
Design of a two-stage Dickson RF-DC Rectifier for 2.45 GHz wireless energy harvesting

Projeto de um Retificador RF-DC Dickson de dois estágios para coleta de energia sem fio de 2,45GHz

Received: 2023-09-03 | Accepted: 2023-10-10 | Published: 2023-10-12

Francisco Silva e Serpa

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4218-0674>

Instituto Federal do Pará Campus Parauapebas, Brasil

E-mail: francisco.serpa@ifpa.edu.br

Francisco de Assis Rêgo Neto

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-2553-9780>

Instituto Federal do Pará Campus Parauapebas, Brasil

E-mail: assis.rego@ifpa.edu.br

Alan Cloves Silva Barreto

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9436-4213>

Instituto Federal do Pará Campus Parauapebas, Brasil

E-mail: alan.barreto@ifpa.edu.br

Leandro Trajano Novelino

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-4600-7839>

Instituto Federal do Pará Campus Parauapebas, Brasil

E-mail: leandro.novelino@ifpa.edu.br

ABSTRACT

Wireless electromagnetic charging has established itself as a module of great relevance in the context of Internet of Things devices. Most commercial applications use wireless radio frequency charging in the 2.45GHz band. In this study, a compact RF-DC rectifier operating at 2.45 GHz is analyzed for an input power range of 0 to 8 dBm and with HSMS 2862 Schottky diodes that are designed and simulated in this article. Impedance matching is simply constructed using a radial stub circuit. To significantly increase the output DC voltage, the rectifier is constructed using the Dickson multi-stage voltage doubler configuration. The performance of the rectifier is evaluated through simulation for an operating frequency of 2.45 GHz, the efficiency parameter reaches 38.8% after electromagnetic co-simulation for an input power of 8 dBm. This rectifier topology is found in several applications in wireless communication and electronic circuits.

Keywords: RF-DC rectifier; Impedance matching; single stub

RESUMO

O carregamento eletromagnético sem fio tem se estabelecido como um módulo de grande relevância no contexto dos dispositivos de Internet das Coisas. A maioria das aplicações comerciais utiliza carregamento por radiofrequência sem fio na banda de 2,45GHz. Neste estudo, um retificador RF-DC compacto operando a 2,45 GHz é analisado para uma faixa de potência de entrada de 0 à 8 dBm e com diodos Schottky HSMS 2862 que são projetados e simulados neste artigo. O casamento de impedâncias é simplesmente construído usando um circuito de *stub* radial. Para aumentar significativamente a tensão DC de saída, o retificador é construído usando a configuração Dickson de duplicador de tensão de múltiplos estágios. O desempenho do retificador é avaliado através de simulação para uma frequência de operação de 2,45 GHz, o parâmetro de eficiência atinge 38,8% após co-simulação eletromagnética para uma potência de entrada de 8 dBm. Esta topologia de retificador é encontrada em diversas aplicações em comunicação sem fio e circuitos eletrônicos.

Palavras-chave: Retificador RF-DC; Casamento de impedância; *Stub* único

INTRODUÇÃO

A evolução dinâmica dos dispositivos sem fio que têm acesso a redes móveis representa um dos principais impulsionadores do crescimento do tráfego móvel. Globalmente, prevê-se que o número total de utilizadores da Internet cresça de 3,9 mil milhões em 2018 para 5,3 mil milhões em 2023 (CISCO, 2020). Isto equivale a quase 70 por cento da população global que terá conectividade móvel até 2023. Consequentemente, o surgimento da banda do espectro Wi-Fi (2,4 GHz e 5 GHz) a ser usada em 2023 pela população mundial levou à presença de abundância de sinal de frequência no entorno (NAIK; LIU; PARK, 2018). A abundância deste sinal de frequência disponível no ar tem um potencial significativo de energia eletromagnética que pode ser reaproveitada para dispositivos elétricos de baixa energia, eliminando assim a necessidade de pilhas e baterias (SERPA; HERNANDEZ; ADRIANO, 2021).

A energia eletromagnética no ambiente tem a vantagem de estar disponível dia e noite, ao contrário da energia solar ou eólica, que depende da disponibilidade de períodos específicos. Em comparação com outras energias, a energia eletromagnética não é limitada pelo espaço ou pelo tempo. A onda de rádio está disponível tanto em ambientes internos quanto externos. Apesar de sua baixa densidade de potência no ambiente, uma fonte intencional pode ser adicionada para uma transmissão de energia mais eficiente. A rectena é o dispositivo responsável em captar ondas eletromagnéticas propagadas no ar e em seguida convertê-las em Corrente Contínua (DC) e é composta por uma antena e um retificador de radiofrequência (RF).

Este trabalho propõe projetar um circuito retificador RF-DC Dickson de dois estágios para coleta de energia sem fio de 2,45 GHz. O principal desafio é a redução da perda de eficiência de conversão de energia devido ao comportamento não linear do diodo. A impedância de entrada

do retificador é baseada na impedância do diodo, que não varia linearmente com a frequência de operação e a intensidade do sinal de RF disponível (HE; LIU, 2020). Esta entrada de incompatibilidade de impedância do circuito retificador com a antena, necessita de uma correção através de um circuito de casamento de impedância. Este circuito deve ser cuidadosamente projetado para uma alta eficiência em uma baixa potência de entrada.

Devido a um limite de baixa potência, o retificador tem eficiência razoável. No entanto, a tensão de saída do retificador não é estável e consiste em ondulações. Para resolver esse problema, um filtro capacitivo é introduzido na saída do circuito para produzir uma tensão CC mais estável e suave. Uma carga retificadora pode ser um resistor, um capacitor, um indutor ou uma combinação de todos eles. Neste projeto de trabalho é utilizada uma carga resistiva.

