

## CONVERSÃO DE ENERGIA ELETROMAGNÉTICA DISPONÍVEL NO ESPAÇO LIVRE PARA CARREGAMENTO DE BATERIAS E USO EM DISPOSITIVOS ELETRÔNICOS.

Eduardo Fluhmann Filho e Edson Tafeli Carneiro dos Santos.

**Apoio: PIBIC Mackenzie**

### RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo apresentar um modelo funcional de “*rectenna*”, conceito que vem da união das palavras em inglês *rectifier* e *antenna* que baseia-se na captura de sinais RF através de uma antena e um retificador transformando a energia eletromagnética capturada em tensão DC. Explicaremos seu funcionamento e as dificuldades encontradas, dentre elas podemos citar as perdas devido ao material FR-4, que absorveu grande parte da energia e se mostrou ineficiente para construção de antenas em alta frequência, sendo caracterizado obtendo-se a constante dielétrica e a tangente de perdas. Além disso, obtivemos problemas com a retificação onde o retificador construído não foi capaz de trabalhar na frequência desejada, fazendo com que outro modelo fosse projetado e simulado. O modelo final é formado por uma antena LPDA, produzida com isopor como material de sustentação para evitar as perdas, com alta diretividade, atuando na faixa de frequência de 2,45 GHz e com ganho aproximado de 9 dB, calculada com o auxílio do *software* MATLAB e simulada com o *software* CST. Esta antena poderá ser conectada à um retificador multiplicador baseado no modelo do tipo Dickson simulado através do *software* ADS em que obtivemos uma tensão final de 5 V a uma distância de 0,13m. Com isso a “*rectenna*” poderá ser utilizado no carregamento de dispositivos eletrônicos e supercapacitores, principalmente nos dias de hoje em que existem muitas transmissões em RF onde a energia é dissipada e perdida. Futuramente este retificador poderá ser construído e modificado para atingir uma melhor eficiência.

**Palavras-chave:** *Rectenna*, LPDA, 2,45GHz

### ABSTRACT

The present work aims to present a functional model of "rectenna", concept that comes from the union of the English words rectifier and antenna that is based on the capture of RF signals through an antenna and rectifier transforming the captured electromagnetic energy into voltage. A.D. We will explain its operation and the difficulties encountered, among which we can mention the losses due to the material FR-4, which absorbed a large part of the energy and proved inefficient for building high frequency antennas, being characterized by obtaining the dielectric constant and the tangent. of losses. In addition, we had problems with grinding where the built rectifier was not able to work at the desired frequency, causing another model to be designed and simulated. The final model is formed by an LPDA antenna, produced with

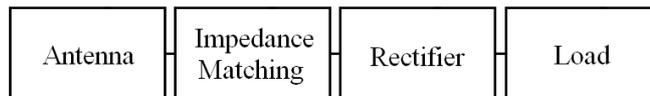
Styrofoam as a support material to avoid losses, with high directivity, operating in the frequency range of 2.45 GHz and with approximate gain of 9 dB, calculated with the aid of the software. MATLAB is simulated with CST software. This antenna could be connected to a multiplier rectifier based on the simulated Dickson type model through ADS software where we obtained a final voltage of 5 V at a distance of 0.13m. With this "rectenna" can be used in charging electronic devices and supercapacitors, especially nowadays when there are many RF transmissions where energy is dissipated and lost. In the future this rectifier may be built and modified to achieve better efficiency.

**Keywords:** *Rectenna*, LPDA, 2,45GHz

## 1. INTRODUÇÃO

No início do século XX Nikola Tesla (1905) responsável pela primeira transmissão sem fio publicava um artigo em que dizia ser possível a transmissão de energia elétrica pelo ar. Hoje, mais de um século depois podemos comprovar que ele estava certo. Com o advento da transmissão por ondas de rádio frequência, como por exemplo a Televisão Digital(400-700MHz), GSM900 (900MHz), GPS (1,52GHz) Wi-Fi (2,4GHz e 5GHz), etc. uma grande quantidade de energia eletromagnética está disponível no ar onde grande parte não é utilizada. Com o conceito denominado “*rectenna*” podemos capturar esta energia e reutilizá-la através do carregamento de dispositivos eletrônicos e de supercapacitores que permitem armazenar esta energia.

Figura 1: Diagrama de uma “*rectenna*”.



