



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

ÍCARO ANDRÉ TAVARES

***RECTENNA MONOPOLAR PARA APLICAÇÕES EM CAPTAÇÃO DE ENERGIA
SEM FIO***

CARAÚBAS

2019

ÍCARO ANDRÉ TAVARES

***RECTENNA* MONOPOLAR PARA APLICAÇÕES EM CAPTAÇÃO DE ENERGIA
SEM FIO**

Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

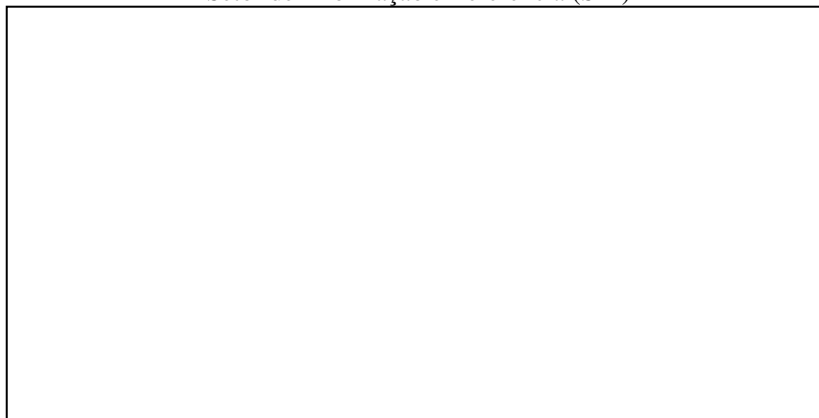
Orientador: Prof. Dr. Francisco de Assis Brito Filho

CARAÚBAS

2019

©Todos os direitos estão reservados à Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996, e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tornar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata, exceto as pesquisas que estejam vinculadas ao processo de patenteamento. Esta investigação será base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) seja devidamente citado e mencionado os seus créditos bibliográficos.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Biblioteca Central Orlando Teixeira (BCOT)
Setor de Informação e Referência (SIR)



Bibliotecário-Documentalista
Nome do profissional, Bib. Me. (CRB-15/10.000)

ÍCARO ANDRÉ TAVARES

**RECTENNA MONOPOLAR PARA APLICAÇÕES EM CAPTAÇÃO DE ENERGIA
SEM FIO**

Monografia apresentada a Universidade
Federal Rural do Semi-Árido como requisito
para obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Elétrica.

Defendida em: 14 / 08 / 2019.

BANCA EXAMINADORA


Prof. Dr. Francisco de Assis Brito Filho (UFERSA)
Presidente


Prof. Ms. Nayana Letícia de Moraes Viana (UFERSA)
Membro Examinador


Prof. Dr. Valdemir Praxedes da Silva Neto (UFRN)
Membro Examinador


Prof. Dr. Haulisson Jody Batista da Costa (IFRN)
Membro Examinador

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a realização deste trabalho, ao meu querido e amado Deus, sem ele nada seria possível.

Agradeço também, especialmente, aos meus pais, Damião Tavares da Cruz e Maria Aurcélia Pereira André, ao meu irmão, Ian André Tavares e aos meus amigos e aos meus familiares por terem me apoiado e ajudado de todas as formas, principalmente, quando precisei de ajuda emocional e logística para seguir batalhando em busca de uma formação profissional.

Sou muito grato ao meu professor orientador, Francisco de Assis Brito Filho, principalmente por seus “puxões de orelha”, pois sem eles não enxergaria meu verdadeiro potencial.

Por fim, agradeço a Valdemir, Nayana e Haulisson por estarem presente nesse momento especial em minha vida.

“O que fazemos na vida, ecoa na eternidade.”
Gladiador

“Se tem um sonho, deve protegê-lo.”
Will Smith

“O mais importante não é a força da pancada que você pode dar, e sim a força da pancada que você pode suportar, para se levantar e bater de novo.”
Rocky Balboa

RESUMO

Na atualidade, busca-se cada vez mais novas fontes alternativas de energia, a fim de diminuir os danos causados pela utilização da energia através dos combustíveis fósseis. Vários dispositivos atuais funcionam através das ondas de micro-ondas e, deste modo, a energia na forma de ondas eletromagnéticas está presente no espaço livre, sem ainda ser efetivamente utilizada. Neste trabalho, é realizado um estudo acerca de um dispositivo que aproveita essa energia eletromagnética exposta no espaço livre, denominado *rectenna*, que consiste na junção de um retificador mais uma antena. A função da *rectenna* é converter energia eletromagnética em energia contínua para alimentação de circuitos de baixo consumo, ou seja, a antena do sistema capta o sinal de micro-ondas, esse sinal é repassado para o retificador que realiza a conversão RF-DC. Os circuitos dos retificadores foram projetados e simulados no *software* ADS para depois serem fabricados. Os testes de performance foram efetuados com diversos *setups*, avaliando o desempenho individual dos retificadores através de um gerador de sinal acoplado diretamente nos mesmos, para extrair a maior conversão possível, variando a potência de entrada. Avaliando também o comportamento da *rectenna* com e sem carga acoplada em sua saída. Uma aplicação para esse circuito seria a famosa *IoT (Internet of Things)*, uma vez que aproveitaria o mesmo sinal de eletromagnético de comunicação, para alimentação dos mesmos.

Palavras-chave: *Rectenna*. Conversão RF-DC. Sistema de coleta de energia sem fio. Transmissão de potência sem fio.

ABSTRACT

Currently, more and more alternative sources of energy are being sought in order to reduce the damage caused by the use of energy through fossil fuels. Several current devices work through microwave waves, so energy in the form of electromagnetic waves is present in free space, yet not actually used. In this work, a study is performed about a device that takes advantage of this electromagnetic energy exposed in the free space, called rectenna, which consists in the junction of a rectifier plus an antenna. The function of rectenna is to convert electromagnetic energy into continuous energy for low-power circuit power, that is, the system antenna picks up the microwave signal, that signal is passed to the rectifier that performs the RF-DC conversion. The rectifier circuits were designed and simulated in the ADS software and later manufactured. Performance tests were performed with several setups, evaluating the individual performance of the rectifiers through a signal generator coupled directly to them, to extract the highest possible conversion, varying the input power. Also evaluating the behavior of the rectenna with and without load coupled in its output. An application for this circuit would be the famous IoT (Internet of Things), since it would take advantage of the same communication electromagnetic signal to power them.

Keywords: Rectenna. RF-DC Conversion. Wireless Energy Harvesting. Wireless Power Transmission.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Metodologia do trabalho.	15
Figura 2.1: Diagrama de blocos do Gerador e <i>Rectenna</i>	17
Figura 2.2: <i>Rectenna</i> com filtros passa-faixa e passa-baixa. Retirado de (HANNACHI,2018).	17
Figura 2.3: <i>Rectenna</i> apenas com o filtro passa-baixa. Retirado de (KUHN,2015).	18
Figura 2.4: Antena microfita <i>patch</i> retangular. (a) Vista superior, (b) Vista frontal.	18
Figura 2.5: Configuração de uma <i>rectenna broadband</i> com RCN. (a) Modelo híbrido, (b) Estrutura da <i>rectenna broadband</i> com RCN. Retirado de (SONG,2017).	20
Figura 2.6: Exemplos de retificadores usuais. (a) Retificador de meia, (b) Retificador de onda completa, (c) Polaridade inversa, (d) Ponte de Graetz. Retirado de (SOYATA,2017).	21
Figura 3.1: Antena projetada via HFSS. (a) Vista superior, (b) Vista posterior.	22
Figura 3.2: Diagrama de Radiação da antena simulada.	23
Figura 3.3: Topologia do Retificador de Meia Onda via ADS.	24
Figura 3.4: Retificador de Onda Completa via ADS.	25
Figura 4.1: Antena fabricada. (a) Vista Superior, (b) Vista posterior.	27
Figura 4.2: Protótipo Retificador de Meia onda.	29
Figura 4.3: Protótipo Retificador de Onda Completa.	30
Figura 4.4: Protótipo <i>Rectenna</i> de Onda Completa.	32
Figura 4.5: Primeiro <i>setup</i> usado para medição das <i>Rectennas</i>	33
Figura 4.6: Recepção do sinal de RF.	33
Figura 4.7: Segundo <i>setup</i> usado para medição das <i>rectennas</i>	35
Figura 4.8: Posições do potenciômetro.	38
Figura 4.9: Configuração usada na medição das <i>rectennas</i> com carga.	39

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 4.1: Perda de retorno da antena.....	23
Gráfico 4.2: Perda de retorno do retificador de meia onda.	24
Gráfico 4.3: Tensão de saída do retificador de meia onda.	25
Gráfico 4.4: Perda de retorno do retificador de onda completa.....	26
Gráfico 4.5: Tensão de saída do retificador de onda completa.	26
Gráfico 5.1: Parâmetro $S(1,1)$ da Antena via VNA.	28
Gráfico 5.2: Comparação dos valores simulados e medidos da antena.	28
Gráfico 5.3: Perda de retorno retificador de meia onda via VNA.	29
Gráfico 5.4: Comparativo dos valores da perda de retorno dos simulados e medidos do retificador de onda completa.	30
Gráfico 5.5: Perda de retorno do retificador de onda completa.....	31
Gráfico 5.6: Comparativo dos valores da perda de retorno dos simulados e medidos do retificador de onda completa.	31
Gráfico 5.7: Saída <i>Rectenna</i> de Meia onda com variação da distância.	34
Gráfico 5.8: Saída <i>Rectenna</i> de Onda completa com variação da distância.	34
Gráfico 5.9: Conversão RF-DC das <i>Rectennas</i> com base na variação de potência de entrada.	36
Gráfico 5.10: Tensão de saída com variação da frequência da <i>rectenna</i> de meia onda.....	37
Gráfico 5.11: Tensão de saída com variação da frequência da <i>rectenna</i> de onda completa.	37
Gráfico 5.12: Tensão de saída com variação da carga na <i>rectenna</i> de meia onda.	39
Gráfico 5.13: Tensão de saída com variação da carga na <i>rectenna</i> de onda completa.....	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Perda no espaço livre das antenas.	35
Tabela 2: Resistência do potenciômetro com base nas posições.	38

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

RF	<i>Radio Frequency</i>
WPT	<i>Wireless Power Transmission</i>
WEH	<i>Wireless Power Harvesting</i>
WSN	<i>Wireless Sensor Network</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
MIT	<i>Massachusetts Institute of Technology</i>
GSM	<i>Global System for Mobile Communications</i>
UTMS2100	<i>Universal Mobile Telecommunication System</i>
Wi-Fi	<i>Wireless Fidelity</i>
DC	<i>Direct Current</i>
CDMA	<i>Code Division Multiple Access</i>
ISM	<i>Industrial, Scientific and Medical</i>
HFSS	<i>High Frequency Structure Simulator</i>
ADS	<i>Advanced Design System</i>
λ	<i>Wavelength</i>
RCN	<i>Resistance Compression Network</i>
FR-4	<i>Epoxy/Fiber-Glass</i>
VNA	<i>Vector Network Analyzer</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
1.1	OBJETIVOS.....	15
1.1.1.	OBJETIVO GERAL.....	15
1.1.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
1.2	METODOLOGIA.....	15
2	REFERENCIAL TEÓRICO	16
2.1.	<i>RECTENNA</i> E SEUS COMPONENTES	17
3.1.1.	ANTENA.....	18
3.1.2.	<i>MATCHING NETWORK</i>	19
3.1.3.	RETIFICADOR	21
3	PROPOSTA DE <i>RECTENNAS</i>	22
3.1.	TOPOLOGIA DA ANTENA	22
3.2.	TOPOLOGIA DO RETIFICADOR DE MEIA ONDA	24
3.3.	TOPOLOGIA RETIFICADOR DE ONDA COMPLETA	25
4	RESULTADOS	27
4.1.	MEDIÇÕES NA ANTENA	27
4.2.	MEDIÇÕES RETIFICADOR DE MEIA ONDA	29
4.3.	MEDIÇÕES RETIFICADOR DE ONDA COMPLETA	30
4.4.	<i>RECTENNA</i>	32
4.4.1.	<i>RECTENNA</i> SEM CARGA	36
4.4.2.	<i>RECTENNA</i> COM CARGA	38
5	CONCLUSÃO.....	40
	REFERÊNCIAS.....	41

1 INTRODUÇÃO

A busca por fontes alternativas de energia vem se intensificando nos últimos anos, uma vez que o objetivo é tanto ter uma diversificação energética como desmonopolizar do uso dos combustíveis fósseis (PACHECO,2006).

Hoje em dia, as fontes alternativas de energia têm várias vertentes diferentes, ou seja, não vêm de uma mesma fonte primária. Por exemplo, as usinas solares usam placas fotovoltaicas para converter a energia captada pelo sol (sua fonte primária) em energia contínua. Da mesma forma, as usinas eólicas utilizam aerogeradores para converter o vento captado por suas hélices em energia contínua (PACHECO,2006).

Contudo, nota-se que o uso dessas fontes alternativas é muito importante para dispositivos autônomos, no qual reduziria o custo para manutenção dos mesmos. Entretanto, para utilização da energia solar, por exemplo, é uma ótima solução para dispositivos de baixo consumo, porém, é uma energia que produz apenas durante o dia, necessitando de uma bateria para armazenamento para alimentar o circuito durante a noite. Comparando essa fonte energética com a eólica têm-se um aproveitamento maior da última, uma vez que tem uma produção constante e eficiente. Todavia, para uma aplicabilidade em aparelhos de baixa potência, não seria viável, devido a questão tanto da mobilidade como da estética de fabricação dos circuitos.

