2}{2\pi} \left(1 + \frac{V_J}{V_0}\right) \left(\frac{\pi - \alpha}{\cos^2 \alpha} + \tan \alpha \right), \quad (3.3)$$

$$C = \frac{R_L}{\pi R_S} \left(1 + \frac{V_J}{V_0}\right) \frac{V_J}{V_0} (\tan \alpha - \alpha), \quad (3.4)$$

$$C_J = C_{J0} \sqrt{\frac{V_J}{V_J + |V_0|}} \quad (3.5)$$

$$\tan \alpha - \alpha = \frac{\pi \frac{R_S}{R_L}}{1 + \frac{V_J}{V_0}} \quad (3.6)$$

onde R_L é a resistência da carga, V_J é a tensão de barreira, R_S é a resistência série do diodo, C_J é a capacitância de junção, C_{J0} é a capacitância de junção a 0 V, ω é frequência em radianos por segundo e α é o ângulo de condução. Os valores dos parâmetros do diodo estão apresentados no Apêndice B.

Utilizando os valores disponíveis no *datasheet* do diodo HSMS-2850 e apresentados na Tabela 3.4, foi criada uma rotina *software* Matlab® utilizando as equações (3.1) à (3.6) para avaliar como a eficiência η do diodo comporta-se em função da variação do parâmetro V_J . A tensão de entrada no diodo foi ajustada em 0,5 V para uma frequência de 2,45 GHz, alimentando uma carga R_L de 10 k Ω . O ângulo de condução α é calculado de maneira iterativa conforme equação (3.6). O resultado final do cálculo é apresentado na Figura 3.7.

Parâmetro	Valor
V_0	0,5 V
R_s	25 Ω
C_{J0}	0,18 pF
R_L	10 k Ω
f	2,45 GHz

Tabela 3.4 Parâmetros fixos do modelo de diodo.

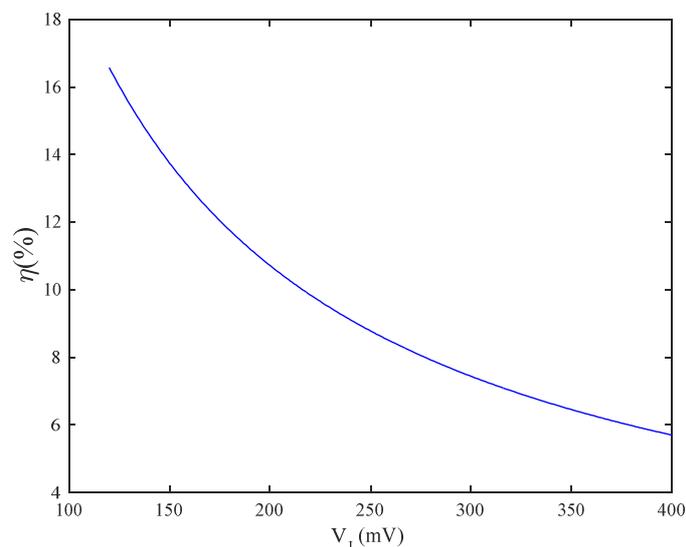


Figura 3.7 $\eta \times V_J$ para o diodo *Schottky*.

Analisando o gráfico da Figura 3.7, percebe-se que a eficiência do diodo é tão maior quanto menor for o valor da tensão de junção V_J . O diodo operando na região de

V_J igual a 150 mV, típica do HSMS-2850, possui uma eficiência total em torno de 14%, valor consideravelmente maior quando comparada à eficiência de 9% para um V_J igual a 250 mV, tipicamente a tensão de barreira do diodo HSMS-2860.

Portanto, considerando os resultados obtidos e apresentados na Tabela 3.3 e Figura 3.7, o diodo da família HSMS-2850 foi o escolhido para as investigações realizadas neste trabalho. Tal modelo é capaz de entregar à carga um maior nível de tensão e com maior eficiência, ambos parâmetros fundamentais para a operação eficiente da *rectenna*. Quando adquirido em um encapsulamento contendo dois diodos, a configuração é numerada com o código HSM-2852 e é então utilizado no *software* ADS® para as simulações realizadas e nos protótipos construídos.

3.4.2. Modelo do conector

Qualquer circuito eletroeletrônico comunica-se com o meio exterior por meio de portas de entrada e saída. A conexão entre tais portas e os circuitos externos pode ser realizada diretamente via linha de transmissão e solda ou utilizando conectores, de maneira a deixar a conexão mais confiável e fácil de manipular. Em circuitos operando em RF é comum utilizar conectores do tipo SMA, tal como o conector KCL 3011 apresentado na Figura 3.8. Esse conector possui impedância característica Z_0 igual a 50Ω e uma boa resposta para operação de 0 à 12 GHz, conforme informado pelo fabricante. Suas características construtivas básicas são apresentadas no Apêndice D.

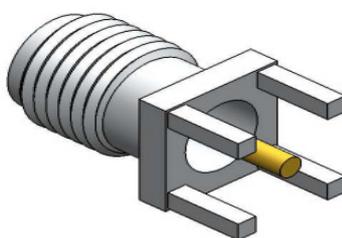


Figura 3.8 - Conector SMA 3011 do fabricante KLC (KLC CONECTORES, 2011).

Conforme apresentado em (BRANDÃO, 2017), conectores comportam-se como uma linha de transmissão, com a presença de uma resistência e uma indutância em série associadas a uma capacitância em paralelo. Quando o conector

é inserido em um circuito eletrônico ou em uma antena, a impedância de entrada total é alterada, podendo assim, ocasionar erros de casamento de impedância. Portanto, para realizar o correto casamento de impedâncias, é necessário modelar o conector e incluir esse modelo na análise dos circuitos retificadores e antenas investigadas neste trabalho. O modelo elétrico do conector utilizado neste trabalho é apresentado na Figura 3.9.

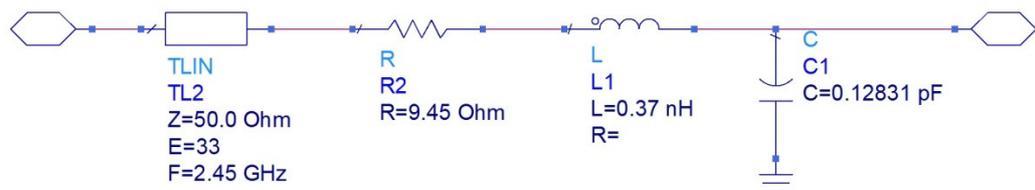


Figura 3.9 – Circuito equivalente do conector SMA KLC3011.

3.4.3. Topologias para circuitos retificadores de rectennas

Os conversores RF-CC empregados nas *rectennas* podem ser construídos segundo algumas topologias retificadoras básicas. As mais empregadas e reportadas na literatura são o diodo-série, diodo-shunt, dobrador de tensão simples, circuito dobrador de múltiplos estágios (KARTHAUS; FISCHER, 2003) e a ponte de diodos (MARIAN et. al., 2012a). Essas topologias são apresentadas na Figura 3.10.

A configuração (a) na Figura 3.10, referente ao diodo-série, é uma configuração retificadora simples, com presença de apenas um diodo, D1, responsável por permitir a passagem da corrente elétrica apenas no semiciclo positivo. São empregados também filtros no bloco de alta frequência para bloqueio de ondas harmônicas refletidas (casamento de impedância entre a antena e o circuito retificador). Entre a carga e o diodo, na parte CC do circuito, também é utilizado um filtro com objetivo de bloquear ondas harmônicas em direção à carga e também melhorar a qualidade do sinal CC de saída, com redução do *ripple*.

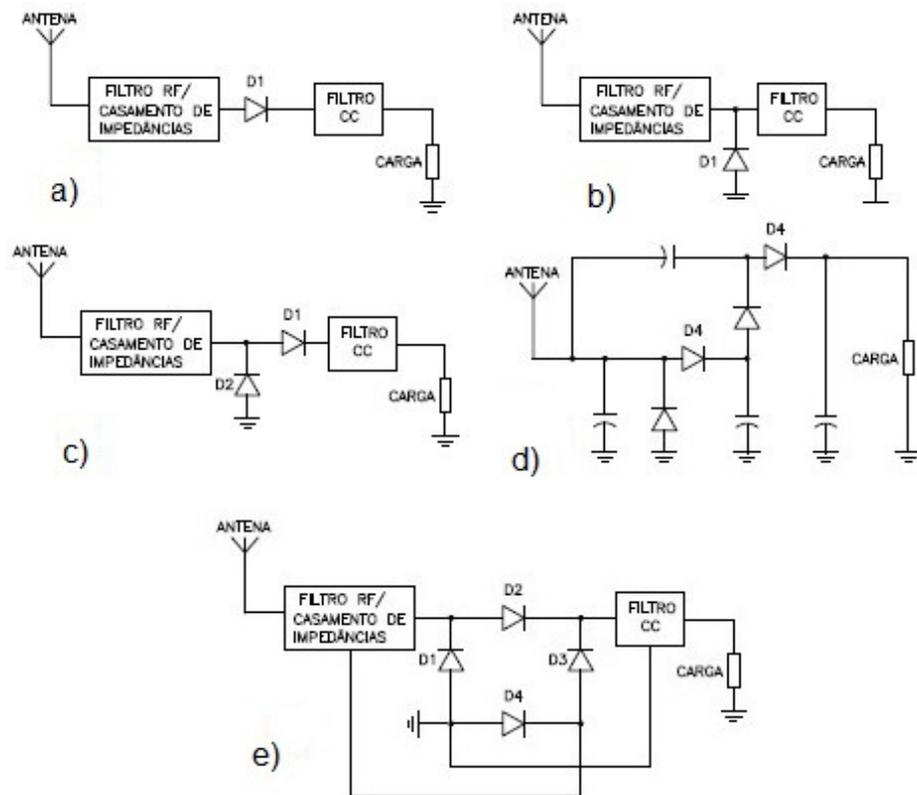


Figura 3.10 – Topologias de retificador: a) diodo-série, b) diodo-*shunt*, c) dobrador de tensão simples, d) dobrador múltiplos estágios, e) ponte de diodos.

A configuração em (b) utiliza um diodo D1 em paralelo aos filtros de entrada e saída, porém ao contrário do circuito em (a), nesta configuração o diodo é polarizado diretamente durante o semiciclo negativo. Tal configuração possui comportamento de saída bastante próximo ao apresentado pela configuração diodo-série. Ambas as configurações, (a) e (b), possuem como grande atrativo o emprego de apenas um único diodo por ciclo de funcionamento e, conseqüentemente, menores perdas devido à tensão de barreira. A simplicidade de construção de tais topologias também é um diferencial que deve ser considerado, dadas às dificuldades elétricas e construtivas implícitas aos circuitos operando em alta frequência.

A configuração dobradora de tensão simples em (c) é uma união das configurações (a) e (b) e, portanto, emprega dois diodos (D1 e D2) para obtenção do sinal de saída. Durante o semiciclo negativo, o diodo D2 está diretamente polarizado e, portanto, permite a passagem de corrente. O diodo D1 está polarizado inversamente e em corte, ocasionando o carregamento do filtro de entrada até o pico do sinal de entrada. Durante o semiciclo positivo, o diodo D2 está inversamente

polarizado e o diodo D1 está conduzindo e carrega o filtro de saída com um valor de sinal de pico acrescido do valor da tensão carregada no filtro de entrada, gerando um valor final de aproximadamente duas vezes maior que a entrada. Esta mesma topologia pode ser repetidamente ligada em cascata com o objetivo de multiplicar o sinal de entrada conforme topologia apresentada na letra (d). Uma conexão de N estágios multiplicadores acarreta uma tensão final na saída conforme equação (3.7), $V_{saída} \approx 2 \times N \times V_{diodo}$ (3.7), onde N é o número de estágios multiplicadores e V_{diodo} é a tensão de saída na configuração diodo-série para uma mesma potência de entrada. Conforme apresentado em (KEYROUZ, 2014), o valor ideal de estágios para uma *rectenna* operando a partir de baixas potências de entrada são quatro estágios.

Na topologia apresentada na letra (e) da Figura 3.10, durante o semiciclo positivo, D2 e D4 conduzem, enquanto no semiciclo negativo, é o momento em que D1 e D3 conduzem. Esta topologia é normalmente empregada em soluções onde os níveis de energia de entrada não são uma condição limitadora, pois a queda de tensão em dois diodos por ciclo causa perdas duas vezes maiores, consumindo, portanto, parcelas significativas de energia.

Neste trabalho, como o objetivo principal é o carregamento da bateria de Li-Ion pela *rectenna*, o circuito retificador empregado deve ser capaz de entregar em sua saída um nível de tensão em um patamar suficientemente elevado para efetivar tal carregamento. As topologias diodo série e *shunt*, embora sejam mais simples de construir, entregam em sua saída valores baixos de tensão (BRANDÃO, 2017), sendo assim, inadequadas ao serviço. As topologias dobradora de tensão com múltiplos estágios e a ponte diodos, por possuírem mais diodos conduzindo a cada ciclo, resultam em maiores perdas no circuito, reduzindo assim, a eficiência total do sistema. Tais topologias também são mais suscetíveis a erros de manufatura devido às complexidades inerentes ao circuito, portanto, inadequadas ao processo manual de manufatura utilizando neste trabalho, com uso de estampa em prensa térmica e corrosão com percloro de ferro.

Dessa maneira, a topologia dobradora de tensão simples, utilizando o diodo HSMS-2852, apresenta-se como a melhor escolha para todos os circuitos retificadores simulados e manufaturados neste trabalho devido à sua capacidade de entregar uma maior tensão em sua saída a partir de um circuito construído com menor complexidade.

3.4.4. Projeto e análise do circuito retificador

O projeto de um circuito retificador que seja capaz de entregar uma tensão elétrica estável e em um nível suficientemente elevado para carregar a bateria de Li-Ion é parte fundamental deste trabalho. Para obtenção de tal retificador, é necessário um projeto cuidadoso, de forma a minimizar as possíveis perdas elétricas no circuito. O correto modelamento elétrico da carga, a escolha da topologia mais adequada do retificador e a otimização da geometria do circuito são elementos de grande relevância para obtenção dos resultados pretendidos. Assim, tendo sido a topologia e o diodo a serem empregados definidos, deve-se determinar o valor de impedância que melhor representa o processo de carregamento da bateria e realizar a otimização da geometria final do circuito.

O valor da impedância a ser alimentada é um parâmetro fundamental e que exerce grande influência no desempenho da *rectenna*. Valores elevados de impedância são desejáveis, pois nesse caso, obtêm-se valores menores de corrente e maiores valores de tensão na carga. Entretanto, para um valor de carga da ordem de 10 k Ω , a eficiência do retificador é menor quando comparada a uma carga de 1 k Ω . (BRANDÃO, 2017). Em (ZHOU, FROPPIER, & RAZBAN, 2001), foi verificado que o retificador sob teste operava de maneira mais eficiente quando projetado para uma carga com impedância entre 500 e 1000 Ω , com o valor de 1000 Ω sendo o melhor dentre todos.

Quando alimentada a partir dos carregadores citados na Seção 3.3.2, a bateria sob estudo possui uma impedância Z_c média de aproximadamente 20 Ω . Tal valor de impedância foi obtida a partir dos valores medidos de corrente, 175 mA e tensão, 3,5 V durante o processo de carga. Porém esse valor de impedância não é adequado para representar o processo de carga neste trabalho, pois o valor de corrente de 175 mA dificilmente pode ser alcançado empregando *rectennas*. Assim, com o objetivo de obter uma melhor aproximação da impedância de carga para o nível de corrente que um retificador operando em alta frequência e baixa potência é capaz de suprir, a bateria Li-Ion foi conectada a um retificador projetado para operar na frequência de 2,45 GHz (BRANDÃO, 2017) e disponível no laboratório de EA do CEFET/MG. O conjunto bateria-retificador foi conectado ao gerador de sinais RF disponível no laboratório, *Keysight N5181A*, e foi verificado que a maior corrente elétrica fornecida pelo retificador à bateria foi de 3 mA, para uma potência de

entrada $P_{in} = 26$ dBm, o maior valor de potência disponibilizado pelo gerador. Este valor de potência foi inicialmente utilizado para verificação do maior nível de corrente que pode ser disponibilizado pelo circuito retificador, pois muito dificilmente encontra-se disponível no ambiente uma potência RF desta magnitude. A partir desse valor de corrente e considerando a tensão inicial de carga de 3 V, é obtido o valor de impedância $Z_c = 1000 \Omega$.

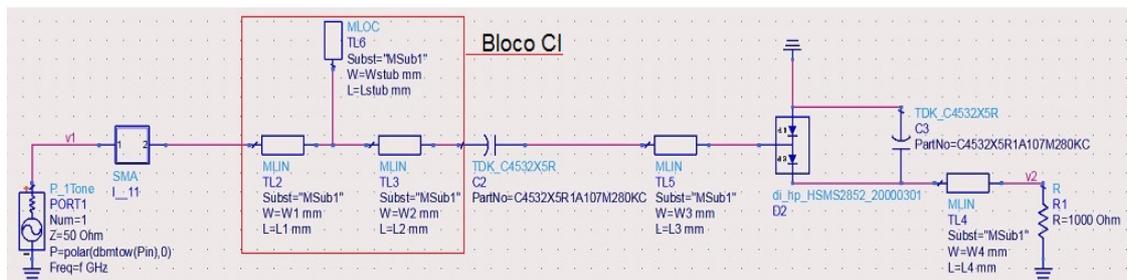


Figura 3.11 – Topologia dobradora de tensão com diodo HSMS-2852 e carga 1000 Ω .

Uma vez definido o valor de carga a ser alimentado, foi projetada a geometria do circuito retificador, apresentada na Figura 3.11. Considerando que o sinal de entrada desse circuito possui alta frequência, foi incluído nesse ponto um Bloco CI (Casamento de Impedâncias) contendo um circuito para realizar o casamento de impedâncias, evitando, portanto, a ocorrência de ondas estacionárias entre a antena e o retificador. A configuração investigada para essa função emprega linhas de transmissão de microfita em associação a um toco de linha de microfita aberto (*stub*) (BRANDÃO, 2017). Na Figura 3.11, é possível verificar a presença do Bloco CI entre o conjunto diodo-carga e a fonte P_1Ton. Tal fonte corresponde a representação circuitual de uma antena com impedância de entrada de 50 Ω , a mesma impedância do conector SMA KLC3011 modelado e incluído nesse circuito. Idealmente, o circuito para casamento de impedâncias deve ser capaz de deslocar a impedância de entrada do conjunto retificador mais carga, Z_{in} , para 50 Ω , evitando assim, perdas por descasamento.

São necessários além dos diodos, capacitores para obtenção do sinal CC estável requerido. Na Figura 3.11, verifica-se que foram utilizados capacitores com modelo *SPICE* fornecido pelo fabricante, possuindo valor de capacitância de 100 μF (TDK CORPORATION, 2017). Tal valor de capacitância foi escolhido por melhor se

adequar ao perfil pulsante do sinal do roteador, a fonte utilizada para o reaproveitamento da energia (BRANDÃO, 2017).

Para o correto dimensionamento do circuito para casamento de impedâncias, foi realizada uma otimização no *software* ADS®, de maneira que a impedância de entrada Z_{in} seja de 50Ω a partir da variação dos comprimentos de L_1 , L_2 , L_{stub} e da largura W_{stub} , indicados na Figura 3.11. As dimensões L_3 , L_4 foram fixados com o valor de 5 e 10 milímetros respectivamente, determinados para possibilitar um bom manuseio e soldagem dos componentes eletrônicos. As dimensões W_2 à W_4 foram fixadas em 2 milímetros, de maneira a se obter também, um bom manuseio do circuito. A otimização foi realizada com o uso da técnica de Algoritmo Genético (AG), com um máximo de 500 iterações e um erro de 0,0001 em relação à função objetivo escolhida: $Z_{in} = 50 \Omega$. O circuito foi otimizado para a frequência de operação de 2,45 GHz, típica dos roteadores comerciais de internet, e para uma potência de entrada P_{in} de -10 dBm. Embora os valores de potência disponíveis em um ambiente possam situar-se bem abaixo deste valor, conforme medidos em (GONÇALVES., 2016), quando as antenas receptoras são posicionadas em visada direta em relação às antenas transmissoras, valores acima de 0 dBm podem ser obtidos (BRANDÃO, 2017). Assim, a partir da experiência obtida pelos trabalhos desenvolvidos no laboratório de EA, o valor de -10 dBm de potência de entrada em um sistema *rectenna* é possível de se obter, desde que se promova um alinhamento adequado entre as antenas transmissora e receptora.

Como os retificadores para *rectennas* operam com um sinal de entrada em alta frequência, as tradicionais grandezas elétricas, corrente e tensão, não são usualmente avaliadas nessas regiões do espectro eletromagnético. Assim, neste trabalho, a análise de todos os protótipos construídos é realizada a partir dos níveis do parâmetro S_{11} , uma maneira mais confiável para avaliar os níveis de ondas estacionárias e as perdas de energia envolvidas entre os blocos dos circuitos (RAMO; WHINNERY; VAN DUZER, 1994).

O retificador da Figura 3.11 foi construído e testado como uso do Analisador de Rede *Keysight*® E5071C, realizando uma varredura de frequências entre 1 e 3 GHz, com a bateria de Li-Ion conectada em sua saída. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 3.12 na forma de S_{11} e também carta de Smith.

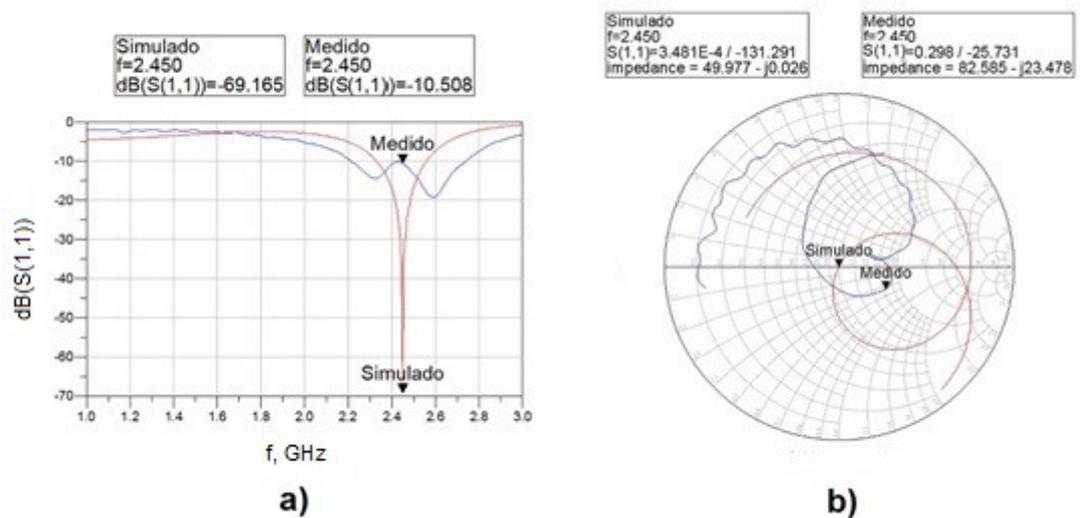


Figura 3.12 – Resultados medido e simulado para retificador com carga 1000 Ω . a) S_{11} b) carta de Smith.

Na Figura 3.12, verifica-se a ocorrência de divergência entre os resultados do circuito retificador simulado e o manufaturado. Enquanto o circuito simulado possui um valor de $S_{11} = -69,165$ dB e uma impedância de entrada de $49,977 - j0,026 \Omega$, o circuito construído possui $S_{11} = -10,508$ dB e impedância de entrada de $82,585 - j23,478 \Omega$, valores substancialmente diferentes. O comportamento não linear do diodo *Schottky*, acrescentado pelas imperfeições construtivas inerentes ao processo manual utilizado, provocaram essas divergências. Entretanto, considerando que, na prática, um circuito RF pode ser aceito como operacional se apresentar valores de S_{11} menores que -10 dB, o retificador sob estudo está operacional e pode ser submetido aos testes para carregamento da bateria Li-Ion.

O retificador construído foi diretamente conectado ao gerador N5181A, ajustado para a frequência de 2,45 GHz para realização do carregamento da bateria. A potência de entrada P_{in} do retificador (saída do gerador) foi variada de -25 dBm a 10 dBm e os resultados obtidos de corrente de carga no circuito são apresentados na Tabela 3.5. Entretanto, como foram obtidos baixos valores de correntes de carregamento, valores de tempo muito elevados são necessários para avaliar o carregamento pleno da bateria. Assim, foram levantadas três curvas de carregamento da bateria, conectando-a diretamente a uma fonte de corrente contínua controlável, para verificar se o comportamento de carregamento da bateria

é linear, ou seja, se uma corrente elétrica duas ou três vezes maior resulta em tempos de carregamento também duas ou três vezes menores respectivamente. Na Figura 3.13, são apresentados os perfis de carregamento da bateria obtidos para três diferentes valores de corrente de carga, $I_c = 5 \text{ mA}$, $I_c = 10 \text{ mA}$ e $I_c = 15 \text{ mA}$ por um tempo de duas horas cada. O valor inicial da tensão na bateria foi o mesmo para os três ensaios, $V_B = 3,17 \text{ V}$, garantindo assim, a mesma condição inicial.

A partir da análise da Figura 3.13, verifica-se que durante a fase de maior carregamento da bateria, correspondente ao Estágio 1 apresentado na Figura 3.2, o comportamento da tensão x tempo é aproximadamente linear. Uma corrente de 15 mA, valor três vezes maior que 5 mA, foi capaz de carregar a bateria à uma taxa aproximadamente, três vezes maior. A tensão final na bateria, para $I_c = 15 \text{ mA}$, foi $V_B = 3,42 \text{ V}$, desde a tensão inicial $V_B = 3,17 \text{ V}$, a diferença foi de 0,25 V. Para a corrente $I_c = 5 \text{ mA}$, V_B final foi 3,25 V com uma diferença de 0,08 V (aproximadamente três vezes menor) em relação ao V_B inicial de 3,17 V.

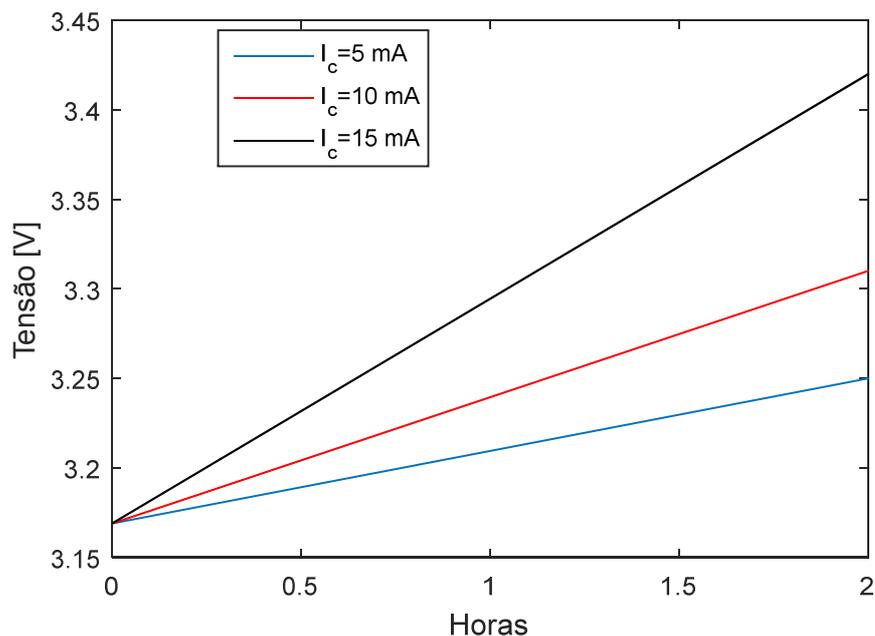


Figura 3.13 – Perfis de carregamento para 5, 10 e 15 mA.

Desse modo, a partir do comportamento observado na Figura 3.13, são apresentados na Tabela 3.5 os valores das correntes de carregamento I_c medidos e os tempos totais para o carregamento da bateria estando diretamente conectada à fonte de RF através do circuito retificador construído.. Os tempos foram calculados

considerando que uma corrente de 150 mA é capaz de carregar plenamente a bateria em um tempo médio total de 6 horas.

P_{in} [dBm]	Corrente I_c no circuito [μ A]	Tempo estimado para carregamento
-25	-40,7	Descarregamento
-20	2,5	360000 horas
-15	6,0	150000 horas
-10	13,1	68702 horas
-5	27,1	33210 horas
0	54,5	16514 horas
5	96,0	9375 horas
10	155,5	5788 horas

Tabela 3.5 – Resultados de carregamento da bateria a partir do retificador otimizado para carga de 1000 Ω .

A partir dos resultados apresentados na Tabela 3.5, verifica-se que para uma potência de entrada abaixo de -20 dBm, o retificador não opera, pois não há energia suficiente para vencer a barreira de potencial do diodo. Nesse caso, a bateria está descarregando-se, dado o sentido medido de I_c . A partir de -20 dBm o circuito foi capaz de operar fornecendo corrente à bateria, embora o valor obtido, 2,5 μ A, resulte em um tempo inviavelmente grande para o carregamento. Para a potência de 10 dBm, o retificador foi capaz de entregar à bateria uma corrente de 155,5 μ A. Embora esse valor de corrente ainda seja pequeno, o nível de potência de 10 dBm na entrada do retificador é de difícil obtenção em se tratando de reaproveitamento de energia eletromagnética. Assim, nesse trabalho são investigadas diferentes propostas para que se obtenha um maior fornecimento de corrente para a carga. Tais propostas formam um conjunto de soluções de maneira a viabilizar o uso da tecnologia *rectenna* em aplicações práticas de engenharia, o objetivo principal deste trabalho.

Uma primeira ação para a melhoria do desempenho do retificador é a determinação mais apropriada do valor da impedância Z_c , ou seja, utilizando os valores reais de corrente I_c que o retificador pode prover. Na Tabela 3.5, pode ser verificado que a menor corrente elétrica de carregamento foi de 2,5 μ A, o que para

uma tensão mínima de 3 V resulta em uma impedância de carga de aproximadamente $Z_c = 1 \text{ M}\Omega$.