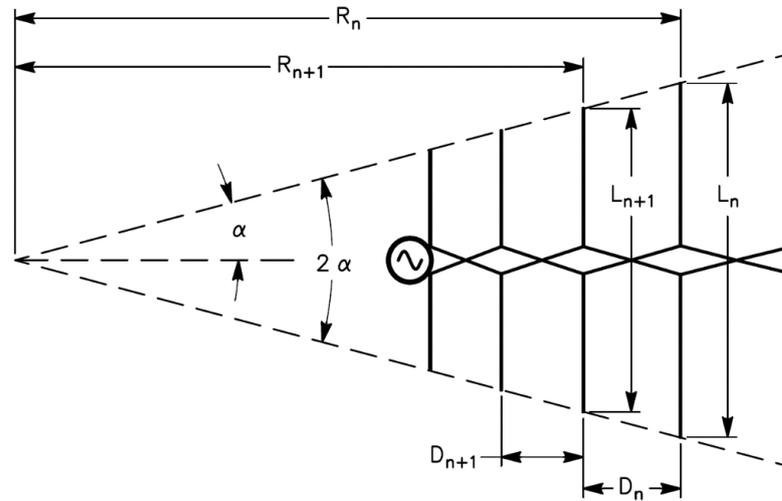
Fonte: autoria própria.

Alguns modelos de antenas foram propostos especificamente para cada frequência, como por exemplo em 800MHz – 2GHz (KUMAR; ARRAWATIA; KUMAR, 2019), 5,8GHz (J. O. MCSPADDEN; L. FAN; K. CHANG, 1998), 2,45GHz (MD. DIN et al., 2014) com seu respectivo retificador. Este artigo propõe um modelo de antena designado para a frequência de 2,45GHz, normalmente utilizada no *Wi-fi*, possibilitando um fácil acesso a esse sinal. Partindo do modelo conhecido por “*Logarithmic Periodic Dipole Antenna Calculator*” (LPDA), a antena proposta foi simulada através do *software* CST STUDIO SUITE (2016), buscando atingir uma estrutura ótima que atendesse a necessidade.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

Balanis (2005) em seu trabalho apresenta o modelo de antena conhecido como LPDA. Esta modelo possui alta diretividade acarretando em um alto valor de ganho. Para a produção de uma antena funcional algumas características devem definidas previamente, sendo elas a razão geométrica ( $\tau$ ) e o fator de espaçamento ( $\sigma$ ) ótimo.

Figura 2: Estrutura de uma LPDA. A distancia dos elementos é medida a partir do elemento de menor tamanho, sendo o espaçamento entre cada elemento proporcional ao fator de espaçamento, e o tamanho é proporcional a razão geométrica.



Fonte: (R. DEAN STRAW, 2007)

A partir disso, os demais parâmetros são obtidos através das equações seguintes;

Ângulo de abertura dos elementos;

$$\alpha = \tan^{-1} \left[ \frac{1 - \tau}{4\sigma} \right] \quad (1)$$

Largura de banda da região ativa;

$$B_{ar} = 1,1 + 7,7(-\tau)^2 \cot \alpha \quad (2)$$

Largura de banda do projeto, em que **B** é a largura de banda desejada encontrada através da Equação (4);

$$B_s = B B_{ar} \quad (3)$$

$$B = \frac{f_{\max}}{f_{\min}} \quad (4)$$

Comprimento total da estrutura;

$$L = \frac{\lambda_{\max}}{4} \left( 1 - \frac{1}{B_s} \right) \quad (5)$$

Número de elementos da estrutura;

$$N = 1 + \frac{\ln(B_s)}{\ln\left(\frac{1}{\tau}\right)} \quad (6)$$

Impedância característica média dos elementos, em que  $l_n$  era o tamanho do elemento e  $d_n$  o diâmetro. Para efeito de cálculo o diâmetro dos elementos é mantido o mesmo, por ser difícil a construção de diferentes tamanhos de elementos;

$$Z_a = 120 \left[ \ln\left(\frac{l_n}{d_n}\right) - 2,25 \right] \quad (7)$$

Espaçamento centro a centro da estrutura;

$$s = d \cosh\left(\frac{Z_0}{120}\right) \quad (8)$$

Um dos parâmetros importantes de uma antena é o ganho. O ganho é definido por Ribeiro (2008) como o produto entre a densidade máxima e a densidade média de potência. Através da equação de transmissão de Friis (1946) podemos encontrar o ganho de duas antenas iguais utilizando a expressão 9:

$$A = \frac{P_T}{P_R} = \frac{1}{G_T G_R} \left( \frac{4\pi f r}{c} \right)^2 \quad (9)$$

Onde;

- A – Atenuação.
- $P_T$  – Potencia transmitida.
- $P_R$  – Potencia recebida.
- $G_T$  – Ganho da antena de transmissão.
- $G_R$  – Ganho da antena de recepção.
- f – Frequência.
- r – Distância entre antenas.
- c – Velocidade da luz no vácuo.