Ao passar dos anos, percebe-se que os componentes eletrônicos estão cada vez menores, demandando um consumo cada vez menor. Para satisfazer o avanço dessa tecnologia uma forma de captação de energia que está sendo estudada na atualidade, que é eletromagnética (Radiofrequência-RF), onde um dispositivo denominado de *Rectenna* converte o sinal de RF em um sinal contínuo (SOYATA,2017).

A *rectenna* consiste em uma antena com um retificador, no qual o sinal de RF é capturado pela antena e é convertido pelo retificador, ocorrendo assim, tanto uma transmissão de potência sem fio (*Wireless Power Transmission* – WPT) como também uma coleta de energia sem fio (*Wireless Energy Harvesting* - WEH) (SOYATA,2017).

1.1 OBJETIVOS

1.1.1. OBJETIVO GERAL

O objetivo deste trabalho foi desenvolver um dispositivo que converta um sinal de RF (Radiofrequência) em sinal contínuo, denominado de *Rectenna*, para aplicações em sistemas de baixo consumo.

1.1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Foram elencados alguns pontos para servir como metas para conclusão deste trabalho, sendo eles:

- Realizar todo um estudo teórico a respeito dos circuitos já consolidados;
- Determinar uma topologia que apresente uma eficiência maior;
- Implementar os circuitos nos softwares ADS e HFSS;
- Fabricar e testar os protótipos simulados;
- Comparar os resultados simulados com os dados experimentais.

1.2 METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho está representada na figura 1.1.

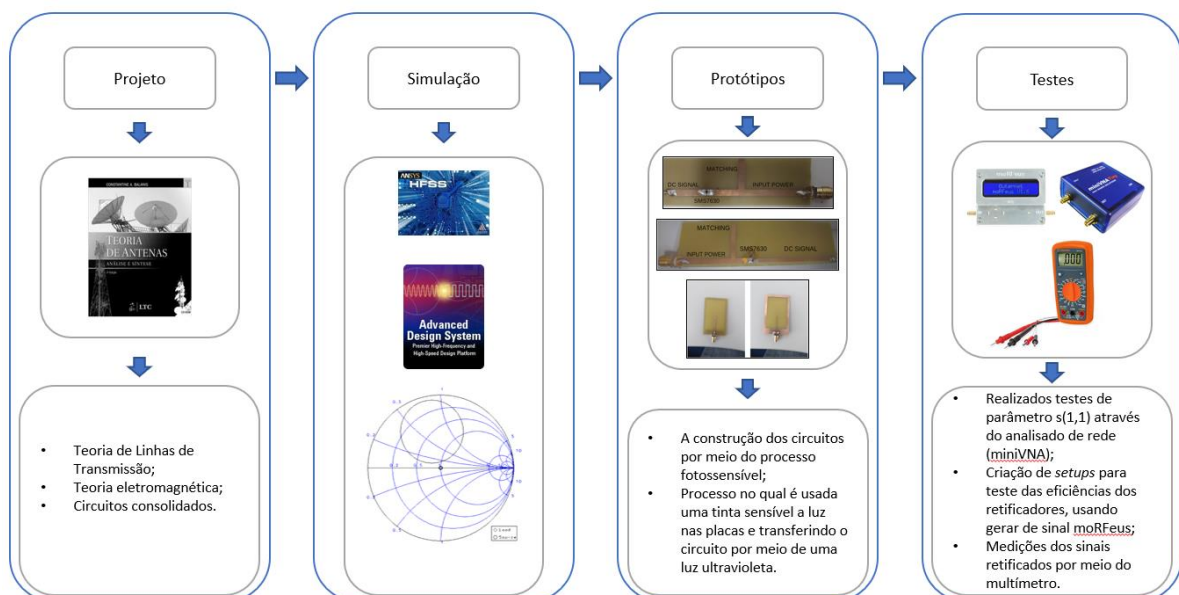


Figura 1.1: Metodologia do trabalho.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Os sistemas sem fio estão ganhando espaço cada vez mais no nosso dia a dia, como por exemplo a WSN (*Wireless Sensor Network*), no qual são usados sensores para a coleta dados, sejam eles: pressão, temperatura, umidade, som, etc. Onde podem ser aplicáveis em sistemas de monitoramento remoto através das *IoT (Internet of Things)*.

Entretanto, com a evolução progressiva da tecnologia, os sistemas de alimentação desses componentes eletrônicos tendem a ser substituídos por métodos mais eficientes, que por sua vez, a dependência das baterias deverá substituídas por sistemas mais eficiente, como por exemplo, *Wireless Energy Harvesting (WEH)* e *Wireless Power Transfer (WPT)*. Sendo que a primeira diz respeito a forma de coleta de energia, podendo ser através do sol, vento, temperatura, som, etc (SOYATA,2017). Já a segunda está relacionada com a transmissão de potência, sendo as mais conhecidas: acoplamento indutivo e acoplamento ressonante (IBRAHIM,2016).

O primeiro experimento com transmissão de potência sem fio (WPT) ocorreu em 1890, porém com baixa eficiência. Entretanto o experimento foi importante para despertar os interesses de outros cientistas. Em 1963, foi demonstrado pela primeira vez, transmissão de energia sem fio através de sinais de micro-ondas pelo Laboratório Spencer, onde o sistema conseguiu entregar uma potência de 100W CC (SONG,2017).

Já em 2007, um grupo do MIT (*Massachusetts Institute of Technology*) mostraram uma nova abordagem para WPT em longas distâncias usando a técnica de acoplamento indutivo ressonante, entregando uma potência de 60W a uma lâmpada com 2 m de distância com eficiência de 40% (SONG,2017).

Através dos conhecimentos adquiridos anteriormente sobre a transmissão de potência sem fio (WPT), foram elaborados dois tipos *Rectennas* com características diferentes, no qual podem ser denominadas de *Multiband* ou *Broadband*. As *Rectennas Multibands* conseguem captar diferentes bandas de frequência, normalmente as bandas GSM1800, GSM900, UTMS2100 e Wi-Fi, atualmente possuem a maior eficiência, chegando até 84% de conversão (KUHN,2015). Já as *Rectennas Broadbands*, captam apenas uma banda larga de frequência, onde possuem uma eficiência menor que as *Multibands*, com eficiência de até 50% (ZHANG,2014).

Por meio desses resultados nota-se que é viável tanto economicamente como ecologicamente investir nessa tecnologia, pois se tem uma energia “limpa”. Sendo que ela pode

ser aplicada em sistemas com baixo consumo de energia, tal como câmeras de segurança, relógios digitais (*smartwatches*), entre outras aplicações da famosa *IoT*.

A subseção a seguir elenca a *rectenna* e seus componentes, que aborda a sua estrutura básica, bem como os elementos que a compõe. Sendo subdivididos em: antena, *matching network* e retificador.

2.1. RECTENNA E SEUS COMPONENTES

Uma estrutura típica de uma *rectenna* consiste em uma antena e um retificador incluindo, o casamento entre a antena receptora e o retificador, tendo como saída um sinal DC, de acordo com a figura 2.1.

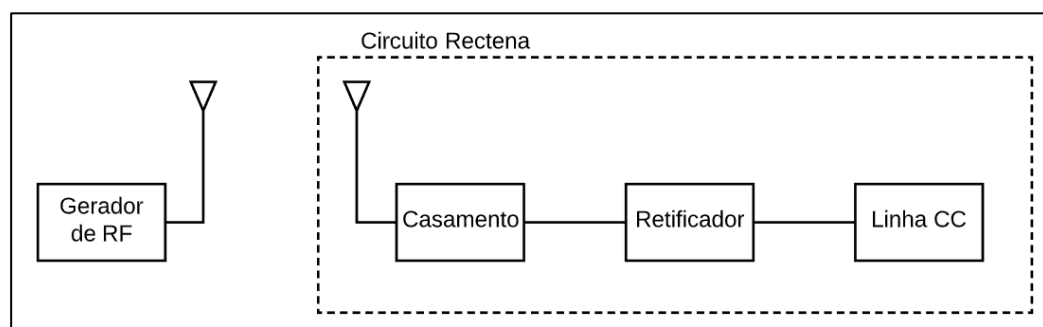


Figura 2.1: Diagrama de blocos do Gerador e *Rectenna*.

Em algumas estruturas podemos encontrar filtros passa-baixa entre o retificador e a linha DC (ou carga), no qual é usado para bloquear qualquer outro sinal de RF do sistema, deixando passar apenas o sinal DC, exposto na figura 2.2 (HANNACHI,2018). Também são encontrados filtros passa-faixa entre a antena e o casamento, a fim de ter uma seletividade de frequência melhor, conforme apresentado na figura 2.3 (KUHN,2015).

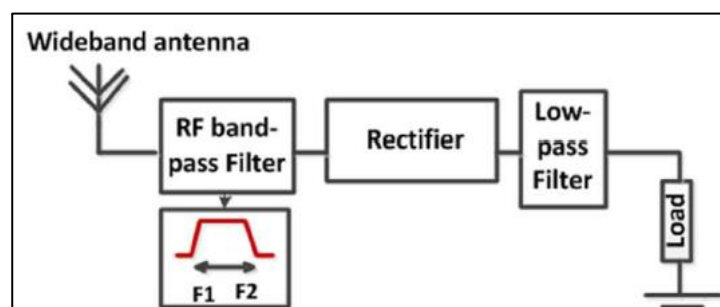


Figura 2.2: *Rectenna* com filtros passa-faixa e passa-baixa. Retirado de (HANNACHI,2018).

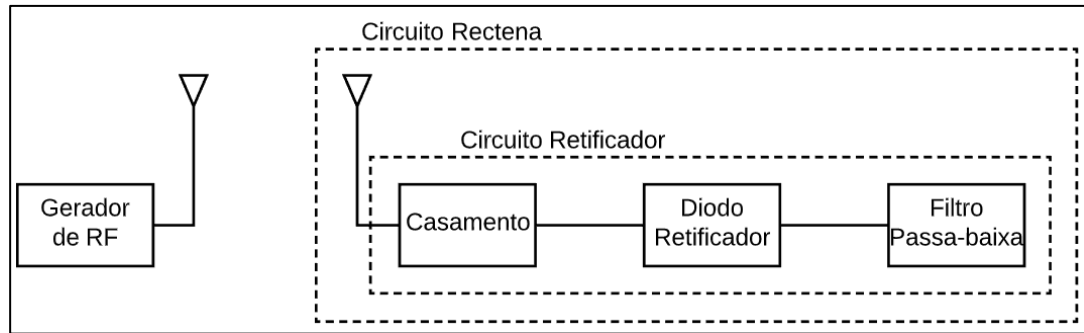


Figura 2.3: *Rectenna* apenas com o filtro passa-baixa. Retirado de (KUHN,2015).

O funcionamento de uma *Rectenna* é bastante simples. Primeiramente é necessário selecionar a frequência a ser estudada (representado pelo bloco “*RF Generator*”), normalmente CDMA (824 – 849 MHz), GSM900 (890 – 915 MHz), GSM1800 (1710 – 1780 MHz) e ISM 2,4 GHz (SINGH,2015). A partir disso é projetado o circuito da sua *Rectenna*, onde cada bloco será abordado nos subtópicos a seguir.

3.1.1. ANTENA

A opção de escolher antenas de microfita foi devido a sua facilidade de fabricação, sua flexibilidade e facilidade de obtenção de resposta em frequência.

Uma antena de microfita é formada por um *patch* metálico que é colocado sobre um substrato aterrado (BALANIS,2012). A figura 2.4 exibe os parâmetros construtivos das antenas de microfita (de *patch* retangular) usando o *High Frequency Structure Simulator* (HFSS), onde na figura 2.4 (a) representa a vista superior das antenas, no qual é levado em consideração o comprimento (L) e a largura (W), já na figura 2.4 (b) mostra a vista frontal, indicando apenas a altura do substrato (h), sendo desprezado a espessura do cobre do *patch*.

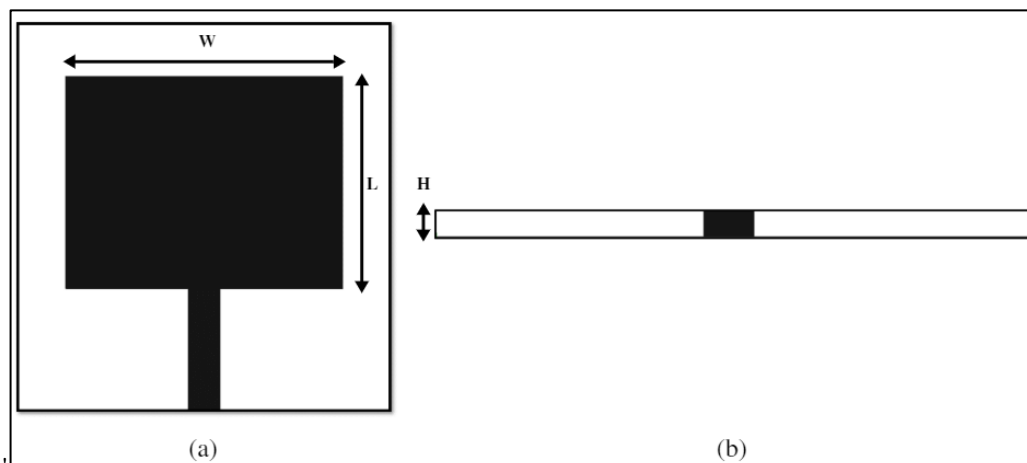


Figura 2.4: Antena microfita *patch* retangular. (a) Vista superior, (b) Vista frontal.