O PROJETO DO CIRCUITO RETIFICADOR

Os diodos Schottky oferecem uma vantagem em relação aos diodos convencionais em termos de velocidade, pois não depende de recombinação de elétrons ou lacunas quando eles entram nas regiões opostas. Além disso, o diodo Schottky possui melhor densidade de corrente, resultando em baixas quedas de tensão direta, o que significa redução de perdas de energia, tornando-o a escolha mais eficiente. Uma das influências significativas na tensão de saída do circuito de coleta de energia é o número de estágios retificadores. Neste trabalho, o modelo do diodo utilizado é o HSMS 2862 e a topologia retificadora é a Dickson de 2 estágios, pois é empregada para melhorar a tensão de saída. A topologia Dickson de dois estágios é um circuito dobrador de tensão e contém dois diodos e um capacitor para cada estágio, conforme figura 1. Durante a alternância positiva do sinal alternado da fonte, um dos diodos é ligado e o outro diodo é bloqueado, e o sinal é transferido para a saída. Durante a alternância negativa, o diodo que estava ligado fica bloqueado e o outro diodo que estava desligado fica ligado, então o sinal retificado é armazenado no capacitor do estágio e é transmitido ao mesmo tempo que a próxima alternância positiva.

A tensão de saída é aumentada para cada saída de um estágio, pode ser definido como:

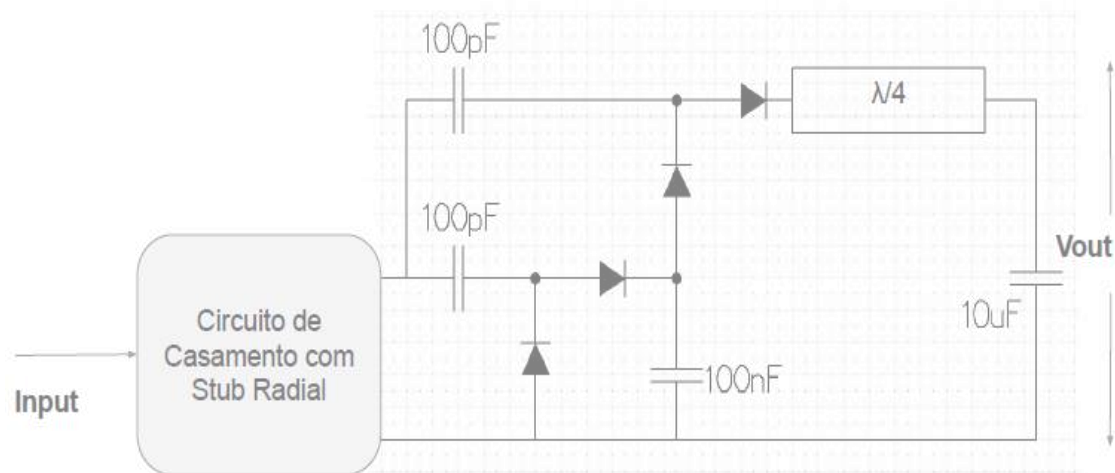
$$V_{out} = 2NVp \quad (1)$$

N é o número de estágios e V_p é a tensão de pico.

O casamento de impedância do circuito retificador pode ser implementado usando componentes concentrados (indutores e capacitores) ou componentes distribuídos (linhas

microstrip e *stubs*). No entanto, em altas frequências, o aglomerado desses elementos não é adequado devido aos efeitos parasitários associados a eles. Além disso, os indutores e capacitores geralmente estão disponíveis apenas para uma faixa limitada de valores e eles são difíceis de serem implementados em frequências de microondas. Com isso, a técnica de casamento de impedância adotada é o ajuste de *stub* único. O qual utiliza uma linha de transmissão (um ramal) conectado em paralelo ou em série (em circuito aberto ou em curto-circuito) com a linha de transmissão de alimentação a uma certa distância da carga. No ajuste de *stub* único, os dois parâmetros ajustáveis são a distância, d , da carga à posição do *stub* e o valor da susceptância ou reatância fornecida pelo *stub*, a diferença nos comprimentos de um ramal aberto ou em curto-circuito é $\lambda/4$ (POZAR, 2012).