Com o objetivo de verificar a influência da variação do valor de Z_c no comportamento e desempenho do circuito retificador, foram projetados e otimizados no *software* ADS® três novos circuitos, um para cada um dos seguintes valores de impedância: $Z_c = 10 \text{ k}\Omega$, $Z_c = 100 \text{ k}\Omega$ e $Z_c = 1 \text{ M}\Omega$. A topologia utilizada nestes circuitos é idêntica à do circuito anterior, ilustrado na Figura 3.11. Os três circuitos foram construídos e os resultados, contendo o parâmetro S_{11} e a carta de Smith em função da variação da frequência, são apresentados nas Figuras 3.14, 3.15 e 3.16, enquanto na Tabela 3.6 são apresentados os resultados de I_c para cada um dos retificadores construídos, considerando diferentes potências de entrada.

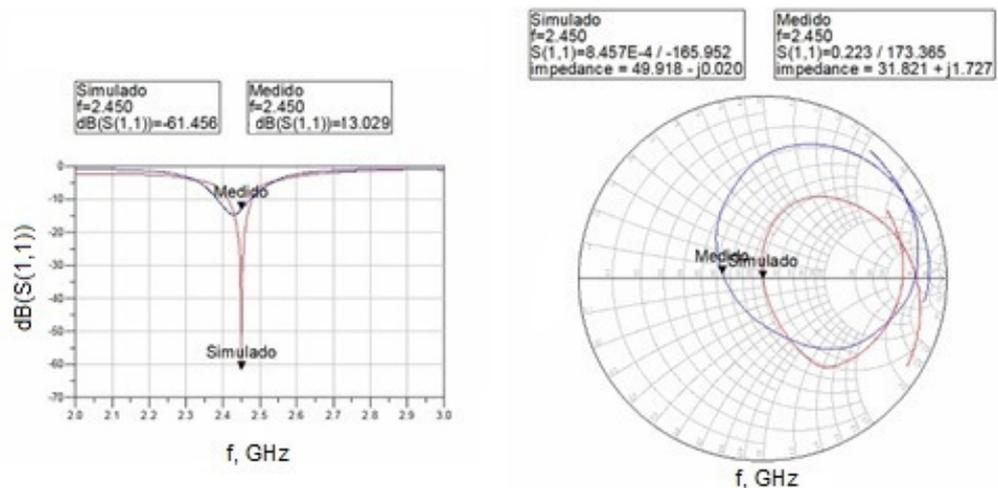


Figura 3.14 – Resultados medido e simulado para retificador com carga 10 kΩ. a) S_{11} b) carta de Smith.

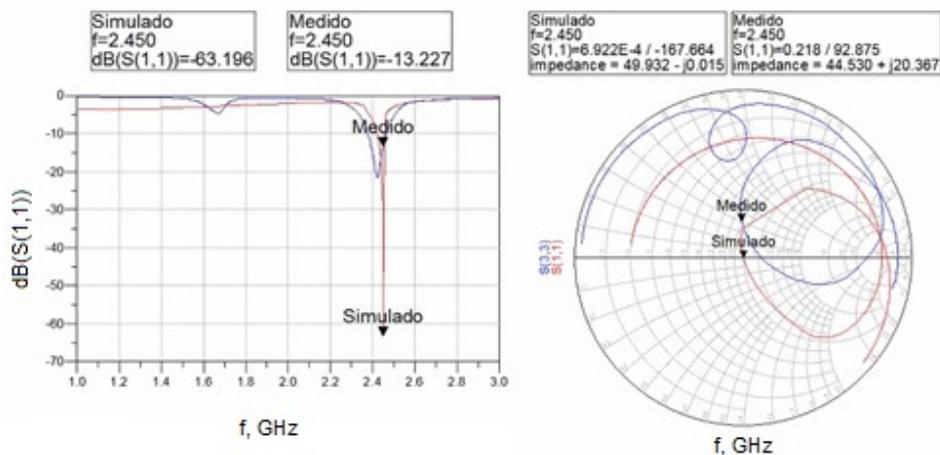


Figura 3.15 – Resultados medido e simulado para retificador com carga 100 kΩ. a) S_{11} b) carta de Smith

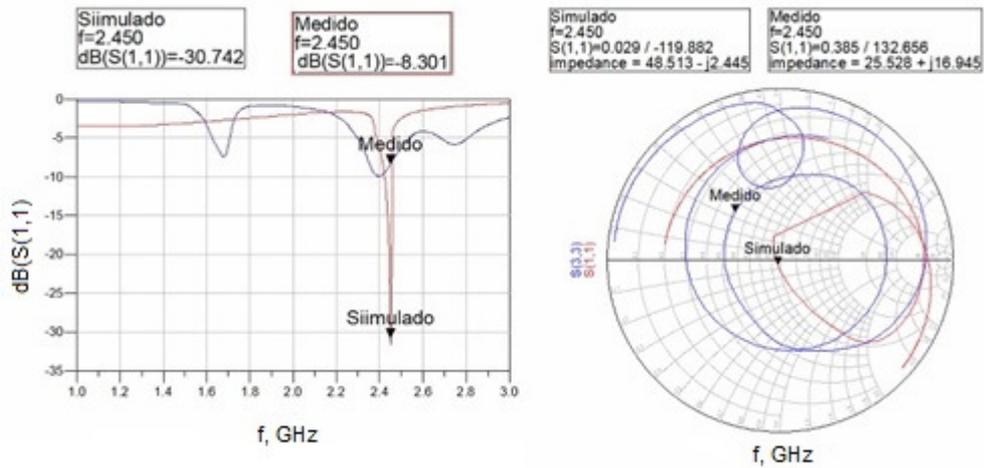


Figura 3.16 – Resultados medido e simulado para retificador com carga 1 MΩ. a) S_{11} b) carta de Smith.

P_{in} [dBm]	$Z_c = 10 \text{ k}\Omega$	$Z_c = 100 \text{ k}\Omega$	$Z_c = 1 \text{ M}\Omega$
	[μA]	[μA]	[μA]
-25	-26,3	-27,0	-40,7
-20	3,6	3,5	3,5
-15	8,6	9,2	8,2
-10	18,9	28,1	17,9
-5	38,0	46,5	35,2
0	72,7	88,7	63,2
5	131,2	135,4	106,2
10	211,1	215,7	163,0

Tabela 3.6 – Resultados de carregamento da bateria com variação de carga.

A partir da análise das Figuras 3.14 a 3.16, verifica-se que os retificadores projetados para 10 kΩ e 100 kΩ obtiveram comportamento de S_{11} bastante próximos entre si. Ambos estão operacionais, com valores de S_{11} abaixo de -10 dB para a frequência de 2,45 GHz. Verifica-se também que o retificador projetado para uma carga de 1 MΩ apresentou o pior comportamento de S_{11} comparado aos outros retificadores manufaturados, com S_{11} superior a -10 dB. O retificador otimizado para uma carga Z_c de 100 kΩ foi o que obteve melhor desempenho com relação à corrente elétrica I_c da bateria, apresentando valores maiores para todas as potências de entrada, exceto em -20 dBm quando ficou ligeiramente inferior aos outros modelos de retificador. Embora os resultados medidos e simulados sejam próximos, em especial para os retificadores com $Z_c = 10 \text{ k}\Omega$ e $Z_c = 100 \text{ k}\Omega$, as divergências se

devem principalmente ao processo manual de construção empregado neste trabalho.

Outro aspecto de grande importância para o desempenho dos retificadores é o comportamento de S_{11} em função da potência de entrada, dado que o diodo é bastante sensível a tal parâmetro. Na Figura 3.17, são apresentadas as curvas medidas de $S_{11} \times P_{in}$ para os quatro retificadores construídos operando na frequência de 2,45 GHz. Verifica-se que o retificador projetado para uma carga de 1 k Ω não apresenta um desempenho satisfatório para nenhuma potência de entrada ($S_{11} > -10$ dB), justificando assim, o pior resultado medido para o carregamento da bateria (I_c menor). Embora o retificador projetado para uma carga de 1 M Ω tenha um valor de S_{11} melhor para $P_{in} = -15$ dBm, sua performance piora consideravelmente com o incremento da potência de entrada, comportamento que também é verificado na Tabela 3.6. Os retificadores projetados para cargas de 10 k Ω e 100 k Ω se mostraram operacionais ($S_{11} < -10$ dB para frequência e faixa de potência desejada) e obtiveram comportamentos próximos tanto com relação a S_{11} , quanto na corrente elétrica fornecida à bateria, porém com uma ligeira vantagem para o retificador para 100 k Ω . Assim, por ter apresentado o melhor desempenho medido, a carga $Z_c = 100$ k Ω é adotada em todas as sucessivas investigações realizadas neste trabalho. Tal retificador, projetado para operar na frequência de 2,45 GHz é identificado sob o código R245.

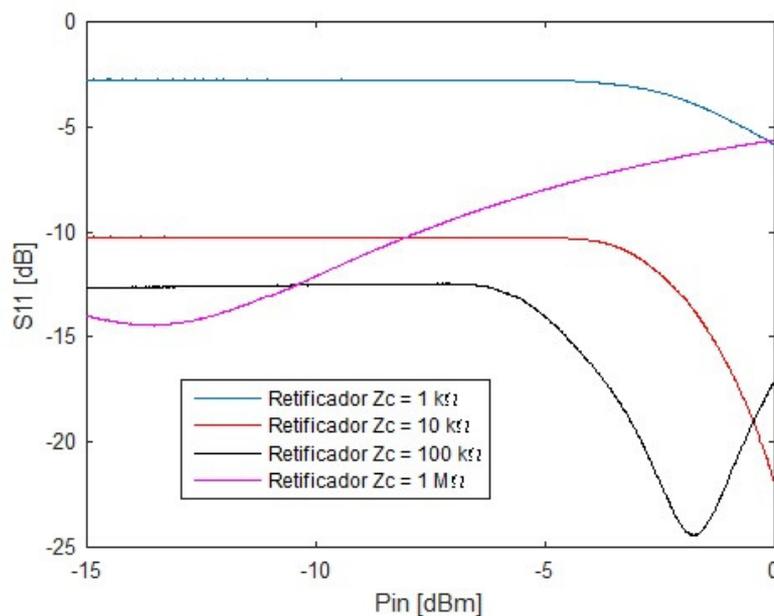


Figura 3.17 – S_{11} em função da variação da potência de entrada para retificadores projetados para cargas de 1 k Ω , 10 k Ω , 100 k Ω e 1 M Ω .

3.4.5. Medição de carregamento da bateria utilizando retificador e conversor *booster*

Considerando os baixos níveis de energia disponíveis no ambiente para efetivação do reaproveitamento de energia eletromagnética, alguns circuitos conversores elaborados para uma maior e melhor entrega de sinal para as cargas vem sendo propostos (VIGNATI, 2012). Dentre esses, uma solução que se adequa aos níveis de tensão e potência de operação de uma *rectenna* é o conversor CC-CC *booster* BQ25504 – *Texas Instruments*. Este é um dispositivo projetado para entrar em operação a frio a partir de um valor mínimo de tensão de 330 mV e entregar em sua saída, uma tensão estabilizada de 3,3 V (TEXAS, 2017). Após entrada em funcionamento, o circuito mantém-se operando a partir de um nível mínimo de 80 mV. Outra característica benéfica do conversor é a sua capacidade de manter o fornecimento de corrente elétrica para a carga devido à presença de capacitores em sua saída, mesmo se houver interrupção da fonte. Também existe a possibilidade de instalação de supercapacitores de maneira a propiciar o fornecimento de uma tensão CC por um tempo ainda maior. Neste trabalho, foi utilizado um supercapacitor de 1000 μ F. O circuito empregado neste trabalho está apresentado na Figura 3.18, com o projeto e comportamento elétrico detalhado em (ZANON, 2017). Por meio do ajuste dos valores dos resistores externos, é possível determinar os níveis de tensão que o conversor deverá operar. Os detalhes técnicos para o projeto são fornecidos no catálogo do fabricante (TEXAS, 2017).

O conversor BQ25504 foi conectado ao retificador R245 formando o conjunto R245-conversor. O conjunto foi diretamente conectado à bateria Li-Ion e então, ao gerador N5181A, ajustado para fornecer a frequência de 2,45 GHz e com variação de potência na saída de -25 até 10 dBm. Semelhante ao realizado na Seção 3.4.4, o objetivo do teste é avaliar o valor da corrente elétrica fornecida à bateria para cada nível ajustado de potência de saída do gerador. O diagrama de blocos que representa o ensaio é apresentado na Figura 3.19, enquanto na Tabela 3.7 são apresentados os resultados obtidos. A fotografia do conjunto *booster* mais supercapacitor encontra-se no Apêndice C.

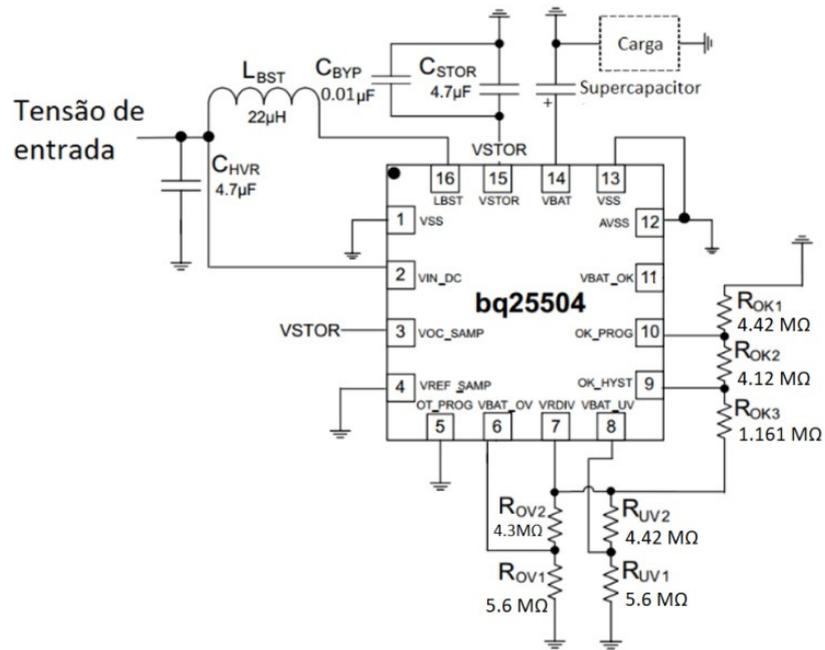


Figura 3.18 – Circuito do conversor BQ25504 (ZANON, 2017).

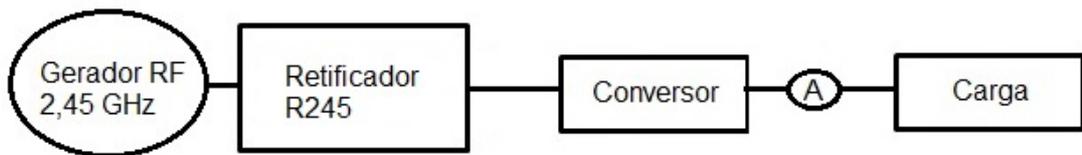


Figura 3.19 – Configuração de medições: retificador-conversor-bateria.

Pot. entrada [dBm]	R=100 kΩ+booster [µA]
-25	3,5
-20	3,6
-15	7,4
-10	9,5
-5,0	11,8
0	22,3
5	45,8
10	76,5

Tabela 3.7 – Resultados de carregamento da bateria com conversor BQ25504.

A partir dos resultados apresentados na Tabela 3.7, verifica-se que o retificador operando em conjunto com o conversor foi capaz de operar a partir de um nível inferior de potência de entrada quando comparado à operação sem o conversor, -25 dBm contra -20 dBm. Embora os níveis de corrente verificados com o

incremento da potência de entrada para o conjunto retificador mais conversor não tenham superado os valores apresentados na Tabela 3.6, a entrada em operação a partir de um nível menor de potência é uma característica extremamente benéfica ao sistema para condições de reaproveitamento da energia eletromagnética.

3.4.6. Retificador para 1,80 GHz e Dupla Frequência (1,80/2,45 GHz)

Além da frequência de 2,45 GHz proveniente dos roteadores de internet, estão também presentes no ambiente outras frequências tais como a de celulares operando, por exemplo, em 0,90/1,80/2,10 GHz. Novos roteadores também já estão operando na frequência de 5,80 GHz, ampliando assim a gama de possíveis fontes para o reaproveitamento da energia eletromagnética. Diversos trabalhos acerca de *rectennas* vêm abordando a utilização de circuitos operando em multifrequências, seja em um mesmo retificador ou em arranjos de retificadores específicos para cada frequência de operação. Em (VINARY; SURE; DESHPANDE, 2006) foi proposto um sistema *rectenna* para aproveitamento de energia nas frequências de 0,90/1,80/2,45 GHz. Em (SUN et. al., 2013), foi projetada uma única *rectenna* para operação simultânea em 1,80 e 2,10 GHz, enquanto em (SUN et. al., 2012) foi proposto também um único circuito, porém operando simultaneamente nas frequências de 2,45 e 5,80 GHz.

Neste trabalho, com o objetivo de também aproveitar energia de mais de uma frequência para o carregamento da bateria Li-Ion, é inicialmente projetado um circuito retificador para a operação em 1,80 GHz, otimizado para uma carga de 100 k Ω e potência de entrada -10 dBm. Foi adotada a mesma topologia dos retificadores para 2,45 GHz, com emprego de linhas de transmissão e *stub* aberto para obtenção do casamento de impedâncias para 50 Ω , conforme Figura 3.11. Os resultados obtidos, simulado e medido são apresentados na Figura 3.20.

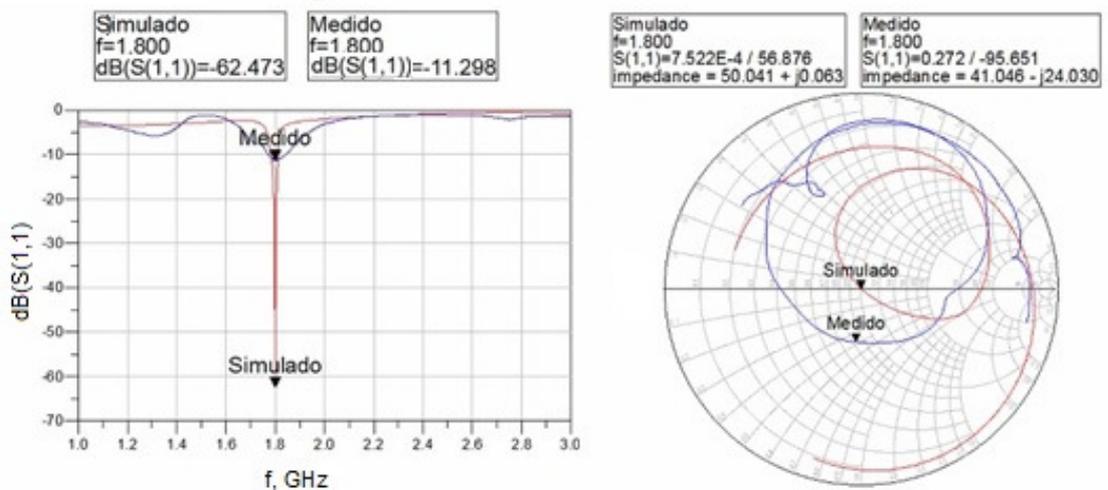


Figura 3.20 – Resultados medido e simulado para retificador R180. a) S_{11} , b) carta de Smith.

Conforme observado para a frequência de 2,45 GHz, também para 1,80 GHz o retificador construído obteve resultado de S_{11} e impedância de entrada com valores significativamente diferentes dos simulados. Entretanto, dado que o parâmetro S_{11} apresentou um valor abaixo de -10 dB, o circuito está operacional e é empregado para o carregamento da bateria Li-Ion na configuração *rectenna* sob a identificação R180. Na Tabela 3.8 são apresentados os valores de corrente de carregamento da bateria empregando o retificador R180 diretamente conectado ao gerador RF. Verifica-se que os valores de corrente obtidos aproximam-se bastante dos valores apresentados na Tabela 3.5. Tal aproximação entre as correntes pode ser justificada pelo valor aproximado do parâmetro S_{11} de ambos os circuitos.

Potência de entrada [dBm]	Corrente I_c no circuito R180 [μ A]
-25	-40,2
-20	2,8
-15	5,9
-10	14,7
-5	30,2
0	65,4
5	103,5
10	169,1

Tabela 3.8 – Resultado de carregamento da bateria com retificador R180.

Em situações onde se deseja aproveitar, por exemplo, a energia de duas faixas de frequências existentes no ambiente, o emprego de um único retificador operando em ambas as frequências pode ser vantajoso. Consegue-se a redução pela metade do número de retificadores necessários, obtendo assim, economia de espaço físico na instalação e no custo dos retificadores. Neste trabalho foi projetado um circuito retificador dobrador de tensão, otimizado no *software* ADS®, de forma a obter uma impedância de entrada Z_{in} de 50Ω tanto na frequência de 1,80, quanto em 2,45 GHz. No processo de otimização, a potência de entrada foi ajustada para -10 dBm, assim como nos casos anteriores. Novamente, foi utilizado o FR4 como substrato e o conector KLC3011 para as conexões necessárias. O circuito desenvolvido no *software* ADS® é apresentado na Figura 3.21, enquanto a topologia do retificador manufacturado é mostrada na Figura 3.22. Na Figura 3.23 são apresentados os resultados obtidos, medido e simulado, para o S_{11} do retificador.

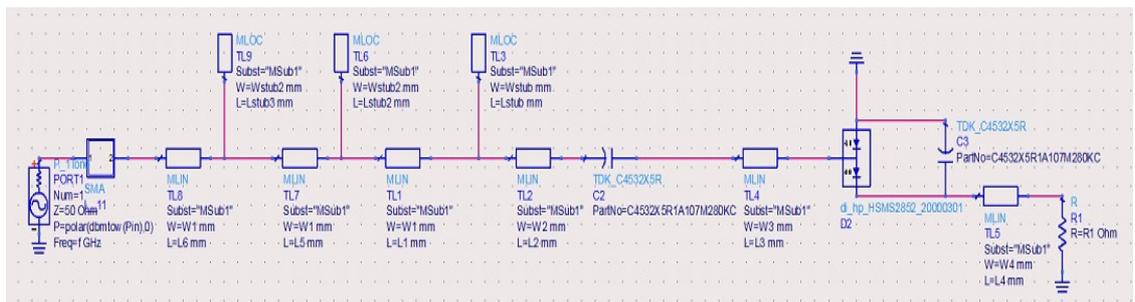


Figura 3.21 – Circuito do retificador projetado para dupla frequência - ADS®.

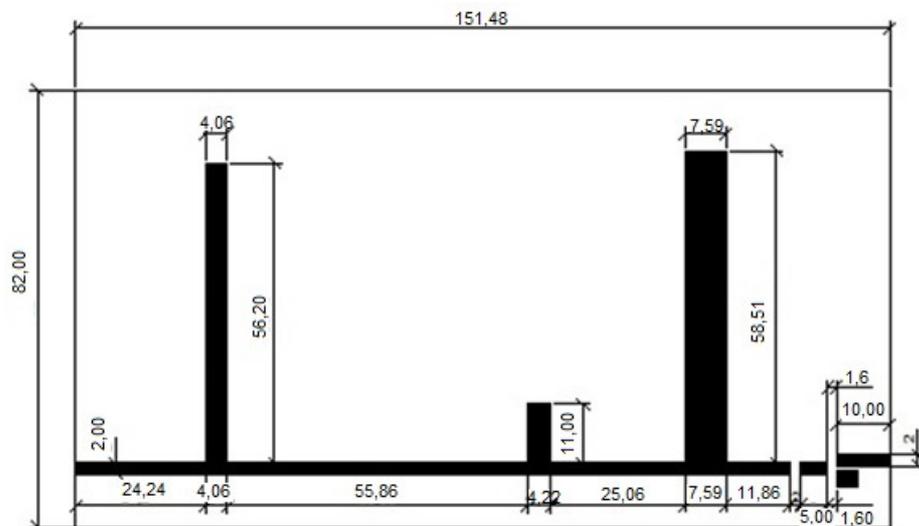


Figura 3.22 – Topologia construída para o retificador de dupla frequência – dimensões em milímetros.

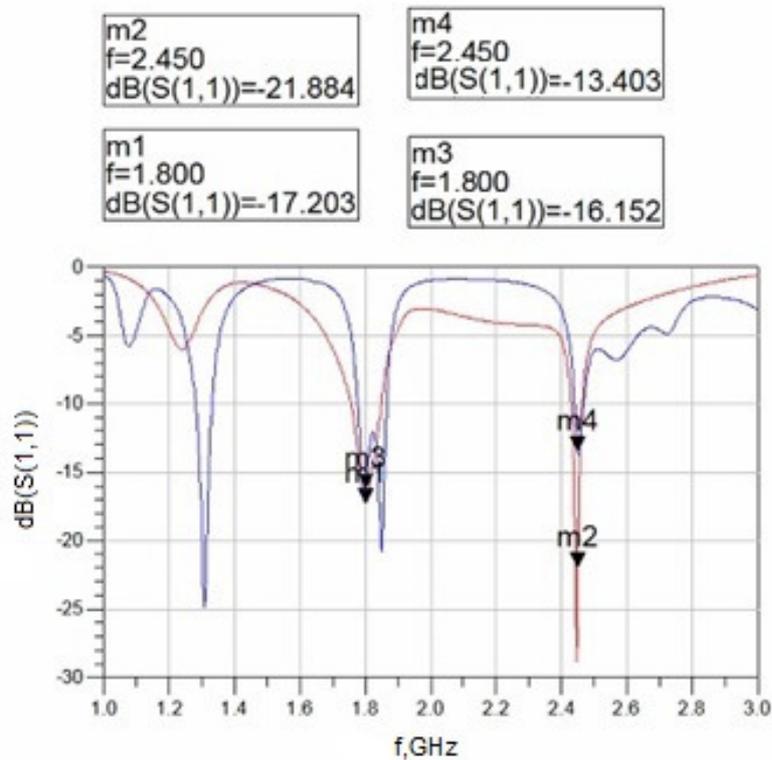


Figura 3.23 – Parâmetros S_{11} do retificador para dupla frequência; m1 (simulado em 1,8 GHz), m2 (simulado em 2,45 GHz), m3 (medido em 1,8 GHz), m4 (medido em 2,45 GHz).

Nas Figuras 3.21 e 3.22, nota-se que foram necessários o emprego de três *stubs* do tipo aberto para que fosse possível alcançar um resultado próximo ao desejado. Os circuitos projetados com apenas um e dois *stubs* não foram capazes de manter um nível de S_{11} abaixo de -10 dB em ambas as frequências desejadas.

Na Figura 3.23, verifica-se que os resultados medidos, m3 e m4 se aproximaram de maneira satisfatória dos resultados simulados, m1 e m2. Dessa maneira, dado que os resultados medidos de S_{11} em ambas as frequências estão abaixo de -10 dB, considera-se que o retificador projetado para dupla frequência está operacional e é utilizado com a identificação RDupla.

Os resultados dos testes de carregamento da bateria Li-Ion empregando o retificador RDupla, inicialmente operando em 1,80, posteriormente em 2,45 GHz, diretamente conectado ao gerador RF são apresentados na Tabela 3.9. Verifica-se que, conforme esperado, o retificador RDupla foi capaz de carregar a bateria com um maior nível de corrente na frequência de 1,80 GHz devido ao melhor parâmetro

S_{11} nesta frequência. Comprovou-se também que os valores de I_c obtidos para o retificador RDupla, em ambas frequências, situaram-se próximos dos valores obtidos para os retificadores anteriormente testados, com uma corrente de carregamento da ordem de alguns μA .

Potência de entrada [dBm]	I_c ret. RDupla (1,80 GHz) [μA]	I_c ret. RDupla (2,45 GHz) [μA]
-25	-30,2	-41,2
-20	3,0	0,8
-15	7,2	2,3
-10	15,4	5,8
-5	30,5	12,9
0	55,8	26,1
5	88,8	50,2
10	126,5	86,7

Tabela 3.9 – Resultado de carregamento da bateria com retificador RDupla.

3.5. Considerações Finais

Neste capítulo, foi investigado o comportamento elétrico de um componente crítico para o funcionamento eficiente de uma *rectenna*, o circuito retificador. O projeto do retificador deve ser feito de maneira minuciosa, pois seu comportamento depende de algumas variáveis: método de manufatura, materiais empregados, frequência de operação, potência de entrada, diodo escolhido, topologia do circuito e a carga a ser alimentada. Assim, inicialmente, a carga foi eletricamente modelada quanto ao comportamento de tensão e corrente durante o processo carregamento. Após essa etapa, foi escolhido o diodo com melhor comportamento dentre os investigados, modelo HSMS-2852, operando na configuração dobradora de tensão simples. Essa configuração foi escolhida devido à sua simplicidade de manufatura e capacidade de elevação da tensão de saída. Após os testes iniciais de carregamento da bateria Li-Ion a partir do retificador diretamente conectado a um gerador de RF, buscou-se a melhoria dos resultados por meio de uma melhor modelagem do valor de impedância de carga, chegando ao valor ótimo de 100 k Ω para a operação do retificador, adotado a partir de então em todos os projetos investigados neste trabalho.

Para obtenção de resultados de carregamento melhores foi proposta a conexão de um circuito conversor CC-CC do tipo *booster* de tensão, tipo BQ25504 entre o retificador R245 e a bateria com o objetivo de reduzir o nível mínimo de potência de operação do circuito. Conforme foi verificado, esse valor foi reduzido de -20 para -25 dBm, o que, em situações práticas de reaproveitamento da energia eletromagnética do ambiente, pode ser um diferencial positivo. Também com objetivo de aumentar o nível de energia entregue à bateria Li-Ion, foram projetados e manufaturados circuitos em 1,80 GHz isoladamente, R180, e também um retificador capaz de operar em duas frequências, 1,80 e 2,45 GHz, RDupla. Um retificador operando simultaneamente nestas frequências é então capaz de aproveitar, além da energia proveniente dos roteadores de internet, a energia do sistema de telefonia celular.