As formulações básicas de design das antenas são seguidas a partir da literatura (BALANIS,2012). Para linhas de *microstrip*, a permitividade efetiva (ϵ_{reff}) é considerada um ajuste para propagação das linhas de campo externas ao substrato (SINGH,2015). O ϵ_{reff} expresso em termos de ϵ_r , lembrando da largura (w) e altura do substrato (h) como se segue (BALANIS,2012):

$$\frac{w}{h} \leq 1$$

$$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \times \left\{ \left[1 + 12 \frac{h}{w} \right]^{-\frac{1}{2}} + 0.04 \left[1 - \frac{w}{h} \right]^2 \right\} \quad (1)$$

$$\frac{w}{h} > 1$$

$$\epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[1 + 12 \frac{h}{w} \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (2)$$

Lembrando que o comprimento L é normalmente a metade do comprimento de onda (λ). Entretanto, devido ao efeito de franjas, esse valor é diminuído de uma parcela (ΔL).

$$\Delta L = 0.412 \times h \frac{(\epsilon_{reff} + 0.3) \left(\frac{w}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{reff} - 0.258) \left(\frac{w}{h} + 0.8 \right)} \quad (3)$$

$$L = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_{reff}}} - 2\Delta L \quad (4)$$

3.1.2. MATCHING NETWORK

Para realização do casamento dos circuitos das *Rectennas* é necessário saber qual técnica melhora significativamente a performance do circuito estudado, pois é através dele que ocorre a sintonia da frequência, fazendo com que o circuito funcione ou não na frequência desejada.

Portanto, são usadas formas de casamento para se obter um resultado desejado. Dentre elas estão o método de casamento com circuito LC, com linhas planares e algumas vezes são aplicados filtros passa-banda, entre a antena e o casamento, para reduzir a sensibilidade e não linearidade do circuito, denominadas de resistência de compressão (RCN) (SONG,2017),

abordado anteriormente. A figura 2.5 representa um modelo híbrido (com a resistência de compressão) com circuitos LC, sendo que a figura 2.5 (a) mostra como seria o casamento mais a resistência de compressão para uma largura de banda ($f_0 \sim f_1$) e para uma fase positiva (ϕ) ou negativa ($-\phi$) e na figura 2.5 (b) exibe a estrutura da *rectenna*.

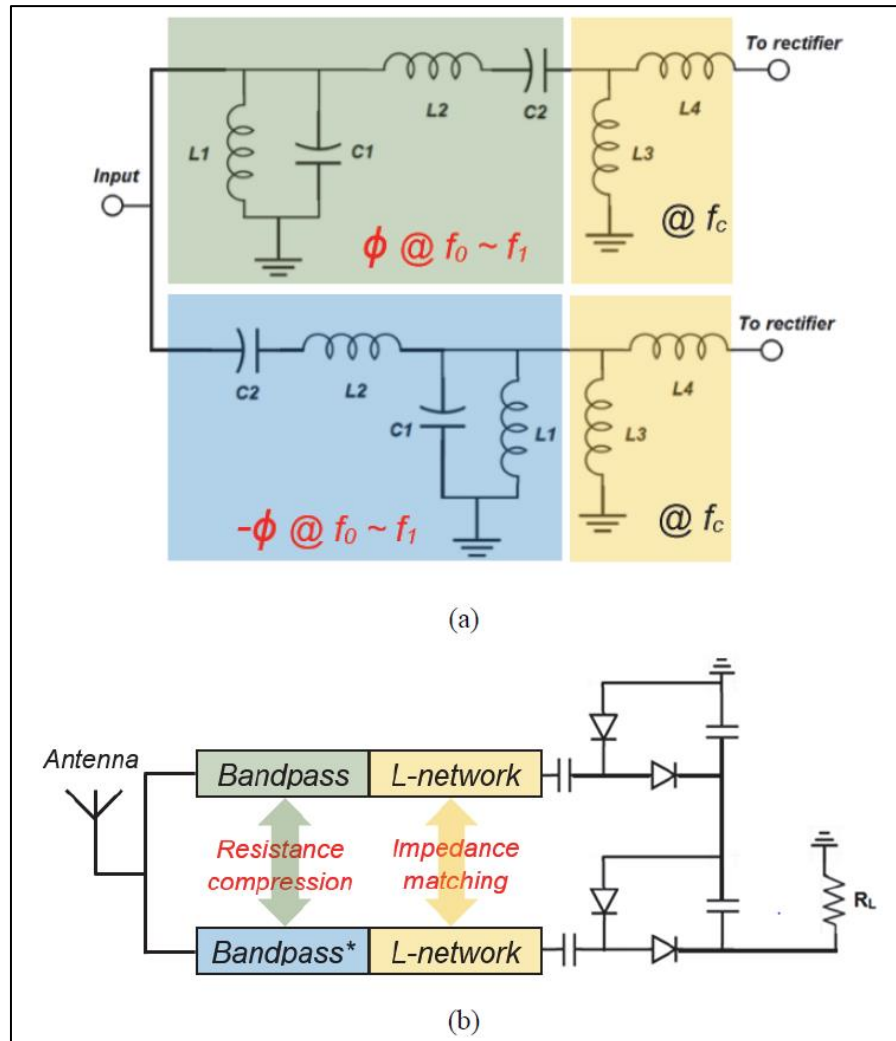


Figura 2.5: Configuração de uma *rectenna broadband* com RCN. (a) Modelo híbrido, (b) Estrutura da *rectenna broadband* com RCN. Retirado de (SONG,2017).

3.1.3. RETIFICADOR

Existem retificadores que tanto são utilizados em nível macro, tal como retificadores com tiristores (usados em eletrônica de potência), como nível micro, aplicado em circuitos que realiza transferência de potência sem fio.

De um tempo para cá, alguns circuitos se tornaram padrões para sistemas de coleta de energia (WEH), alguns circuitos estão exemplificados na figura 2.6, segundo (SOYATA,2017). Em que a figura 2.6 (a) é retificador de meia onda, mais usual devido a sua praticidade, eficiência e seu aspecto construtivo, figura 2.6 (b), retificador de onda completa, diferente do anterior consegue captar tanto no semiciclo negativo como no positivo da onda eletromagnética, figura 2.6 (c), polaridade inversa, sendo praticamente o mesmo do item (b) onde diferente apenas na sua polaridade, uma vez que, considerando que a onda inicie com uma crista, o de onda completa irá retificar primeiro que o de polaridade inversa, devido exclusivamente a posição do diodo e figura 2.6 (d), ponte de Graetz, é semelhante ao de onda completa, só que mais robusto.

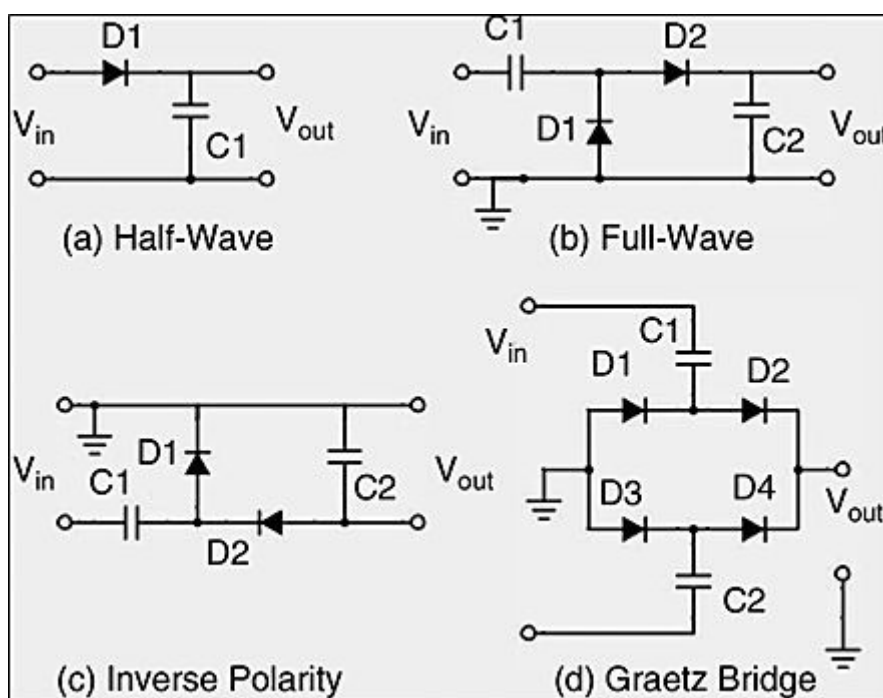


Figura 2.6: Exemplos de retificadores usuais. (a) Retificador de meia, (b) Retificador de onda completa, (c) Polaridade inversa, (d) Ponte de Graetz. Retirado de (SOYATA,2017).

3 PROPOSTA DE *RECTENNAS*

A topologia das *rectennas* foram com base nos conhecimentos adquiridos na seção 2, onde inicialmente, avaliou-se o tipo de antena que seria utilizada, optando-se por uma escolha que seja flexível em termos de resultados, com base nos estudos de Bandeira (2019). Posteriormente, foi analisado arranjos dos retificadores e, conforme (SOYATA,2017), selecionou-se as estruturas de meia onda e de onda completa. Essa seção será dividida em: topologia da antena, topologia do retificador de meia onda e topologia do retificador de onda completa.

3.1. TOPOLOGIA DA ANTENA

A escolha do circuito da antena foi baseada em uma estrutura monopolar, pois sua resposta em frequência é mais rápida com pequenas variações tanto no *patch* como no plano de terra (BANDEIRA,2018). Com base nos conhecimentos adquiridos em (BANDEIRA,2018), foi dimensionado a antena monopolar (projetada com base em $\lambda/4$) para atingir a frequência de 2,4 GHz, sendo usada as dimensões $W=2$ mm e $L=25,5$ mm para a linha do *patch*, figura 3.1 (a), e um plano de terra com *slot*, cujo os valores W_g , W_a , L_g e L_a descreve as dimensões do slot (W_g e L_g) e da antena (W_a e L_a), sendo usados, $W_a = 34$ mm, $L_a = 55$ mm, $W_g = 29$ mm e $L_g = 45$ mm, figura 3.1 (b).

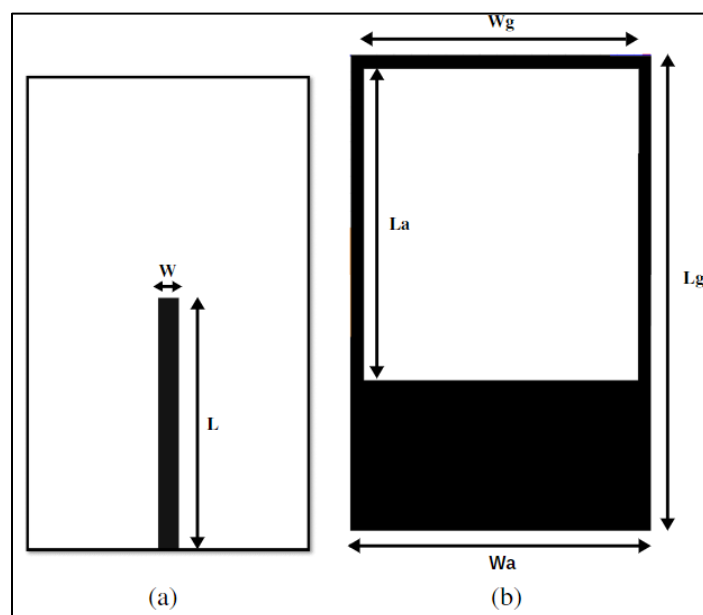


Figura 3.1: Antena projetada via HFSS. (a) Vista superior, (b) Vista posterior.

Para a simulação da antena foi utilizado o *software* HFSS, no qual o substrato utilizado foi o FR-4, levando em consideração a permissividade elétrica (ϵ_r) igual a 4,4 e a altura do substrato (H) igual a 1.57 mm. O ganho atingido pela antena é em torno de 0,2 dB, a perda de retorno da antena foi em torno de -27 dB, tendo uma largura de banda de 900MHz (2 – 2,9 GHz), com a frequência central de 2,4 GHz. O gráfico 3.1 apresenta o parâmetro s(1,1) da antena projetada e a figura 3.2 mostra o diagrama de radiação da mesma.

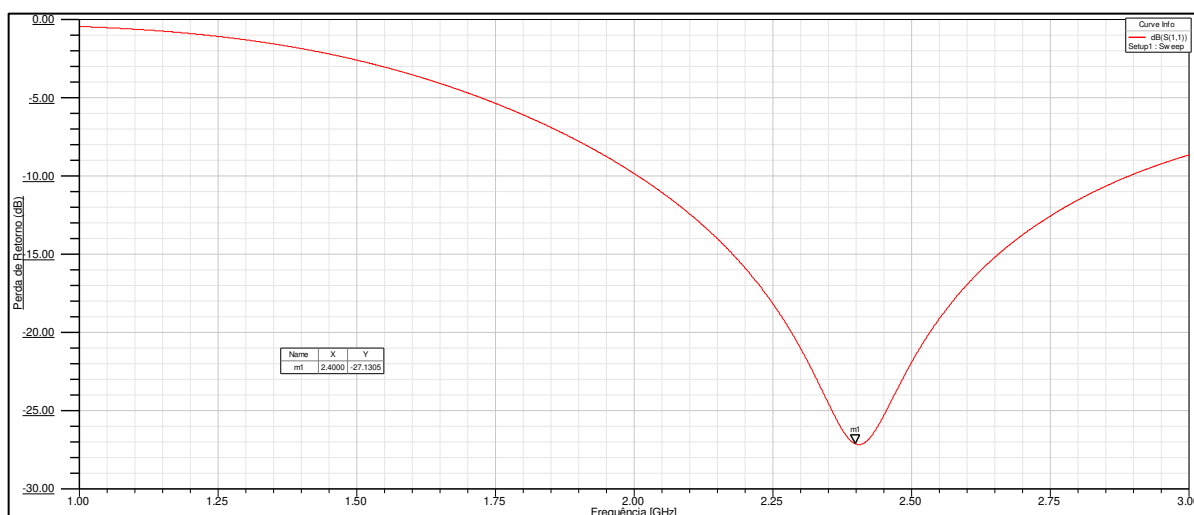


Gráfico 3.1: Perda de retorno da antena simulada.