Figura 1 – Circuito Retificador proposto

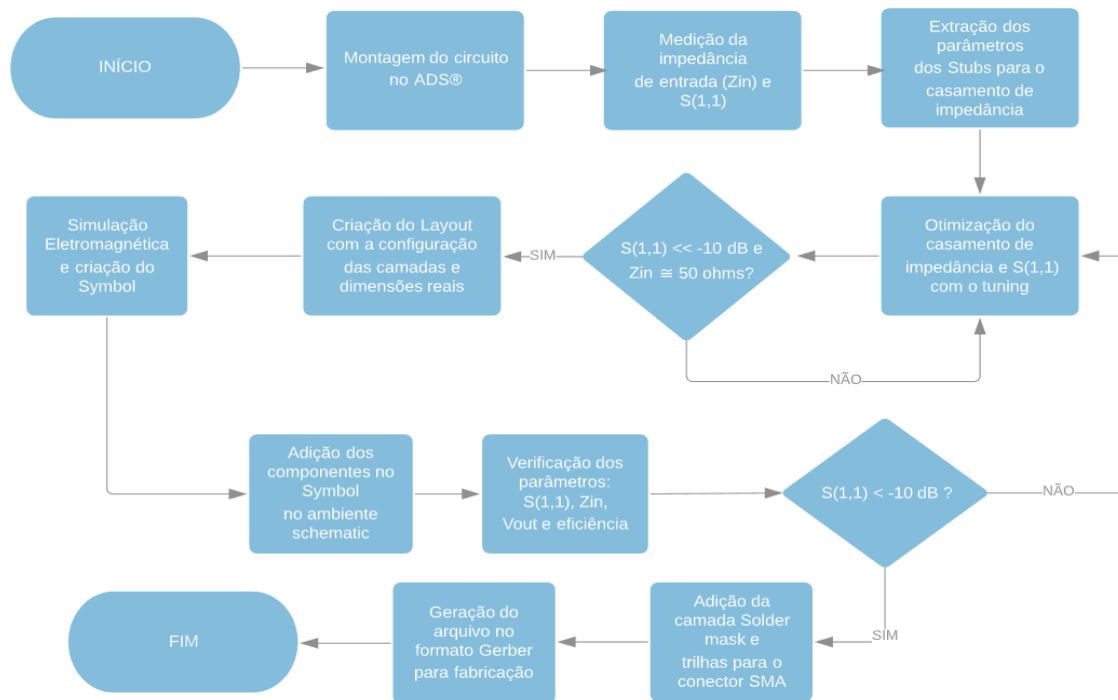


Fonte: Autoria própria

Após definida a topologia do retificador RF-DC, o projeto segue para a montagem e simulação do esquemático no *software Advanced Design System (ADS)* da empresa Keysight®, conforme figura 3. Os valores da impedância de entrada (Z_{in}) e a perda de retorno $S(1,1)$ são coletados, conforme figura 10.a. Com os valores bem diferentes dos requisitos mínimos, $S(1,1)$ menor que -10 dB e Z_{in} aproximadamente 50Ω , verificou-se a necessidade do casamento de impedância para que seja possível uma transferência máxima de potência entre a antena e o circuito retificador. Por isso, foi realizada a extração dos parâmetros do *stub* radial e a otimização com a ferramenta *tuning* para alcançar os requisitos mínimos, conforme figura 4 e 5. Após alcançado os requisitos, criou-se o *layout* com as configurações das camadas em dimensões reais. O penúltimo passo da otimização é a Co-simulação eletromagnética, um simulador eletromagnético que transforma as equações eletromagnéticas de Maxwell em equações integrais e depois aplica a discretização numérica, processo conhecido como método dos momentos. Com

isso é possível uma aproximação numérica da simulação com as medições, pois o cálculo considera agora as estruturas planas em substrato com camadas e perdas. Dessa forma o *layout* do circuito sofreu pequenos ajustes, conforme mostrado na figura 7 e 8. E por fim, após verificado $S(1,1)$ novamente, foi adicionado à camada de solda, trilhas para o conector SMA e gerado o arquivo Gerber para fabricação da microfita.