4. ANTENAS

A antena é o elemento constituinte de uma *rectenna* responsável pela captação da energia eletromagnética disponível no ambiente. Dado que o nível de energia é muito baixo, um projeto meticuloso da antena é tão importante quanto o do retificador, pois caso contrário, não é possível alcançar o mínimo de tensão para vencer o potencial de barreira do diodo *Schottky*. Assim neste capítulo são investigados diferentes arranjos de antenas impressas retangulares com o objetivo de obter antenas de ganho mais elevado e então, capazes de coletar maior potência para o circuito retificador. Uma solução empregando metamaterial também é investigada com o objetivo de aumentar a diretividade da antena.

4.1. Antenas Impressas

Em instalações onde o tamanho, peso e custo são elementos limitadores, o emprego de antenas impressas é uma boa alternativa. Tais antenas são de construção simplificada e apresentam um baixo custo de confecção através do método de impressão sobre um substrato dielétrico. Todavia, possuem algumas desvantagens significativas, tais como baixa eficiência, baixo ganho, banda estreita de frequências e apresentam radiação espúria de alimentação (BALANIS, 2009). Pode-se obter aumento da largura de banda através do emprego de conjuntos de elementos, embora neste caso, o sistema possa se tornar excessivamente grande. Nas faixas de frequências VHF (30-300MHz), o emprego das antenas de microfita pode se tornar inviabilizado devido às dimensões físicas requeridas para se obter a frequência de ressonância, sendo então mais adequado às frequências mais elevadas, tais como UHF (30-3000 MHz) ou superiores.

De maneira simplificada, as antenas impressas constituem-se por uma fita ou plaqueta metálica de pequena espessura t ($t \ll \lambda_0$, onde λ_0 é o comprimento de onda no espaço livre) separada por um dielétrico de pequena espessura h ($h \ll \lambda_0$) de um plano terra de referência. Uma característica fundamental dessas antenas é a direção do ganho máximo no diagrama de radiação, tipicamente, normal ao plano do substrato. As antenas impressas podem ser fabricadas empregando diferentes geometrias, sendo mais comum o uso das plaquetas quadradas, retangulares, retangulares chanfradas, circulares e fitas (dipolos). Em (SHARMA; WADKAR,

2015), foram analisadas as antenas impressas tipo retangular, circular e retangular chanfrada segundo três parâmetros fundamentais: parâmetro S_{11} , diretividade e largura de banda, com os respectivos resultados apresentados na Tabela 4.1. O substrato escolhido foi a fibra de vidro, com $\epsilon_r = 4,4$.

Antena	Frequência [GHz]	Parâmetro S_{11} [dB]	Diretividade [dB]	Largura de banda [MHz]
Retangular	2,41	-18,03	3,39	75,0
Circular	2,41	-12,63	3,76	80,0
Retangular Chanfrada	2,41	-15,59	3,51	90,0

Tabela 4.1 – Resultados simulados das antenas sob teste (SHARMA; WADKAR, 2015).

Na Tabela 4.1 é verificado que a antena retangular apresentou um valor do parâmetro S_{11} melhor em relação aos outros modelos testados. Quanto à diretividade, as três antenas possuem valores bastante próximos entre si, com ligeira vantagem para o modelo circular. Quanto à largura de banda, a antena chanfrada obteve o melhor resultado. Verifica-se assim, que cada modelo de antena possui vantagens e desvantagens, devendo ser escolhido conforme a aplicação desejada.

Embora possuam as desvantagens previamente citadas, em aplicações práticas de *rectennas*, as antenas impressas vêm sendo largamente utilizadas, com seu uso constando em vários trabalhos recentes (SHRESTHA; NOH; CHOI, 2013). As geometrias básicas tais como, quadrada, circular e dipolo são normalmente as escolhidas para compor a *rectenna*, embora outras geometrias mais complexas também estão sendo empregadas com o objetivo de alcançar algum objetivo específico.

Neste trabalho, optou-se pelo projeto, otimização e manufatura de antenas impressas do tipo retangular, alimentadas através de linha de transmissão também impressa. Essa escolha se deve aos resultados satisfatórios obtidos em trabalhos anteriores no laboratório de EA do CEFET/MG, tal como apresentado no Capítulo 1 e nos trabalhos verificados durante a elaboração do estado da arte sobre *rectennas*. São propostas estratégias para o aumento da capacidade de coleta de energia pela antena com o objetivo de maximizar o aproveitamento da energia disponível no ambiente. A alimentação por meio da linha de transmissão impressa é utilizada

devido à facilidade de construção, conexão ao conector SMA KLC3011 e de otimização das dimensões de forma a possibilitar o casamento de impedâncias (BALANIS, 2009).

4.2. Antenas Impressas Retangulares

A partir do procedimento básico para projeto de antenas retangulares (BALANIS, 2009), neste trabalho são projetadas e otimizadas antenas retangulares considerando duas funções objetivo: maior diretividade e parâmetro $S_{11} < -10$ dB na frequência desejada. A otimização de cada uma das antenas foi realizada com o emprego da técnica de Algoritmo Genético disponível no *software* CST®, com uma taxa de mutação fixa de 60% e também considerando a influência do conector KLC3011 na impedância de entrada Z_{in} das antenas. As partes constituintes das antenas, elementos radiadores, linhas de transmissão e dimensões do substrato foram permitidas para variar de forma a atender as funções objetivo estabelecidas. Após a otimização, as antenas foram construídas e avaliadas experimentalmente.

4.2.1. Projeto e otimização das antenas

Todas as antenas foram projetadas e construídas empregando como substrato a mesma placa de fibra de vidro FR4 utilizada na manufatura dos retificadores do Capítulo 3, com valores caracterizados de $\epsilon_r = 4,3$ e $\delta = 0,01$. Foram investigadas antenas simples com um único elemento radiador retangular e antenas constituídas de conjuntos de elementos radiadores para operação em 2,45 e 1,80 GHz. Também é investigada uma geometria de antena para operar nessas duas frequências de maneira simultânea.

A seguir são apresentadas as antenas investigadas com os seus acrônimos de identificação apresentados na Tabela 4.2, onde estão resumidos os resultados obtidos. Um dos objetivos deste Capítulo é comparar o desempenho das antenas produzidas neste trabalho, identificadas com a letra “F”, com as antenas investigadas em (BRANDÃO, 2017), identificadas com a letra “G”, onde foram otimizadas somente segundo o objetivo de casamento de impedâncias, sem inclusão da diretividade na otimização.

Conjuntos de antenas contendo dois e quatro elementos radiadores foram projetados e construídos para a frequência de 2,45 GHz com o objetivo de se obter uma maior diretividade e ganho. Para a frequência de 1,80 GHz, foi projetado e construído apenas o conjunto contendo dois elementos radiadores, pois o projeto com quatro elementos resultou em uma antena com dimensões superiores às dimensões da placa de FR4 disponível no laboratório. Todas as dimensões apresentadas nas figuras foram possibilitadas para variar durante a otimização. As medidas indicadas nas figuras são as obtidas após a realização da otimização e estão em milímetros, enquanto as fotografias das antenas manufaturadas encontram-se no Apêndice C.

Antena retangular para Frequência de 2,45 GHz – 1x245F

A antena retangular com um único elemento radiador foi projetada inicialmente conforme procedimento apresentado em (BALANIS, 2009). As dimensões indicadas na Figura 4.1 foram obtidas a partir do processo de otimização, que permitiu sua variação dentro de uma faixa pré-estabelecida de valores determinados no projeto inicial. Essa antena é chamada neste de trabalho de 1x245F.

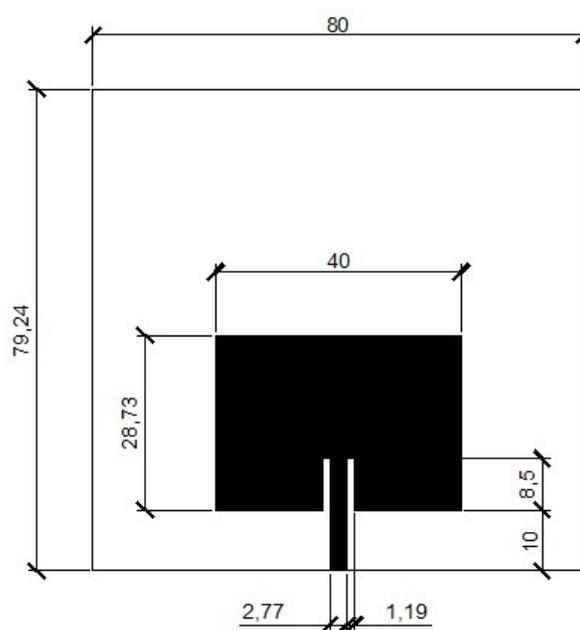


Figura 4.1 – Antena 1x245F: dimensões otimizadas.

Conjunto de antena retangular para frequência de 2,45GHz – 2x245F

A antena chamada neste trabalho de 2x245F é constituída de dois elementos radiadores retangulares e projetada para operar na frequência de 2,45 GHz. Conforme (BALANIS, 2009), conjuntos podem ser empregados para modificar um determinado diagrama de radiação ou, como desejado neste trabalho, aumentar a diretividade total da antena. A antena 2x245F foi projetada a partir das dimensões iniciais utilizadas em (BRANDÃO, 2017). Foi utilizado o mesmo processo de otimização empregado na antena 1x245, com todas as dimensões indicadas na Figura 4.2 consideradas como variáveis de otimização, com seus limites devidamente estabelecidos. As linhas de transmissão para alimentação do conjunto foram projetadas para atuar como transformadores de quarto de onda com o objetivo de se obter um melhor casamento de impedância em 50Ω e, portanto, $S_{11} < -10$ dB. As dimensões indicadas na Figura 4.2 são as finais após a otimização.

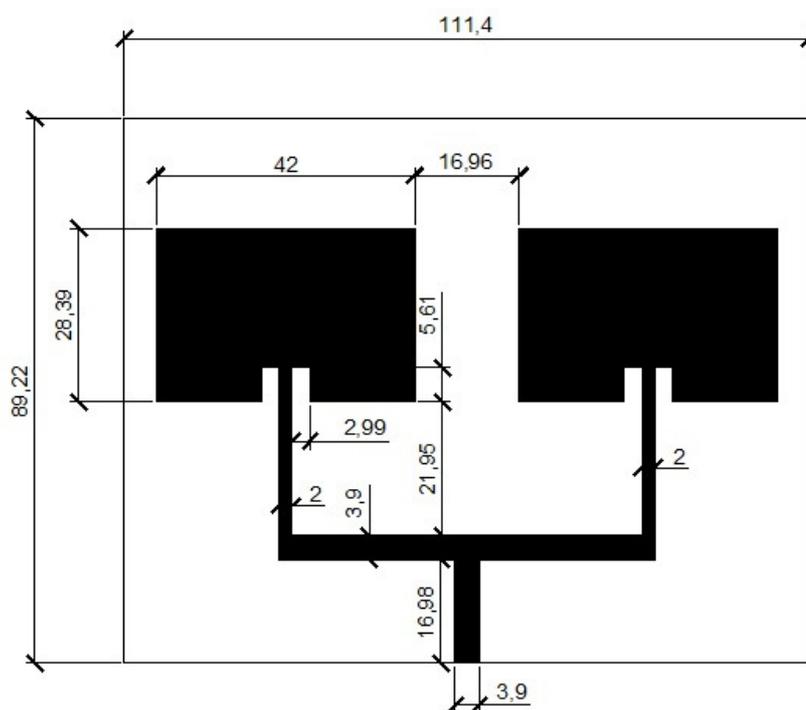


Figura 4.2 – Antena 2x245F: dimensões otimizadas.

Conjunto de antena retangular para frequência de 2,45GHz – 4x245F

A partir do conjunto 2x245F, foi projetada e otimizada uma antena com quatro elementos radiadores para se obter uma maior diretividade a partir da variação das

dimensões indicadas na Figura 4.3. As dimensões iniciais da antena foram as mesmas das empregadas em (BRANDÃO, 2017). Além dos espaçamentos entre os elementos radiadores, também foi permitido à ferramenta de otimização do *software* CST®, variar as dimensões de cada um dos radiadores de maneira a se atingir ao mínimo global das funções objetivo estabelecidas. Assim como na antena 2x245F, linhas de transmissão também foram empregadas para alimentação dos elementos radiadores e para obtenção de uma impedância de entrada próxima de 50Ω para todo o conjunto.

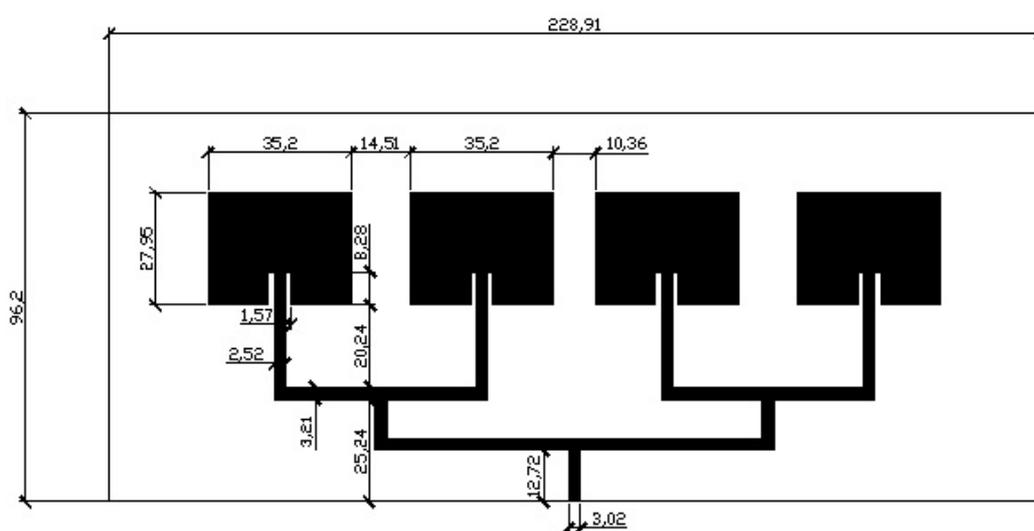


Figura 4.3 – Antena 4x245F: dimensões otimizadas.

Antena retangular para frequência de 1,80GHz – 1x180F

Utilizando o processo idêntico ao utilizado para a antena 1x245F, foi projetada e otimizada no *software* CST® uma antena retangular para a frequência de 1,80 GHz com uso de um único elemento radiador, chamada neste trabalho de 1x180F. A otimização buscou atingir uma maior diretividade em comparação à antena investigada em (BRANDÃO, 2017) e uma impedância de entrada próxima de 50Ω na frequência de 1,80 GHz. Todas as dimensões apresentadas na Figura 4.4 são as dimensões finais após a otimização.

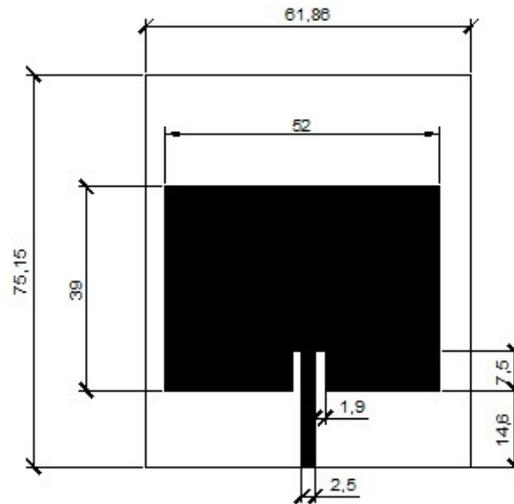


Figura 4.4 – Antena 1x180F: dimensões otimizadas.

Conjunto de antena retangular para frequência de 1,80GHz – 2x180F

Utilizando o processo idêntico ao adotado para a antena 2x245F, foi projetado e otimizado no *software* CST® um conjunto de dois radiadores do tipo *patch* retangular para aumentar a diretividade total e manter a impedância de entrada em 50Ω na frequência de 1,80 GHz. Entretanto, após a conclusão da otimização, verificou-se que a antena apresentava uma frequência de ressonância também próxima da frequência de 2,45 GHz. Assim, foi realizada uma nova otimização de maneira a, além de manter o S_{11} e a diretividade em valores ótimos em 1,80 GHz, que também se pudesse obter a antena operacional para a frequência de 2,45 GHz. As dimensões finais da antena são apresentadas na Figura 4.5.

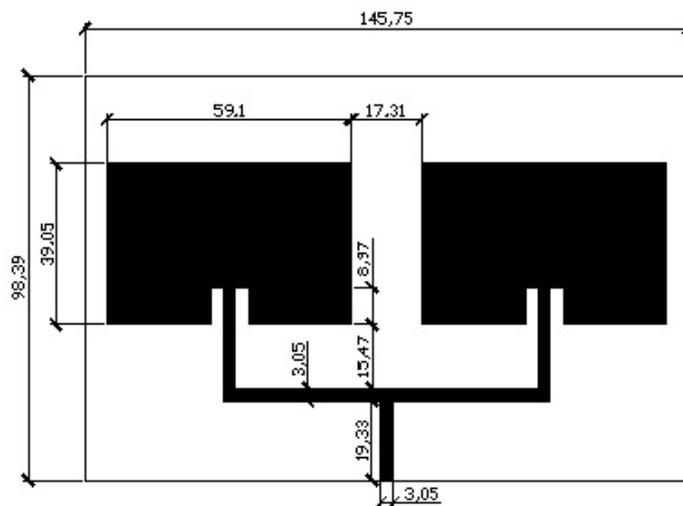


Figura **Erro! Nenhum texto com o estilo especificado foi encontrado no documento.**4.5– Antena 2x180F: dimensões otimizadas.

Antena retangular modificada para frequências de 1,80 e 2,45GHz – 1xDuplaF

Conforme foi apresentado na Seção 3.4.6, um retificador capaz de operar simultaneamente em duas frequências é capaz de reduzir o número total de componentes utilizados, economizando assim, espaço e custos. Tal conceito é válido também para a antena, onde uma antena apresentando S_{11} abaixo de -10 dB simultaneamente em 2,45 e 1,80 GHz é considerada operacional em tais frequências.

A geometria adotada para a antena que opera nessas duas frequências é chamada nesse trabalho de 1xDuplaF e é apresentada na Figura 4.6. A geometria escolhida foi baseada no trabalho desenvolvido em (HABIB et. al., 2015). Entretanto, diferentemente do empregado na referência, neste trabalho a antena foi otimizada para obtenção, além de parâmetros S_{11} inferiores a -10 dB em 2,45/1,80 GHz, diretividade máxima em ambas frequências. Os resultados obtidos da antena 1xDuplaF encontram-se na Tabela 4.2 e são comparados com os resultados obtidos na referência citada, aqui identificado como 1xDuplaH.

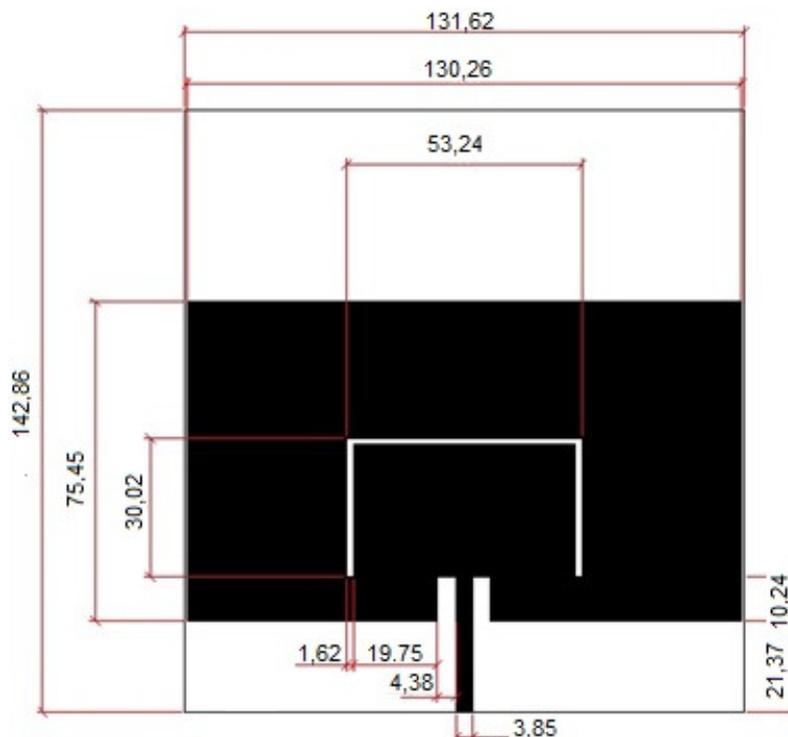


Figura 4.6 – Antena 1xDuplaF: dimensões otimizadas.

4.2.2 Resultados medidos e simulados das antenas

Nesta seção são apresentados na Tabela 4.2 os resultados dos parâmetros S_{11} medidos e simulados e a diretividade máxima do lóbulo principal simulado no *software* CST® de todas as antenas investigadas. Também foram realizados testes da potência elétrica recebida pelas antenas posicionadas em duas distâncias de referência, 10 e 60 cm, a partir de uma antena transmissora, um dipolo comercial de alto ganho com diretividade de 8 dBi, fornecida junto ao roteador modelo TL-WR841HP (TP-LINK, 2017). As antenas receptoras foram diretamente conectadas a um Analisador de Espectro, modelo *FieldFox Keysight* N9912A para a aquisição dos valores de potência. A fonte RF para as antenas operando em 2,45 GHz é um roteador comercial modelo TL-WR841HP (TP-LINK, 2017). Para a frequência de 1,80 GHz, foi utilizada como antena transmissora o mesmo dipolo empregado para 2,45 GHz, porém conectado ao gerador de sinais N5781A, ajustado para uma potência máxima de saída de 18 dBm. Tal valor foi escolhido devido ao fato de ser a maior potência medida na saída do roteador, garantindo assim, um melhor nivelamento entre as fontes. O parâmetro S_{11} da antena transmissora é

apresentado na Figura 4.7, e embora a antena tenha sido projetada para operação ótima entre 2,40 e 2,50 GHz, conforme informado pelo fabricante, ela também está em condições operacionais na frequência de 1,80 GHz, com S_{11} abaixo de -10 dB. A topologia de medição da potência coletada pelas antenas é ilustrada na Figura 4.8. A medição foi realizada estando as antenas receptoras posicionadas sobre uma mesa de maneira a se obter o melhor alinhamento entre elas e a antena transmissora. Dado que os níveis de energia das fontes empregadas são variáveis no tempo, o Analisador de Espectro foi ajustado para aquisição do maior valor de potência durante um período estabelecido de um minuto em cada medição.

Antena	S_{11} medido [dB]	S_{11} simulado [dB]	Diretividade [dBi]	Potência em 10cm [dbm]	Potência em 60 cm [dbm]
1x245F	-30,92	-32,45	7,0	-3,551	-17,01
1x245G	-31,91	-37,31	6,47	-4,303	-16,4
2x245F	-15,621	-42,0	9,14	0,6505	-14,87
2x245G	-18,816	-17,84	8,7	-0,2825	-16,33
4x245F	-19,055	-30,32	11,3	2,16	-11,91
4x245G	-17,619	-39,85	10,5	1,907	-12,08
1x180F	-14,92	-19,11	5,88	-5,42	-28,03
2x180F _(1,80)	-23,591	-39,35	8,69	-3,275	-10,73
2x180F _(2,45)	-15,09	-35,47	5,58	-12,37	-29,00
1xDuplaF _(1,80)	-16,7	-26,12	5,11	-5,14	-15,94
1xDuplaF _(2,45)	-18,1	-29,98	9,85	-9,256	-20,65
1xDuplaH _(1,80)	-4,19(*)	-35,0(*)	8,0(*)	Não realizado	Não realizado
1xDuplaH _(2,40)	-2,52(*)	-20,0(*)	5,6(*)	Não realizado	Não realizado

Tabela 4.2 – Resultados simulados das antenas sob teste.

(*)Valores informados pelos autores

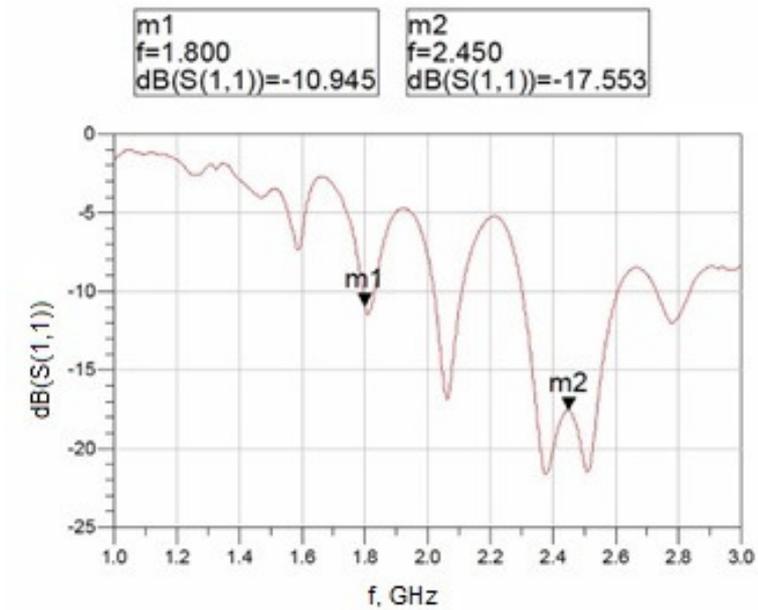


Figura 4.7 – Parâmetros S_{11} da antena transmissora dipolo em 1,80 e 2,45 GHz.

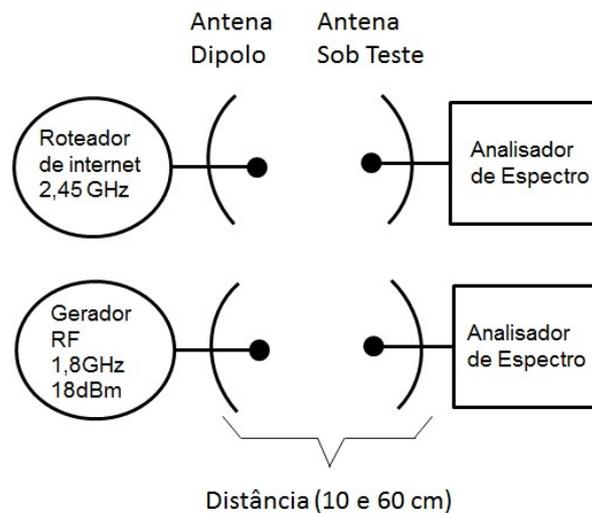


Figura 4.8 – Metodologia para medição da potência recebida pelas antenas.

Pela análise da Tabela 4.2 verifica-se para todas as antenas investigadas, a ocorrência de divergências entre os valores do parâmetro S_{11} medido e simulado. O método de confecção utilizado, manual com emprego de prensa a quente e corrosão com perclorato de ferro, e as incertezas das características exatas do substrato, contribuíram de maneira significativa para as diferenças observadas. Apesar da ocorrência de tais divergências, todas as antenas construídas mostraram-se operacionais para as faixas de frequências projetadas e otimizadas. A maior

potência coletada foi obtida pela antena 4x245F. Esta antena, embora com um S_{11} medido pior do que a antena de referência (4x245G), foi capaz de captar uma maior potência tanto em 10, quanto em 60 cm. Tal fato pode ser creditado à sua maior diretividade, um parâmetro que aliado ao S_{11} , é uma figura de mérito fundamental para uma antena.

A antena 2x245F foi capaz de coletar mais potência em 10 cm quando comparada a sua antena de referência, 2x245G. Também coletou mais energia na distância de 10 cm em comparação com a antena 2x180F, mesmo a antena 2x180F recebendo potência elétrica simultaneamente de duas frequências. Entretanto, em 60 cm, a antena 2x180F foi capaz de captar um maior nível de potência, evidenciando assim, o benefício da otimização desta antena nas duas frequências previamente escolhidas.

A antena para dupla frequência 1xDuplaF comportou-se de maneira similar à antena 1x245F, com uma potência total captada em 10 cm, nas duas frequências, de -3,7 dBm, face aos -3,55 dBm da antena 1x245F. Em 60 cm também houve proximidade na potência total coletada para ambas as antenas, -17,01 dBm para a antena 1x245F e -16,1 para a 1xDuplaF. A antena 1x180F, operando isoladamente em 1,80 GHz obteve o pior comportamento dentre todas as antenas testadas, com a captação do menor nível de potência tanto em 10, quanto em 60 cm. Isto pode ser creditado aos níveis mais baixos de S_{11} e diretividade da antena.

A antena de referência 1xDuplaH, projetada em (HABIB et. al., 2015), conforme informado pelos autores, não obteve os resultados desejados nas frequências de projeto, 1,80 e 2,40 GHz devido ao deslocamento da frequência de operação causado pelas imperfeições construtivas e incertezas do material. Entretanto, a antena mostrou-se operacional nas frequências de 1,84 GHz ($S_{11} = -13,75$ dB) e 2,46 GHz ($S_{11} = -10,1195$). Tal comportamento evidencia mais uma vez a importância de uma caracterização metódica do material, em conjunto com um processo de manufatura cuidadoso da antena para minimizar todas as incertezas inerentes ao processo.

Os níveis de potência captados em 10 cm, para as antenas manufaturadas, deverão ser capazes de acionar os diodos *Schottky* presentes no circuito retificador, mesmo na presença do descasamento de impedância entre tais blocos. O mínimo

necessário verificado no Capítulo 3 foi de -20 dBm para o retificador em 2,45 GHz operando isoladamente, e -25 dBm operando com emprego do conversor *booster*.

Verificou-se também a importância de se obter uma maior diretividade para uma antena em conjunto com o valor adequado de parâmetro S_{11} . Embora as diferenças de potências captadas pelas antenas otimizadas neste trabalho em comparação com as antenas de (BRANDÃO, 2017) sejam relativamente pequenas, tais ganhos podem ser significativos em se tratando de reaproveitamento de energia eletromagnética, elevando em alguns mV a tensão de saída em um sistema *rectenna* completo.