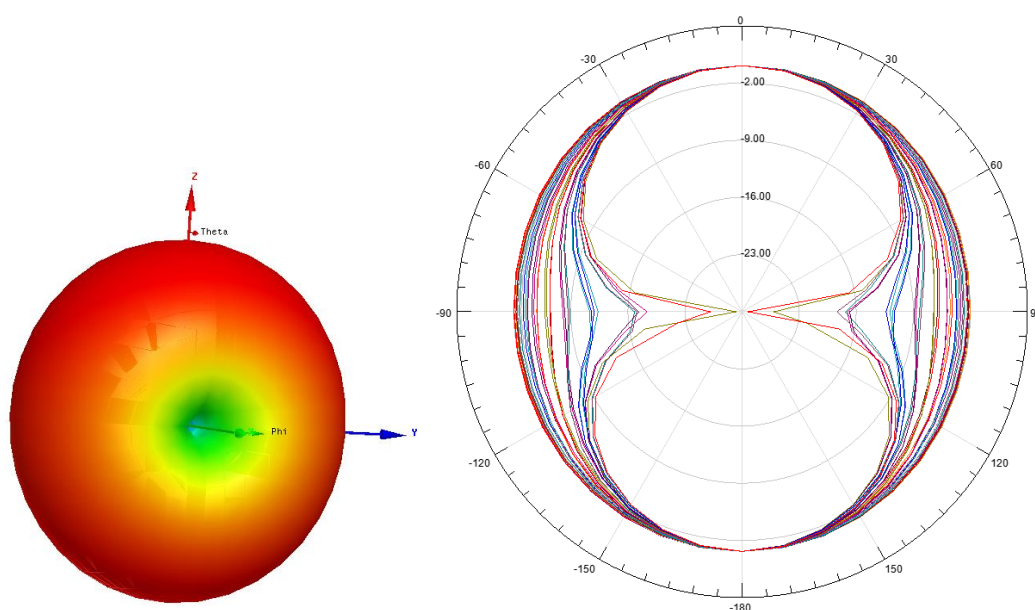


Figura 3.2: Diagrama de Radiação da antena simulada.

3.2. TOPOLOGIA DO RETIFICADOR DE MEIA ONDA

A topologia adotada para a retificador de meia onda foi baseada em (SOYATA,2017), onde o sinal de entrada é representado pela antena, exibida na seção anterior, conectada a uma linha de $50\ \Omega$, que por sua vez, é casada com o diodo Schottky (SMS7630 da *Skyworks*) por meio de uma linha e um toco. A escolha do tipo de diodo foi devido seu chaveamento ser rápido.

Após a passagem pelo diodo, o circuito está retificado, não optando por utilização de capacitores para redução do *ripple*, colocando-se assim uma linha DC para medição. O circuito é apresentado na figura 3.3.

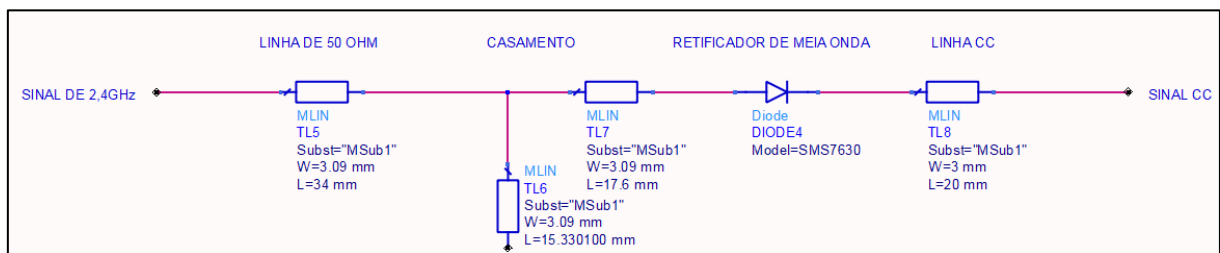


Figura 3.3: Topologia do Retificador de Meia Onda via ADS.

Primeiramente, foi analisado a perda de retorno do circuito, visto que, o objetivo era que o mesmo tivesse uma ressonância na frequência de 2,4 GHz para que funcionasse juntamente com a antena projetada. A o gráfico 3.2 mostra o parâmetro $s(1,1)$ do retificador de meia onda, tendo ressonância em 2,4 GHz com, aproximadamente, -13 dB de perda, tendo uma largura de banda de 26 MHz (utilizando a referência de -10 dB).

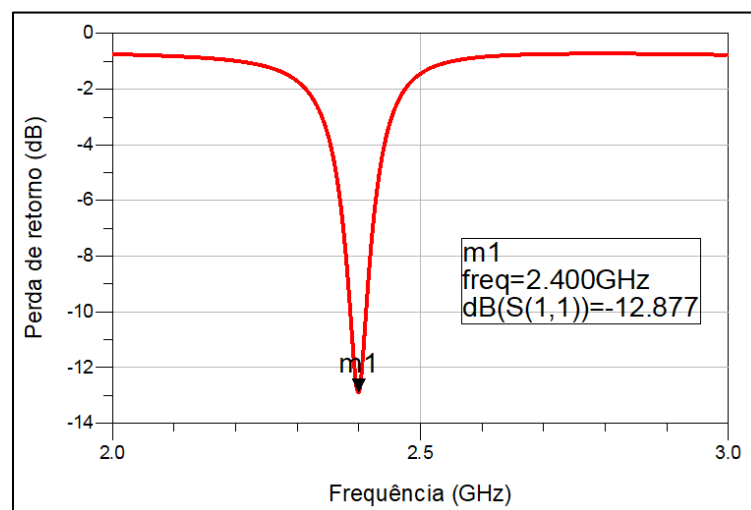


Gráfico 3.2: Perda de retorno do retificador de meia onda simulado.

Após realizado esse passo, foi verificado quanto de tensão era retificada com a variação das potências de entrada (-30 dBm à -3 dBm). A gráfico 3.3 exibe os resultados obtidos na simulação.

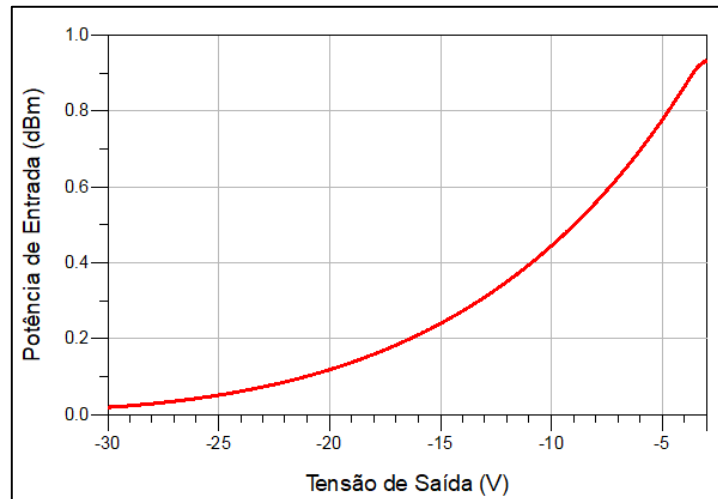


Gráfico 3.3: Tensão de saída do retificador de meia onda simulado.

3.3. TOPOLOGIA RETIFICADOR DE ONDA COMPLETA

A topologia do retificador de onda completa se assemelha com o de meia onda, diferindo apenas por um diodo, que faz parte do modelo de retificador da figura 2.6 (b). A figura 3.4 mostra o modelo no ADS do circuito.

Para seu funcionamento é injetado um sinal de 2,4 GHz na sua entrada, onde esse sinal se propagará até os diodos que farão a retificação de onda completa (aproveitando os dois semiciclos da onda eletromagnética). Por fim, esse sinal convertido se propagará por meio de uma linha CC, usada para medição.

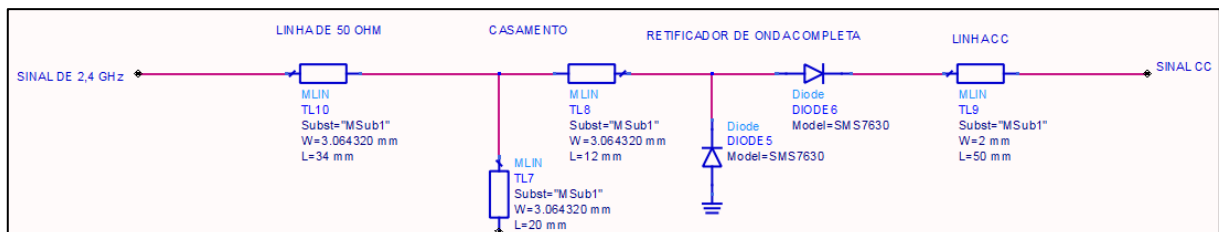


Figura 3.4: Retificador de Onda Completa via ADS.

Analogamente à retificador de meia onda, foram avaliados tanto a perda de retorno como a tensão de saída com a variação da potência de entrada, tendo uma resposta em 2,4 GHz com -17,3 dB de perda (gráfico 3.4) e com uma largura de banda de 61 MHz (com base na perda de -10 dB). Já a tensão de saída com base na variação de potência de entrada (-30 dBm à -3 dBm) é representada no gráfico 3.5.

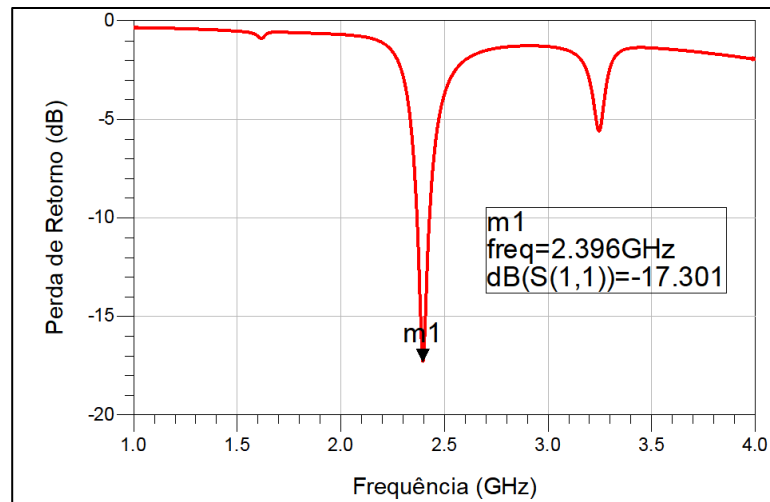


Gráfico 3.4: Perda de retorno do retificador de onda completa simulado.

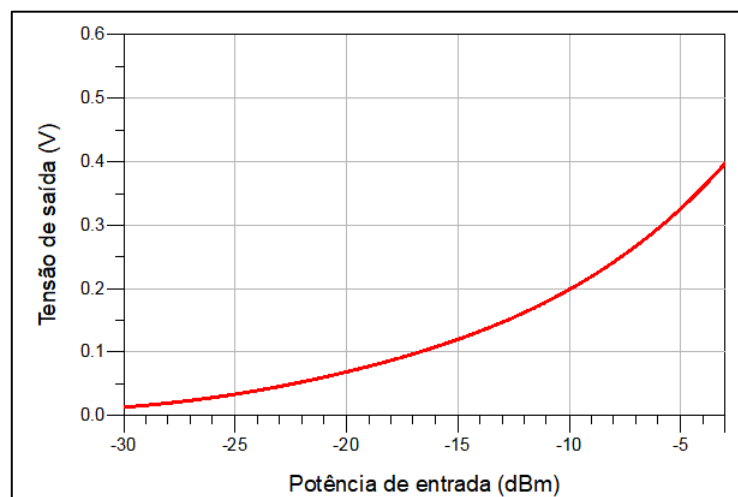


Gráfico 3.5: Tensão de saída do retificador de onda completa simulado.

4 RESULTADOS

A seguir serão apresentados os resultados medidos da antena e dos retificadores. No processo de confecção dos circuitos foram usadas placas de FR-4 ($\epsilon_r=4.4$ e altura do substrato 1.57 mm) com base no método fotossensível.

Os resultados exibidos em sequência, foram divididos da seguinte maneira. O primeiro subtópico, especifica a fabricação e medição da antena, mostrando a perda de retorno, largura de banda e o ganho adquirido. O segundo e terceiro, aborda os dados coletados dos retificadores, levando em consideração tanto os seus parâmetros $s(1,1)$ como a conversão RF-DC. Por fim, o último subtópico elencará os resultados das estruturas das *rectennas*, onde serão realizados testes com e sem carga para verificação de sua conversão de energia.

4.1. MEDIÇÕES NA ANTENA

Primeiramente foi realizado a simulação da antena (apresentado na seção 4.1). Logo após isso, fabricou-se o circuito (figura 4.1) e verificou-se a perda de retorno da mesma usando o VNA (*Vector Network Analyzer*), mostrado no gráfico 4.1. A antena apresentou uma largura de banda de 585 MHz (2,059 – 2,644 GHz) com o $s(1,1) = -28,58$ dB e frequência centra de 2,39 GHz.