Figura 2 – Fluxograma das etapas do projeto

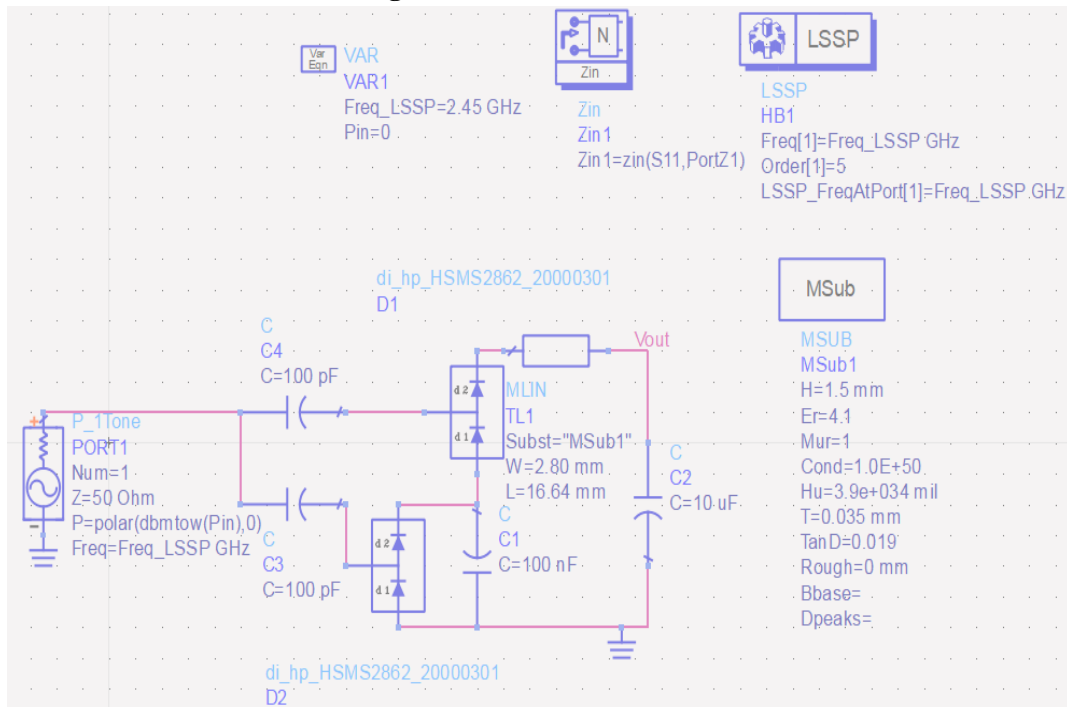


Fonte: Autoria própria

RESULTADO DAS SIMULAÇÕES

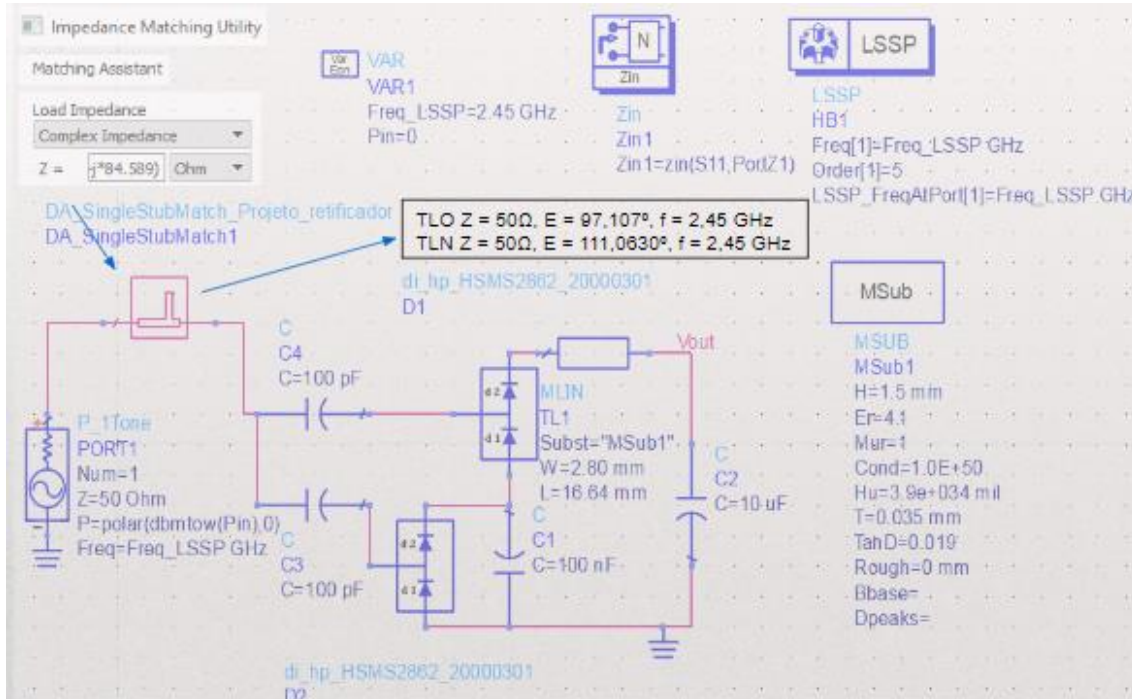
O retificador RF-DC projetado foi fabricado em um substrato de fibra de vidro (FR4) de espessura de 1,5 mm e de constante dielétrica (ϵ_r) de 4,5. Foram inseridos capacitores em série C_4 e C_3 de 100 pF com a função de bloquear a tensão CC da fonte, uma linha de transmissão TL1 de $\lambda/4$ em série com a carga com a função de bloquear os harmônicos gerados pelo retificador, um capacitor de carga C_2 de 10 μ F com a função de reduzir o efeito *ripple* da tensão de saída. E por fim, a carga chamada de R_1 de 1 k Ω .

Figura 3 – Circuito Retificador inicial



Fonte: Autoria própria

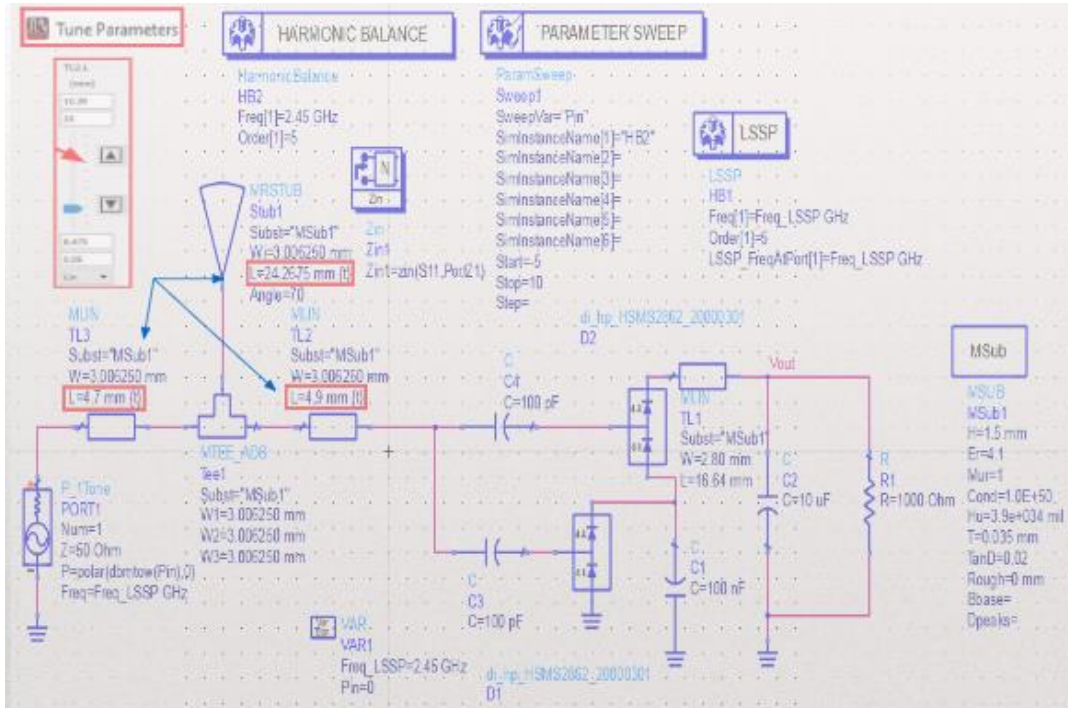
Um casamento de impedância de *stub* único (*single-stub*) fornece uma resposta de frequência de banda estreita entre as portas de entrada e saída. As terminações de fonte ou carga podem ser especificadas usando uma aproximação com componentes Lumped, uma impedância complexa independente de frequência ou um parâmetro S.

Figura 4 – Circuito retificador com ferramenta utilizada para casamento de impedância