4.3. Metamateriais

Metamateriais são meios artificiais projetados e construídos com objetivo de se obter uma característica eletromagnética final que não está disponível nos materiais naturalmente existentes na natureza. Também podem ser denominados metasuperfícies quando a estrutura possui apenas duas dimensões (MARTINI; MACI, 2013). Tais materiais foram inicialmente propostos por Victor Veselago (VESELAGO, 1968), onde foi apresentada a possibilidade de construção de materiais artificiais com valores negativos de permissividade elétrica ϵ e permeabilidade magnética μ em uma frequência desejada. Veselago também demonstrou a ocorrência da propagação antiparalela de uma onda plana monocromática em um meio metamaterial. Nesse caso, o vetor de Poyting propaga-se na direção oposta à velocidade de fase, ao contrário do que ocorre em um meio convencional.

O índice de refração n que um determinado meio material possui também está relacionado aos parâmetros constitutivos ϵ e μ segundo (CALOZ; ITOH, 2000):

$$n = \sqrt{\epsilon_r} \sqrt{\mu_r},$$

(4.1)

onde ϵ_r é a permissividade relativa do meio e μ_r é a permeabilidade relativa do meio.

Verifica-se em (4.1) a existência de quatro possíveis soluções, ilustradas na Figura 4.9.

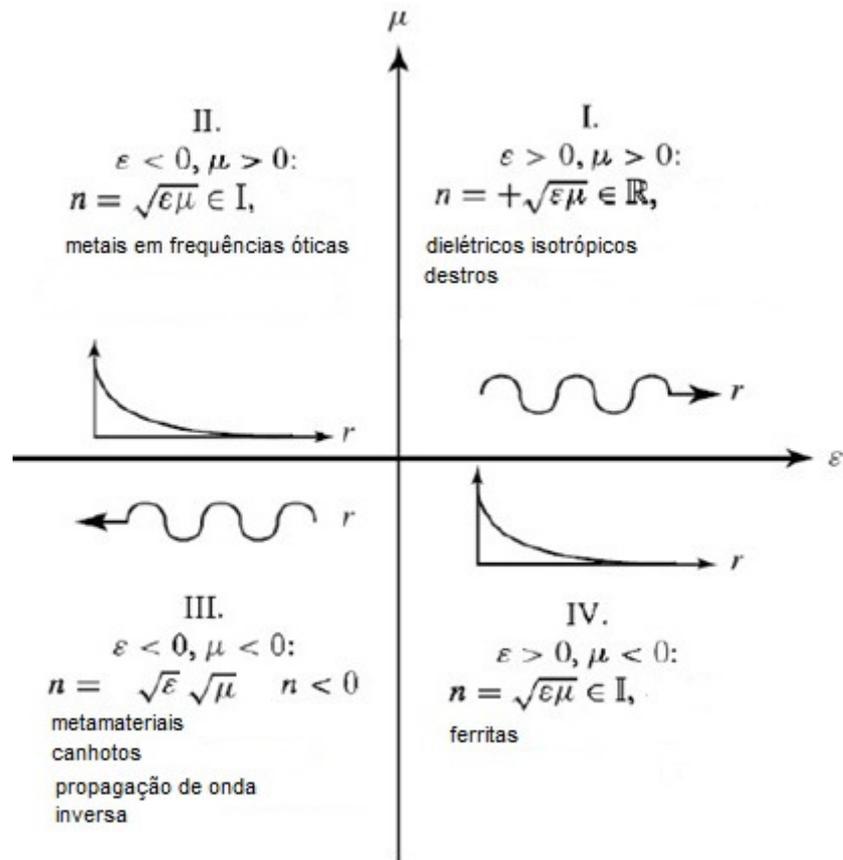


Figura 4.9 – Diagrama de permissividade, permeabilidade e índice de refração (AQUINO, 2008).

Na Figura 4.9, os materiais nos quadrantes I, II e IV são bem conhecidos e tradicionalmente empregados nas mais diversas aplicações de engenharia, enquanto no quadrante III situam-se os metamateriais. Tais materiais possuem simultaneamente, valores negativos de permissividade e permeabilidade, resultando em índice de refração negativo e propagação de onda em modo antiparalelo com a velocidade de fase. Tais materiais são também conhecidos na literatura técnica como materiais canhotos em referência ao termo em inglês, *Left Handed*. Tal definição se deve à direção de propagação dos vetores de campo elétrico e magnético na ocorrência da passagem de uma onda eletromagnética por tais materiais. Ao contrário dos materiais comuns que obedecem à regra da mão direita, nos metamateriais tais vetores obedecem à regra da mão esquerda (VESELAGO, 1968).

Por possuírem índice de refração negativo, os metamateriais, quando submetidos à passagem de uma onda eletromagnética, pela Lei de Snell,

apresentam um ângulo de refração negativo, tal como pode ser verificado na Figura 4.10.

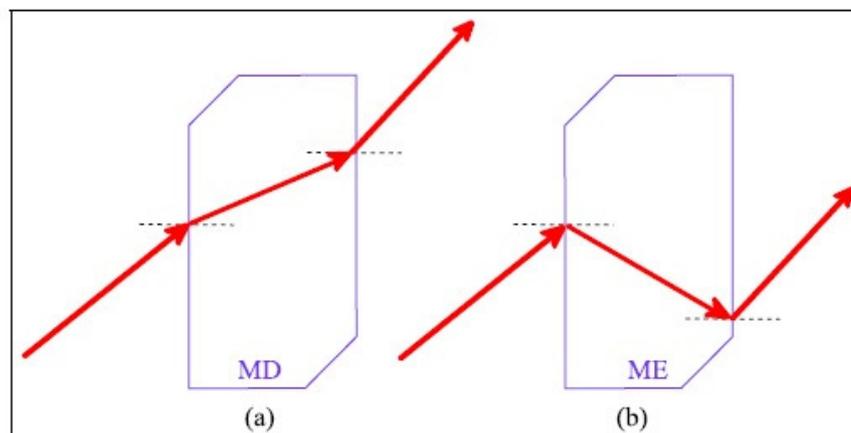


Figura 4.10 – Diagrama de raios e refração (a) material comum Mão Direita (MD), (b) metamaterial Mão Esquerda (ME) (AQUINO, 2008).

No entanto, o próprio Veselago relatou em seus trabalhos a dificuldade prática de se obter um material com tais características, embora naquele tempo já existissem arranjos físicos de fios finos que resultavam em uma permissividade total negativa (ROTMAN, 1962), apresentado na Figura 4.11.



Figura 4.11 – Arranjo de fios finos (ROTMAN, 1962).

Em 1999, o pesquisador J. B. Pendry obteve pela primeira vez, a partir dos conceitos propostos por Veselago, sucesso na obtenção de uma estrutura artificial que resultasse nos parâmetros negativos de permeabilidade magnética (PENDRY

et. al., 1999). Essa estrutura consistia em anéis circulares ressonadores concêntricos com fendas opostas, denominado *Split Ring Resonator* (SRR), podendo também apresentar a versão alternativa de anéis ressonadores quadrados concêntricos, *Square SRR* (S-SRR). Ambas as topologias são apresentadas na Figura 4.12, enquanto os modelos elétricos equivalentes estão na Figura 4.13. Cada anel possui capacitância C , resistência R e indutância L totais, interligadas por uma capacitância de acoplamento mútua entre os anéis, resultando assim, no circuito final.



Figura 4.12 – Ressonadores tipo *Split Ring*: a) SSR e b) S-SRR.

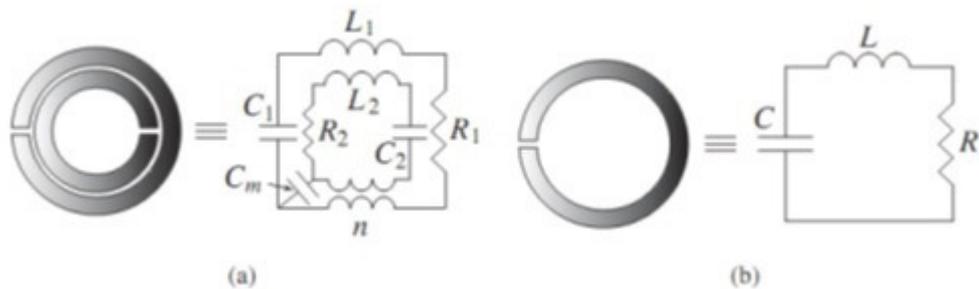


Figura 4.13 – Modelo de circuito do SSR (a) com dois anéis, (b) um anel (SILVA, 2015).

Assim, através da união entre o arranjo de fios finos que apresenta permissividade elétrica negativa e os anéis ressonadores com permeabilidade magnética negativa, foi criada a estrutura periódica com ambos os parâmetros negativo e, portanto, um metamaterial tal como apresentado na Figura 4.14. Um parâmetro fundamental em tal arranjo é o termo “P” de repetição das células. Tal parâmetro deve apresentar um valor bem menor do que o comprimento de onda guiada na estrutura, devendo ser menor do que, pelo menos, um quarto de onda (PENDRY et. al., 1999).

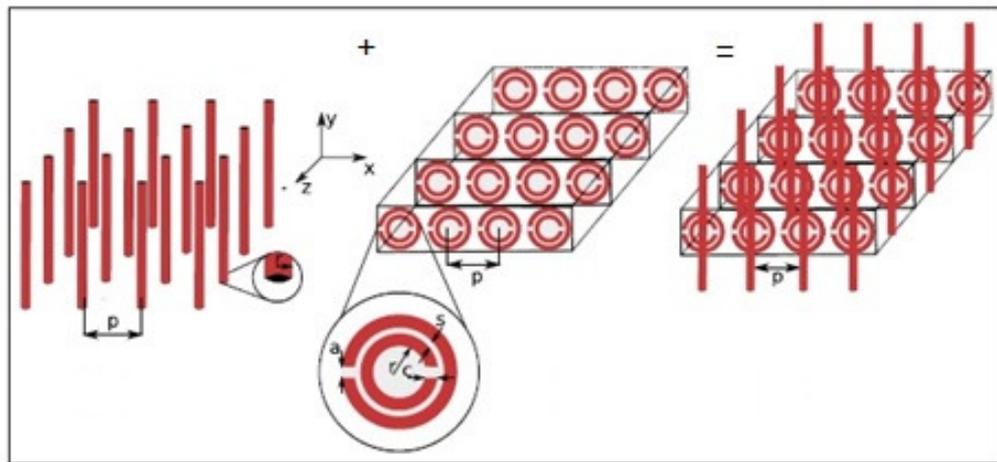


Figura 4.14 – Estrutura de repetição empregando SSR e arranjo de fios finos (AQUINO, 2008).

A partir da teoria elaborada por Veselago e dos avanços propostos por Pendry, em (SMITH et. al., 2005) foi proposto um modelo de metamaterial que emprega estruturas impressas sobre substratos dielétricos apresentando as duas faces recoberta por cobre, tal como apresentado na Figura 4.15. Os resultados obtidos pelo trabalho são apresentados na Figura 4.16.

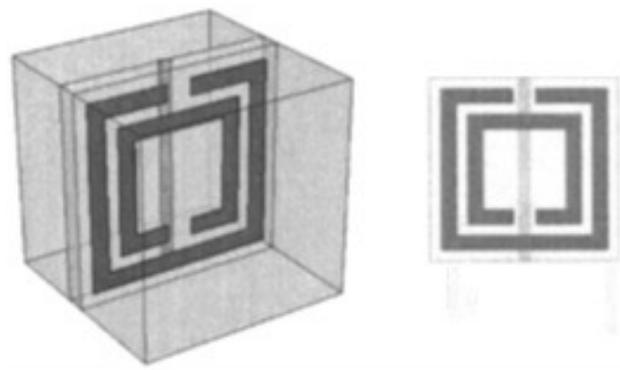


Figura 4.15– Célula metamaterial proposta por (SMITH et. al., 2005).

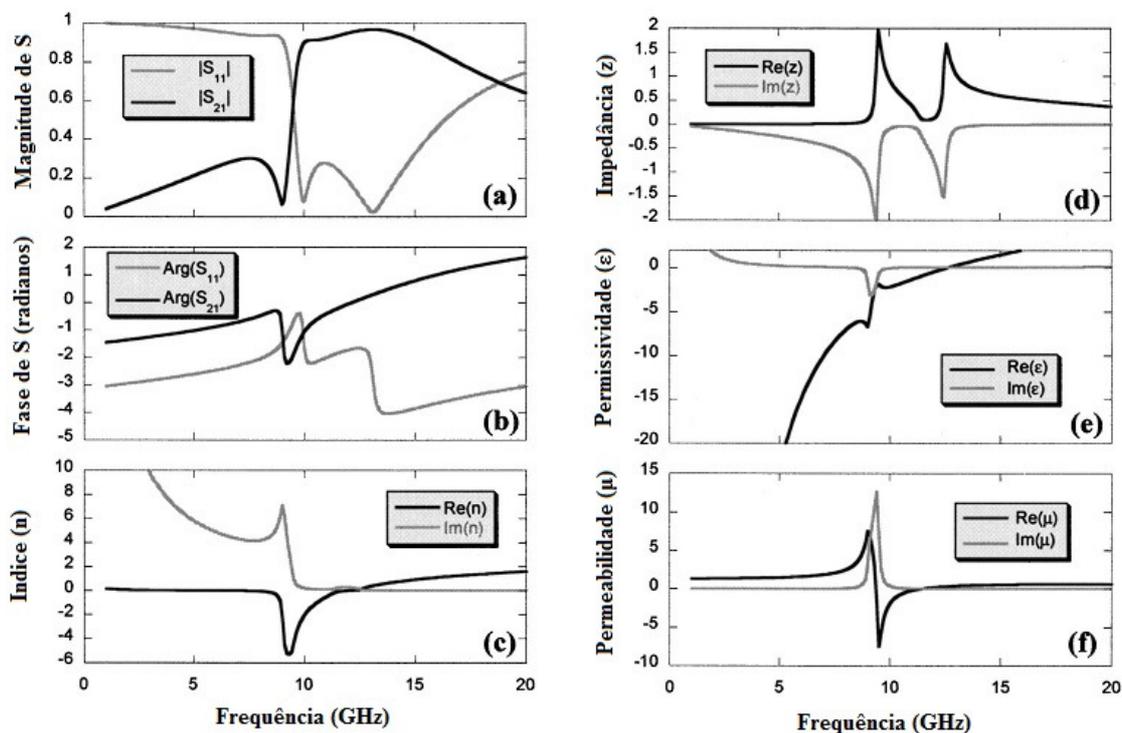


Figura 4.16 – Resultados da estrutura metamaterial proposto em (SMITH et. al., 2005).

Verifica-se na Figura 4.16, letras a) e b), que na frequência de projeto do metamaterial (aproximadamente 10 GHz), ocorre a inversão dos parâmetros S_{11} e S_{12} , tanto do módulo, quanto do ângulo de fase. Na letra c) é apresentado o índice de refração apresentado pelo metamaterial, este demonstrando ser negativo para as frequências próximas de 10 GHz. O índice de refração negativo é uma característica importante para caracterizar metamateriais, tal como os parâmetros ϵ e μ . Nas letras e) e f), estes parâmetros apresentam a componente real negativa na frequência de projeto da estrutura, caracterizando-a, portanto, como um metamaterial.

4.4. Projeto de Célula Metamaterial

Várias são as aplicações práticas dos metamateriais, tais como ampliação e melhoria da rede de telecomunicações, ultrassom médico, fabricação de nanoestruturas, painéis solares mais eficientes, novas câmeras de segurança, capas de invisibilidade, dentre outras. (ENGHETA; ZIOLKOWSKI, 2006). J. B. Pendry propôs que materiais com índice de refração negativo funcionam de maneira idêntica

às lentes ópticas, capazes assim de focar a onda eletromagnética em uma determinada região do espaço (PENDRY, 2000). Alguns trabalhos vêm obtendo sucesso na concepção prática destas lentes, tais como (VERNEY; SAUVIAC; SIMOVSKI, 2004) e (MOON et. al., 2009). Uma lente eletromagnética capaz de aumentar a energia RF coletada pelas antenas previamente construídas é então um dispositivo adequado para o emprego nas *rectennas* deste trabalho, devendo propiciar então, uma maior corrente de carregamento para a bateria Li-Ion.

Neste trabalho é proposto o projeto, otimização e construção de dois modelos de lentes eletromagnéticas de maneira a possibilitar o aumento da diretividade das antenas 2x245F e 2x180F, apresentadas na Seção 4.2 e assim, viabilizar uma maior coleta da energia RF do meio em 2,45 e 1,80 GHz. A antena 2x180F foi escolhida por ter apresentado o melhor resultado de coleta de potência RF na frequência de 1,80 GHz. A antena 2x245F, tal qual a 2x180F, também possui dois elementos radiadores, permitindo assim, uma melhor comparação de resultados entre tais antenas após o uso da lente eletromagnética. Cada lente eletromagnética é composta por um arranjo de estruturas S-SRR em um lado do substrato e um conjunto de fitas metálicas no outro lado, tal como proposto em (SMITH et. al., 2005) na Figura 4.12.

Conforme estabelecido em (CALOZ; ITOH, 2006), o tamanho médio de uma célula S-SRR deve ser menor do que aproximadamente um quarto do comprimento de onda guiado no material, $\lambda_g/4$, garantindo assim, as condições de homogeneidade. A homogeneidade é um aspecto fundamental em um metamaterial, pois desta maneira, é garantido que a difração e o espalhamento das ondas incidentes não prevalecerão frente ao efeito da refração de onda no interior do material. Calculando o valor mínimo da dimensão $\lambda_g/4$ para um substrato de FR4 com $\epsilon_r = 4,3$, o mesmo utilizando em todo o trabalho, temos os valores de 59 mm em 2,45 GHz e 80 mm em 1,80 GHz. Tais valores, sendo o limite máximo teórico para o projeto do S-SRR, foram inicialmente estabelecido como o comprimento do anel externo da estrutura. O anel interno foi inicialmente deslocado do anel externo em uma distância de 1 milímetro, mesmo comprimento utilizado para a largura das trilhas. A fenda ressonante responsável pela capacitância do S-SRR foi inicialmente projetada com 1 milímetro também, valor esse que está no limite da precisão do método de confecção manual adotado neste trabalho.

Todavia, apenas o emprego isolado do S-SRR não garante que a ϵ e a μ sejam simultaneamente negativos, necessitando, portanto, da inclusão de um arranjo em conjunto com fios ou linhas metálicas impressas. O fio empregado em (SMITH et. al., 2005) possui uma largura de 0,14 mm para a frequência de 10 GHz. Neste trabalho, foi estabelecida a largura inicial mínima de 1 mm para o fio para as duas frequências, o limite que o método de confecção manual utilizado neste trabalho possibilita. Assim, utilizando o conjunto de uma linha impressa, associada a um S-SRR, a topologia foi simulada e submetida ao processo de otimização via técnica AG no *software* CST®, com a função objetivo estabelecida em $S_{11} < -10$ dB em 2,45 GHz. O mesmo processo também foi empregado no projeto da célula para operação na frequência de 1,80 GHz. As dimensões obtidas para as células sob investigação, após o término da otimização, são apresentadas na Figura 4.17 em milímetros. Na face superior do substrato, FR4, foi posicionada a estrutura S-SRR, enquanto na posterior foi posicionada a linha impressa. Os parâmetros S_{11} e S_{12} obtidos das estruturas são apresentados nas Figuras 4.18 e 4.19.

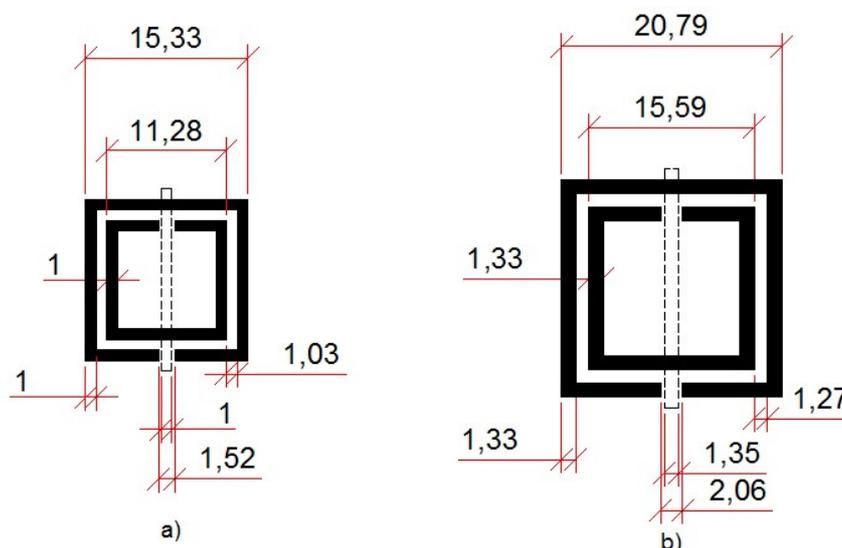


Figura 4.17 – Células metamateriais após otimização do CST® a)2,45 GHz, b)1,80 GHz.

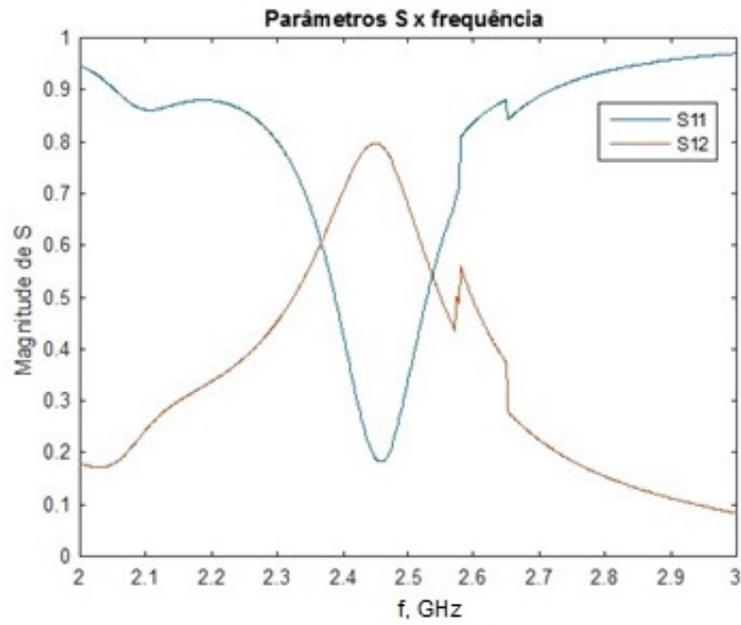


Figura 4.18 – Parâmetros S_{11} e S_{12} da célula projetada para 2,45 GHz.

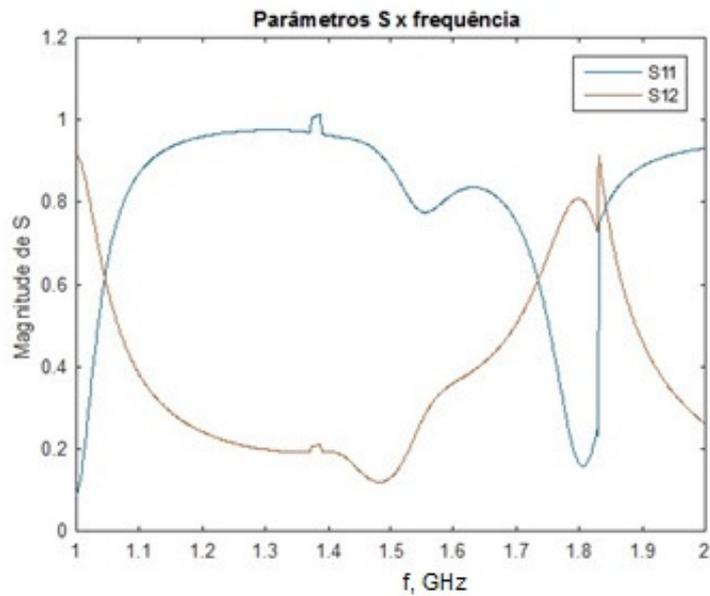


Figura 4.19 – Parâmetros S_{11} e S_{12} da célula projetada para 1,80 GHz.

Comparando os resultados obtidos neste trabalho com os resultados obtidos por Smith, Figura 4.16, verifica-se que existe uma proximidade entre eles. Na frequência de ressonância desejada, há a inversão dos valores de S_{11} e S_{12} , com o S_{11} atingindo um mínimo e o S_{12} atingindo um máximo conforme também verificado na Figura 4.16. Outro aspecto de grande relevância em se tratando de metamateriais é a obtenção dos valores de permissividade e permeabilidade da

célula projetada. Conforme as aproximações de Nicolson-Ross-Weir (NRW), tais parâmetros podem ser extraídos a partir dos valores dos parâmetros S_{11} e S_{21} (JOSHI et. al., 2011). Assim, os valores de ϵ_r e μ_r foram calculados neste trabalho conforme equações:

$$\mu_r = \frac{2}{jk_0d} \times \frac{1-V_2}{1+V_2}, \quad (4.2)$$

$$\epsilon_r = \frac{2}{jk_0d} \times \frac{1-V_1}{1+V_1}, \quad (4.3)$$

onde k_0 é o número de onda, d é a espessura do substrato e V_1 e V_2 são os termos compostos dos parâmetros S . Conforme indicado em (JOSHI et. al., 2011), para um metamaterial constituído de uma célula do tipo S-SRR, a parcela k_0d é igual a 0,266, enquanto V_1 e V_2 são dados pelas equações:

$$V_1 = S_{21} + S_{11}, \quad (4.4)$$

$$V_2 = S_{21} - S_{11}. \quad (4.5)$$

Empregando os valores de S_{11} e S_{21} em conjunto com as equações (4.2) a (4.5), foi elaborada uma rotina no *software* Matlab® para gerar os gráficos de ϵ_r e μ_r das células metamateriais projetadas, apresentados nas Figuras 4.20 a 4.23.

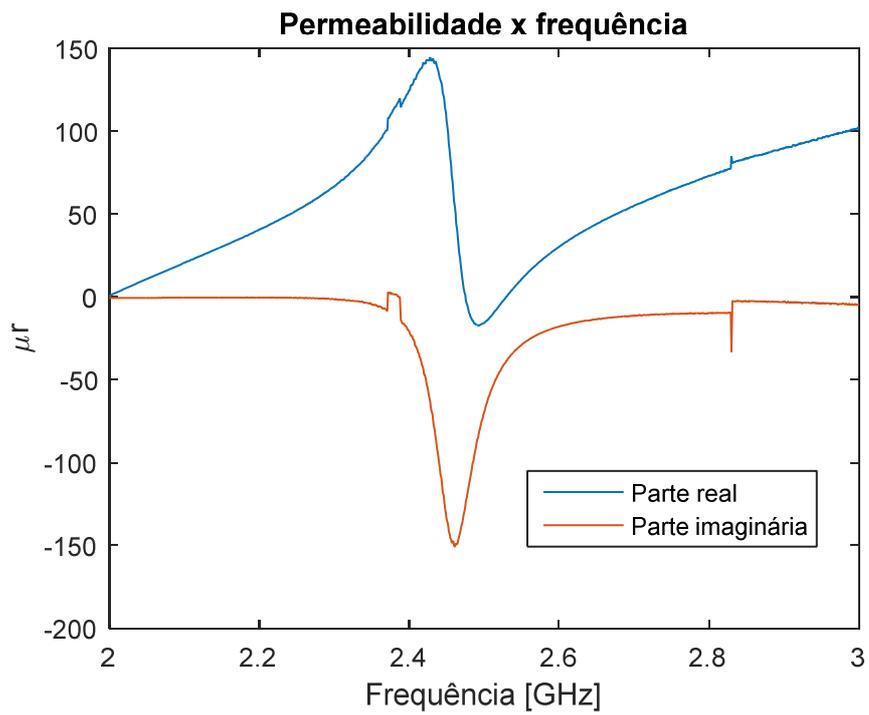


Figura 4.20 $-\mu_r \times f$ para célula projetada para operação em 2,45 GHz.

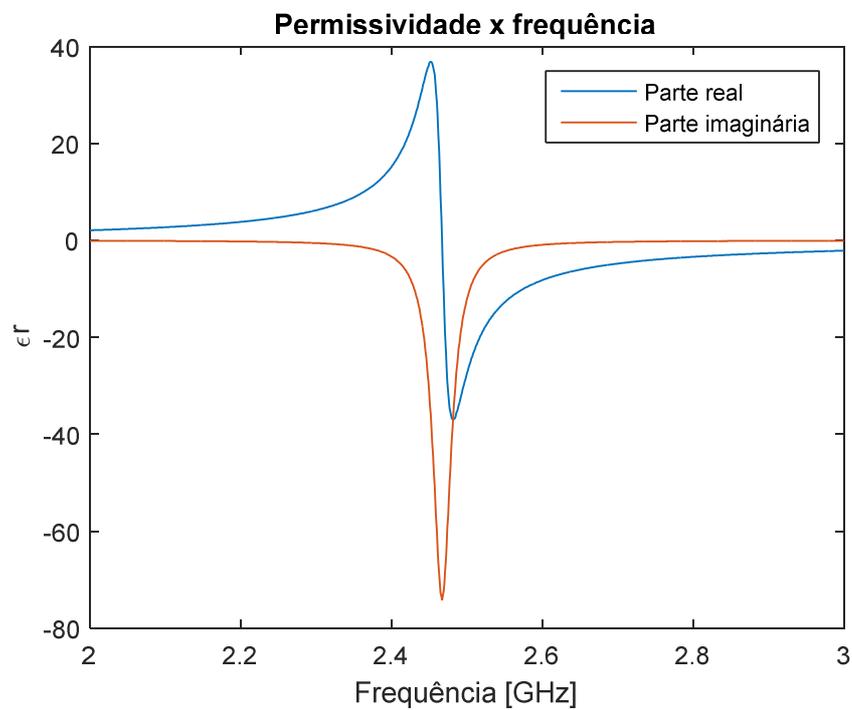


Figura 2.21 $-\epsilon_r \times f$ para célula projetada para operação em 2,45 GHz.