Considerando que as antenas são idênticas, os ganhos serão parecidos. Rearranjando e desenvolvendo os elementos obtemos a equação 10:

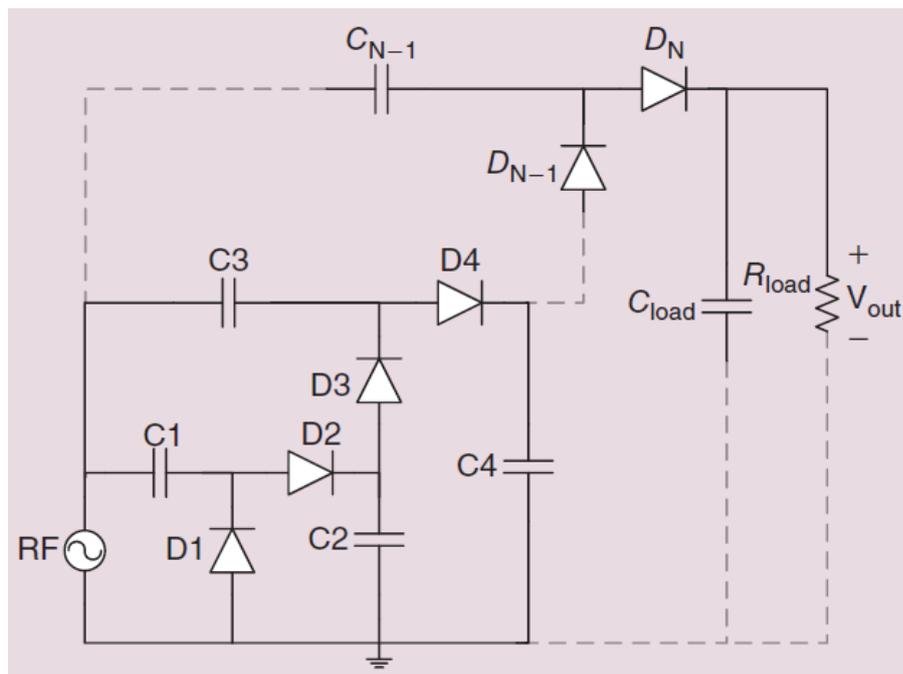
$$G = \frac{92,44 + 20 \log f + 20 \log r - A}{2} \quad (10)$$

Buscando uma alta eficiência do sistema, seguiu-se o princípio da máxima energia transferida descrito por Sadiku (2012). Se a impedância característica é diferente da impedância de carga dizemos que a carga está descasada, isso faz com que parte da energia

transmitida seja refletida. Para evitar este problema e permitir a máxima transferência, é necessário o casamento das impedâncias através de linhas de transmissão que levarão, neste caso, a energia até o retificador.

O retificador é parte fundamental do conjunto, é dele que será coletada a energia transformada em tensão contínua. Como Vegeta e Durin (2014) nos mostram, existem vários tipos de retificadores, dentre eles encontramos o retificador multiplicador de Dickson (1976) observado na Figura 3. Este modelo consiste em uma cascata de diodos responsáveis por retificar a tensão alternada recebida e multiplicá-la. Quanto mais diodos em cascata, maior a multiplicação da tensão.

Figura 3: Retificador e multiplicador de tensão Dickson.



Fonte:(VALENTA; DURGIN, 2014)

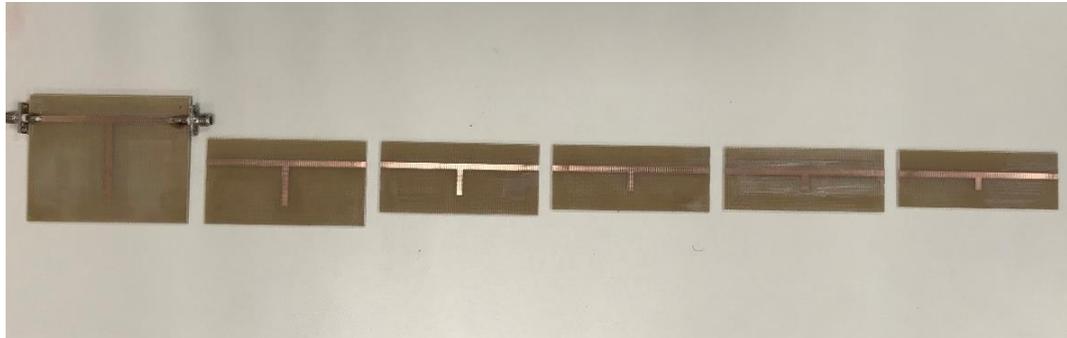
### 3. METODOLOGIA

#### 3.1. CARACTERIZAÇÃO DO DIELÉTRICO

Para a construção da antena utilizamos uma placa de FR-4 com espessura do cobre de 0,015mm e dielétrico de aproximadamente 1,628mm, o qual foi feita a caracterização em algumas frequências no intervalo entre 1-5GHz. Utilizando o *software* CST, foram produzidas algumas amostras exibidas na Figura 4, em que a geometria produzida teve o tamanho de  $\lambda/(4\epsilon_r)$ , ressoando na frequência específica. Após a produção, foram realizadas as medidas do S21 com o *vector network analyzer* (VNA), mostrado na Figura 5.