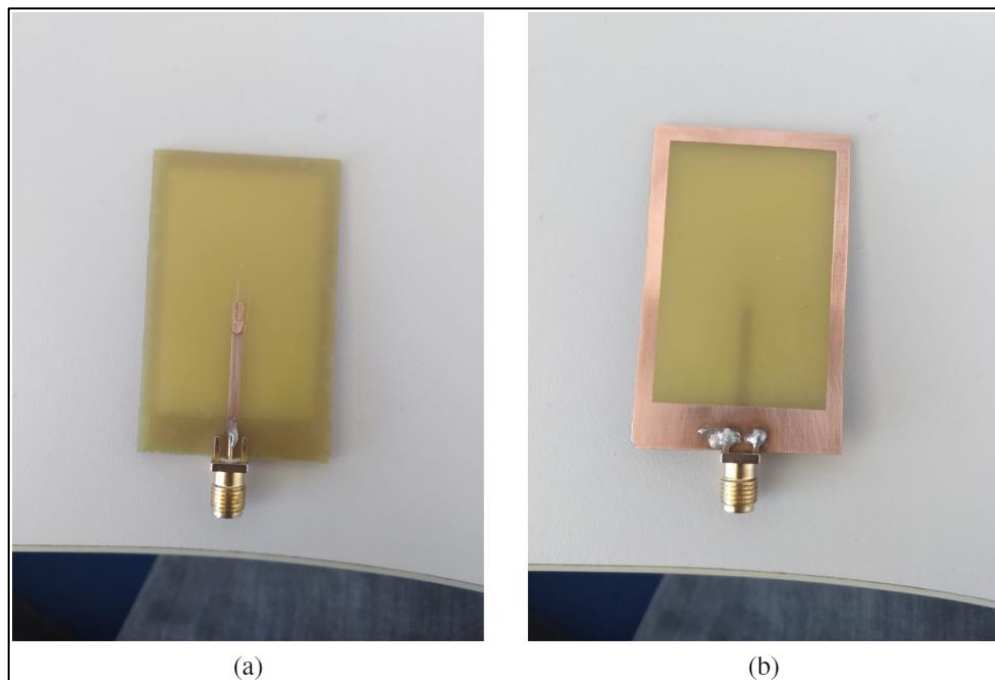


Figura 4.1: Antena fabricada. (a) Vista Superior, (b) Vista posterior.

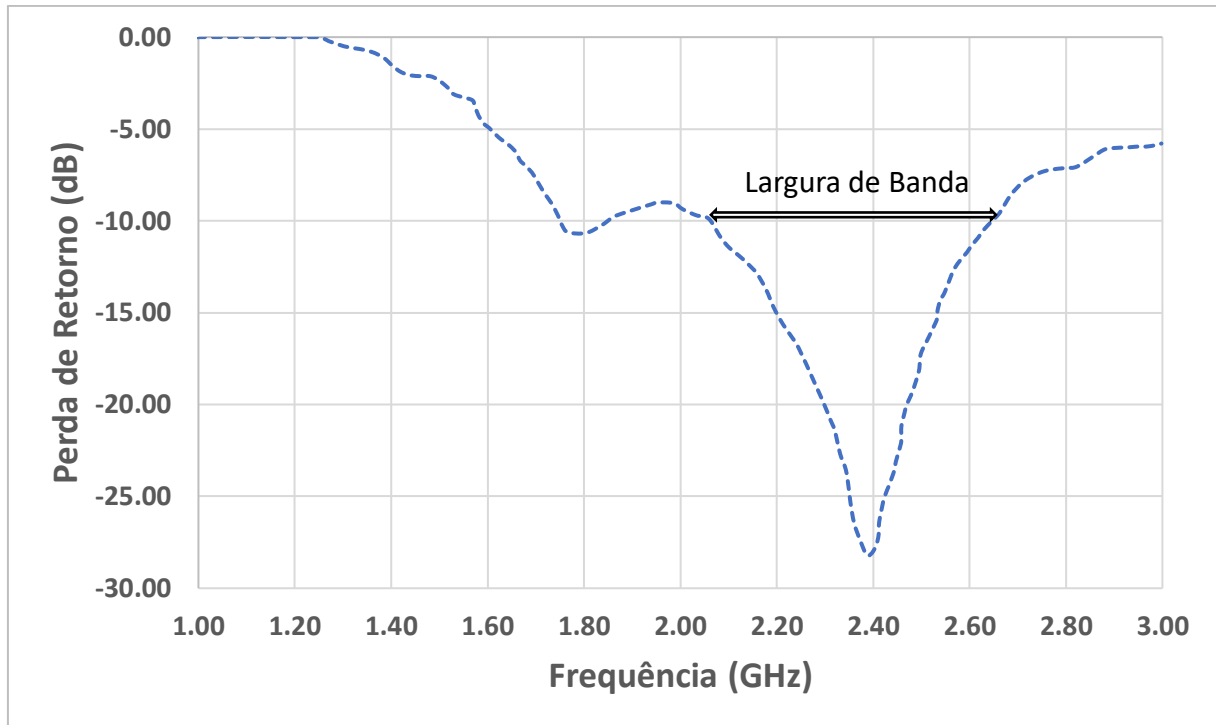


Gráfico 4.1: Parâmetro $s(1,1)$ da Antena via VNA.

Comparando com o resultado de simulação, verifica-se que a fabricação melhorou a perda de retorno da antena (de -27 dB para -28,5 dB), entretanto, a largura de banda diminuiu de 900 MHz para 585 MHz. O gráfico 4.2 exibe o comparativo entre os dois resultados.

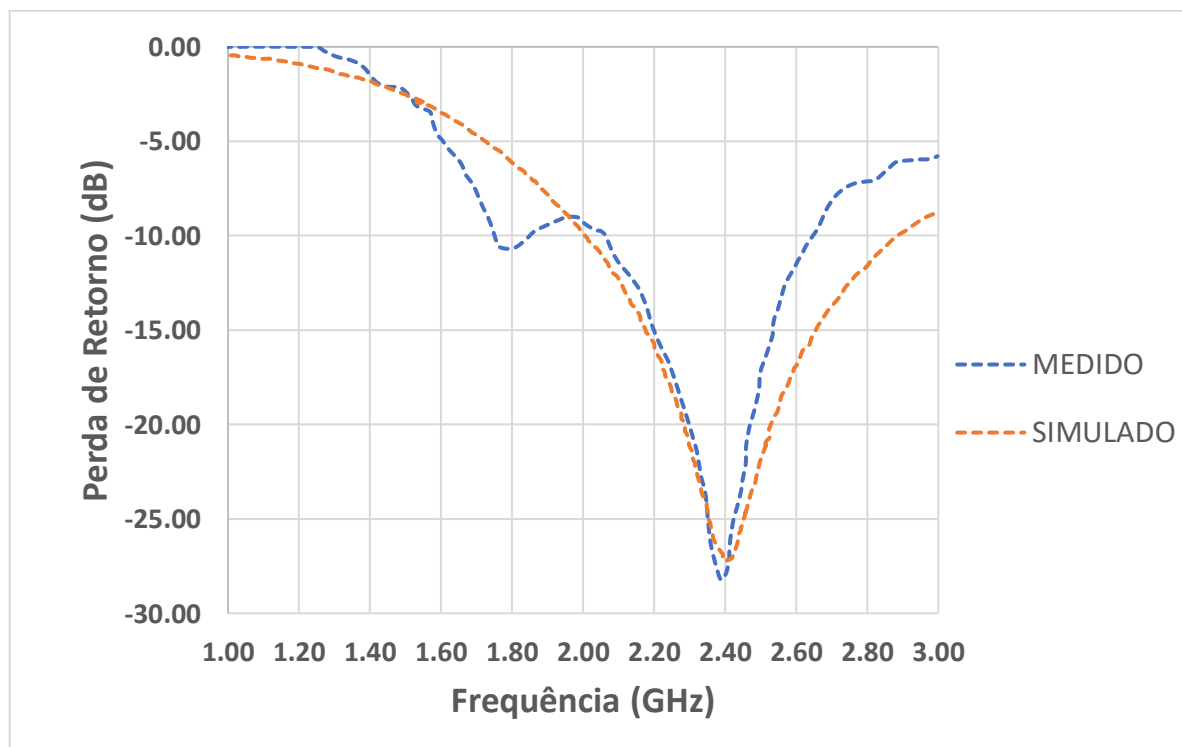


Gráfico 4.2: Comparação dos valores simulados e medidos da antena.

4.2. MEDIÇÕES RETIFICADOR DE MEIA ONDA

Como comentado, o circuito retificador de meia onda foi projetado para funcionar na frequência de 2,4 GHz. Foram usados os mesmos procedimentos de fabricação da antena e seu protótipo está exibido na figura 4.2.

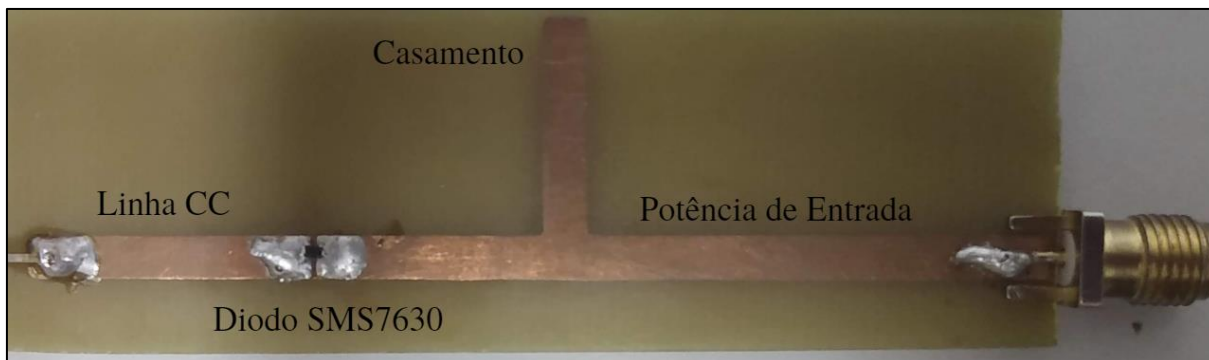


Figura 4.2: Protótipo Retificador de Meia onda.

O circuito mostrou uma perda de retorno melhor que a simulada, entretanto houve um pequeno deslocamento da sua frequência de ressonância. O gráfico 4.3 exibe a perda de retorno do retificador com base no VNA, possuindo uma perda de -17,61 dB na frequência de 2,35 GHz, com uma largura de banda de 39 MHz de (2,326 – 2,365 GHz). Já o gráfico 4.4, compara o simulado com o medido e nota-se a variação de frequência, sendo que a curva de 90° no casamento do circuito pode ter provocado aparecimento de capacitâncias e indutâncias parasitas, afetando diretamente no desempenho do circuito medido.

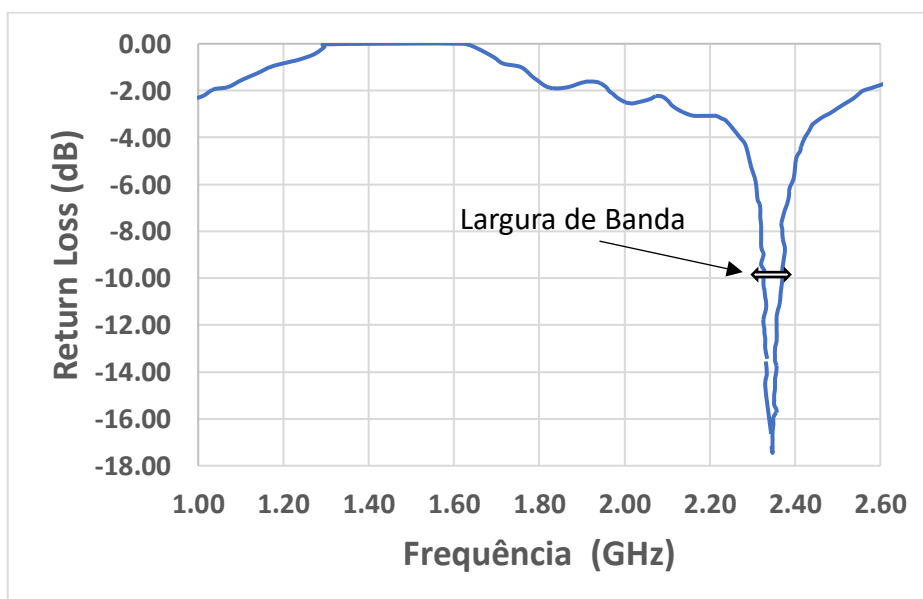


Gráfico 4.3: Perda de retorno retificador de meia onda via VNA.