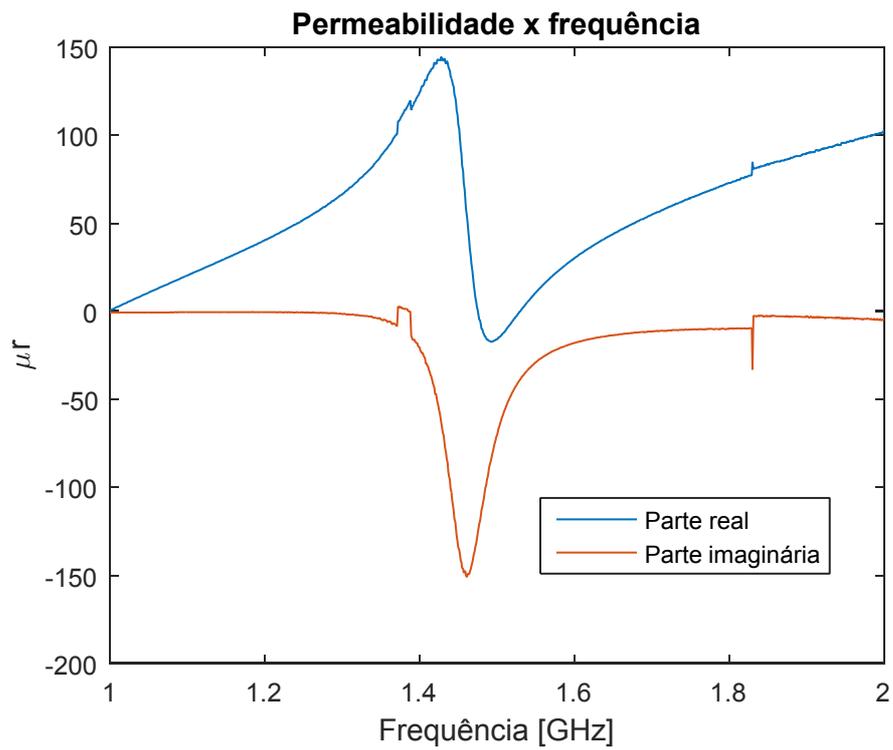


Figura 4.22 – μ_r x f para célula projetada para operação em 1,80 GHz.

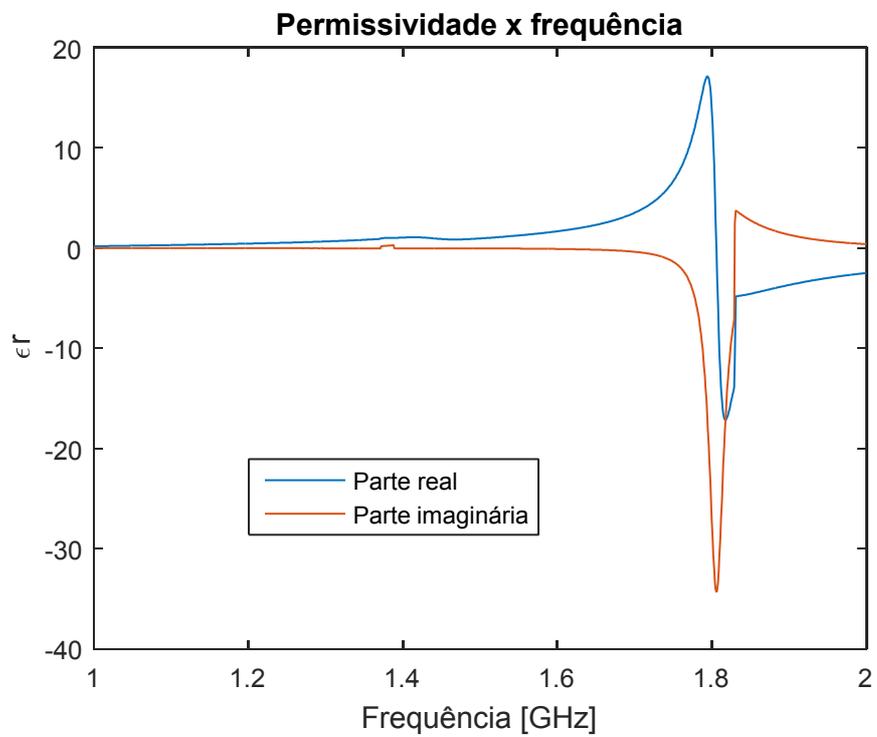


Figura 4.23 – ϵ_r x f para célula projetada para operação em 1,80 GHz.

Na Figura 4.20, entre as frequências de 2,45 e 2,50 GHz, verifica-se que a parte real da permeabilidade magnética do material torna-se negativa, enquanto a parte imaginária é negativa até 2.80 GHz. Na Figura 4.21, verifica-se também o comportamento negativo da permissividade nas proximidades da frequência de ressonância projetada, tanto para a parcela real, quanto para a parcela imaginária.

Na Figura 4.22, verifica-se que, embora o comportamento da permeabilidade em 1,80 GHz tenha se aproximado bastante da permeabilidade em 2,45 GHz, a frequência na qual a parcela real torna-se negativa está entre 1,45 e 1,55 GHz, valor diferente da frequência desejada. Tal resultado pode ser creditado devido a falhas do próprio método de cálculo numérico empregado, tal como citado em (CHEN et. al., 2004), onde é proposto um método mais robusto e confiável para extração dos parâmetros constitutivos do material a partir dos parâmetros S. Na Figura 4.23 verifica-se que o cálculo da permissividade obtida a partir do método empregado neste trabalho obteve resultado satisfatório. Nas proximidades da frequência de ressonância de projeto, 1,80 GHz, tanto a parte real, quanto a imaginária do material são negativas, indicando assim, o comportamento metamaterial do mesmo. Após resultados obtidos, as células metamateriais nas frequências de 1,80 e 2,45 GHz serão empregadas e testadas de forma a possibilitar a melhoria da coleta de energia RF das antenas construídas.

4.5. Projeto de Lentes Eletromagnéticas com Metamaterial

A partir das células metamateriais projetadas e otimizadas na Seção 4.4, uma lente eletromagnética com a impressão periódica destas células é proposta para assim, aumentar o nível de diretividade das antenas e possibilitar uma maior coleta da energia eletromagnética. Devido à impossibilidade da construção da antena com quatro ressonadores para a frequência de 1,80 GHz, foram manufaturadas lentes eletromagnéticas com as dimensões aproximadas das antenas 2x245F e 2x180F. Outro aspecto relevante é a distância entre os conjuntos de células que, conforme anteriormente citado, deve ser menor do que um quarto do comprimento de onda guiado no material. As lentes foram manufaturadas conforme Figuras 4.24 e 4.25, com as dimensões indicadas em milímetros. As distâncias indicadas foram determinadas a partir da geometria da antenas 2x245F e 2x180F de maneira a propiciar um bom alinhamento e também devido ao critério mínimo para a repetição

das células, $\lambda_g/4$. Em uma das faces dos substratos foram impressas as células S-SRR para obtenção da permeabilidade negativa, enquanto nas outras faces foram impressas linhas de microfita para obtenção da permissividade negativa.

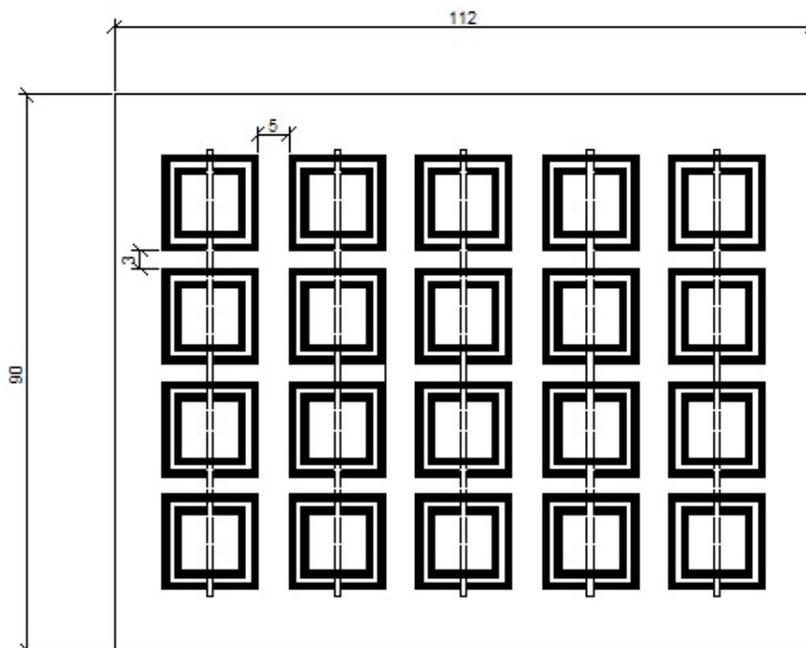


Figura 4.24 – Lente eletromagnética para operação em 2,45 GHz.

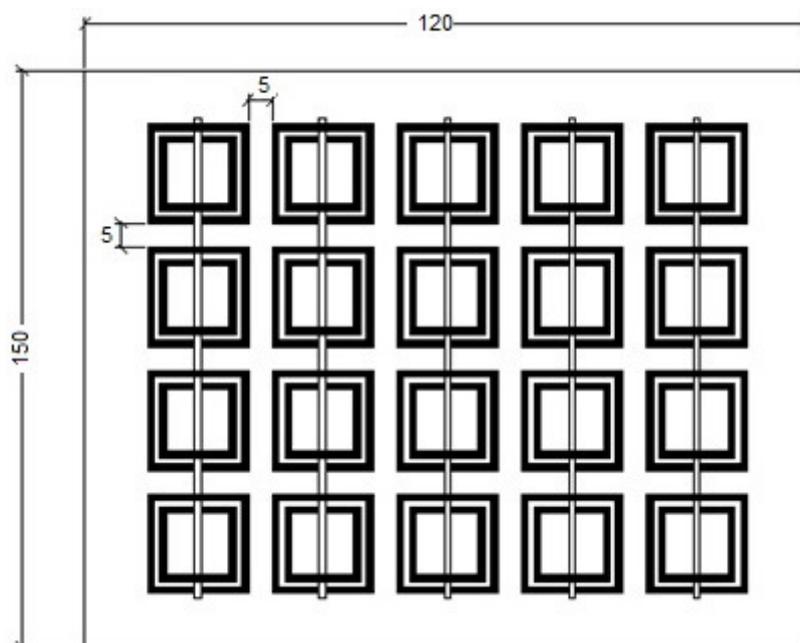


Figura 4.25 – Lente eletromagnética para operação em 1,80 GHz.

Após a confecção manual das lentes, elas foram posicionadas de maneira a garantir um alinhamento preciso com as respectivas antenas receptoras, para assim, verificar os níveis de potência recebidos em 10 e 60 centímetros, conforme realizado na Seção 4.2. A distância entre as lentes e as antenas foi estabelecida em 1 centímetro, pois através de vários testes para quantificar os níveis de potência recebidos, foi identificada esta como a melhor distância. A configuração de medição empregada neste teste está apresentada na Figura 4.26, enquanto os resultados estão resumidos na Tabela 4.3, incluindo também as potências anteriormente obtidas para facilitar a análise.

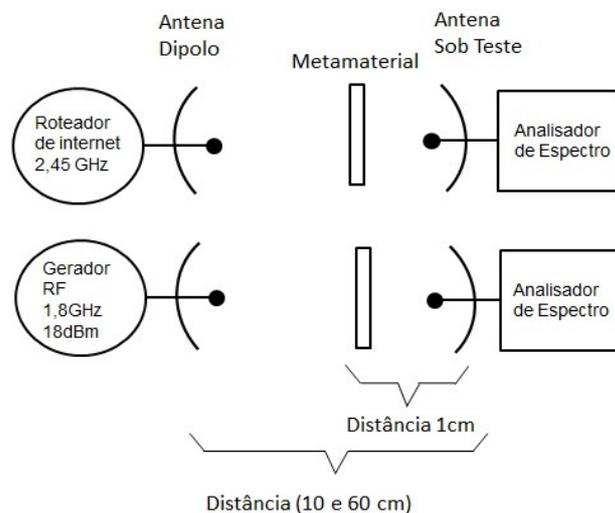


Figura 4.26 – Configuração de medição da potência de entrada das antenas mais lente eletromagnética.

Antena	Potência em 10cm [dbm]	Potência em 60 cm [dbm]	Potência em 10cm [dbm]	Potência em 60 cm [dbm]
	Sem metamaterial		Com metamaterial	
2x245F	0,6505	-14,87	2,46	-14,06
2x180F	-3,275	-10,73	-1,365	-10,18

Tabela 4.3 – Potências recebidas pelas antenas com e sem emprego de lente eletromagnética.

Pela análise da Tabela 4.3, verifica-se que as lentes eletromagnéticas empregadas neste trabalho atenderam às expectativas desejadas em relação ao nível de potência coletado pelas antenas receptoras. A antena 2x245F, coletou 51% mais potência elétrica em 10 centímetros apenas com o emprego da lente. Para 60

centímetros, embora o ganho tenha sido menor, ainda assim a antena foi capaz de coletar 20% a mais de energia eletromagnética. A antena 2x180F também coletou mais energia apenas com o posicionamento do metamaterial projetado para a frequência de 1,80 GHz, com um ganho de 55% para 10 centímetros de distância e 13% para 60 centímetros.

4.6. Considerações Finais

Neste capítulo, foram discutidos os elementos constituintes básicos do componente responsável pela coleta da energia eletromagnética: a antena. Foram investigadas algumas soluções de maneira a possibilitar o aumento da coleta de energia. Soluções tais como otimizar a diretividade da antena em conjunto com o casamento de impedâncias em 50Ω foram capazes de aumentar, mesmo que de maneira discreta, a coleta de energia das antenas quando comparadas com os resultados anteriores. Uma antena para operar em dupla frequência foi projetada para ser capaz de alimentar posteriormente, o retificador também operando em duas frequências.

Uma breve discussão teórica acerca dos metamateriais foi realizada e posteriormente, foram projetadas lentes eletromagnéticas conforme literatura disponível, de maneira a propiciar um aumento na energia total coletada para duas das antenas manufaturadas. Os resultados numéricos indicaram que tais materiais possuem características de permissividade elétrica e permeabilidade magnética negativas, apesar da divergência apresentada em 1,80 GHz para a permeabilidade. Os resultados de potência alcançados evidenciaram os benefícios de se empregar as lentes eletromagnéticas, com substanciais ganhos de energia coletada. Em todas as propostas para o aumento da coleta da energia, foi imprescindível a utilização da ferramenta de otimização do *software* CST®.

5. SISTEMA *RECTENNA* COMPLETO

Conforme apresentado na Figura 3.1, a *rectenna* é constituída pela antena, um bloco para casamento de impedâncias junto ao circuito retificador e a carga. Inicialmente, a carga foi modelada, buscando assim, verificar o seu comportamento elétrico sob as condições reais de operação. Em conjunto com a carga, foram estabelecidos os melhores tipos de circuitos retificadores para os objetivos deste trabalho, utilizando a topologia dobradora de tensão, com uso do diodo *Schottky* HSMS-2852 para alimentar uma bateria Li-Ion com corrente contínua. As antenas foram projetadas de maneira a se aproveitar a energia eletromagnética do ambiente, possibilitando assim, alimentação do circuito retificador e posteriormente, carregamento da bateria.

Neste capítulo, são avaliados experimentalmente em conjunto os retificadores manufaturados, o conversor *booster* BQ25504, as antenas manufaturadas e as lentes eletromagnéticas. Também são investigadas e testadas duas topologias para a conexão entre as *rectennas*: a ligação em série e a ligação em paralelo, além do uso de um filtro eletromagnético impresso.

A bateria Li-Ion é carregada pelas *rectennas* com o uso do roteador TL-WR841HP (TP-LINK, 2017), ajustado para operar em 2,45 GHz e do gerador de sinais N5181A, ajustado com mesmo nível de potência de saída do roteador, 18 dBm, e frequência de 1,80 GHz. Durante os testes, as antenas transmissora e receptora foram posicionadas de maneira a assegurar um bom alinhamento entre si nas seguintes distâncias de avaliação: 10 e 60 centímetros. As *rectennas* são identificadas com o mesmo nome utilizado para as antenas. Por exemplo, a *rectenna* 1x245F é a *rectenna* que utiliza a antena 1x245F em conjunto com o retificador R245. A *rectenna* 2x180F utiliza a antena 2x180F conectada ao retificador R180, enquanto a *rectenna* 1xDupla emprega a antena 1xDupla conectada ao retificador RDupla.

5.1. Testes de carregamento

Durante os ensaios de carregamento realizados, a bateria Li-Ion foi carregada a partir das *rectennas* durante um curto período de tempo em cada medição para verificação apenas dos níveis de corrente elétrica de carregamento. Os ensaios de

carregamento da bateria Li-Ion foram realizados conforme configuração apresentada na Figura 5.1. O arranjo foi posicionado em uma mesa de forma a garantir o alinhamento preciso entre a antena transmissora dipolo, e as antenas receptoras sob teste. Para o teste de carregamento da *rectenna* 1xDupla coletando a energia proveniente de duas antenas dipolo transmissoras, buscou-se um posicionamento de forma a não privilegiar nenhuma das duas antenas. Foram utilizados os retificadores otimizados e construídos para uma carga de 100 k Ω , R245, R180 e RDupla. O retificador RDupla foi conectado à antena de dupla frequência 1xDupla para então ser capaz de receber a energia RF simultaneamente de 2,45 e 1,80 GHz e entregá-la de forma retificada à bateria. A antena 2x180F foi testada somente recebendo a potência proveniente de 1,80 GHz, pois sua operação em dupla frequência apresentou resultado inferior à antena 1xDupla. Os resultados das medições são apresentados na Tabela 5.1.

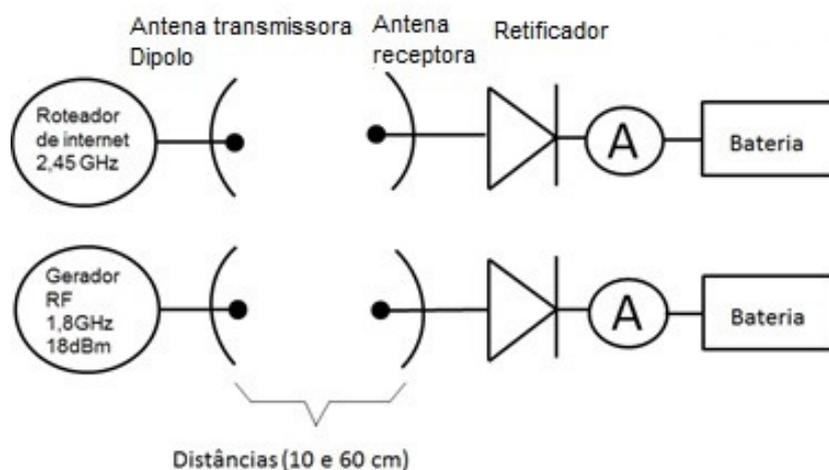


Figura 5.1 – Configuração para medição da corrente elétrica entre *rectenna* e bateria.

Antena	Retificador Utilizado	Corrente I_c em 10 cm [μA]	Corrente I_c em 60 cm [μA]
1x245F	R245	31,3	0,2
2X245F	R245	45,1	0,6
4X245F	R245	57,5	0,9
1X180F	R180	20,5	0,0
2X180F	R180	32,4	0,5
1xDupla	RDupla	36,0	0,6

Tabela 5.1 – Resultados medidos das *rectennas* sob teste.

Através dos resultados apresentados na Tabela 5.1, verifica-se que a *rectenna* 4x245F utilizando o retificador R245 foi capaz de entregar à bateria o maior nível de corrente elétrica, seguida pela *rectenna* 2x245F. Tais valores justificam-se pela maior quantidade de potência que as antenas 4x245F e 2x245F coletam quando comparadas, por exemplo, com a antena 1x245F. A antena 1x180F, durante os testes apresentados no Capítulo 4 foi a que coletou o menor nível de energia, fato corroborado pela menor corrente elétrica fornecida à bateria pela *rectenna* 1x180F. Outro fator que também contribuiu para a menor corrente entregue tanto pela *rectenna* 1x180F, quanto para a 2x180F é a utilização do retificador R180, que apresenta um nível de $S_{11} = -11,298$ dB, pior quando comparado ao retificador R245, com $S_{11} = -13,227$ dB.

Com o objetivo de sintetizar o texto, não são apresentados todos os resultados obtidos em laboratório. Assim, as *rectennas* com os melhores resultados para o carregamento da bateria, 2x245F e 4x245F, são então conectadas ao conversor *booster* para verificação do comportamento elétrico de carregamento. A configuração de medição empregada está apresentada na Figura 5.2, enquanto os resultados obtidos estão na Tabela 5.2.

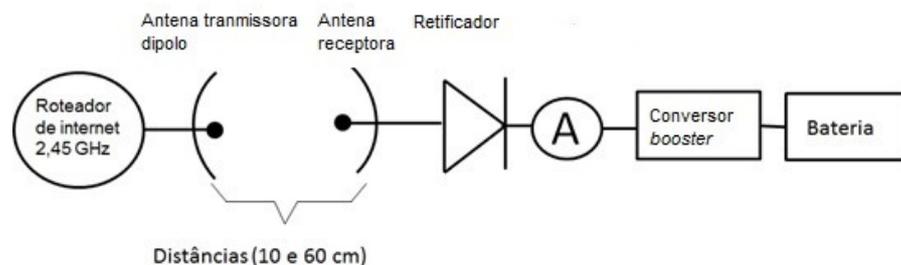


Figura 5.2 – Configuração para medição da corrente elétrica entregue pela *rectenna* ao *booster* e bateria.

Antena	Retificador Utilizado	Corrente I_c em 10 cm [μ A]	Corrente I_c em 60 cm [μ A]
2X245F	R245+booster	10,9	4,6
4X245F	R245+booster	22,0	7,1

Tabela 5.2– Resultados medidos das *rectennas* e *booster* sob teste.

Os resultados medidos e apresentados na Tabela 5.2 para as *rectennas* operando em conjunto com o *booster* validam o comportamento verificado no Capítulo 3. Para uma maior potência de entrada, em 10 centímetros, as correntes fornecidas para a bateria, em ambas *rectennas*, são menores quando o *booster* é utilizado em comparação com a não utilização do mesmo. Porém, para um menor nível de potência, em uma distância de 60 centímetros, as *rectennas* foram capazes de entregar mais corrente para a bateria nos dois casos testados.

Verificam-se também que os valores de corrente elétrica medidos estão condizentes com os valores esperados através da análise em conjunto das Tabelas 3.7 e 4.2. A antena 2x245F, coletou uma potência de 0,6505 dBm em 10 centímetros. Pela Tabela 3.7, para uma potência de entrada de 0 dBm, o conjunto retificador mais *booster*, fornece à bateria uma corrente de 12,3 μA . Verifica-se assim que o valor medido de 10,9 μA em 0,6505 dBm é inferior à corrente de 12,3 μA em 0 dBm. Tal discrepância está relacionada às diversas perdas por descasamento que ocorrem nas conexões entre antena, retificador, *booster* e bateria. O mesmo comportamento também é observado para a antena 4x245, pois quando conectada ao retificador e ao *booster*, carregou a bateria com 22 μA . Na distância de 10 centímetros, a antena 4x245F coletou uma potência de 2,16 dBm (Tabela 4.2). Para o conjunto retificador-booster, tal valor de potência de entrada, conforme Tabela 3.7, é capaz de carregar a bateria com uma corrente entre 12,3 e 45,8 μA , validando, portanto, a medida efetuada de 22,0 μA .

5.2. Propostas de Melhoria das Condições de Carregamento

Nesta Seção são descritas e investigadas três propostas para obtenção de um maior nível de corrente elétrica para o carregamento da bateria Li-Ion. Inicialmente, é apresentado um filtro de frequências que é aplicado na *rectenna* construída para operação em dupla frequência, RDupla. Posteriormente, as *rectennas* 2x245F e 2x180F são testadas com o emprego da lente eletromagnética cinvestigada no Capítulo 4 e, por fim, são analisadas as ligações série e paralelo para verificação da melhor topologia de conexão.

5.2.1. Filtro de frequências

As conexões realizadas em alta frequência estão sujeitas a superposição construtivas e destrutivas em diversos pontos das ondas eletromagnéticas incidentes, o que pode resultar em menores níveis de energia na saída. Assim, a *rectenna* 1xDupla, operando de forma a coletar a energia proveniente de duas diferentes frequências, pode ficar submetida a um funcionamento abaixo do esperado caso uma frequência contribua de forma negativa ao funcionamento da outra.

Nesta Seção é proposto um filtro passa baixa, projetado de forma a permitir somente o fluxo de energia proveniente da frequência de 1,80 GHz, bloqueando assim, a frequência de 2,45 GHz. Tal escolha foi devido ao menor nível de potência elétrica coletada em 2,45 GHz pela antena 1xDupla, conforme Tabela 4.2. O filtro proposto é construído a partir de uma Superfície Seletora de Frequências (SSF) construída a partir de uma linha impressa retangular modificada com uso de uma deformação circular (DA SILVA et. al.). O projeto do filtro foi realizado conforme dimensões indicadas no artigo de referência e então, a partir da otimização via técnica AG realizada pelo *software* CST®, novas dimensões foram fornecidas de modo a atender as funções objetivas escolhidas: S_{11} em 1,80 GHz abaixo de -10 dB e S_{12} em 2,45 GHz abaixo de -10 dB. O filtro foi manufaturado utilizando o mesmo substrato FR4 empregado em todas as construções deste trabalho, e sua geometria é apresentada na Figura 5.3. O filtro foi estampado somente em um dos lados, com o outro lado do substrato não sofrendo nenhum tipo de corrosão ou desgaste, possuindo a função de operar como um plano de referência de terra. Os resultados simulados estão apresentados na Figura 5.4, enquanto os medidos são apresentados na Figura 5.5. A fotografia do filtro manufaturado encontra-se na Figura C.1.

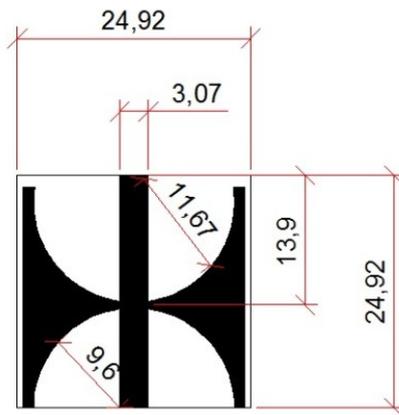


Figura 5.3– Filtro impresso após otimização no CST® - dimensões em milímetros.

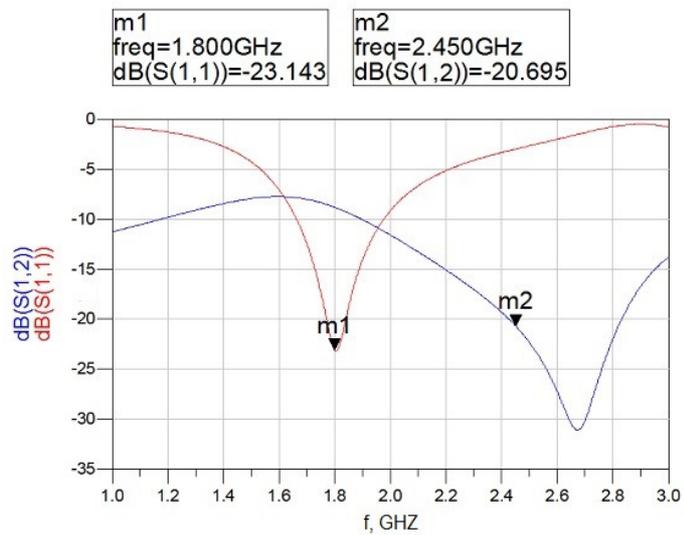


Figura 5.4– Filtro de microfita manufacturado: resultado simulado.

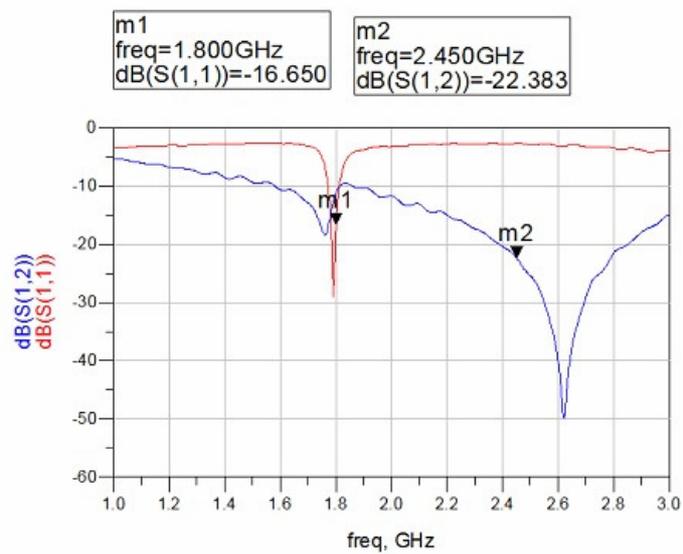


Figura 5.5– Filtro de microfita manufacturado: resultado medido.

Verifica-se na Figura 5.5 que os resultados de $S_{11} = -16,65$ em 1,80 GHz e $S_{12} = -22,383$ em 2,45 GHz tornam o filtro operacional dentro dos requisitos estabelecidos. Tais valores aproximaram-se de maneira considerável dos valores simulados para o filtro, apresentados na Figura 5.4. Após a manufatura, o filtro foi testado em conjunto com a *rectenna* 1xDupla, utilizando a configuração ilustrada na Figura 5.6. Os resultados, antes e depois do emprego dos filtros são apresentados na Tabela 5.3.