Fonte: Autoria própria

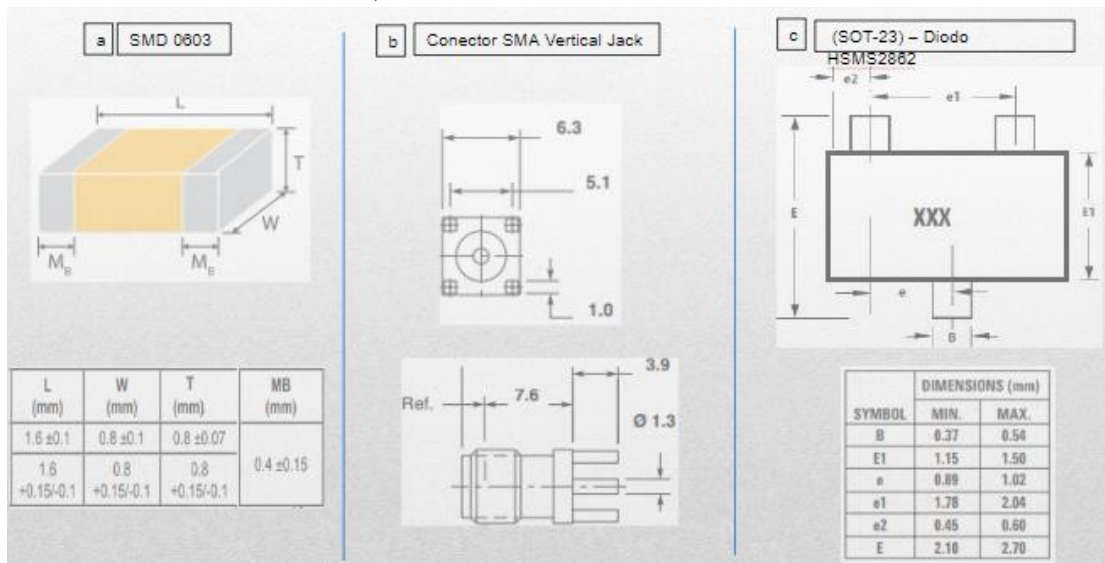
O casamento de impedância do circuito proposto é uma junção em T com uma ponta radial. As ferramentas de simulação *Large-Signal S-Parameter* (LSSP) do software ADS® teve o objetivo de extrair a impedância de entrada e a ferramenta de simulação *Harmonic Balance* (HB) utilizada para simulação e análise de potência em circuitos analógicos não-lineares operando em RF e de impedância com controle de potência.

Figura 5 – Circuito Retificador com *stub* radial com dimensões ajustadas



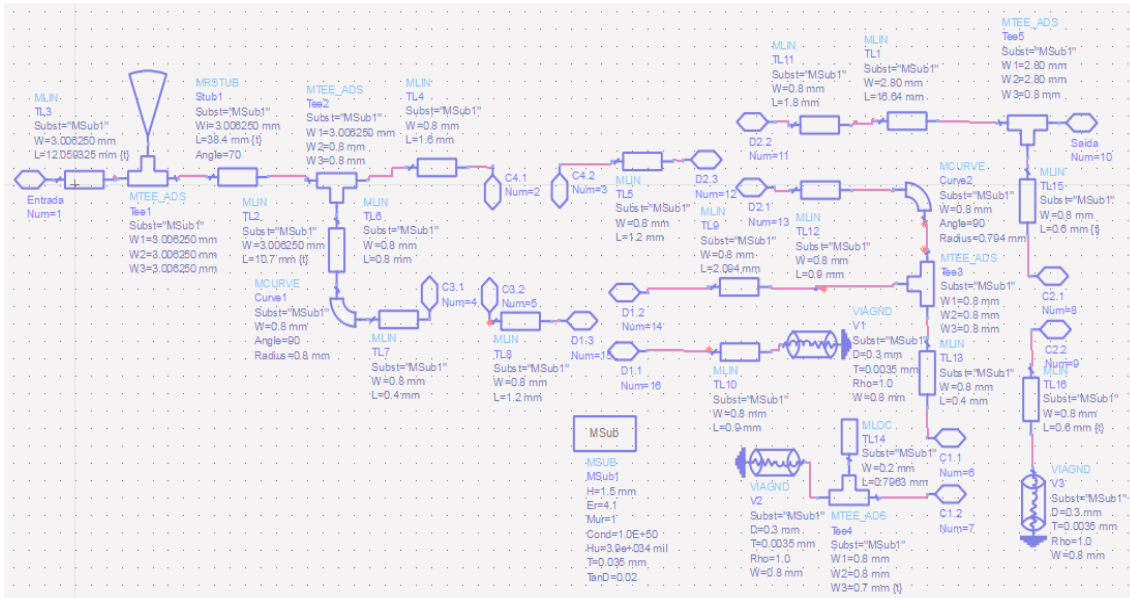
Fonte: Autoria própria

Figura 6 – Informações dos componentes do circuito: a) Resistor/Capacitor; b) Conector SMA; c) Bloco SOT diodo HSMS 2862.



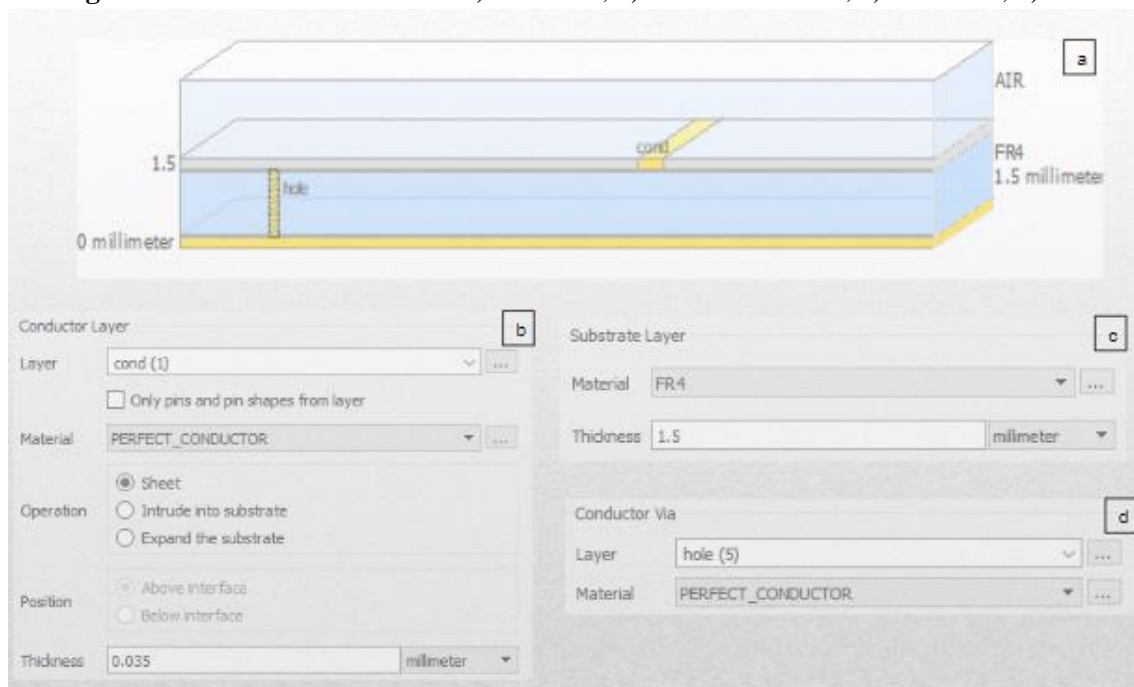
Fonte: Adaptado de Jameco Electronics (2006); Multicomp (2013); Tycos Eletronic (2007)