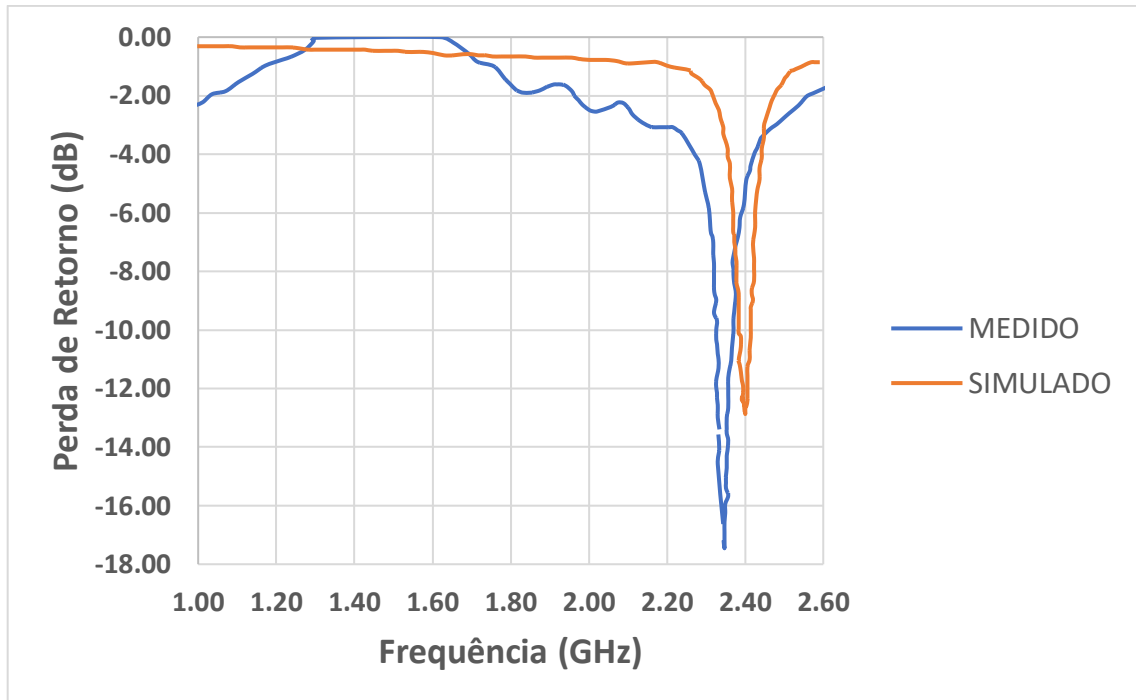


Gráfico 4.4: Comparativo dos valores da perda de retorno dos simulados e medidos do retificador de meia onda.

4.3. MEDIÇÕES RETIFICADOR DE ONDA COMPLETA

Foram realizados os mesmos procedimentos para o retificador de onda completa. O protótipo do circuito é exposto na figura 4.3.



Figura 4.3: Protótipo Retificador de Onda Completa.

Extraindo os dados experimentais desse circuito foi possível perceber que sua largura de banda foi 34 MHz (2,317 – 2,351GHz) com uma perda de -14,64 dB na frequência central de 2,35GHz, de acordo com o gráfico 4.5. Analogamente ao de meia onda, houve o mesmo

deslocamento de frequência, ocorrido pelo mesmo motivo, onde o gráfico 4.6, expressa o comparativo do simulado com o medido.

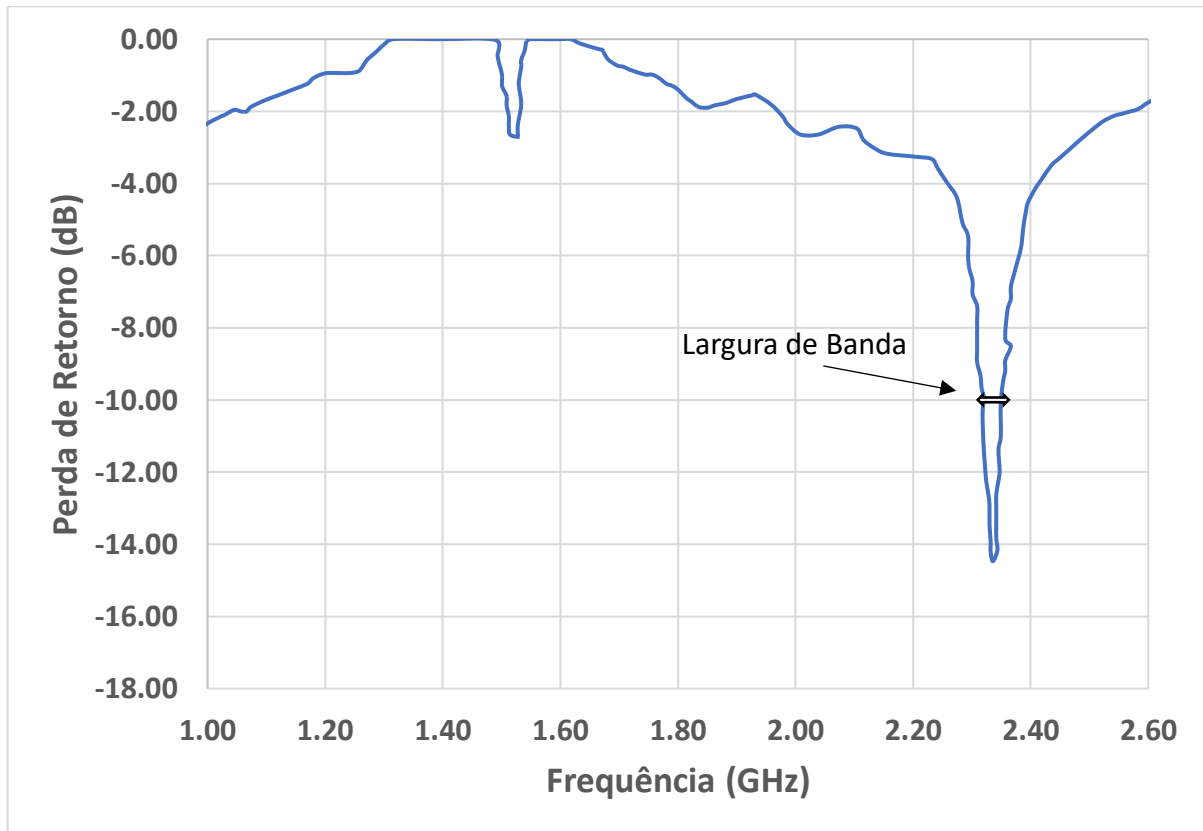


Gráfico 4.5: Perda de retorno do retificador de onda completa.

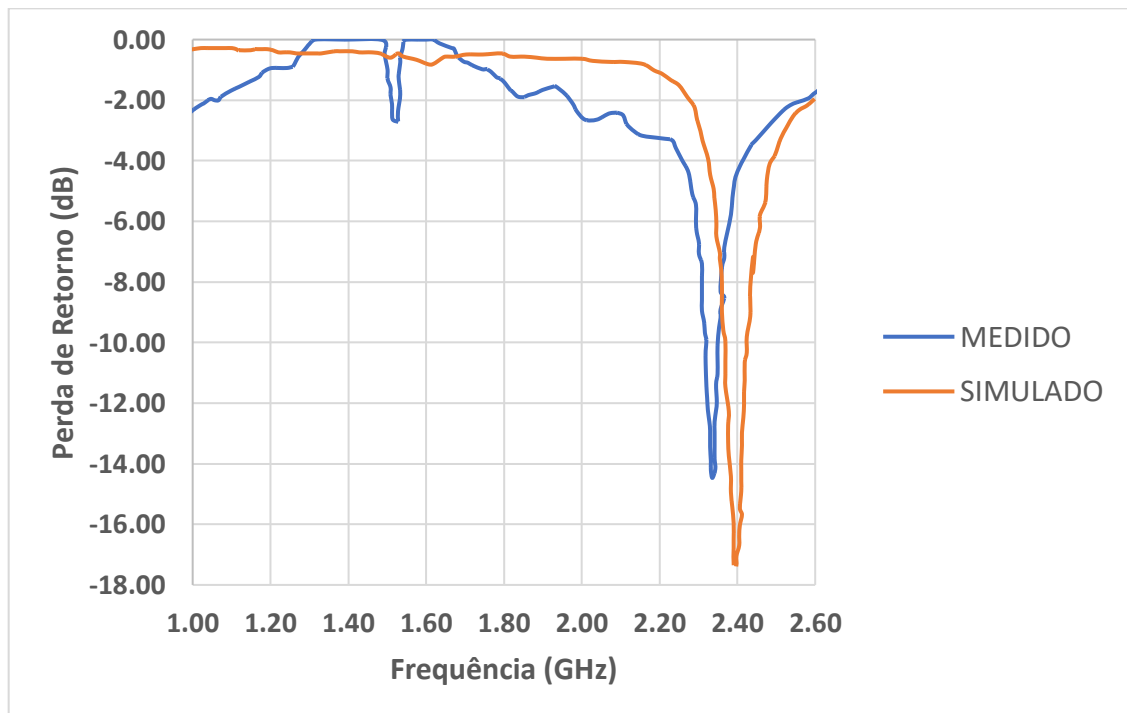


Gráfico 4.6: Comparativo dos valores da perda de retorno dos simulados e medidos do retificador de onda completa.

4.4. RECTENNA

Após os testes individuais de cada componente do circuito, foi avaliado o desempenho da *Rectenna* (retificador + antena), no qual o teste de performance fora aplicado para ambos retificadores. Essa seção mostrará os dois testes para medição das *rectennas*, bem como seu comportamento em uma situação ideal (sem alimentar uma carga) e real (alimentando uma carga). A figura 4.4 exibe o protótipo da *Rectenna* de onda completa.

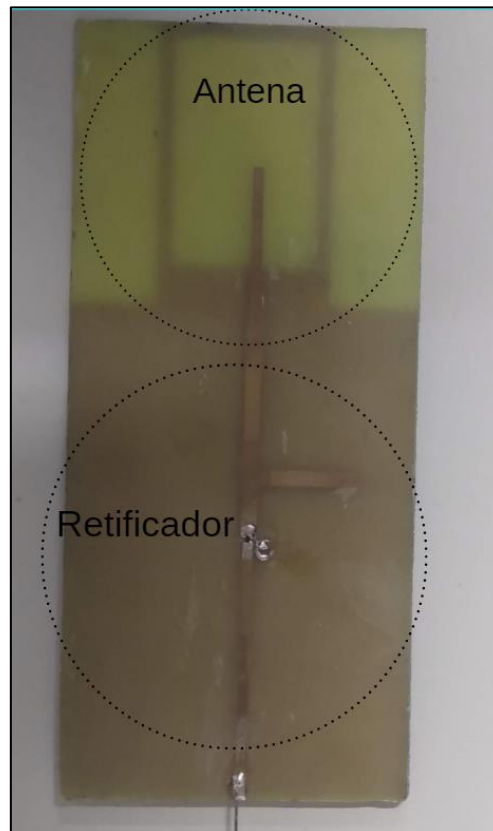


Figura 4.4: Protótipo *Rectenna* de Onda Completa.

Para obtenção dos resultados das *rectennas*, foram realizados dois testes. No primeiro, utilizou-se o *setup* das figuras 4.5 e 4.6. A configuração mostrada contém uma antena transmissora (sintonizada em 2,4 GHz) ligada ao gerador de sinal de RF para geração do sinal na frequência de 2,4GHz, representando o ramo de geração. Já na recepção do sinal, possui a antena projetada ligada aos atenuadores (-3, -6 e -10 dB), para limitar a potência de chegada, juntamente com o amplificador ZX60-V63+ (com ganho de potência de 20 dB) e por fim, os retificadores.

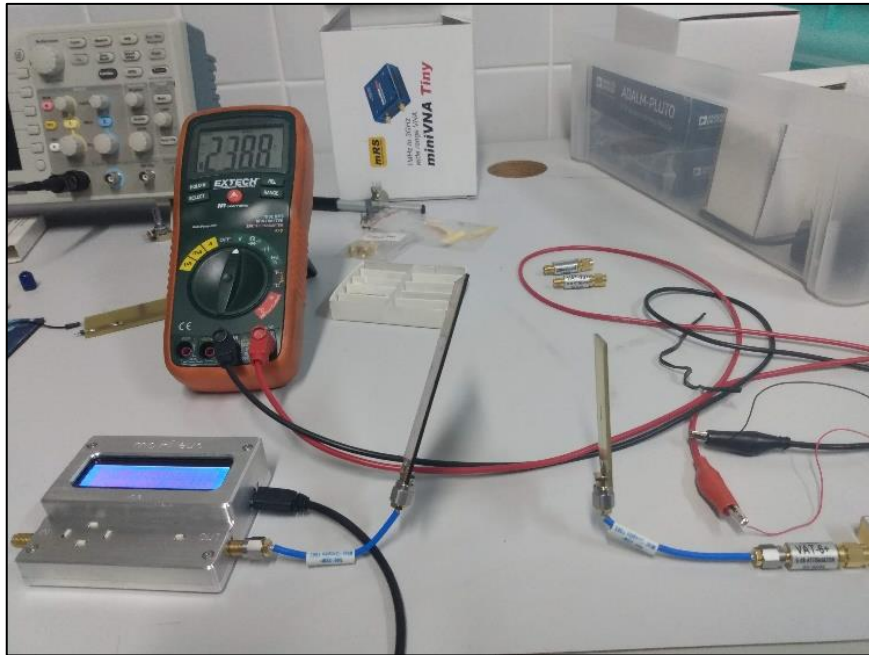


Figura 4.5: Primeiro *setup* usado para medição das *Rectennas*.