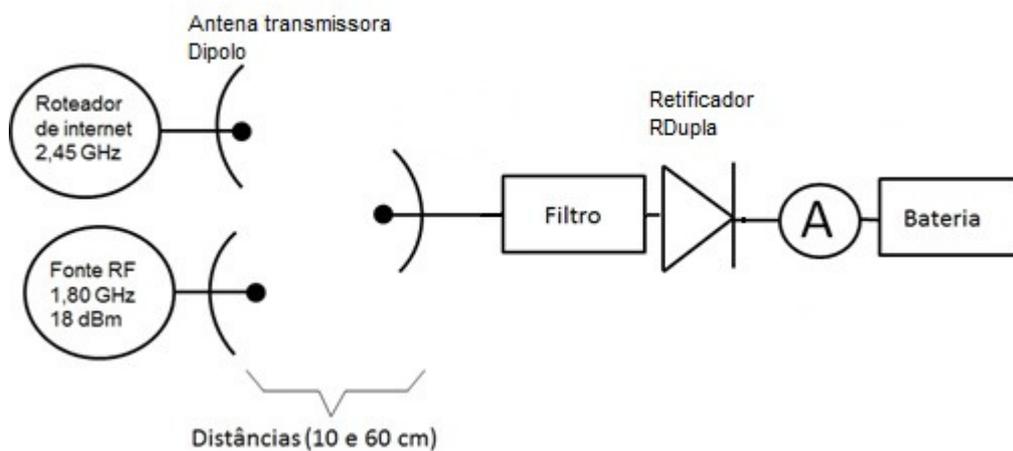


Figura 5.6– Configuração de medição da *rectenna* 1xDupla associada a um filtro seletor de frequências.

Rectenna 1xDupla	Corrente I_c em 10 cm [μA]	Corrente I_c em 60 cm [μA]
Sem Filtro	36,0	0,6
Com Filtro	30,0	2,5

Tabela 5.3 – Resultados medidos da *rectenna* 1xDupla sem e com o emprego do filtro de microfitas.

A partir dos resultados obtidos na Tabela 5.3, verifica-se que na região onde o nível de potência coletado pela antena são maiores, 10 centímetros, o emprego do filtro na realidade reduziu a quantidade de corrente elétrica fornecida à bateria. Isso pode ser creditado às perdas adicionais devido à inserção de mais um componente no circuito. Em 60 centímetros, verifica-se que a corrente elétrica medida sem a utilização do filtro, foi menor em comparação ao teste com o emprego do filtro. Nesta distância, a potência elétrica coletada na frequência de 1,80 GHz é de -15,94 dBm, valor consideravelmente superior à potência elétrica coletada em 2,45 GHz, -20,65

dBm. Verifica-se assim que o FSS foi capaz de elevar o nível de corrente total através do bloqueio da potência incidente de uma das frequências receptoras. Tal comportamento pode ser benéfico em ambientes que possuam várias frequências diferentes incidentes em uma *rectenna* e algumas destas frequências interajam de forma negativa no resultado final do sistema. Assim, um filtro de frequências pode ser capaz de melhorar a operação do sistema dependendo das condições operativas de todo o conjunto.

5.2.2. *Rectenna* com uso de lente eletromagnética

Após os projetos e as otimizações efetuados para as lentes eletromagnéticas propostas no Capítulo 4, nesta seção são realizados os testes operacionais das lentes junto às *rectennas* 2x245F e 2x180F. As configurações de medição estão ilustradas na Figura 5.7, enquanto os resultados das medições efetuadas são apresentados na Tabela 5.4. Assim como realizado no Capítulo 4 durante os testes de recebimento de potência pelas antenas com uso da lente eletromagnética, para a medida de carregamento da bateria Li-Ion, a distância entre as antenas receptoras e a lente foi de 1 centímetro.

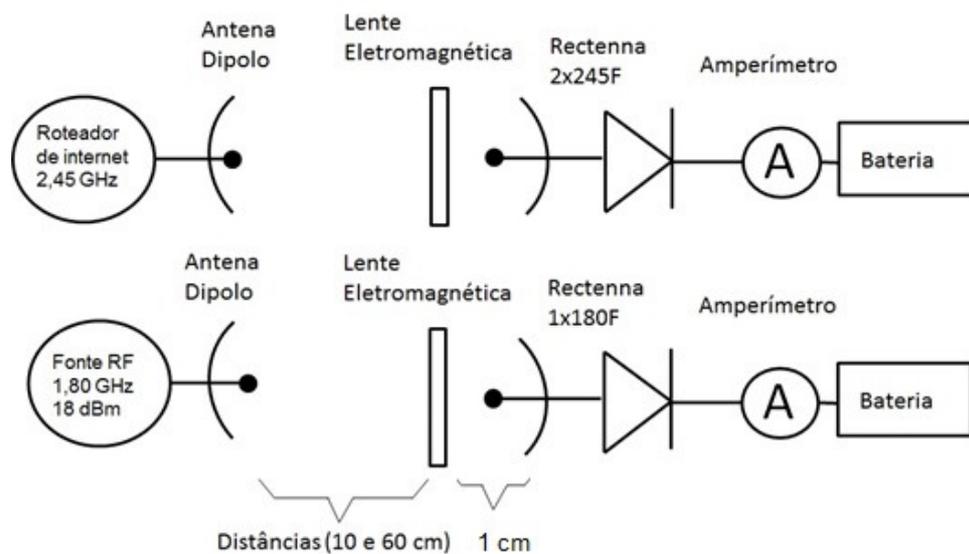


Figura 5.7 – Configuração de medição das *rectennas* 2x245F e 2x180F em associação com lente eletromagnética.

<i>Rectenna</i>	Corrente I_c em	Corrente I_c em	Corrente I_c em	Corrente I_c em
	10cm [μ A]	60 cm [μ A]	10cm [μ A]	60 cm [μ A]
	Sem lente eletromagnética		Com lente eletromagnética	
2x245F	45,1	0,6	65,1	0,8
2x180F	32,4	0,5	45,5	0,7

Tabela 5.4– Correntes fornecidas pelas *rectennas* com e sem o emprego de lente eletromagnética.

Os resultados obtidos na Tabela 5.4 demonstram um aumento significativo da corrente de carregamento da bateria após o emprego da lente eletromagnética. Para a *rectenna* 2x245F, o ganho foi de 44,3% em 10 centímetros e 33,3% em 60 centímetros. Para a *rectenna* 2x180F, na distância de 10 centímetros o ganho verificado foi de 40,4%, enquanto para 60 centímetros foi de 40%.

5.2.3. Conexões Série e Paralelo

As conexões entre diferentes *rectennas* podem ser efetuadas segundo duas filosofias básicas: conexão no bloco RF e conexão no bloco CC. Conforme apresentado na Seção 5.2.1, a conexão em RF pode provocar em interferências destrutivas, resultando assim em maiores perdas totais. Dessa forma, a ligação CC é a maneira mais confiável para a conexão de várias *rectennas* com o objetivo final de aumentar a corrente de carregamento da bateria. As *rectennas* podem ser conectadas em CC segundo duas topologias básicas: ligação em série ou ligação em paralelo. Em (MIURA; SHINOHARA; MATSUMOTO, 2001) e (BRANDÃO, 2017) foi demonstrado que a conexão em paralelo das *rectennas* é mais vantajosa, ocasionando menores perdas. Tal comportamento também foi verificado em (DEGRENNE et.al., 2012), onde foi verificado que a ligação série entre *rectennas* pode conduzir a um sistema operando de maneira desbalanceada, com a presença de *rectennas* operando como cargas e não como fontes de energia.

Neste trabalho, de forma a melhor analisar as duas topologias, inicialmente ambas são simuladas no *software* ADS® para verificação dos níveis de S_{11} e corrente elétrica entregue à carga de $R_1 = 100 \text{ k}\Omega$. Os diagramas esquemáticos dos circuitos simulados estão apresentados na Figura 5.8. Neste diagrama, os circuitos retificadores foram agrupados em blocos de maneira a facilitar a visualização das conexões. A frequência dos geradores representativos das antenas foi ajustada para

2,45 GHz, e em uma potência de saída de -10 dBm. Os resultados obtidos são apresentados nas Figuras 5.9 e 5.10.

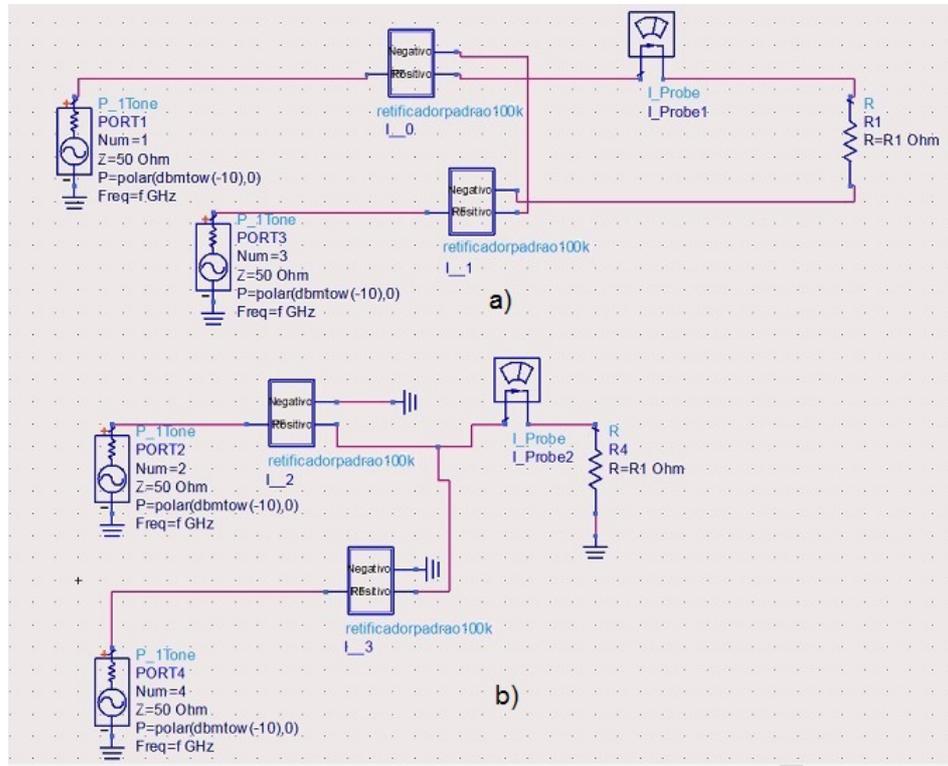


Figura 5.8 – Diagrama esquemático para medição de S_{11} e corrente elétrica fornecida à carga nas ligações a) série, b) paralelo.

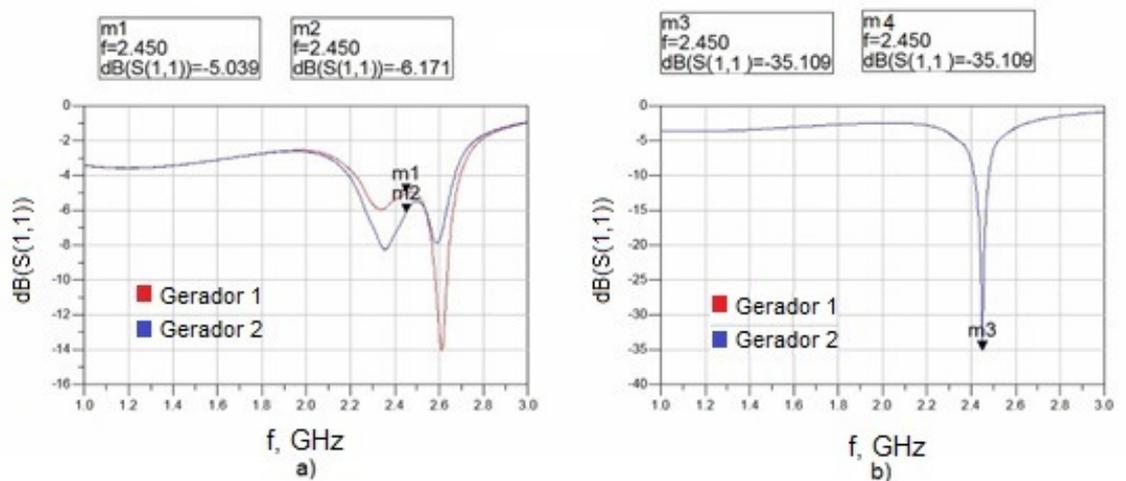


Figura 5.9 – Parâmetros S_{11} para a ligação a) série e b) paralelo.

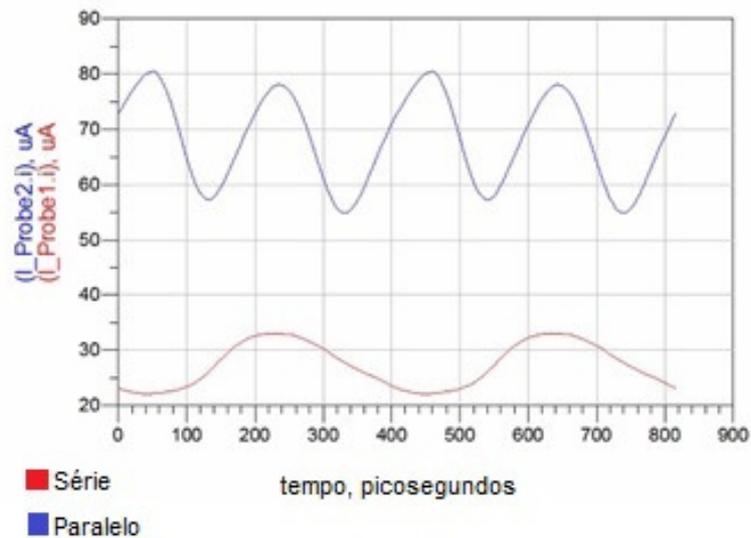


Figura 5.10 – Correntes elétricas medidas no *software* ADS: ligação série (I_Probe1.i) e ligação paralela (I_Probe2.i).

Na Figura 5.9, a), as medições na frequência de 2,45 GHz, m1 e m2, referentes ao parâmetro S_{11} dos retificadores, indicam que ocorre uma grande reflexão de energia nesta frequência devido ao descasamento de impedância ocasionado pela conexão série. Os valores simulados de S_{11} , -5,039 dB e -6,171 dB demonstram o elevado nível de ondas estacionárias entre as fontes. Verifica-se também que houve um deslocamento do ponto ótimo de operação para a frequência de 2,6 GHz. Na Figura 5.9, b), verifica-se que o S_{11} dos retificadores convergiu exatamente para o mesmo ponto na frequência de ressonância desejada, -35,109 dB. Tal valor está bem abaixo do S_{11} mínimo operacional de -10 dB e bastante abaixo dos valores encontrados para a ligação série. Conforme esperado, esse comportamento também pôde ser verificado nas medidas de corrente elétrica efetuadas, apresentadas na Figura 5.10. O amperímetro I_Probe1 foi conectado após a ligação série das *rectennas*, enquanto o amperímetro I_Probe2 foi conectado após a conexão paralela. Na Figura 5.10, verifica-se que a corrente I_Probe2 é bem superior à corrente I_Probe1, confirmando assim, um melhor comportamento da ligação paralela entre as *rectennas* frente à conexão série.

Diante do exposto, foram testadas todas as *rectennas* para verificação do comportamento durante o carregamento da bateria Li-Ion nas configurações isolada e paralelo. Entretanto, de forma a sintetizar o texto, são apresentados os melhores resultados obtidos, com o emprego de duas *rectennas* 4x245F conectadas em

paralelo na parte CC e simetricamente posicionadas em relação ao roteador de internet para verificação dos níveis de corrente entregues à bateria Li-Ion. A Figura 5.11 ilustra a configuração de medição empregada, enquanto na Tabela 5.5 são apresentados os resultados obtidos.

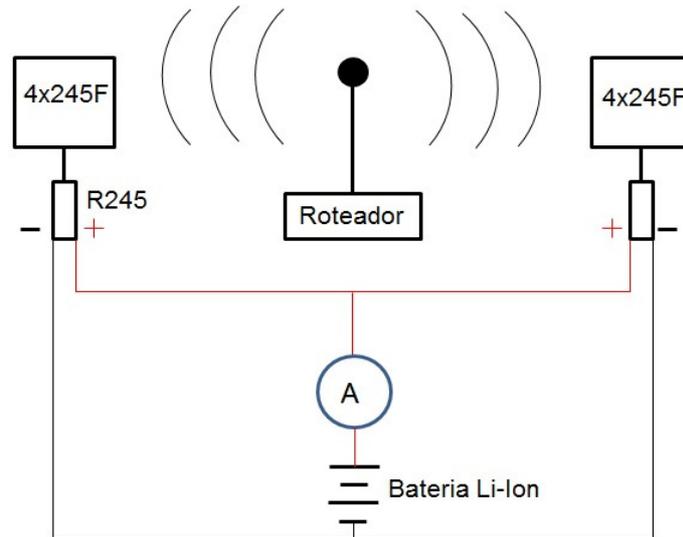


Figura 5.11 – configuração de teste para conexão paralelo das *rectennas* 4x245F.

<i>Rectenna</i>	Corrente I_c em 10cm [μ A]	Corrente I_c em 60 cm [μ A]	Corrente I_c em 10cm [μ A]	Corrente I_c em 60 cm [μ A]
	Operação isolada		Duas <i>rectennas</i> em paralelo	
4x245F	57,5	0,9	79,8	1,2

Tabela 5.5 – Resultados de carregamento a partir da *rectenna* 4x245F: sem e com ligação em paralelo

Verifica-se que a ligação em paralelo das *rectennas* 4x245F foi capaz de entregar um valor maior de corrente para a bateria nas duas distâncias medidas. Na distância de 10 centímetros, o incremento medido na corrente foi de 39%, enquanto na distância de 60 centímetros, o acréscimo de corrente foi próximo, 33% a mais de corrente.

Para confirmar computacionalmente esse comportamento de aproximadamente 40% a mais de corrente em uma ligação em paralelo, é realizada uma nova simulação no *software* ADS®. A potência de saída do gerador RF alimentando somente um retificador foi ajustada de maneira a se obter uma leitura

aproximada de corrente de $57,5 \mu\text{A}$, a corrente da operação isolada em 10 centímetros. A partir desse ponto, é possível verificar se a ligação em paralelo entre duas *rectennas* resultará em um valor de corrente próximo ao medido para uma mesma potência de saída dos geradores. O diagrama esquemático da simulação é apresentado na Figura 5.12, enquanto os resultados são apresentados na Figura 5.13.

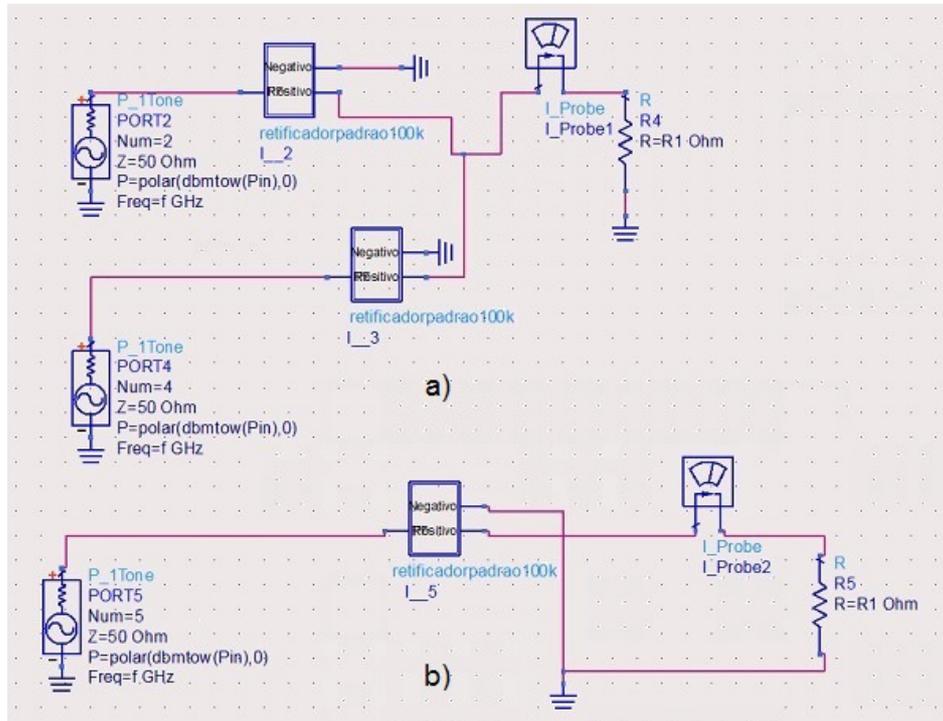


Figura 5.12 – Diagrama esquemático para medição da corrente elétrica fornecida à carga nas ligações a) paralelo, b) ligação simples.

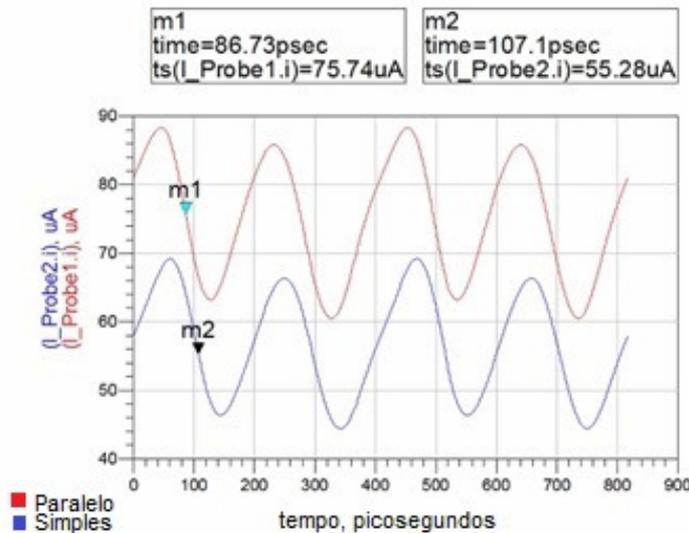


Figura 5.13 – Correntes elétricas medidas no *software* ADS: ligação em paralelo (I_Probe1.i) e *rectenna* simples (I_Probe2.i).

Na Figura 5.13 é possível constatar de maneira aproximada, que a conexão em paralelo entre *rectennas* elevou o nível de corrente elétrica fornecida à carga em torno de 40%. O medidor de corrente da conexão em paralelo, I_Probe1.i, mostrou um valor médio de corrente de 75,74 μA , ou seja, 37% a mais que a corrente no medidor I_Probe2.i da *rectenna* operando isoladamente, 55,28 μA , validando, portanto, as medições realizadas.

5.3. Operação Otimizada de um Sistema *Rectenna*

Durante todo este trabalho o objetivo principal foi a investigação das condições operativas mais eficientes para o uso da tecnologia *rectenna* em uma aplicação prática: o carregamento elétrico de uma bateria Li-Ion. Após todas as investigações realizadas, pode-se verificar que do ponto de vista técnico, a melhor condição é a operação em paralelo de várias *rectennas*, utilizando antenas com quatro elementos ressonadores, uso de lentes eletromagnéticas e emprego de retificador em uma única frequência. Todavia, dada a indisponibilidade de uma placa de FR4 que pudesse ser utilizada para a construção da antena de quatro elementos radiadores para a frequência de 1,80 GHz, nesta Seção é testada a condição de operação de um sistema *rectenna* empregando as antenas com dois elementos radiadores, lentes eletromagnéticas e conexão em paralelo. A utilização de antenas com quatro radiadores levaria a uma condição ainda melhor para o carregamento da bateria. A configuração de medição empregada é apresentada na Figura 5.14, enquanto na Tabela 5.6 são apresentados os resultados obtidos para o carregamento da bateria. As distâncias medidas, 10 e 60 centímetros são as distâncias entre as antenas transmissoras e as receptoras. As antenas transmissoras foram posicionadas com um espaçamento de 10 centímetros entre si. Nesse teste, os circuitos são testados sem o uso do conversor *booster* devido à indisponibilidade de quatro unidades no laboratório para realização da medição.

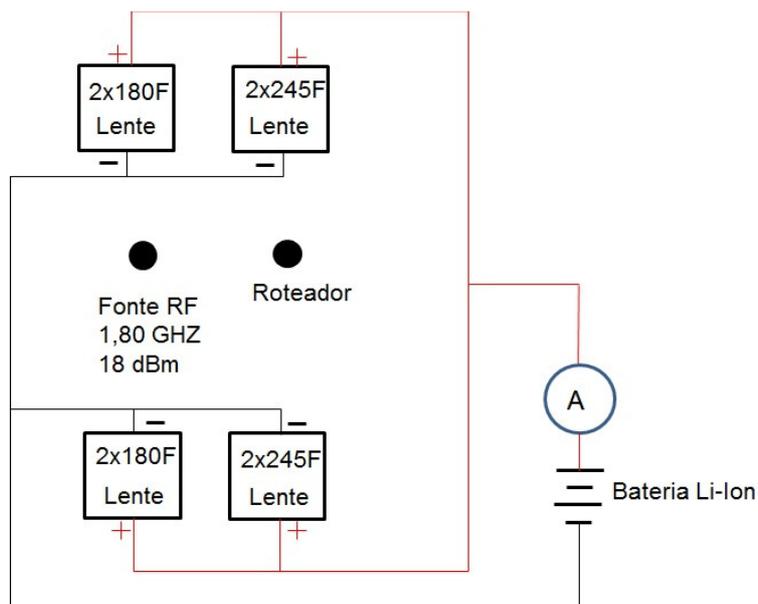


Figura 5.14 – Configuração do teste final do sistema *rectenna*: antenas 2x245F, 2x180F, retificadores R245 e R180, lentes eletromagnéticas e conexão em paralelo.

Sistema	Corrente no circuito [μA]	Tempo estimado para carregamento
Sistema <i>rectenna</i> com distâncias de 10 cm.	125,0	7200 horas
Sistema <i>rectenna</i> com distâncias de 60 cm.	22,0	40909 horas
<i>Rectenna</i> 1x245F com distância de 10 cm	31,3	28754 horas
<i>Rectenna</i> 1x245F com distância de 60 cm	0,2	4500000 horas

Tabela 5.6 – Resultados comparativos para o carregamento da bateria Li-Ion.

Na Tabela 5.6 são apresentadas as correntes elétricas medidas segundo a topologia da Figura 5.15 e as correntes elétricas obtidas utilizando a *rectenna* mais simples, 1x245F, apresentada aqui para facilitar a comparação entre o sistema *rectenna* mais simples ao mais complexo. O sistema utilizando as antenas com dois radiadores, emprego de lente eletromagnética e conexão em paralelo, foi capaz de elevar a corrente de 31,3 μA até 125,0 μA , um incremento de 400% para a distância de 10 centímetros. Para 60 centímetros o ganho foi ainda maior, partindo de um valor quase nulo, 0,2 μA para 22,00 μA , ou seja, um ganho expressivo de 10900%.

O tempo gasto para o carregamento completo da bateria Li-Ion, sendo inversamente proporcional ao aumento da corrente elétrica, também sofreu considerável redução a partir do emprego das soluções de melhoria para o sistema *rectenna*. Conclui-se assim, que as soluções de otimização dos vários blocos constituintes da *rectenna* atingiram os objetivos esperados, com incremento da corrente elétrica fornecida para a bateria Li-Ion a partir de, apenas, fontes de RF.

5.4. Considerações Finais

Após a modelagem da carga e do circuito retificador, realizada no Capítulo 3, e das antenas no Capítulo 4, neste capítulo o sistema *rectenna* completo foi submetido a melhorias adicionais para o carregamento da bateria e por fim, aos testes operacionais.

A *rectenna* operando nas duas frequências de projeto foi testada com uso do retificador 1xDupla, coletando simultaneamente a energia de 2,45 e 1,80 GHz a partir da antena 1xDupla para alimentar a bateria. Entretanto, verificou-se que, quando a potência de entrada em uma das frequências é reduzida, o sistema pode operar de maneira ineficiente, com redução da corrente entregue à carga. Tal comportamento pôde ser mitigado com a utilização de um filtro seletor de frequências em microfita, responsável por filtrar a frequência com menor nível de energia durante a operação. A utilização da *rectenna* de dupla frequência possui como grandes benefícios, a compactação do sistema e a redução de custo em comparação à utilização de uma *rectenna* específica para cada frequência.

Entretanto, foi na configuração apresentada na Figura 5.14, utilizando cada *rectenna* operando em uma única frequência específica com utilização da lente eletromagnética e conexão paralela entre tais *rectennas*, que se obteve o maior fluxo de corrente em direção à bateria. Conforme esperado devido às investigações realizadas no Capítulo 4, as lentes eletromagnéticas foram capazes de elevar a potência coletada pelas antenas, fato que foi evidenciado pela maior corrente medida com a utilização destas lentes. A investigação a respeito das conexões série ou paralelo mais uma vez confirmou os resultados verificados na literatura, com grande vantagem para a conexão paralela entre as *rectennas* frente à conexão série. A conexão paralela é capaz de elevar a corrente total em aproximadamente

40%, um valor substancialmente elevado, dada as dificuldades técnicas para o aproveitamento da energia RF presente no ambiente.

6. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi investigada a tecnologia da antena retificadora, ou *rectenna*, conforme estabelecida por Brown na década de 1960. Embora a tecnologia não seja nova, as aplicações práticas com a *rectenna* sempre foram bastante limitadas devido às dificuldades de obtenção de diodos com bom comportamento para altas frequências e da indisponibilidade de cargas de baixíssimo consumo energético. Todavia, conforme apresentado no Capítulo 2, a partir dos anos 2000, diversos trabalhos foram publicados abordando a *rectenna* e suas possíveis aplicações. Um novo ramo de aplicações de engenharia, a IoT, foi criado, utilizando sensores e cargas de baixo consumo, ideais para serem alimentadas por *rectennas*. Tais dispositivos podem ser diretamente alimentados pelas *rectennas*, ou conforme apresentado neste trabalho, alimentados por uma bateria carregada via *rectennas*. Outros pontos benéficos para o aumento do emprego da tecnologia são a maior disponibilidade de energia RF no ambiente, principalmente provenientes dos roteadores de internet, e a maior disponibilidade de aquisição dos diodos para altas frequências, *Schottky*.