Figura 7 – Circuito Retificador projetado para geração do layout final



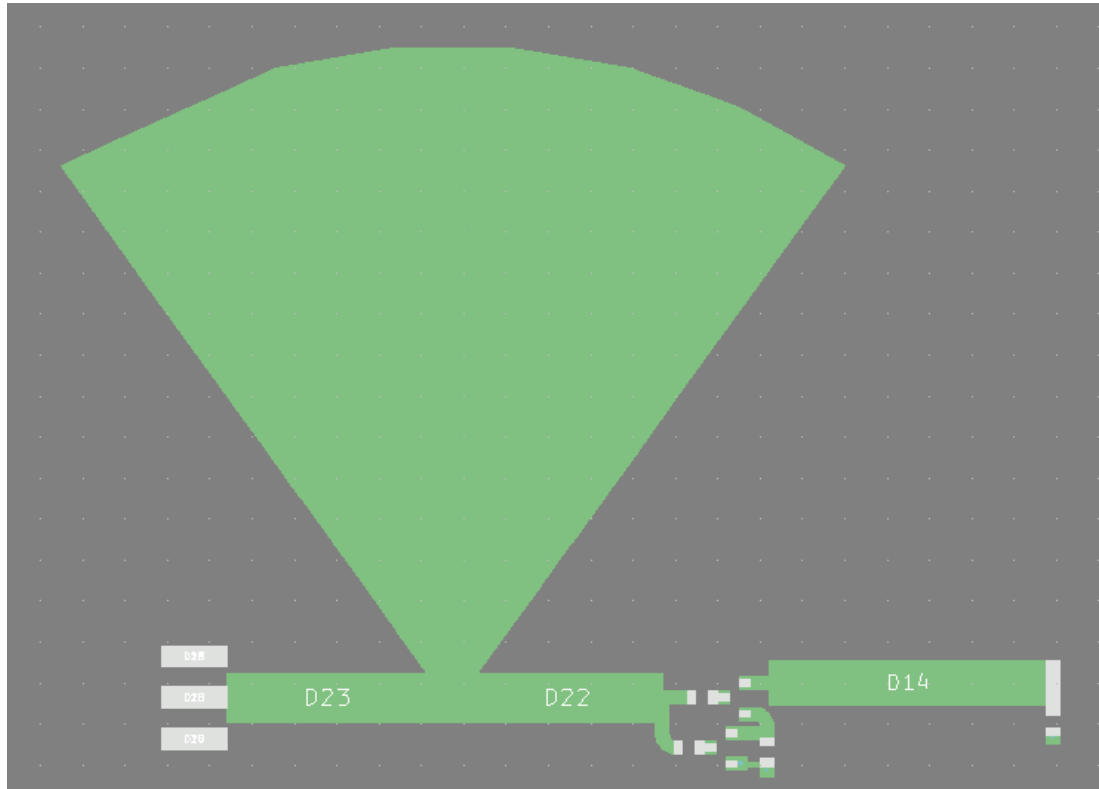
Fonte: Autoria própria

Figura 8 – Detalhes da microfita: a) Camadas; b) Trilha condutora; c) Substrato; d) Via