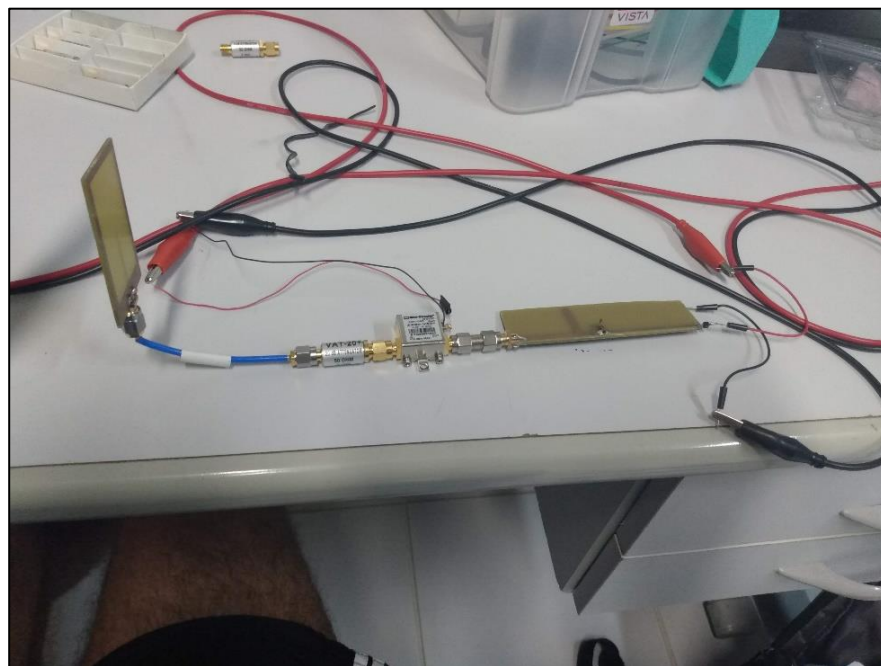


Figura 4.6: Recepção do sinal de RF.

Através desse arranjo foi possível verificar a transmissão de potência sem fio das *rectennas* com base na variação da potência de entrada e nas distâncias entre as antenas. Os gráficos 4.7 e 4.8, retratam os resultados coletados, respectivamente, das *rectennas* de meia onda e onda completa, que analisando-os nota-se que a perda no espaço livre é muito grande em função das pequenas distâncias percorridas, por isso foi usado um amplificador.

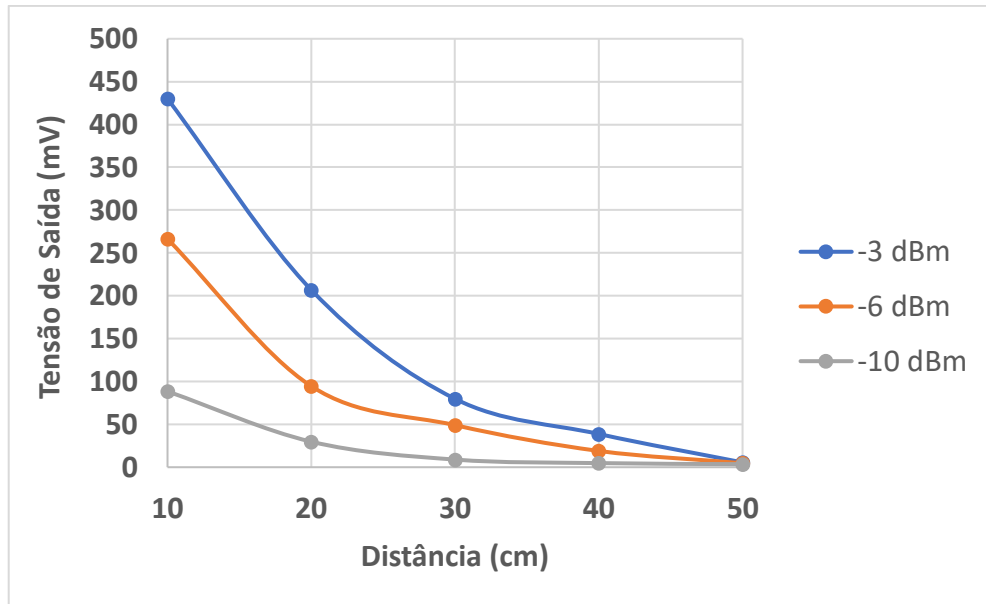


Gráfico 4.7: Saída *Rectenna* de Meia onda com variação da distância.

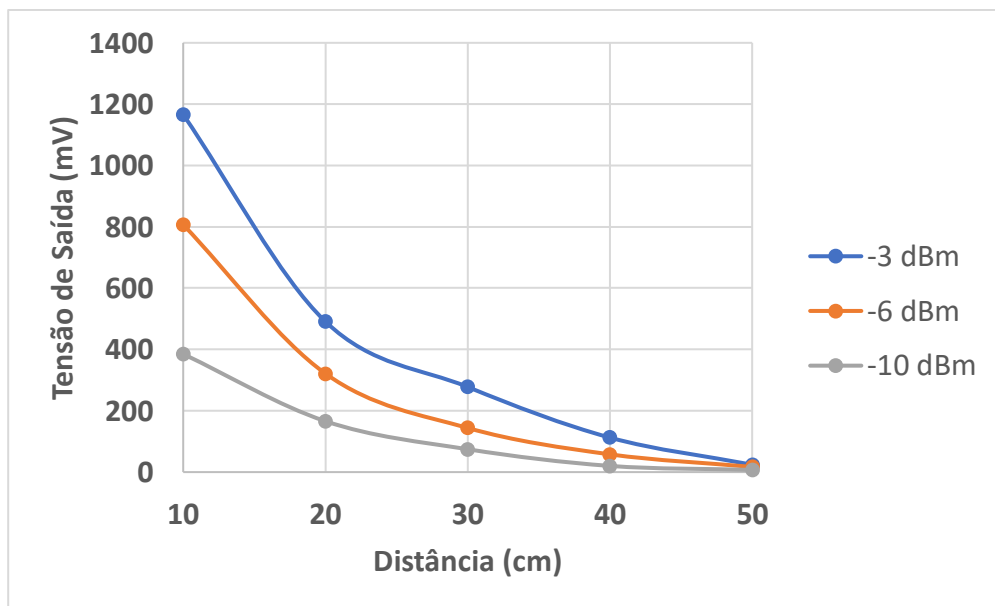


Gráfico 4.8: Saída *Rectenna* de Onda completa com variação da distância.

Segundo (RIBEIRO, 2014), a equação da perda no espaço livre é dada pela equação (5), cujo L é a perda em dB, f é a frequência de transmissão do sistema e d é a distância entre as antenas. A tabela 1 mostra a perda no espaço livre com base nas distâncias medidas.

$$L = 32,44 + 20 \log f + 20 \log d \quad (5)$$

Tabela 1: Perda no espaço livre das antenas.

Distância (cm)	Perda (dB)
10	140
20	146
30	150
40	152
50	154

No segundo teste, usou-se atenuadores de -3, -6, -10, -20 e -30 dB, aplicando uma potência de entrada de 0 dBm pelo gerador de sinal da *Outernet (moRFeus)*, a fim de extrair a máxima retificação do sinal sem perda no espaço livre, por meio desse *setup*, gerou-se um sinal com potências de -3, -6, -10, -20 e -30 dBm, exposto na figura 4.7. A execução desse teste ocorreu em duas etapas, uma com o teste sem carga e uma com carga, explicados nas seções a seguir.

Figura 4.7: Segundo *setup* usado para medição das *rectennas*.

4.4.1. RECTENNA SEM CARGA

Primeiramente, avaliou-se a performance do circuito sem acoplar uma carga a fim de extrair o maior valor de conversão RF-DC do circuito variando a potência de entrada de -3 à -30 dB. Por meio do gráfico 4.9, verifica-se que até a potência de -9 dBm, os retificadores apresentam praticamente a mesma característica. Entretanto, conforme vai aumentando a potência a conversão se torna mais efetiva na *rectenna* de meia onda.

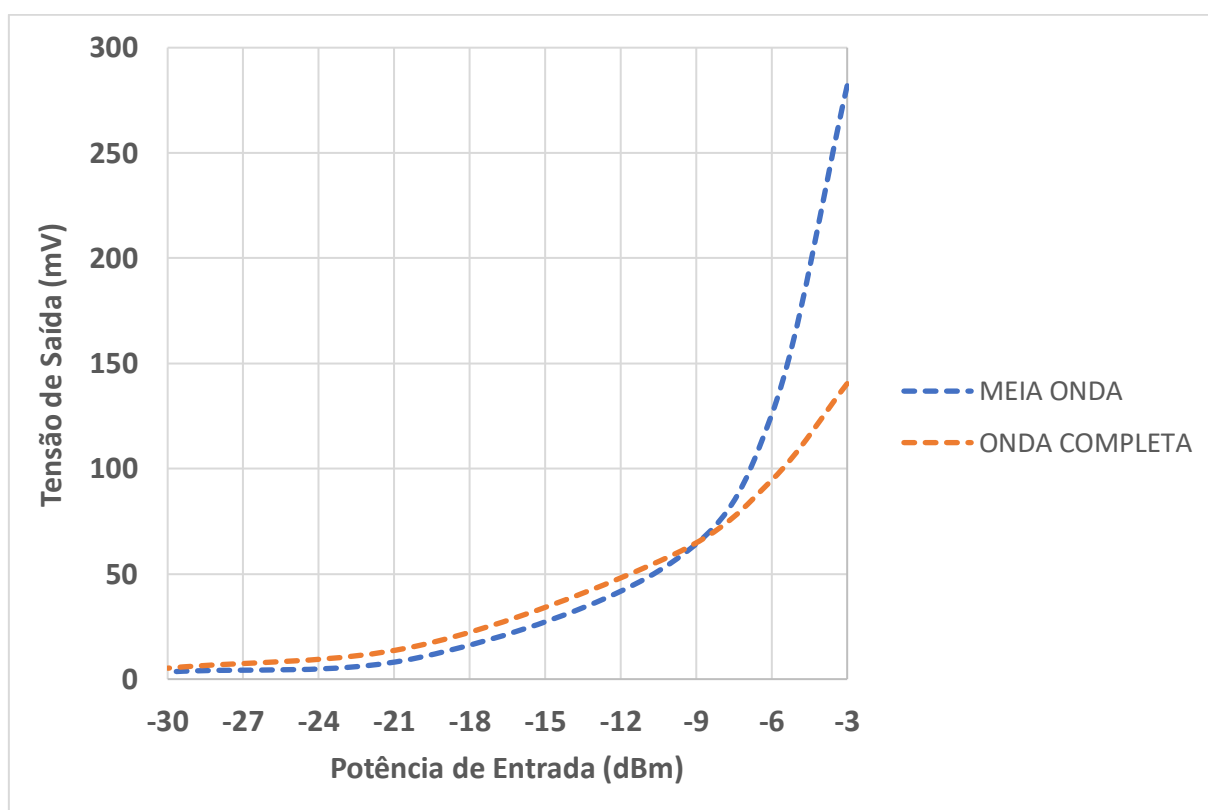


Gráfico 4.9: Conversão RF-DC das *rectennas* com base na variação de potência de entrada, realizada na frequência de 2,4 GHz.

Segundamente, foi verificado a conversão do circuito com base na variação de frequência, no qual foi selecionado um range de 1 – 2,6 GHz.

Analisando os resultados nota-se que, para a *rectenna* de meia onda (gráfico 4.10), apresenta um desempenho considerável no range de 2,3 – 2,4 GHz, em torno de sua frequência de ressonância projetada. É perceptível também, conforme o sinal se afasta de sua largura de banda, o sinal convertido vai diminuindo, o que é esperado. Esse sistema converte até 300 mV.

Já para a *rectenna* de onda completa (gráfico 4.11) demonstra uma eficiência de conversão quando comparado com de meia onda. Contudo, o circuito funciona na frequência projetada. Essa configuração converte até 150 mV.

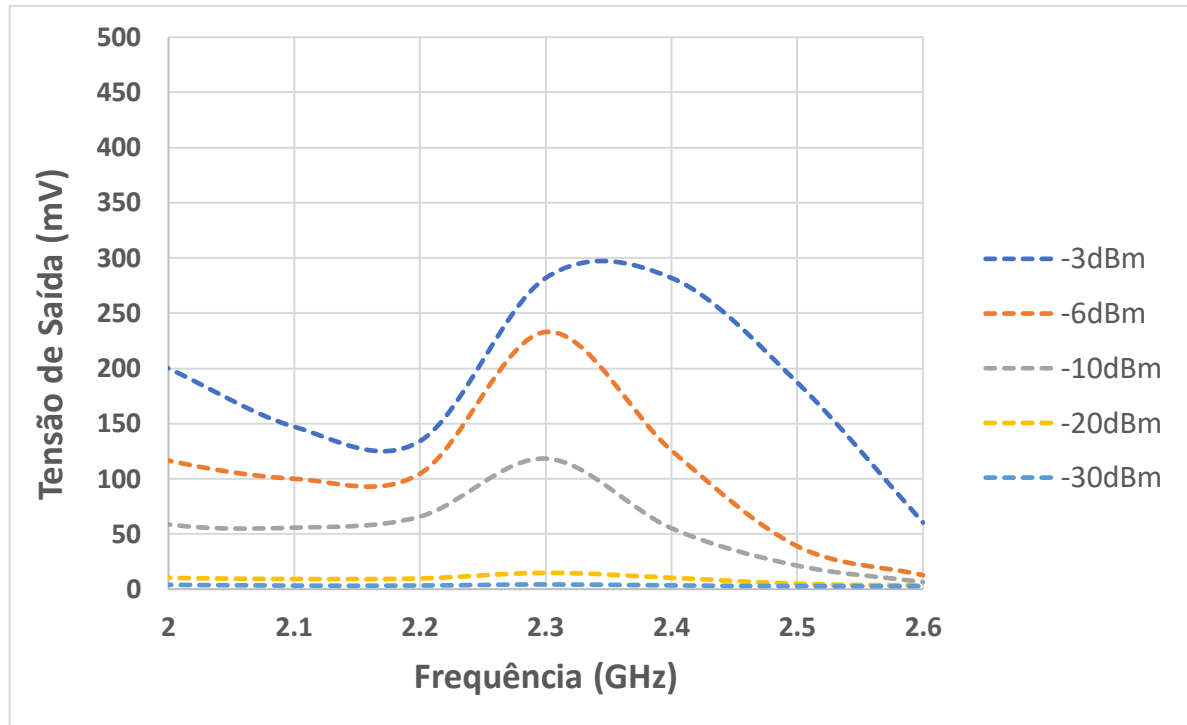


Gráfico 4.10: Tensão de saída com variação da frequência da *rectenna* de meia onda.