A partir dos trabalhos citados no Capítulo 2, no Capítulo 3 foi possível investigar soluções técnicas que possibilitassem a melhoria da tecnologia *rectenna* pela modelagem da carga e do circuito retificador. A carga estabelecida, uma bateria Li-Ion, mostrou-se adequada para ser alimentada por uma *rectenna*, visto que foi possível verificar, por meio do amperímetro, a circulação de corrente elétrica de carregamento. No *software* ADS®, o circuito retificador foi projetado e otimizado para uma carga de 100 k Ω , valor que possibilitou o melhor carregamento da bateria nos ensaios práticos. Foram construídos retificadores impressos sobre substrato em fibra de vidro para as frequências de 2,45 e 1,80 GHz isoladamente e também um modelo para operação em dupla frequência. Por fim, um conversor *booster* CC-CC foi testado em conjunto com os retificadores e pôde ser verificado que sua utilização foi capaz de reduzir o nível mínimo de operação da *rectenna* para -25 dBm, face aos -20 dBm medidos sem o seu uso.

No Capítulo 4 foi realizada uma investigação acerca das antenas impressas do tipo retangular, um modelo que se adequa bastante para aplicação em *rectennas* dado a sua elevada diretividade e baixo custo de confecção. A partir dos modelos

investigados no trabalho (BRANDÃO, 2017), foram otimizadas novas antenas de maneira a se aumentar ainda mais a diretividade e de forma a não gerar um descasamento da impedância de entrada em 50Ω . Os resultados obtidos indicaram que as antenas projetadas neste trabalho coletaram um pouco mais de energia RF, mesmo possuindo valores de S_{11} piores em comparação às antenas de referência, evidenciando a importância do parâmetro diretividade em uma antena. Uma antena apresentando ressonância em duas frequências foi projetada, otimizada e manufaturada com sucesso de forma a se aproveitar a energia de outras fontes simultaneamente. Também foi realizada uma investigação acerca de metamateriais, materiais que não existem na natureza e possuem características de permissividade e permeabilidade negativas. Conforme verificado na literatura, tais materiais podem ser utilizados em diversas aplicações de engenharia e dentre elas, possuem a função de lentes ópticas, capazes de concentrar um feixe de ondas eletromagnéticas em um ponto. Os resultados de recepção de potência elétrica nas antenas indicaram que as lentes eletromagnéticas, quando corretamente posicionadas, foram capazes de elevar a potência total captada pelas antenas.

No Capítulo 5 foram realizados os testes práticos das *rectennas* completas alimentando a bateria de Li-Ion. Verificou-se também o emprego de uma superfície seletora de frequências com função de melhorar a operação do sistema utilizando a energia de duas frequências simultaneamente. As topologias série e paralela para a conexão entre *rectennas* foram discutidas e comparadas, com larga vantagem para a conexão em paralelo de *rectennas*. Verificou-se um significativo incremento de corrente elétrica fornecida para a bateria com a utilização de todas as melhorias propostas neste trabalho: uma antena com múltiplos elementos radiadores, com emprego de uma lente eletromagnética adequadamente posicionada, conectada a um retificador otimizado para uma carga de $100 \text{ k}\Omega$ com menores níveis possíveis de S_{11} na frequência de ressonância, formando assim, uma *rectenna* otimizada. A conexão em paralelo das *rectennas* otimizadas para as frequências de 1,80 e 2,45 GHz mostrou-se a forma mais eficiente para obtenção dos resultados pretendidos neste trabalho.

Apesar dos resultados positivos obtidos, verifica-se que a tecnologia da *rectenna* ainda possui um caminho desafiador a ser percorrido. A dificuldade de obtenção de circuitos manufaturados com o mesmo comportamento dos circuitos

simulados ainda é considerável, face ao método manual de construção e qualidade comercial do substrato. A priori, os níveis de energia RF presentes no ambiente são sempre muito baixos devido às normas de segurança que estabelecem os níveis máximo toleráveis das radiações não-ionizantes e ionizantes. Assim, além de todo o processo de otimização empregado neste trabalho, devem ser desenvolvidos e utilizados novos modelos de diodos com níveis de barreira de potencial ainda menores, de forma a reduzir as perdas ao mínimo possível.

6.1.Trabalhos Futuros

Recomenda-se para os próximos trabalhos, a pesquisa e utilização de novos modelos de diodos que possam ter valores de tensão de barreira ainda menores do que os diodos utilizados neste trabalho, no intuito de reduzir as perdas elétricas. Sugerem-se como possíveis cargas os sensores de baixíssimo consumo com a tecnologia *Bluetooth* de comunicação. Tais sensores comunicam-se sem fio com as centrais de comando e, atualmente, possuem os menores valores de consumo energético do mercado.

Neste trabalho, utilizou-se um conversor *booster* previamente fabricado. Recomenda-se projetar um circuito *booster* operando em um sistema *rectenna* que utilize os recursos de busca do máximo ponto de eficiência de todo o conjunto retificador e carga. Com o objetivo de se aumentar a disponibilidade de energia RF no ambiente, podem ser instalados amplificadores de sinal, tais como os amplificadores para sinal de telefonia celular. Além de possibilitarem um melhor sinal para os aparelhos celulares, possibilitarão também um aumento da potência disponível para as *rectennas*.

Recomenda-se também a investigação acerca de novas topologias de conexão entre a antena e o retificador. Uma *rectenna* construída totalmente sobre um mesmo substrato apresenta algumas vantagens interessantes. Com a dispensa do uso de conectores, pode-se projetar uma antena que tenha uma impedância de entrada com valor complexo conjugado da impedância do conjunto retificador mais carga. Com isso, retira-se a obrigatoriedade de uma impedância de entrada em 50Ω para os blocos constituintes da *rectenna*. Conforme apresentado no Capítulo 3, o circuito retificador possui comportamento não linear, sendo influenciado por diversos parâmetros e dificilmente apresenta um valor de Z_{in} exatamente igual a 50Ω .

Circuitos eletrônicos para monitoramento das potências RF coletadas pelas *rectennas* podem ser uma alternativa viável nos casos onde se deseja controlar dinamicamente as variáveis do circuito, tais como parâmetro S_{11} , corrente e tensão na carga. Assim, um circuito que opere constantemente dentro do máximo ponto de potência entregue à carga é uma alternativa promissora para a elevação da eficiência de todo o sistema.

Por fim, recomenda-se a investigação do uso de novas frequências além das frequências utilizadas neste texto. Podem ser utilizadas a frequência UHF de televisão digital, 470-806 MHz, a frequência de 5,80 GHz dos novos roteadores *Wi-Fi*, além das frequências mais elevadas do sistema 5G que ainda estão em discussão na data de elaboração deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- AGILENT TECHNOLOGIES. **Harmonic Balance Simulation**, 2006. Disponível em: <<http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/ads2006/pdf/cktsimhb.pdf>>. Acesso em 23/03/201.
- ALI, E. et al. Design and development of harvester rectenna at GSM band for battery charging applications. **Journal of Engineering and Applied Sciences**, Vol. 10, n. 1, p. 10206 - 10212, Nov., 2015. Disponível em: <http://www.arpnjournals.org/jeas/research_papers/rp_2015/jeas_1115_3050.pdf>. Acesso em 15/12/2017.
- APLICADA STA (2017). **STA - Sistemas e Tecnologia Aplicada**. Disponível em: <www.sta-eletronica.com.br>. Acesso em 23/03/201.
- AQUINO, M. **Antenas De Microfita Com Substrato Metamaterial**. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Computação da UFRN, Natal, 2008. Disponível em: <<ftp://ftp.ufrn.br/pub/biblioteca/ext/bdtd/ManoelBLA.pdf>>. Acesso em 01/10/2017.
- AVAGO TECHNOLOGIES. **Product Schottky Diodes**. Avago Technologies, 2017. Disponível em: <<https://www.broadcom.com/products/wireless/diodes/schottky/>>. Acesso em 04/10/2017.
- BALANIS, C. **Teoria de Antenas**. Rio de Janeiro: LTC, 2009.
- BICALHO, F., RESENDE, U., CORREA, D. (2017). Otimização e Investigação Comportamental de Antenas Dipolo Operando em um Sistema Rectenna. **XXXVIII Ibero-Latin American Congress on Computational Methods in Engineering**. Florianópolis, 2017. Doi:10.20906/CPS/CILAMCE2017-1163. Acesso em 12/12/2017.
- BITO, J.; et al. A Novel Solar and Electromagnetic Energy Harvesting System With a 3-D Printed Package for Energy Efficient Internet-of-Things Wireless Sensors. **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**, v. 65, n. 5, p. 1831-1842, 2017. DOI: 10.1109/TMTT.2017.2660487. Acesso em 20/03/2017.
- BRAGA, N. **Instituto Newton Braga**, 2017. Disponível em: <www.newtonbraga.com.br>. Acesso em 12/12/2017.
- BRANDÃO G. **Sistema para reaproveitamento de energia eletromagnética utilizando rectennas**. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG, Belo Horizonte, 2017. Disponível em: <<https://www.ufsj.edu.br/portal2-repositorio/File/ppgel/124-2017-06-06-DissertacaoGuilhermeBrandao.pdf>>. Acesso em 20/01/2018.

BRANDÃO, G.; RESENDE, U.; GONÇALVES, S., SATHLER, H. In: **10th International Symposium on ELECTRIC AND MAGNETIC FIELDS (EMF2016)**, 2016, Lyon. Anais do EMF 2016, 2016.

BRANDÃO, G.; ZANON, F.; RESENDE, U. Sistema de Reaproveitamento de Energia Utilizando Conjunto de Antenas Microstrip. **Revista Interdisciplinar de Pesquisa em Engenharia - RIPE**. V. 2, n. 9, p. 98-109, 2016. Disponível em: <<http://periodicos.unb.br/index.php/ripe/article/view/23683/17007>>. Acesso em 02/02/2018.

BRANDÃO, G.; RESENDE, U.; BICALHO, F.; AFONSO, M. (2017). Parallel association of rectennas for electromagnetic energy harvesting. **18th International Symposium on Electromagnetic Fields in Mechatronics, Electrical and Electronic Engineering (ISEF) Anais**, 2017. DOI: 10.1109/ISEF.2017.8090729. Acesso em 20/11/2017.

BRASIL. **Resolução nº303, de 2 de julho de 2002**. Regulamento Sobre Limitação da Exposição a Campos Elétricos, Magnéticos e Eletromagnéticos na Faixa de Radiofrequências entre 9 kHz e 300 GHz, 2002.

BROWN, C. The history of power transmission by radio waves. **IEEE Trans. Microwave Theory Tech**, v. 32, n. 9, p. 1230-1242, 1984. DOI: 10.1109/TMTT.1984.1132833. Acesso em 23/04/2017.

CALOZ, C.; ITOH, T. **Electromagnetic Materials: Transmission Line Theory and Microwave Applications**. The Engineering Approach. Nova Jersey, EUA: John Wiley and Sons, 2000.

CALOZ, C., ITOH, T. **Electromagnetic Metamaterials: Transmission Line Theory and Microwave Application**. Nova Jersey, EUA: John Wiley and Sons, 2006.

CAMPOS, S. **Estudo teórico e experimental de um sistema de conversão e transmissão de energia usando rectennas**. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG, Belo Horizonte, 2014.

AHN, C. Development of RF Energy Harvesting and Charging Circuits for Low Power Mobile Devices. **Recent Researches in Circuits, Systems, Control and Signals**. Chiba, Japão, p. 131-134, 2011.

CHEN, X., GRZEGORCZYK, T., WU, B., PACHECO, J., KONG, J. Robust method to retrieve the constitutive effective parameters of metamaterials. **Physical Review**, v. 70, p.71-76, 2004. DOI: 10.1103/PhysRevE.70.016608. Acesso em 03/08/2017.

DA SILVA, R., DE ASSIS, P., DE OLIVEIRA, R., DE BARROS, T. Projeto de um filtro de microfita com deformação circular. **Revista Científica Semana Acadêmica**. Fortaleza, ano MMXVI, Nº. 000092, 2016.

DEGRENNÉ, N., MARIAN, V., VOLLAIRE, C., BURET, F., VERDIER, J., ALLARD, B. Voltage Reversal in Unbalanced Rectenna Association. **IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters**, vol.11, p. 941-944, 2012.

ENERGÉTICA (2017). **Empresa de Pesquisa Energética**. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br>>. Acesso em 03/08/2017.

ENGHETA, N.; ZIOLKOWSKI, R. **Metamaterials** - Physics an Engineering Explorations. Nova Jersey, EUA: John Wiley and Sons, 2006.

FEZAI, F., MENUDIÉRE, C., THEVENOT, M., VOLLAIRE, C., CHEVALIER, N., MONÉDIÉRE, T. Reducing Electronic Device Standby Power Using a Remote Wake-Up System. **IEEE Antennas & Propagation Magazine**, vol. 58, n. 5, p. 66-73, 2016.

GONÇALVES, B. **Circuitos de Retificação para Sistemas de Recuperação de Energia Eletromagnética**. Campina Grande, Paraíba, 2016.

GONÇALVES, S., THOMAZ, L., RESENDE, U., AFONSO, M., COPPOLI, E., VOLLAIRE, C. Improvements on Excitation of Microstrip Antennas Using FDTD-CPML Method. **16th International Symposium on Electromagnetic Fields in Mechatronics, Electrical and Electronic Engineering (ISEF) Anais**, 2015.

GONÇALVES, S.; TOMAZ, L.; RESENDE, U.; AFONSO, M., COPPOLI, E., VOLLAIRE, C. FDTD-CPML method applied to analysis of a novel UWB microstrip antenna. **International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics**, vol. 51, n. 1, p. S75-S80, 2016.

GUDAN, K., CHEMISHKIAN, S., HULL, J., THOMAS, S., ENSWORTH, J., REYNOLDS, M. A 2.4 GHz Ambient RF Energy Harvesting System with -20 dBm Minimum Input Power and NiMH Battery Storage. **IEEE Int. Conf. on RFID-Technologies and Applicatitons**, p. 7-12, 2014.

HABIB, M., RAFIQU, I., ABDULLAH, K., JAKPAR, M. **U-Slot Rectangular Patch Antenna for Dual Band Application**, v. 315, p.111-120, 2015.

JEREMIAH, C. Wireless Power Transmission: As an Emerging Technology. **International Conference on Communication, Control, Computing and Electronic Engineering (ICCCCEE)**. Khartoum, Sudan, 2017.

JOSE, N., JOHN, N., RAJA, P., PRABHAKAR, T.. RF Powered Integrated System for IoT Applications. **New Circuits and Systems Conference**, p. 1-4, 2015.

JOSHI, J., PATNAIK, S., DEVI, S., LOHOKARE, M. Bandwidth Enhancement and Size Reduction of Microstrip Path Antenna. **Wireless Engineering and Technology**, v. 2, n. 1, p. 37-44, 2011.

KANG, Z., LIN, X., TANG, C., LIU, W., FAN, Y. 2.45-GHz Wideband Harmonic Rejection Rectenna for Wireless Power Transfer. **International Journal of Microwave and Wireless Technologies**, p. 977-983, 2016.

KARTHAUS, U., FISCHER, M. Fully Integrated Passive UHF RFID Transponder IC With 16.7 μ W Minimum RF Input Power. **IEEE Journal of Solid-state Circuits**, v. 38, n. 10, p. 1602-1608, 2003.

KEYROUZ, S. **Practical rectennas**: far-field RF power harvesting and. Eindhoven, Holanda, 2014.

KEYSIGHT TECHNOLOGIES. **Products**: Agilent Technologies, 2016. Disponível em: <<http://www.home.agilent.com/agilent/home.jsp?lc=por&cc=BR#products>>. Acesso em 13/04/2017.

KLC CONECTORES. **Conector SMA fêmea reto PCI distância centro pino 5,08 mm**, 2011. Disponível em: <http://www.klc.ind.br/2013/busca_resultado.php>. Acesso em 13/04/2017.

LABCENTER.V **Proteus Design Suite**, 2018. Disponível em: <<https://www.labcenter.com/>>. Acesso em 13/02/2018.

MALVINO, B. **Eletrônica** - vol.1. Porto Alegre: AMGH, 2011.

MARIAN, V., ALLARD, B., VOLLAIRE, C., VERDIER, J. Strategy for Microwave Energy Harvesting From Ambient Field or a Feeding Source. **IEEE Transaction on Power Electronics**, v. 27, n. 11, p. 1481-1491, 2012.

MARIAN, V., VOLLAIRE, C., VERDIER, J., ALLARD, B. Low Power Rectenna Systems for Wireless Energy Transfer. **Wireless Power Transfer**, p. 65-106, 2012

MARTINI, E., MACI, S. Metasurfaces designed by coordinate transformations. **International Symposium on Electromagnetic Theory**, p. 888-889, 2013.

MCSPADDEN, J., FAN, L., CHANG, K. Designs and Experiments of a High-Conversion-Efficiency 5.8-GHz Rectenna. **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**, v. 46, n. 12, p. 2053-2060, 1998.

MILAGRE, L., GONÇALVES, S., THOMAZ, L., RESENDE, U., AFONSO, M. Numerical Simulation using FDTD Method to Estimate Return Loss for Ultra-Wideband Antennas Built with High Loss FR-4. **COMPUMAG**, 2015.

MILAGRE, L., GONÇALVES, S., RESENDE, U. Optimization of Resonance Frequency Band of Microstrip Antennas with Differential Evolution algorithm and the FDTD Method. **Anais EMF**, 2016.

MIURA, T., SHINOHARA, N., MATSUMOTO, H. Experimental Study of Rectenna Connection for Microwave Power Transmission. **Electronics and communications in Japan**, v. 34, n. 2, p. 27-36, 2011.

MOON, T., CHO, C., LEE, J., KIM, J. **A Novel Millimeter Wave Super Lens Using Split-Ring Resonator**, p.1-2, 2009.

MURATA. **General Purpose Monolithic Ceramic Capacitors GRM Series**, 2017. Disponível em: <<http://psearch.en.murata.com/capacitor/lineup/grm/#a02>>. Acesso em 13/04/2017.

PENDRY, J. Negative Refraction Makes a Perfect Lens. **Physical Review Letters**, v.85, n. 18, p. 3966-3969, 2000.

PENDRY, J., HOLDEN, A., ROBBINS, D., STEWART, W. Magnetism from Conductors and Enhanced Nonlinear Phenomena. **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**, v.47, n.11, p. 2075-2084, 1999.

PEREIRA, P. **Estudo Teórico e Experimental de um Sistema para Transmissão de Energia sem Fio Utilizando Rectenna**. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG, Belo Horizonte, 2014. Disponível em: <<https://drive.google.com/file/d/0B33h6pvlVtVsQTFZBMWxvRm1OcWM/view>>. Acesso em 20/01/2018.

PEREIRA, P., PONTES, S., RESENDE, U., GONÇALVES, S. **Wireless Power Transmission Using a Rectenna**. CILAMCE, 2013.

PIÑUELA, M., MITCHESON, P., LUCYSZYN, S. Ambient RF Energy Harvesting in Urban and Semi-Urban Environments. **IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques**, v. 61, n. 7, p. 2715-2726, 2013. DOI: 10.1109/TMTT.2013.2262687. Acesso em: 14/03/2017.

RAMO, S., WHINNERY, J., VAN DUZER, T. **Fields and waves in communication electronics**. Nova Iorque: John Wiley, 1994.

ROTMAN, W. Plasma Simulation by Artificial Dielectrics and Parallel-Plate Media. **IRE Transactions on Antennas and Propagation**, v.10, n.1, p. 82-95, 1962.

SADIKU, M. **Elementos de Eletromagnetismo**. Porto Alegre: Bookman, 2012.

SEMICONDUCTOR, F. **On Semiconductor**. Energy Efficient Innovations, 2017. Disponível em: <www.fairchildsemi.com>. Acesso em: 14/03/2017.

SHARMA, H., WADKAR, S. Comparative Study of Rectangular, Circular, and Corner Truncated Patch at 2.4 GHz. **International Journal of Engineering Research and Technology**, v.4, n. 3, p. 944-947, 2015.

SHRESTHA, NOH S., CHOI D. Comparative Study of Antennas Designs for RF Energy Harvesting. **International Journal of Antenas and Propagation**, v. 2013, pp. 1-10, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1155/2013/385260>>. Acesso em 18/05/2017.

SILVA, J. (2015). **Estudo do comportamento de antena de microfita com substrato metamaterial**. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Comunicação e Automação da UFRN. Mossoró, 2015.

SMITH, D., VIER, D., KOSCHNY, TH., SOUKOLIS, C. Electromagnetic parameter retrieval from inhomogeneous metamaterials. **Physical Review Letters**, v. 71, n. 3, p. 1-11, 2005.

SOARES, I. Mutual Coupling Analysis in Fractal Microstrip Antenna Arrays. **MOMAG**, 2016.

SOARES, I., RESENDE, U., GONÇALVES, S. Sierpinski carpet fractal microstrip arrays for energy harvesting applications. **Anais CEFC**, 2016.

SOARES, I., ZANON, F., RESENDE, U., GONÇALVES, S. A Novel Circular Fractal Microstrip Antenna Array for Energy Harvesting. **Anais EMF**, 2016.

SOARES, I., GONÇALVES, S., RESENDE, U., AFONSO, M., VOLLAIRE, C. Improvements on Electric Field Excitation for FDTD-UPML Applied on a Novel High-Resonant Antenna Geometry built in FR-4 Substrate. **Anais EMF**, 2016.

SONG, C., HUANG, Y., ZHOU, J., CARTER, P., YUAN, S. Matching Network Elimination in Broadband Rectennas for High-Efficiency Wireless Power Transfer and Energy Harvesting. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 64, n. 5, p. 3950-3961, 2017.

SONG, C., HUANG, Y., ZHOU, J., CARTER, P. Recent Advances in Broadband Rectennas for Wireless Power Transfer and Ambient RF Energy Harvesting. **11th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP)**, p. 341-345, 2017. DOI: 10.23919/EuCAP.2017.7928536. Acesso em 21/05/2017.

SUN, H., GUO, Y., HE, M., ZHONG, Z. A Dual-Band Rectenna Using Broadband Yagi Antenna Array for Ambient RF Power Harvesting. **IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters**, v.12, p. 918-921, 2013.

SUN, H., GUO, YONG-XIN, H., MIAO, Z., ZHENG. Design of a High-Efficiency 2.45-GHz Rectenna for Low-Input-Power Energy Harvesting. **IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters**, v.11, p. 929-932, 2012.

TAN, F., LIU, C. Theoretical and Experimental Development of a High-Conversion-Efficiency rectifier at X-Band. **International Journal of Microwave and Wireless Technologies**, v. 9, n. 5, p. 985-995, 2016.

TDK CORPORATION. **TDK Product Center**, 2017. Disponível em: <<https://product.tdk.com/info/en/products/capacitor/index.html>>. Acesso em: 19/07/2017.

TECHNOLOGY, C. S. **Product**: CST Studio Suit, 2018. Disponível em: <<https://www.cst.com/>>. Acesso em: 31/01/2018.

TESLA, N. **Patente 685,953**. Estados Unidos da América, 1901.

TESLA, N. **Patente 1,119,732**. Estados Unidos da América, 1902.

TEXAS, INSTRUMENTS. **Texas Instruments**, 2017. Disponível em: <www.ti.com/>. Acesso em: 19/07/2017.

TP-LINK. **Roteador Wireless N 300Mbps High Power TL-WR841HP (V2)**, 2018. Disponível em: <<http://loja.tp-link.com.br/roteador-wireless-n-300mbps-high-power-tl-wr841hp-v2-44/>>. Acesso em: 31/01/2018.

VERNEY, E., SAUVIAC, B., SIMOVSKI, C. Isotropic metamaterial electromagnetic lens. **Physics Letters**, v. 331, n. 3-4, p.244-247, 2004. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.physleta.2004.07.032>>. Acesso em 30/06/2017.

VESELAGO, V. The Electrodynamics of Substances with Simultaneously Negative Values of epsilon and mu. **Soviet Physics Uspekhi**, v. 10, n. 4, p. 509-514, 1968.

VIGNATI, S. **Solutions for Indoor Light Energy Harvesting**, 2012. Disponível em: <<http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:578896/FULLTEXT01.pdf>>. Acesso em: 31/01/2018.

VINARY, B., SURE, P., DESHPANDE, R. Design of Rectenna for Energy Harvesting From Ambient GSM and WLAN Frequency Bands. **RUAS-SASTech Journal**, v. 15, n. 2, p. 17-20, 2006.

VISSER, H., POP, V., VULLERS, R. Wirelessly Read-Out Temperature Sensor Remotely Powered By A Gsm Phone. **Proceedings of the PowerMEM**, p. 306-309, 2011.

VISSER, H., POP, V., VELD, B., VULLERS, R. Remote RF Battery Charging. PowerMEMS 2010. **10th International Workshop Micro & Nanotechnology for Power Generation and Energy Conversion Applications**, pp. 37-40, 2010.

ZANON, F. **Sistema Para Reaproveitamento da Energia Eletromagnética Utilizando Rectenna Aplicado ao Monitoramento de Temperatura**. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET/MG, Belo Horizonte, 2017.

ZHANG, F., MENG, F.-Y., LEE, J.-C., & WU, Q. Study of a Novel Compact Rectenna for Wireless Energy Harvesting. **IEEE International Wireless Symposium (IWS)**, p.1-4, 2013. DOI: 10.1109/IEEE-IWS.2013.6616837. Acesso em 23/10/2017.

ZHANG, J. **Rectennas for RF Wireless Energy Harvesting**. Liverpool, Inglaterra, 2013.

ZHANG, J, HUANG, Y., CAO, P. An Investigation of Wideband Rectennas for Wireless Energy Harvesting. **Wireless Engineering and Technology**, v. 5, p. 107-116, 2014.

ZHOU, Y., FROPPIER, B., RAZBAN, T. Study of a Matching Circuit Effect on a Microwave. **Mediterranean Microwave Symposium**, v. 37, n. 10, p. 1020-1026, 2001.

APÊNDICE A

CIRCUITO PARA CARREGAMENTO DE BATERIAS LI-ION

Um circuito para carregamento de baterias Li-Ion deve ser capaz de fornecer de maneira permanente, tensão e corrente possuindo níveis adequados e estáveis, de forma a não causar sobrecarga ou aquecimento excessivo na bateria sob carga. Um dispositivo eletrônico bastante empregado nesta tarefa é o regulador de tensão LM7805 do fabricante *Fairchild Semiconductor*. Entre suas principais características estão a capacidade de prover proteção térmica na saída e proteção contra curto-circuito.

O regulador LM7805 é fabricado em um encapsulamento tipo TO-220 com três terminais, conforme Figura A.1. Para um tensão de entrada entre 7 até 35 V, o regulador é capaz de entregar, com segurança, em sua saída uma tensão estabilizada de 5 V, com variação entre 4,8 e 5,2 V e um máximo de corrente de 1 A.

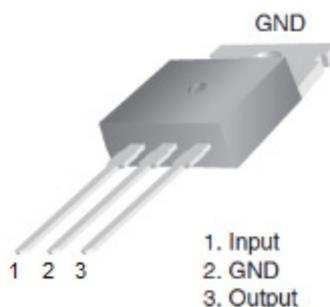


Figura A.1 – Regulador LM7805 – *Fairchild Semiconductor* (SEMICONDUCTOR, 2017).

Inicialmente, o circuito para carregamento da bateria Li-Ion, utilizando o LM7805, foi simulado no *software* Proteus® (LABCENTER, 2018) para verificação se os níveis de tensão e corrente simulados estariam conforme os valores obtidos por meio de medição em laboratório. O circuito base utiliza a configuração retificadora de onda completa em ponte mais capacitor na saída conectado a uma carga, conforme Figura A.2.

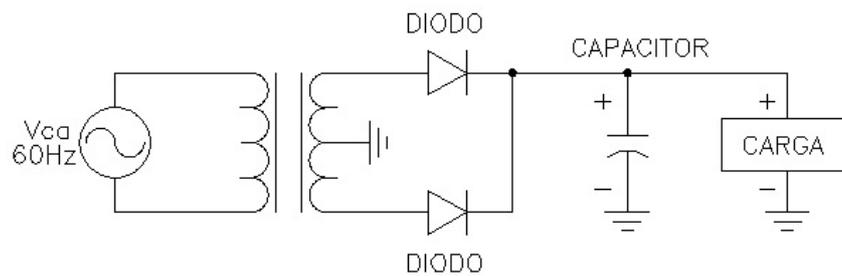


Figura A.2 –Retificador de Onda Completa em Ponte.

Utilizando um transformador, o sinal alternado com frequência nominal de 60 Hz na entrada, normalmente com tensão igual a 127/220 V, é reduzido para um nível adequado aos circuitos eletrônicos. Por meio da polarização dos diodos, ora no semiciclo positivo, ora no semiciclo negativo, o sinal é retificado na carga e possui flutuação (*ripple*) frequência de 120 Hz. Entretanto, para alimentação de cargas em corrente contínua, ainda é necessário utilizar um capacitor entre o retificador e carga de maneira a reduzir ou eliminar essa flutuação da tensão.

Neste trabalho, a carga em questão, na Figura A.2, é o conjunto LM7805 mais a bateria Li-Ion. Conforme informação do *datasheet* e apresentado na Figura A.3, capacitores na entrada e na saída do LM7805 devem ser utilizados, possuindo valores mínimos de 0,33 μF e 0,1 μF , respectivamente. Entretanto, dado que na entrada do LM7805 encontra-se a saída do retificador, optou-se por utilizar um capacitor eletrolítico com a maior capacitância disponível no laboratório de EA, 430 μF , para então, entregar uma tensão mais contínua e com menor flutuação possível à carga. Na Figura A.4 é apresentado o circuito simulado no *software* Proteus®. Para uma melhor visualização dos resultados, a Figura A4 é dividida em dois blocos, a) e b), apresentados nas Figuras A.5 e A.6.