Através da ferramenta de *parameter sweep* do software CST foi feita a aproximação da constante dielétrica relativa ( $\epsilon_r$ ) e a tangente de perdas ( $\tan \delta$ ) do material. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 1.

Figura 4: Amostras para caracterização do material FR-4 disponível.



Fonte: Autoria própria.

Figura 5: Setup para medição do parâmetro S21 das amostras.



Fonte: Autoria Própria.

Tabela 1: Constante dielétrica relativa e tangente de perda obtidas das amostras de caracterização.

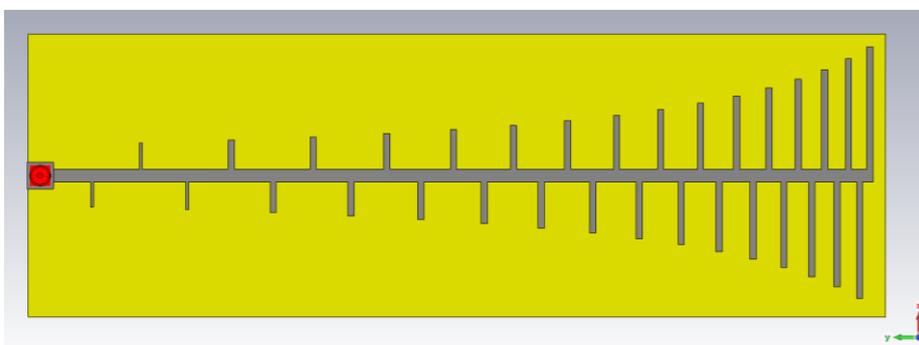
	1,0 GHz	2,0 GHz	3,0 GHz	4,0 GHz	5,0 GHz
$\epsilon_r$	4,56	4,41	4,56	4,38	4,31
$\tan \delta$	0,016	0,014	0,012	0,002	0,03

Fonte: Autoria Própria.

### 3.2. ANTENA

Através das equações propostas por Balanis e o *script* em MATLAB (2018) apresentado por Kale e Patil(2015) foi possível a simulação utilizando o *software* CST e a construção da LPDA, apresentada na Figura 6.

Figura 6: Antena produzida utilizando o material FR-4.



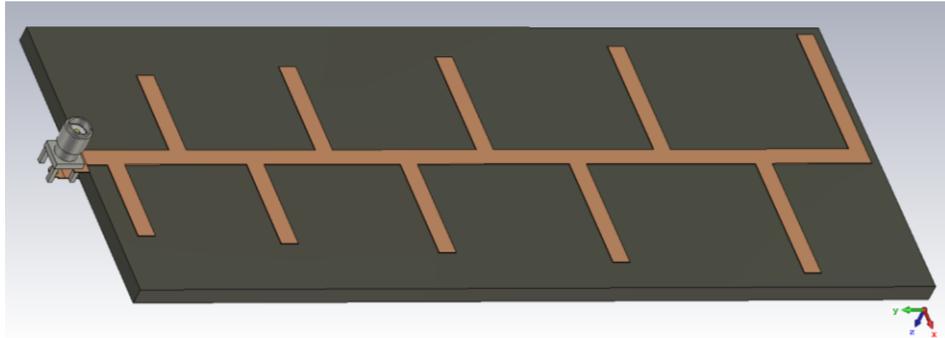
Fonte: Aatoria própria.

Após a comparação entre os resultados da simulação e das medidas, foi possível observar que o material utilizado (FR-4), por possuir uma tangente de perdas alta (maior que 0,002), absorve a energia recebida causando uma perda considerável. Para resolver este problema, outra antena foi calculada e produzida utilizando isopor como material de sustentação, como visto nas Figuras 7 e 8. O isopor é um material que possui características próximas ao do ar, tornando pequenas as perdas. O resultado dos cálculos dos parâmetros é apresentado na Tabela 2

Tabela 2: Parâmetros resultantes do cálculo da antena produzida com isopor.

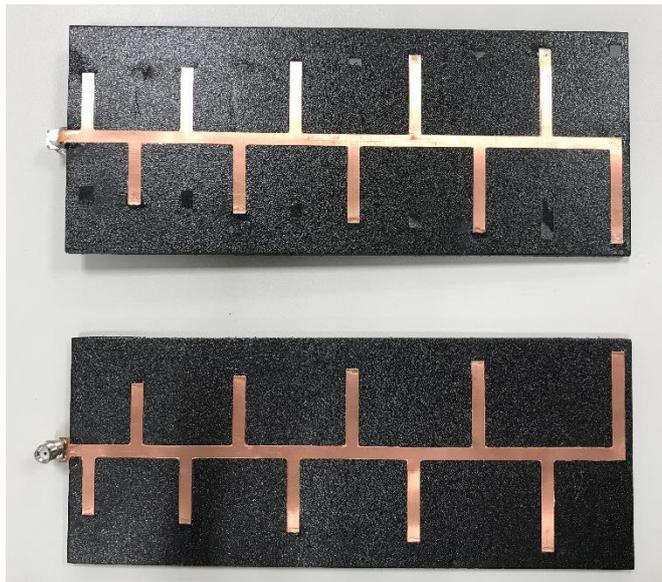
$\tau$	0,95
$\sigma$	0,17985
$f_{min}$	2300 MHz
$f_{max}$	2600 MHz
$\alpha$	3,9758°
$B$	1,13 MHz
$B_{ar}$	1,38 MHz
$B_s$	1,56 MHz
$N$	10
$Z_a$	84,39 Ohms
$s$	4,07 mm
$L$	167,4 mm