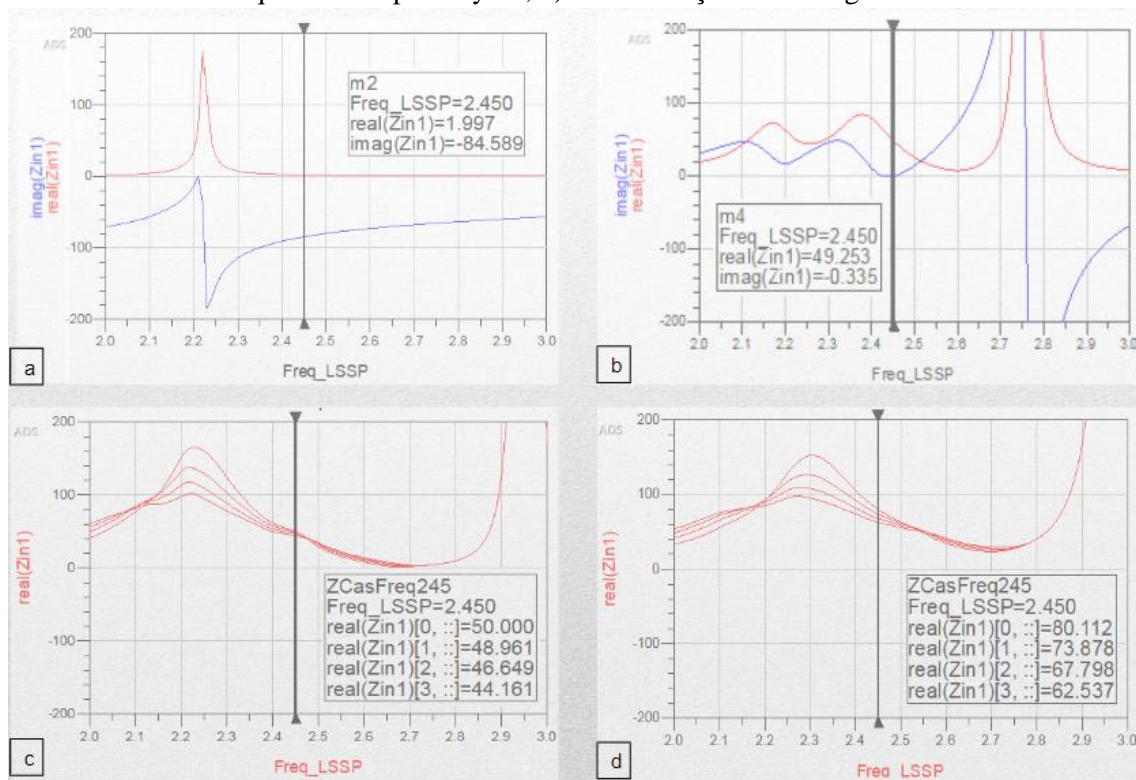
Fonte: Autoria própria

Figura 9 – Layout no formato Gerber



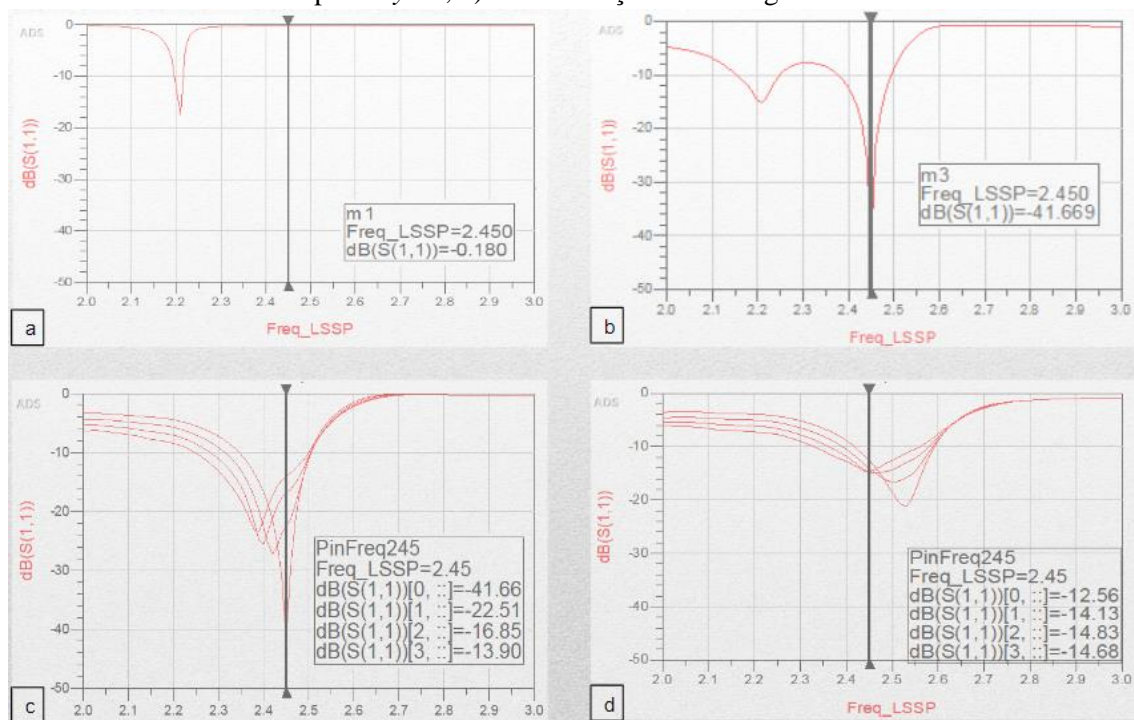
Fonte: Autoria própria

Figura 10 – Gráficos da impedância (Z_{in}): a) Circ. inicial; b) Após tuning com *stub* radial; c) Esquemático após Layout; d) Co-simulação eletromagnética



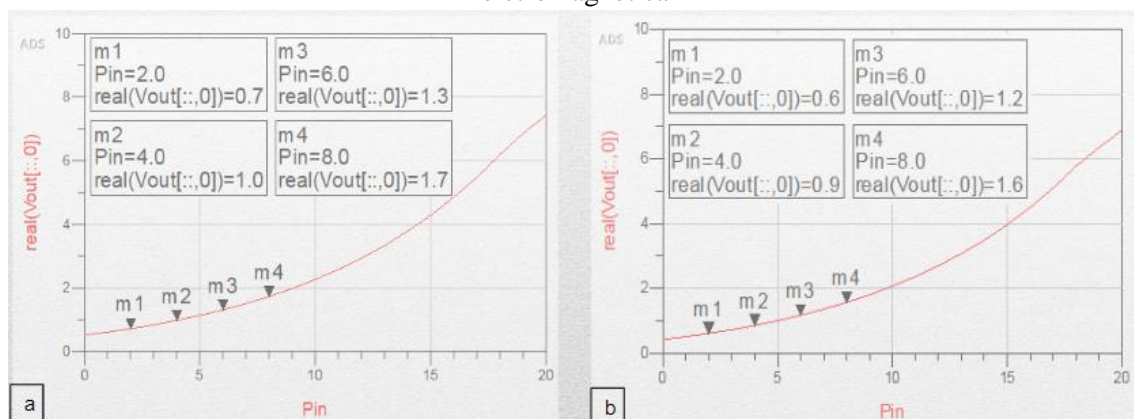
Fonte: Autoria própria

Figura 11 – Gráficos de S(1,1): a) Circ. inicial; b) Após tuning com *stub* radial; c) Esquemático após *Layout*; d) Co-simulação eletromagnética