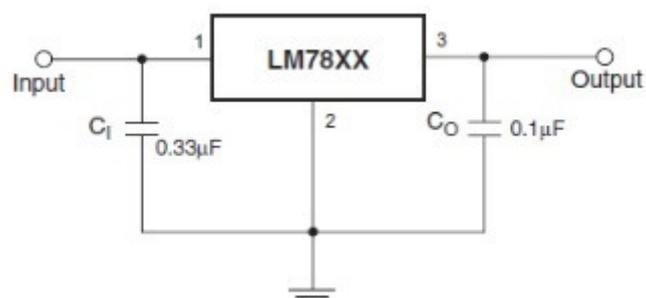


Figura A.3 –Capacitores recomendados pelo *datasheet* (SEMICONDUCTOR, 2017).

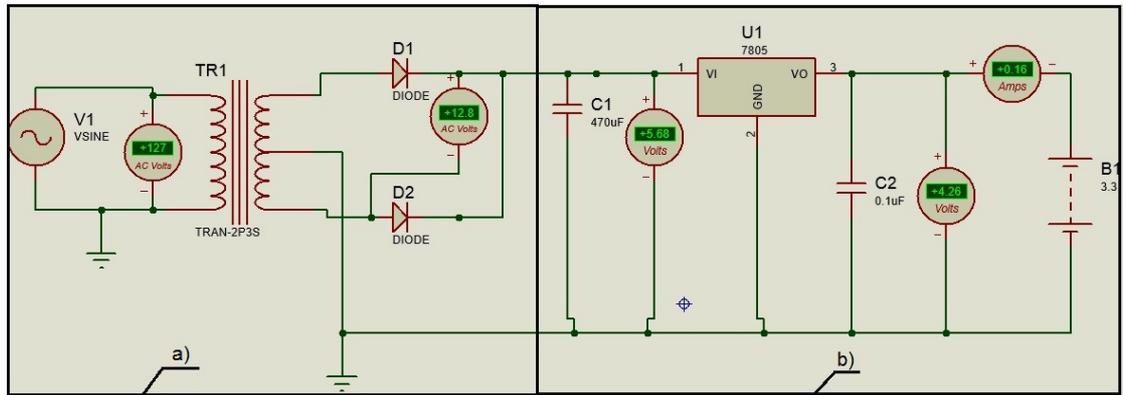


Figura A.4 – Simulação do carregador de baterias no *software* Proteus®.

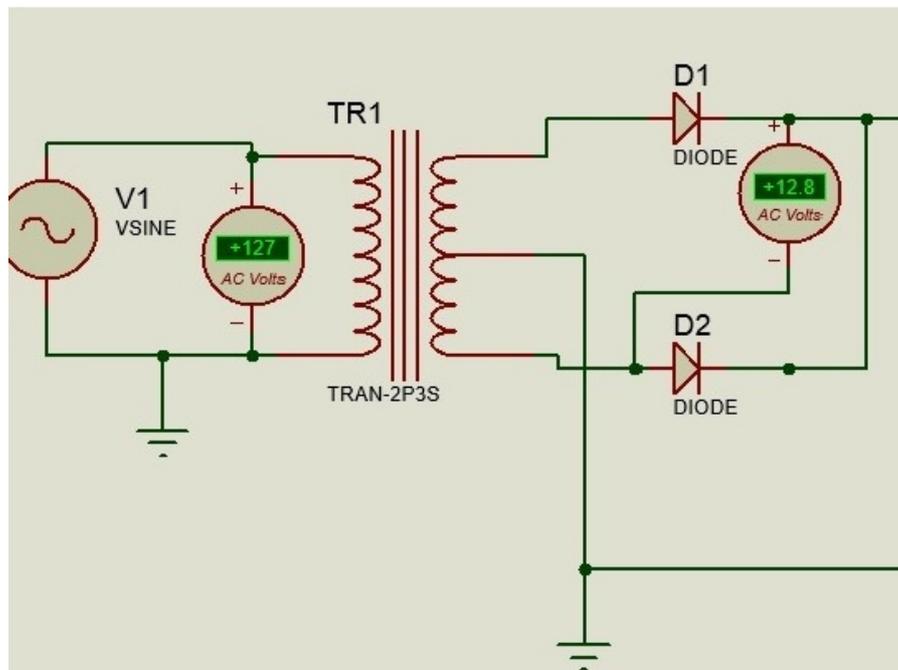


Figura A.5 – Bloco a) do circuito simulado no *software* Proteus®.

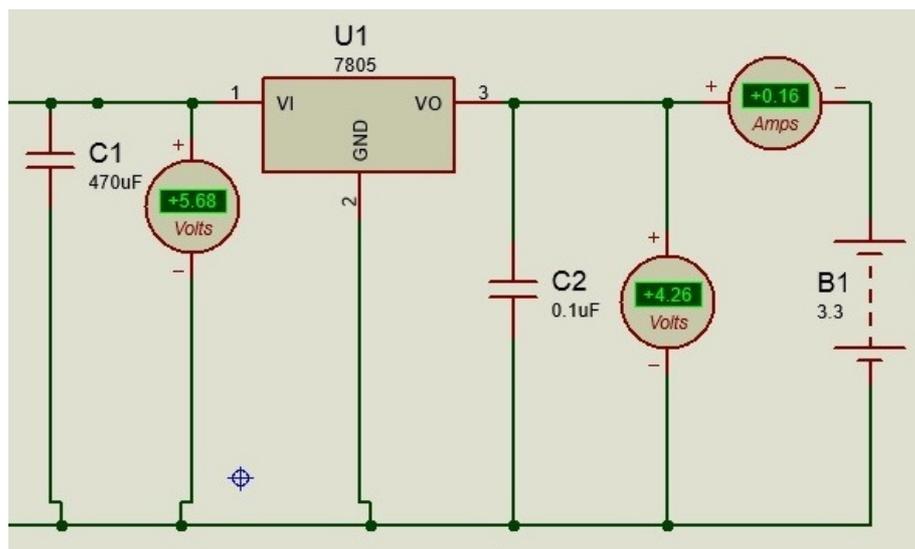


Figura A.5 – Bloco b) do circuito simulado no *software* Proteus®.

Na simulação foi empregado um transformador abaixador 127/18-36 V, com três enrolamentos, estando o primário diretamente conectado à fonte CA de 127 V. Ao secundário do transformador foram conectados dois diodos de silício, com barreira de potencial V_j típica de 0,7 V. A tensão na entrada do LM7805, 5,68 V, está dentro do limite estabelecido no *datasheet*, possibilitando assim, que em sua saída, possa ser entregue uma tensão estabilizada de 5 V. Na simulação, verifica-se que a inserção da bateria de 3,3 V na saída do LM7805 acarretou em uma queda de tensão na saída do regulador, variando de 5 para 4,26 V. Tal comportamento foi verificado também com um multímetro durante as medições do circuito no laboratório, com uma tensão medida variando entre 4,2 e 4,3 V.

Embora, conforme apresentado na Figura 3.4, a corrente elétrica medida durante o carregamento da bateria Li-Ion através do uso do LM7805 tenha apresentado um valor de pico inicial de 200 mA, após alguns instantes o valor da corrente é reduzido de maneira pronunciada, possuindo um valor médio de aproximadamente 160 mA. Tal valor de corrente é o mesmo obtido através da simulação, com o medidor indicando exatamente 160 mA, portanto, validando o circuito medido com o simulado.

APÊNDICE B

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DOS DIODOS AVAGO

Os diodos utilizados neste trabalho são da série HSMS-285X e HSMS-286X, do fabricante *Avago*, fornecidos com o encapsulamento SOT-23 e são do tipo SMD (*Superficial Mounting Device*). A topologia de ambas as séries de diodos é apresentada na Figura B.1.

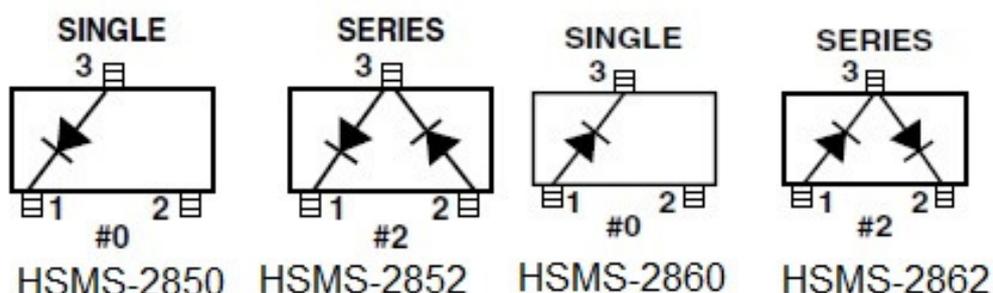


Figura B.1 – Vista superior dos diodos HSMS-285X e HSMS-286X (AVAGO TECHNOLOGIES, 2017)

Por inspeção visual nota-se que os encapsulamentos HSMS-2850 e HSMS-2860 possuem apenas um único diodo, enquanto HSMS-2852 e HSMS-2862 possuem dois diodos disponíveis em configuração anti-paralela. Para o projeto e fabricação dos circuitos retificadores, tais diferenças construtivas devem ser respeitadas e consideradas de forma a inserir linhas de transmissão, capacitores, indutores e cargas nas posições corretas. Conforme catálogo disponível no site do fabricante *Avago*, (AVAGO TECHNOLOGIES, 2017) as respectivas tensões de barreira V_J de ambos os diodos são apresentadas na Tabela B.1 Também são apresentados os valores de frequência de trabalho e potência de entrada, P_{in} , recomendados.

Parâmetro	HSMS 285X	HSMS 286X
V_J (tensão de barreira)	150 a 250 mV	250 a 350 mV
f (frequência de operação)	até 1,5 GHz	acima de 4 GHz
P_{in} (potência de entrada)	< (-20 dBm)	> (-20 dBm)

Tabela B.1 – Características elétricas básicas dos diodos HSMS-285X e HSMS-286X

A partir dos dados apresentados, nota-se que o diodo HSMS-285X possui uma tensão de barreira menor quando comparado ao diodo HSMS-286X, uma característica que a princípio, o torna um candidato mais promissor para utilização no retificador de uma *rectenna* por causar menores perdas totais de tensão no circuito. Também a característica de melhor operação para menores valores de potência de entrada torna o diodo HSMS-285X indicado para a aplicação no reaproveitamento da energia eletromagnética presente no ambiente.

O *software* ADS®, por trabalhar com os modelos *SPICE* fornecidos pelo fabricante *Avago*, é capaz de simular as condições de operação dos diodos em questão. O modelo de circuito elétrico dos diodos *Shottky* é apresentado na Figura B.2, enquanto na Figura B.3 são apresentados os valores dos parâmetros para os diodos HSMS-285X/6X.

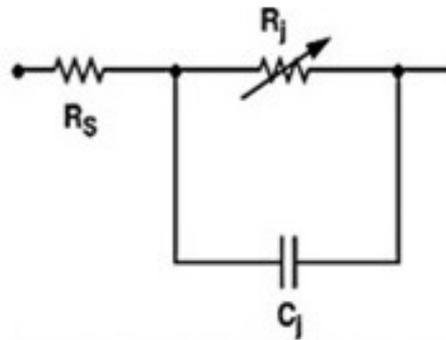


Figura B.2 – Modelo *Spice* dos diodos HSMS285X e HSMS286X. (AVAGO TECHNOLOGIES, 2017)

Tabela de parâmetros SPICE

Parâmetro	Unidade	HSMS - 285	HSMS - 286
B_V	V	3.8	7.0
C_{j0}	pF	0.18	0.18
E_G	eV	0.69	0.69
I_{BV}	A	3 E-4	1 E-5
I_S	A	3 E-6	5 E-8
N		1.06	1.08
R_S	Ω	25	6.0
$P_B (V_j)$	V	0.35	0.65
$P_T (XTI)$		2	2
M		0.5	0.5

Figura B.3 – Valores dos parâmetros elétricos dos diodos HSMS285X e HSMS286X. (AVAGO TECHNOLOGIES, 2017)

O parâmetro R_s computa todas as perdas ôhmicas embutidas no funcionamento do diodo, ou seja, perdas por dissipação de calor, sendo denominada resistência série parasita do diodo. A parcela C_j é a capacitância parasita de junção, termo que é dependente das características físicas e construtivas do encapsulamento do diodo. Entretanto, tal capacitância apresenta-se ao circuito como uma impedância variável com a frequência de operação do circuito, dado pela reatância capacitiva.

O parâmetro R_j , resistência de junção, possui em sua composição algumas parcelas fixas, n , T , I_s (fornecidos no *datasheet*) e uma parcela variável, I_b . I_b é a corrente que flui pelo diodo devido a um sinal elétrico externamente aplicado a ele, ou seja, R_j depende bastante dos níveis de potência elétrica na entrada do diodo. Quanto maior for I_b , menor será a parcela R_j , porém nas aplicações envolvendo reaproveitamento de energia eletromagnética via *rectenna*, I_b terá sempre um valor pequeno devido aos baixos níveis de energia presentes no ambiente.

Verifica-se assim que o diodo é um componente que possui um comportamento dependente do valor de potência e frequência de entradas. Caso esteja em um circuito operando em condições diferentes com relação ao projeto inicial, o comportamento final pode ser bastante diferente do esperado, com menores níveis do sinal de saída e maior ineficiência.

APÊNDICE C

FOTOGRAFIAS

Neste Apêndice estão agrupadas as fotografias dos dispositivos manufaturados neste trabalho.

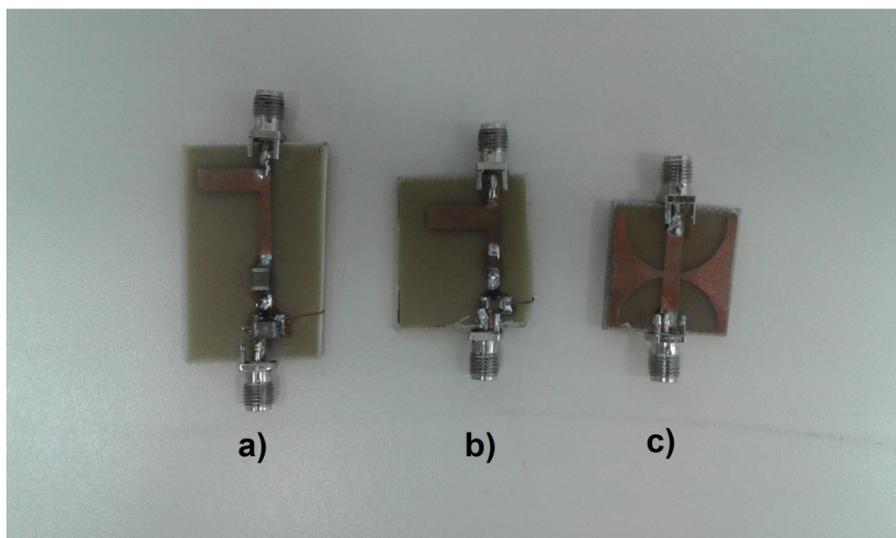


Figura C.1 – a) Retificador R180, b) Retificador R245 , c) Filtro impresso



Figura C.2 – Retificador RDupla

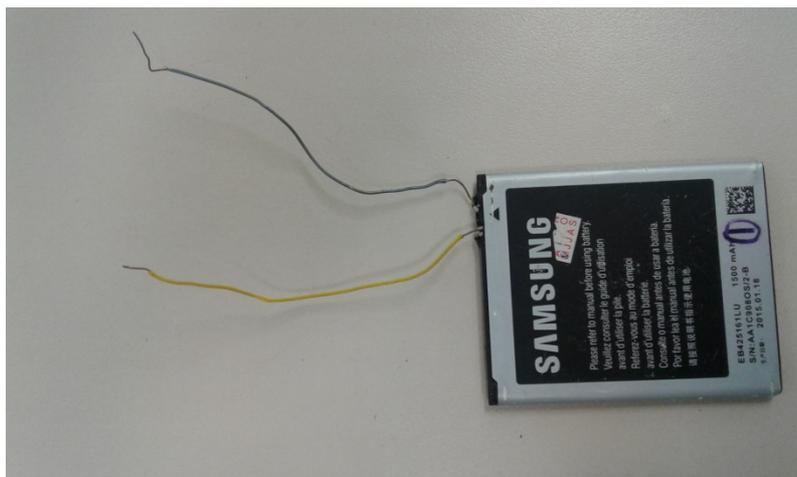


Figura C.3 – Bateria de Li-Ion.

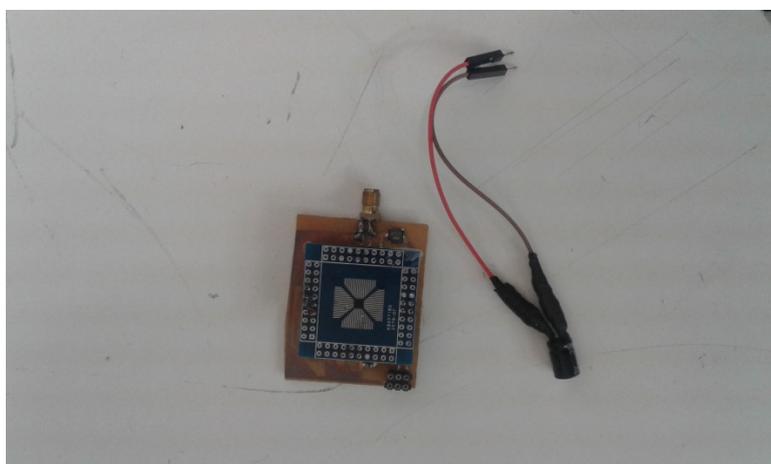


Figura C.4 – *Booster* e supercapacitor de 470 μ F.



Figura C.5 – Antena 1x245.

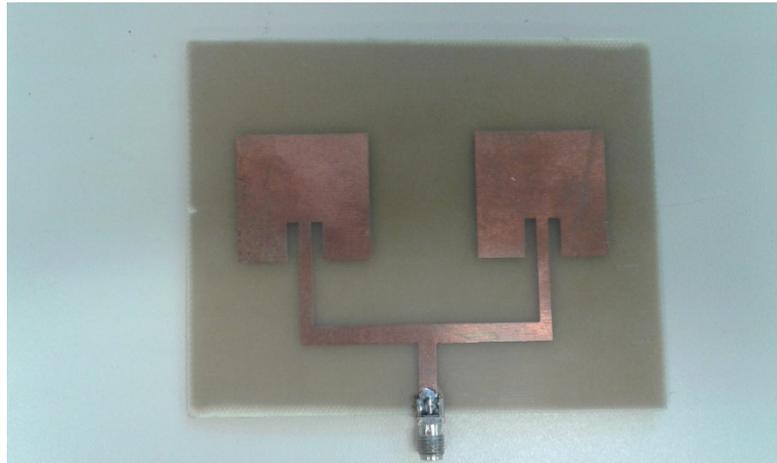


Figura C.6 – Antena 2x245.

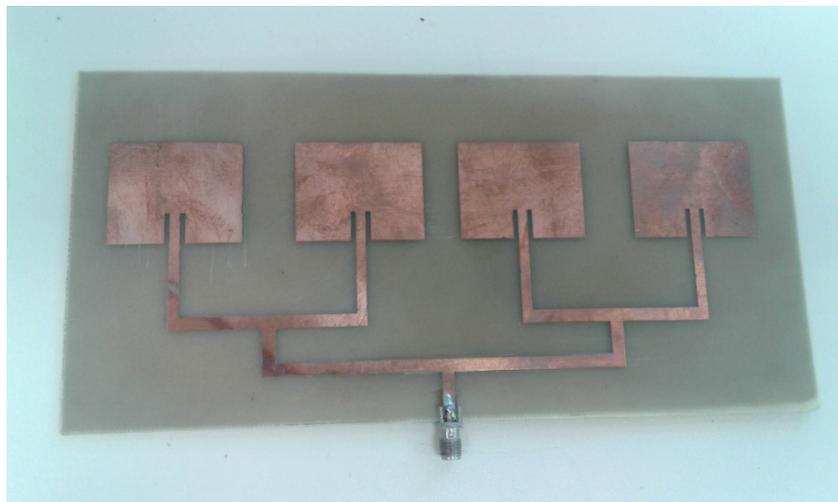


Figura C.7 – Antena 4x245.

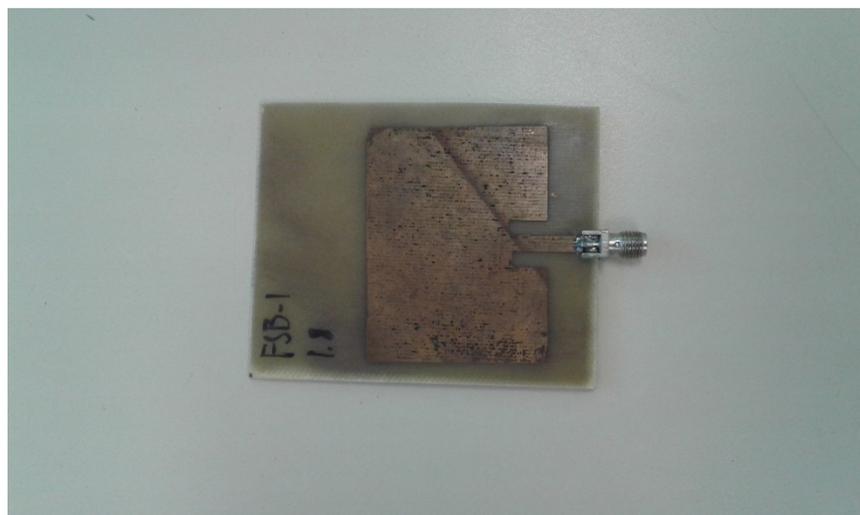


Figura C.8 – Antena 1x180.

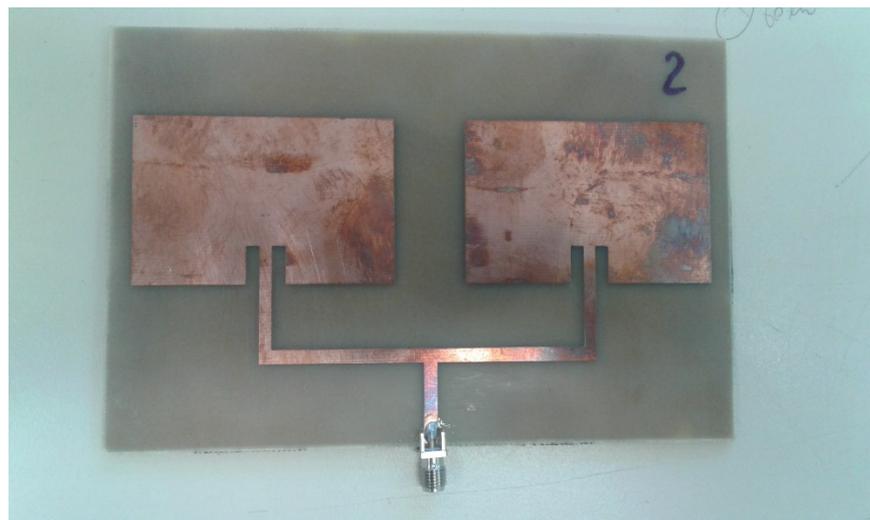


Figura C.9 – Antena 2x180.

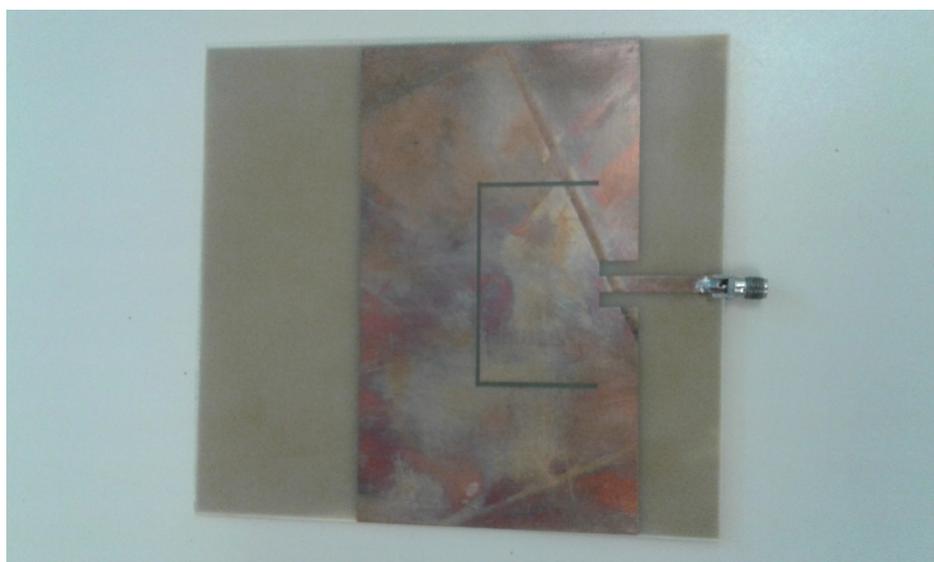


Figura C.10 – Antena 1xDupla.

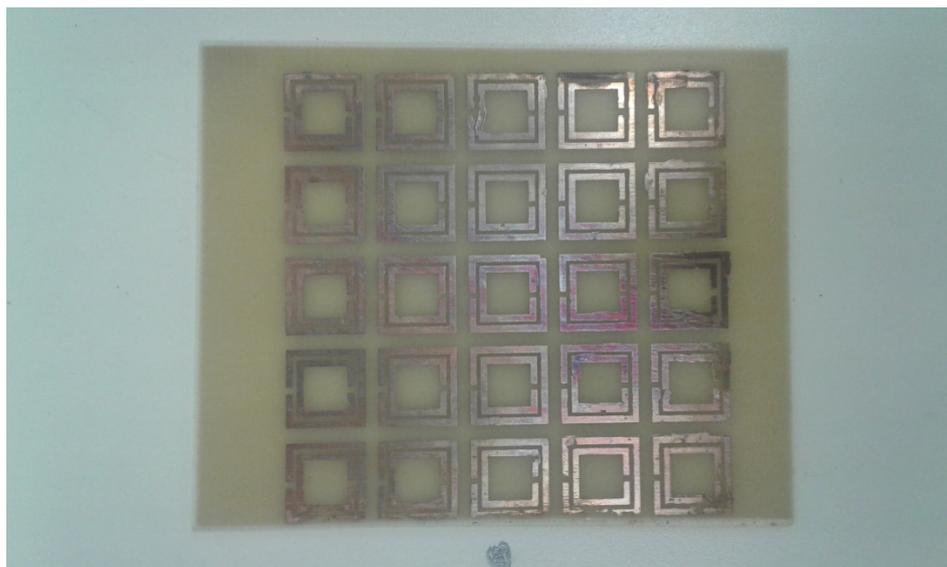


Figura C.11 – Lente Eletromagnética para 2,45 GHz

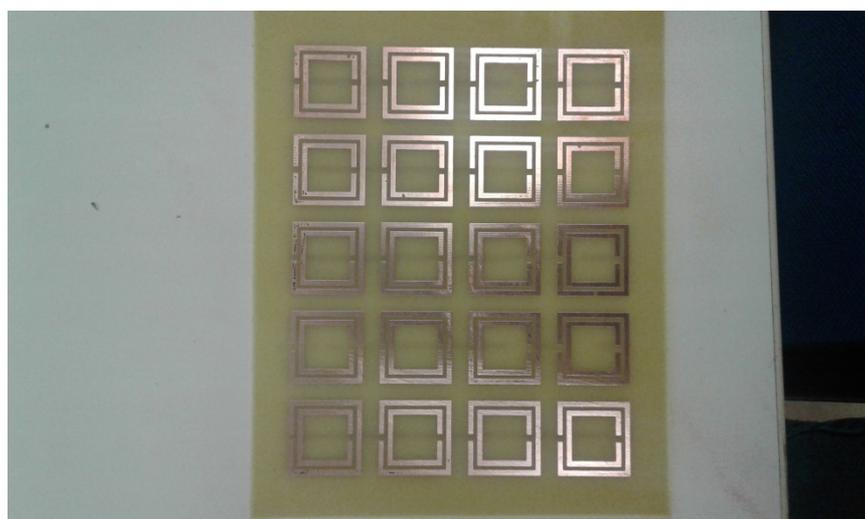


Figura C.12 – Lente Eletromagnética para 1,80 GHz

APÊNDICE D
CONECTOR KLC 3011

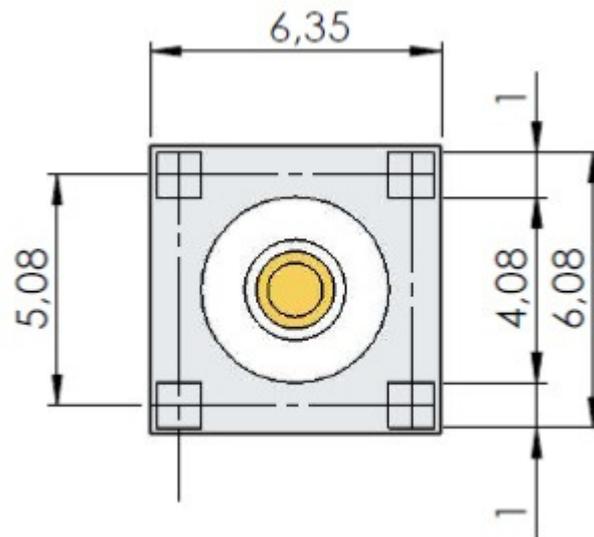


Figura D.1 –Conector KLC 3011 – vista superior (dimensão em milímetros).

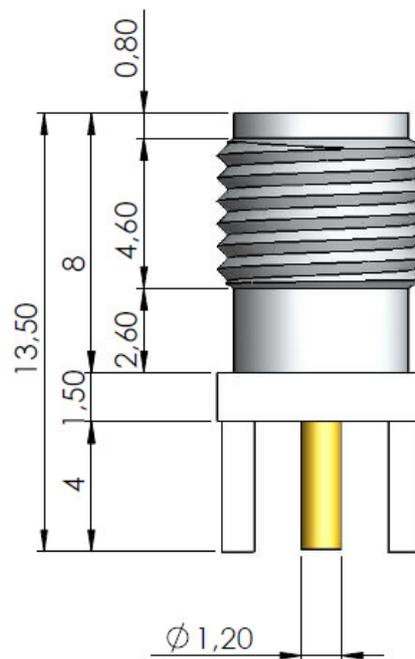


Figura D.2 –Conector KLC 3011 – vista lateral (dimensão em milímetros).