Figura 7: Antena construída no software CST.



Fonte: Autoria própria.

Figura 8: Antenas já produzidas. Duas antenas iguais para realizar as medições.



Fonte: Autoria própria.

Para a medição do parâmetro de espalhamento ( $S_{11}$ ) foi utilizado um VNA tornando possível a comparação entre o medido e simulado, verificando que foi alcançado um parâmetro de espalhamento menor que  $-10\text{dB}$  em  $2,45\text{GHz}$ .

Figura 9: Setup para medição do parâmetro S11.



Fonte: Autoria própria.

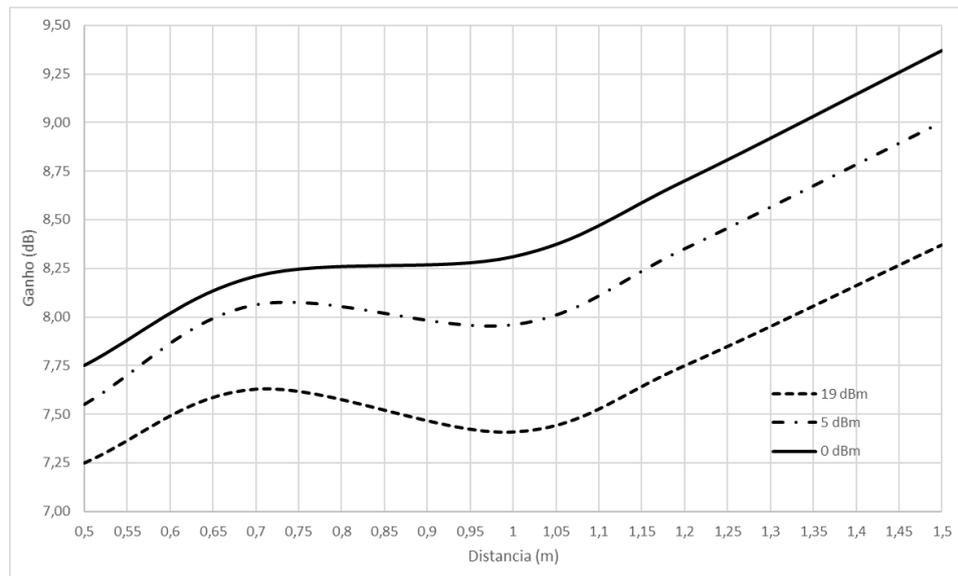
As medidas de ganho foram feitas em campo aberto para evitar reflexão dos materiais próximos. Foi utilizado um gerador de sinais e um analisador de espectro. A distância entre antenas foi variada, juntamente com a potência transmitida, obtendo como resultado o ganho apresentado no gráfico da Figura 11, que pode ser comparado com o diagrama de radiação da Figura 12.

Figura 10: *Setup* em campo aberto para medição do ganho das antenas.



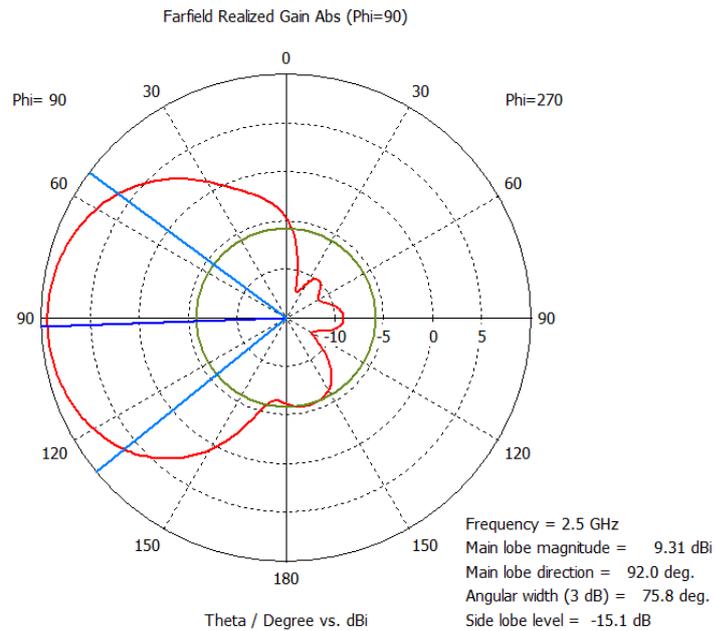
Fonte: Autoria própria.