Fonte: Autoria própria

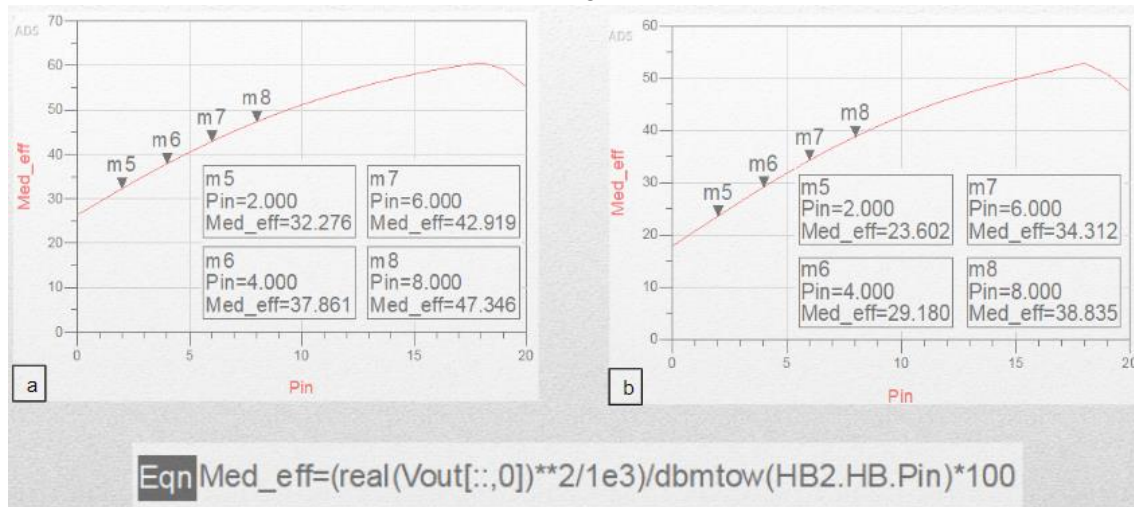
Figura 12 – Gráficos da tensão de saída: a) Esquemático após *Layout*; b) Co-simulação eletromagnética



Fonte: Autoria própria

A impedância de entrada do retificador antes do casamento de impedância era de $Z_{in} = 1,997 - j84,589$. Com as etapas de otimização com *stub* radial, esquemático após *Layout* e Co-simulação eletromagnética, a parte real da impedância de entrada se aproximou de 50Ω , conforme figura 10. Já na figura 11 mostra a perda de retorno S(1,1) que era -0,180 dB antes do casamento de impedância e após todas as etapas de aproximação das condições reais, passou para valores abaixo de -10 dB. E por fim, a figura 12 mostra a tensão de saída na faixa de potência de entrada de 2 à 8 dBm nas etapas de *Layout* e Co-simulação eletromagnética.

Figura 13 – Gráficos da simulação de eficiência: a) Esquemático após *Layout*; b) Co-simulação eletromagnética



Fonte: Autoria própria

A eficiência de conversão (PCE) é a relação entre a potência de saída retificada e a potência de RF incidente, conforme a equação 2. A potência de RF incidente foi definida para o valor de 0 dBm e depois para os valores de 2, 4, 6 e 8 dBm.

$$PCE(\%) = \frac{P_{load}}{P_{in}} = \frac{V_{out}^2}{R_L} \frac{1}{P_{in}} \quad (2)$$

CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou o método de casamento de impedância de *stub* radial único com uma topologia Dickson de dois estágios. Esta nova metodologia simples de desenho do circuito de casamento proposto foi baseada em resultados de simulação, onde foi possível ter um modelo inicial e finalmente um ajuste do projeto através de ferramentas de otimização. O retificador proposto obteve como resultados da simulação, uma eficiência de retificação de 23,6% à 38,83% para uma faixa de potência de entrada de 2 à 8 dBm, na frequência de 2,45 GHz e carga de 1kΩ. A otimização poderia alcançar valores mais significativos utilizando a técnica de Algoritmo Genético (AG), com iterações em função da condição de eficiência.

REFERÊNCIAS

CISCO. *Cisco Annual Internet Report (2018-2023)*. White paper. 2020. Disponível em: <<https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/executive-perspectives/annual-internet-report/white-paper-c11-741490.pdf>> Acesso em: 10 de out. de 2023.

HE, Z.; LIU, C. *A compact high-efficiency broadband rectifier with a wide dynamic range of input power for energy harvesting*. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, v. 30, n. 4, p. 433–436, 2020.

Jameco Electronics. *Catálogo Avago's HSMS-286x série, Avago Technologies*. EUA, 2006. Disponível em: <<https://datasheet.octopart.com/HSMS-2862-TR1G-Avago-datasheet-62063134.pdf>> Acesso em: 10 de out. de 2023.

Multicomp. *Catálogo da Multilayer SMD Ceramic Capacitors*; Premier Farnell. Inglaterra, 2013, Disponível em: <http://www.farnell.com/datasheets/1723208.pdf>> Acesso em: 10 de out. de 2023.

NAIK, G., LIU, J. e PARK, JMJ. *Coexistência de tecnologias sem fio nas bandas de 5 GHz: uma pesquisa de soluções existentes e um roteiro para pesquisas futuras*. Pesquisas e tutoriais de comunicações IEEE, 20, 1777-1798. 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/COMST.2018.2815585>> Acesso em: 10 de out. de 2023.

POZAR, D. M. *Microwave Engineering* (ed. 4). Massachusetts: John Wiley & Sons, 2012. 758 p.

SERPA, FRANCISCO S. E; HERNANDEZ, HUGO DANIEL ; ADRIANO, RICARDO L. DA S. . *A Compact High-Efficiency Broadband RF Rectifier for Energy Harvesting Applications*. In: 2021 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC), 2021, Fortaleza. 2021 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC), 2021. p. 1.

Tycos Eletronics. *Catálogo RF Coax Connectors*, TE Connectivity Connectors & Sensors for Harsh Environmets. Suíça, 2007. Disponível em: <https://www.te.com/commerce/DocumentDelivery/DDEControl>> Acesso em: 10 de out. de 2023.