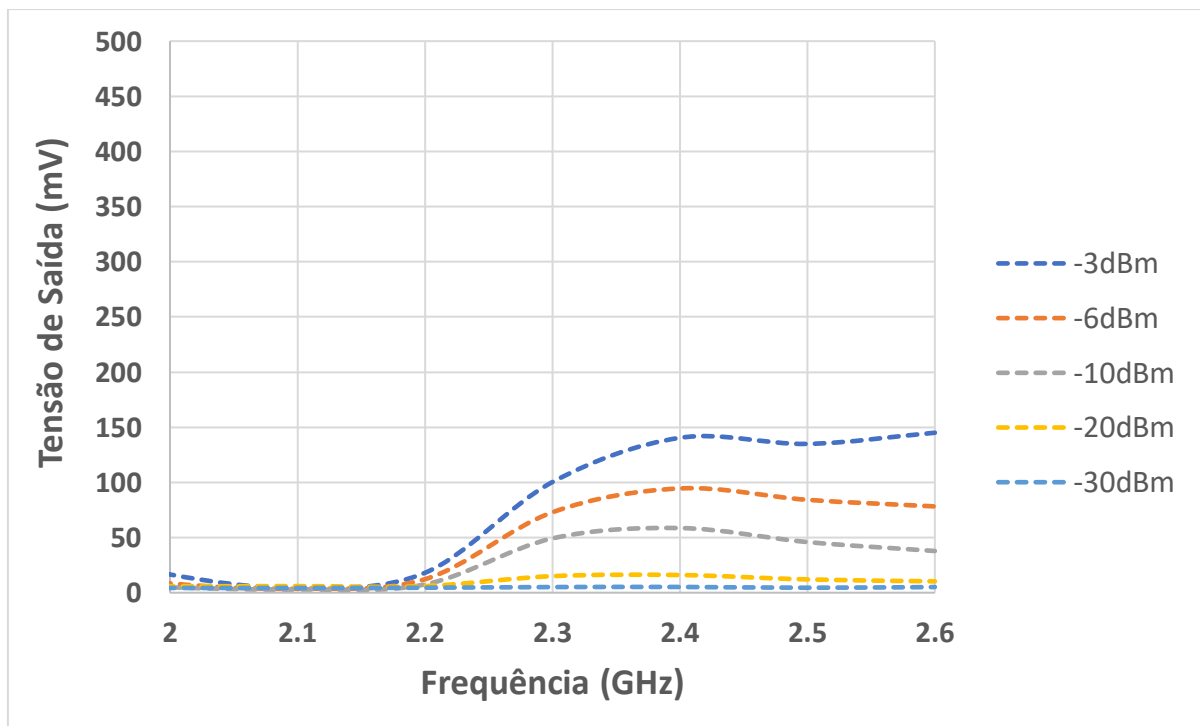


Gráfico 4.11: Tensão de saída com variação da frequência da *rectenna* de onda completa.

4.4.2. RECTENNA COM CARGA

Nessa etapa foi acoplado um potenciômetro na saída das *rectennas* a fim de obter a sua resposta com variação da carga. Para isso, utilizou-se um potenciômetro de $50k\Omega$, onde nele foi demarcado 6 posições, representando 6 resistências diferentes, mostrada na figura 4.8. A tabela 2 mostra os valores das resistências, bem como suas posições.

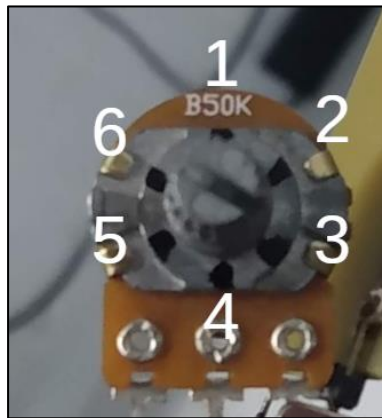


Figura 4.8: Posições do potenciômetro.

Tabela 2: Resistência do potenciômetro com base nas posições.

Posição	Resistência (Ω)
1	0
2	9200
3	19600
4	29000
5	39000
6	46000

Para realização das medições dessa etapa, verificou-se a tensão na carga com variação de sua resistência e da sua potência recebida (-3, -6, -10, -20 e -30 dBm), utilizando o *setup* mostrado na figura 4.9.

Os gráficos 4.12 e 4.13 exibem os resultados das medições comentadas anteriormente. As curvas apresentadas nas respostas são bastante semelhantes, onde conforme vai aumentando a demanda na carga mais energia vai sendo transmitida para a mesma.



Figura 4.9: Configuração usada na medição das *rectennas* com carga.

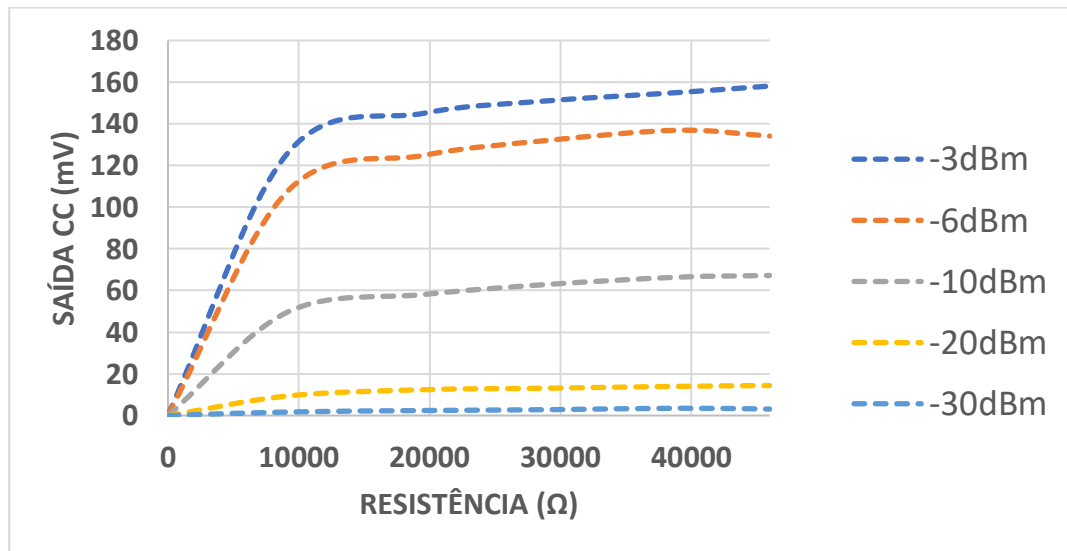


Gráfico 4.12: Tensão de saída com variação da carga na *rectenna* de meia onda.

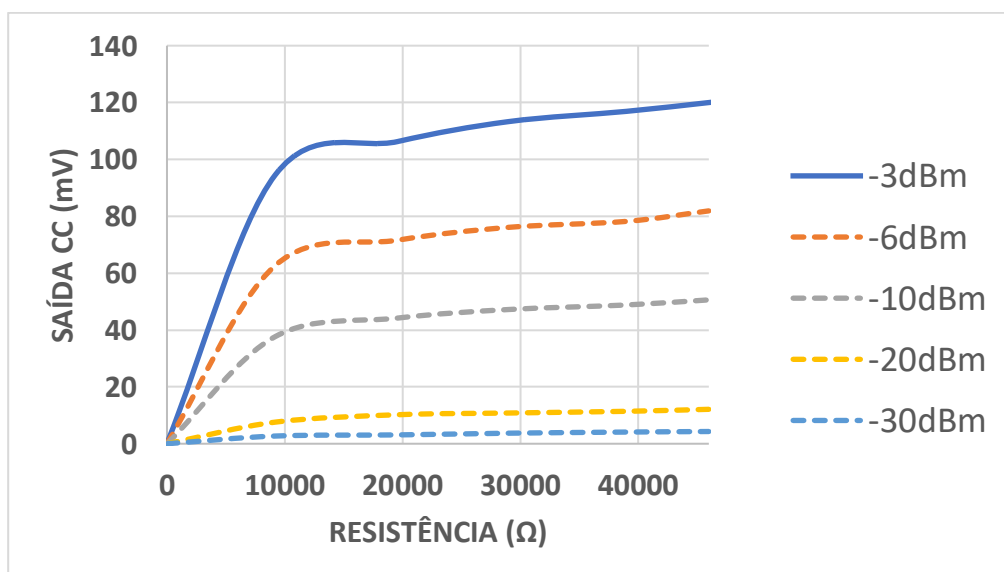


Gráfico 4.13: Tensão de saída com variação da carga na *rectenna* de onda completa.

5 CONCLUSÃO

O desenvolvimento do presente estudo possibilitou primeiramente em um levantamento bibliográfico sobre tipos de transmissão de potência sem fio (WPT), formas sistema de coleta de energia sem fio (WEH) e as estruturas de *rectennas* (circuitos que compõe retificador e antena). As *rectennas* normalmente conhecidas no estado da arte são a *multiband* e a *broadband*. A primeira conhecida por converter um sinal de RF em DC em mais de uma faixa de frequência, já a segunda converte apenas uma banda de frequência.

Neste trabalho foi escolhida uma *rectenna* que funciona na faixa de frequência do sinal Wi-Fi (2,4 GHz) para dispositivos de baixo consumo. A antena projetada para o circuito é do tipo monopolar, devido a sua facilidade de resposta em frequência, possuindo uma perda de retorno aproximadamente -28 dB.

Já os retificadores foram usados dois tipos, o de meia onda e o de onda completa. O primeiro apresentou uma perda de retorno de -17dB e o segundo com -14dB, ambos funcionais na frequência de 2,4 GHz. O retificador de meia onda apresentou uma conversão de até 300 mV com a variação de potência de -30dBm à -3dBm, já o de onda completa converteu até 150 mV na mesma variação de potência.

Através dos resultados obtidos notou-se que o objetivo inicial fora concluído, uma vez que era desenvolver um dispositivo que converta um sinal de RF em um sinal contínuo, sendo realizado um levantamento teórico das topologias usuais, simulações dos circuitos estudados e fabricação e medição dos mesmos.

Para trabalhos futuros, seria aprimorar os circuitos desenvolvidos, utilizando novas formas de retificação do sinal, como por exemplo ponte de Greatz ou retificador de múltiplos estágios, Dickson/Greinacher (SOYATA,2017). Melhorar também, o ganho da antena receptora e o casamento do circuito, diminuindo as perdas por indutâncias e capacitâncias parasitas.

REFERÊNCIAS

- BALANIS, C. A. *Advanced Engineering Electromagnetics*, 2nd edition, Wiley, 2012.
- BANDEIRA, Kaio Márcio da Costa. **Antena de Microfita Multibanda para Aplicações em Sistemas de Comunicação Sem Fio Padrões IEEE 802.11ah e IEEE 802.11ax**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica e Computação) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal - RN, 2018.
- HANNACHI, C.; BOUMAIZA, S.; TATU, S.O. *A Highly Sensitive Broadband Rectenna for Low Power Millimeter-wave Energy Harvesting Applications*, 2018 IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTC), doi: 10.1109/WPT.2018.8639130, 2018.
- IBRAHIM, F.N.; JAMAIL, N.A.M.; OTHMAN, N.A. *Development of Wireless Electricity Transmission Through Resonant Coupling*. 4th IET Clean Energy and Technology Conference (CEAT 2016). Institution of Engineering and Technology. doi:10.1049/cp.2016.1290. ISBN 9781785612381.
- KUHN, Véronique; LAHUEC, Cyril; SEGUIN, Fabrice; PERSON, Christian. *A Multi-Band Stacked RF Energy Harvester With RF-to-DC Efficiency Up to 84%*, IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol. 63, no. 5, pp. 1768–1778, May 2015.
- PACHECO, Fabiana. **Energias Renováveis: breves conceitos**. Economia em Destaque, pp 04-11, 2006.
- RIBEIRO, J. A. J. **Propagação das ondas eletromagnéticas – Princípios e aplicações**. 1ª edição, Editora Érica, 2004.
- SINGH, B.; GHOSH, S.; CHAKRABARTI, G.S. *Design Optimization and Implementation of Multiband Rectenna for Efficient Radio Frequency Energy Harvesting*, IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol. 63, no. 5, pp. 1768–1778, May 2015.
- SONG, Chaoyun; HUANG, Yi; ZHOU, Jiafeng; CARTER, Paul. *Recent Advances in Broadband Rectennas for Wireless Power Transfer and Ambient RF Energy Harvesting*, in 2017 11th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP), UK, 2017.

SOYATA, Tolga; COPELAND, Lucian; HEINZELMAN, Wendi. ***RF Energy Harvesting for Embedded Systems: A Survey of Tradeoffs and Methodology***, *IEEE Circuits and Systems Magazine*, pp 23-57, 2017.

ZHANG, Hongxian; ZHU, Xinen. ***A Broadband High Efficiency Rectifier for Ambient RF Energy Harvesting***, 2014 IEEE MTT-s *International Microwave Symposium.*, Tampa, FL, jun. 2014, pp.1-3.