Figura 11: Gráfico do ganho obtido através das medições em campo aberto, variando distância e potência de transmissão.



Fonte: Autoria própria.

Figura 12: Diagrama de radiação da antena.

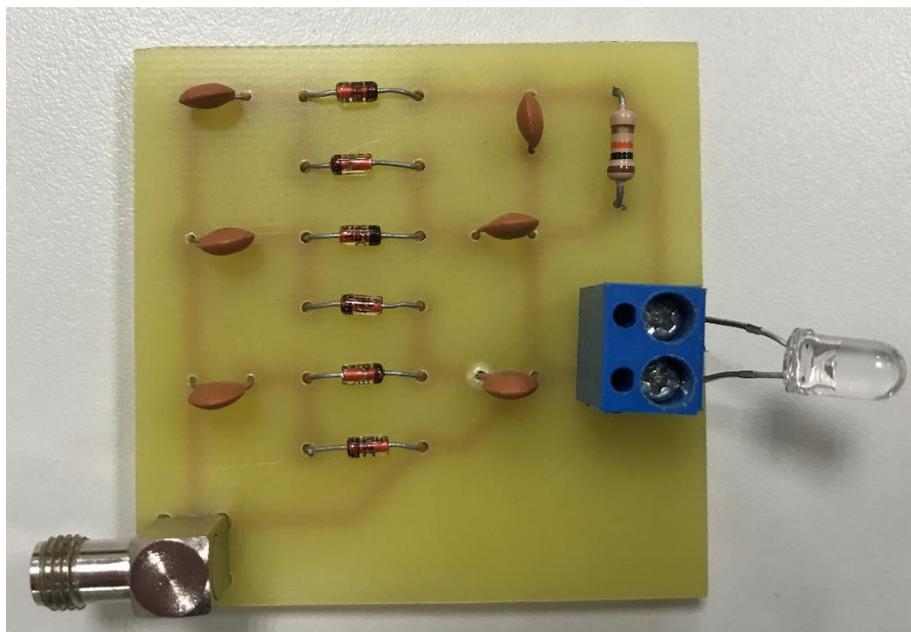


Fonte: A autoria própria.

### 3.3. RETIFICADOR

A retificação foi efetuada baseando-se no retificador proposto por Dickson composto por diodos 1N60P e capacitores 1nF como observado na Figura 13.

Figura 13: Retificador.



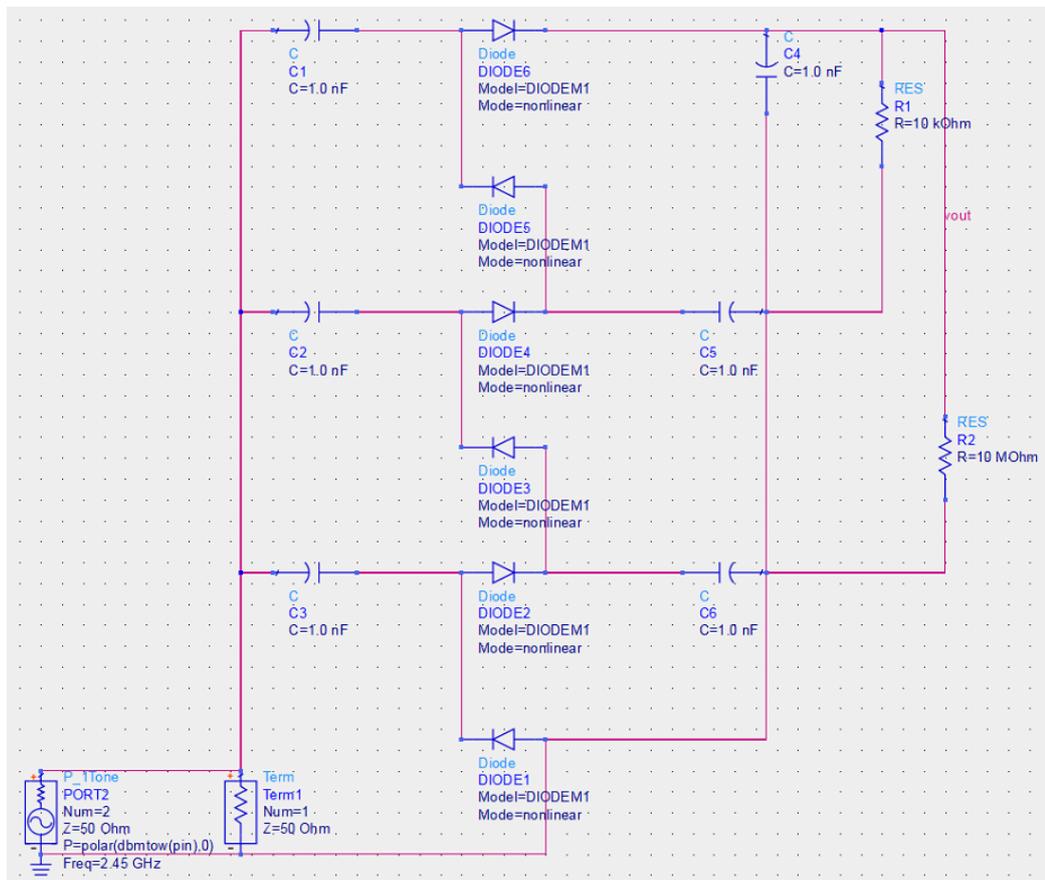
Fonte: A autoria própria.

Conectando o retificador diretamente ao gerador de sinais foi possível concluir que a retificação com potência de 19dBm ocorre até 700MHz, fazendo com que o retificador seja incapaz de operar na frequência a qual a antena foi projetada.

Buscando contornar este problema, outro retificador foi simulado utilizando o *software* Keysight ADS (*Advanced Design System*)(2019) e o diodo SMS7630(2016) (Figura 14), o qual as informações foram obtidas através do *datasheet* do fabricante. Utilizando o método de balanceamento harmônico (*Harmonic Balance*) (Figura 15) variou-se a potência de entrada de -19dBm até 19dBm, respeitando os limites dos equipamentos disponíveis em laboratório, sendo possível obter uma tensão máxima de 5,5V a uma potência de entrada de 13 dBm, como pode ser observado no gráfico da Figura 16.

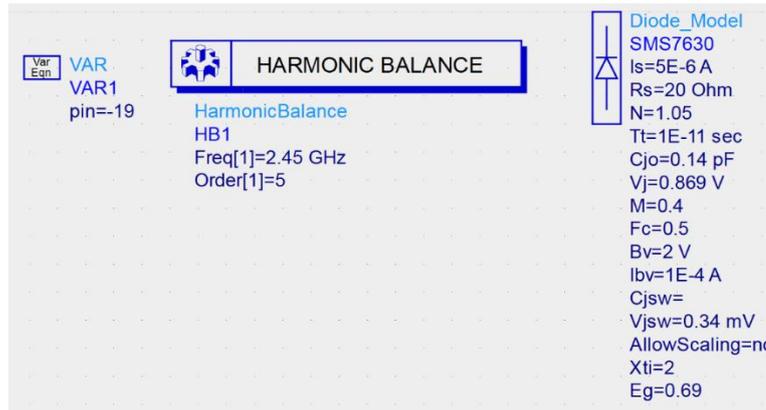
“O método do Balanceamento Harmônico pressupõe que o estímulo de entrada consiste de algumas senoides em regime estacionário. Portanto, a solução é uma soma das senoides em estado estacionário, o que inclui as frequências de entrada, além dos harmônicos significativos e seus produtos.” (CHUMA, 2017)

Figura 14: *Schematic* do retificador utilizando o diodo SMS7630.



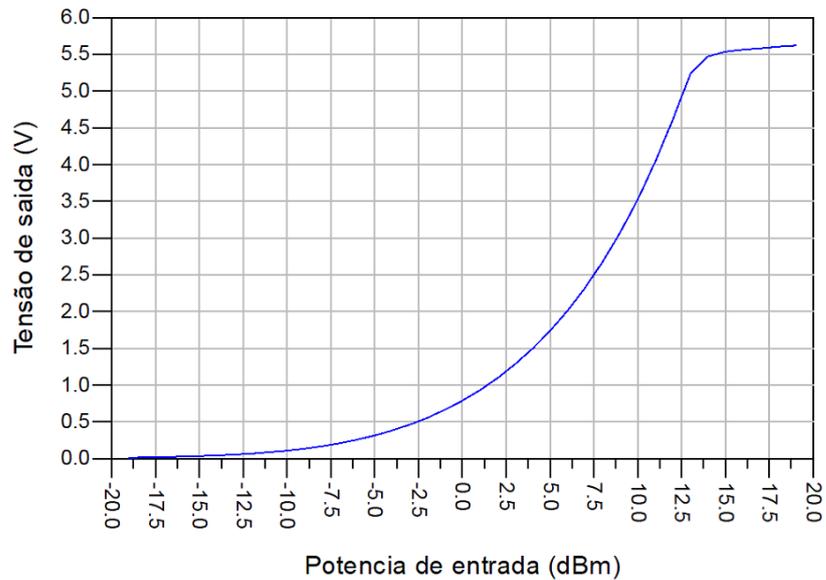
Fonte: Autoria própria.

Figura 15: Especificações do diodo utilizado e tipo de simulação (*Harmonic Balance*).



Fonte: Autoria própria.

Figura 16: Gráfico da tensão de saída pela potência de entrada.



Fonte: Autoria própria.

#### 4. RESULTADO E DISCUSSÃO

Utilizando o ganho obtido na Figura 11 e a potência de entrada na Figura 16, conjuntamente com a equação de Friis, podemos concluir que seria possível ocorrer a retificação a uma distância máxima de 0,13m utilizando-se uma potência de entrada de 13dBm, onde obteríamos uma tensão mínima de 5,5V. Portanto poderíamos alimentar um dispositivo eletrônico ou até mesmo carregar um supercapacitor que armazene esta energia.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através da simulação conseguimos provar o conceito da retificação utilizando o modelo de *rectenna*, provando ser capaz atender a proposta. Apesar das dificuldades discutidas no texto tanto com o circuito retificador e com o material utilizado na construção das antenas, foi produzido o modelo físico de ambos, e ambos apresentaram funcionamento esperado. O retificador, mesmo não operando na frequência desejada, retificou o sinal com perfeição quando foi utilizada uma antena monopolo. A frequência de teste foi de 700MHz, atingindo aproximadamente 10V na saída do retificador, com 0,01m de distância e 19dBm de potência na antena transmissora. Além disso, a antena construída possui um ganho elevado e ao ser ligada ao retificador simulado poderá fornecer tensão suficiente para reaproveitar a energia eletromagnética dissipada pelas inúmeras fontes existentes.

Futuramente, poderá ser feita a construção do retificador utilizando um diodo com maior eficiência, implicando no aumento da distância entre as antenas e diminuição da potência necessária para que a retificação ocorra.

## 6. REFERÊNCIAS

BALANIS, C. A. **Antenna theory**. [s.l: s.n.]. v. 25

CHUMA, E. L. **Desenvolvimento de uma rectenna compacta com circuito de conversão de energia integrado** Campinas, 2017.

CST. **CST STUDIO SUITE - Electromagnetic Field Simulation Software**.

DICKSON, J. F. On-Chip High-Voltage Generation in MNOS Integrated Circuits Using an Improved Voltage Multiplier Technique. **IEEE Journal of Solid-State Circuits**, 1976.

FRIIS, H. T. A Note on a Simple Transmission Formula. **Proceedings of the IRE**, 1946.

J. O. MCSPADDEN; L. FAN; K. CHANG. Design 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.

KALE, V. S.; PATIL, D. B. Software Development and Construction of Log Periodic Dipole Antenna Using MATLAB. **IJREEICE**, v. 3, n. 12, p. 83–87, 15 dez. 2015.

**Keysight Technologies - Advanced Design System (ADS)**. Disponível em:

<<https://www.keysight.com/en/pc-1297113/advanced-design-system-ads?&cc=BR&lc=por>>. Acesso em: 28 ago. 2019.

KUMAR, H.; ARRAWATIA, M.; KUMAR, G. Broadband Planar Log-Periodic Dipole Array Antenna Based RF-Energy Harvesting System. **IETE Journal of Research**, v. 65, n. 1, p. 39–43, 2019.

MD. DIN, N. et al. Design of Rf Energy Harvesting System for Energizing Low Power Devices. **Progress In Electromagnetics Research**, v. 132, n. July, p. 49–69, 2014.

R. DEAN STRAW. **The ARRL Antenna Book**. 21st. ed. Newington: The national association for amateur radio, 2007.

RIBEIRO, J. A. J. **Propagação das ondas eletromagnéticas: princípios e aplicações**. 2. ed. São Paulo: Érica, 2008.

SADIKU, M. O. **Elementos De Eletromagnetismo**. Tradução Jorge Lisboa Amoretti; Liane Loder Ludwig. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2012.

**Skyworks Solutions - SMS7630 Series**. Disponível em:

<[http://www.skyworksinc.com/uploads/documents/Surface\\_Mount\\_Schottky\\_Diodes\\_200041\\_AC.pdf](http://www.skyworksinc.com/uploads/documents/Surface_Mount_Schottky_Diodes_200041_AC.pdf)>. Acesso em: 28 ago. 2019.

TESLA, N. The transmission of electrical energy without wires as a means for furthering peace. **Elect. World Eng.**, 1905.

THE MATHWORKS INC. **MATLAB R2018a**[www.mathworks.com/products/matlab](http://www.mathworks.com/products/matlab), 2018.

VALENTA, C. R.; DURGIN, G. D. Harvesting wireless power: Survey of energy-harvester conversion efficiency in far-field, wireless power transfer systems. **IEEE Microwave Magazine**, v. 15, n. 4, p. 108–120, 2014.

**Contatos:** [eduardofluhf@hotmail.com](mailto:eduardofluhf@hotmail.com) [edson.santos@mackenzie.br](mailto:edson.santos@mackenzie.br)