



## **TÍTULO: Análise de Coleta de Energia de RF para Aplicações de Detecção de Baixa Potência.**

*PEDRO, Evandro José Pereira<sup>1</sup>*  
*Centro Universitário Academia – UniAcademia*  
*COSTA, Luís Guilherme da Silva<sup>2</sup>*  
*Centro Universitário Academia – UniAcademia*

Linha de Pesquisa: Eficiência Energética

### **RESUMO**

Neste trabalho, a análise e simulação de um retificador de rádio frequência (RF) para aplicações de captação de energia ambiente são avaliadas, destacando os efeitos na tensão de saída devido a variação da potência do sinal de RF na antena e no valor da impedância da carga. É proposto um modelo de impedância a partir de um diodo Schottky e analisado seus efeitos quando conectado na topologia de um circuito retificador de RF para a frequência de 2.45 GHz. A simulação foi baseada em uma topologia com diodo retificador em série utilizando uma rede em L para casamento de impedância com simulação através do software Advanced Design System (ADS). A partir dos valores obtidos na simulação foi medido a eficiência do circuito proposto variando a potência de entrada e a impedância da carga.

**Palavras-chave:** *Energy Harvesting. Rádio Frequência. Retificadores de RF.*

### **1 - INTRODUÇÃO.**

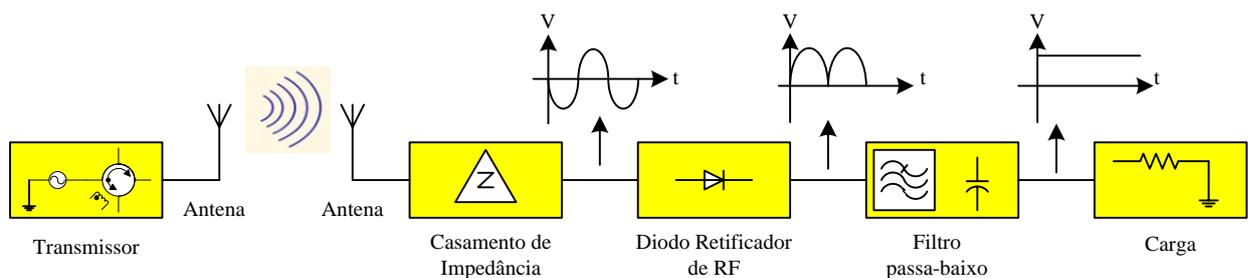
A captação de energia de RF significa essencialmente converter a energia eletromagnética do ambiente em energia elétrica utilizável. Essa energia ambiente pode ser qualquer tipo de ondas de rádio emitidas, por exemplo, por estações de TV, FM, roteadores WiFi ou torres de telefonia celular. Além disso, a captação de RF é particularmente adequada para as demandas exclusivas de dispositivos IoT (Internet of Things) e Smart Grids, pois estes dispositivos tendem a ser pequenos (até mesmo nanométricos) com baixo consumo de energia e muitas vezes são projetados para operar em locais remotos extremamente difíceis. Em muitos casos, os circuitos fazem parte de sistemas embarcados, como monitores de saúde ou outras

soluções industriais, o que os torna inacessíveis para manutenção ou substituição de baterias. As aplicações de coleta de energia de RF são projetadas para serem autossustentáveis e econômicas e tendem a exigir pouca ou nenhuma manutenção ao longo de muitos anos e, conseqüentemente, durante toda a vida útil da aplicação.

Contudo, um ponto importante a ser analisado na captação de energia por RF é a concepção de um retificador de RF capaz de converter essa energia em corrente contínua (CC) a partir do sinal recebido pela antena e transferir essa energia com máxima eficiência para a carga. Segundo (CASELLA et.al 2019), o circuito retificador de RF, mostrado na Figura 1, tem como componentes uma antena que irá captar a energia de um transmissor, um circuito para casamento de impedância, diodo retificador, um filtro passa-baixa e uma carga. As topologias projetadas em circuitos retificadores de RF podem utilizar vários diodos, o que torna o projeto mais dispendioso, porém um dispositivo mais eficiente.

No entanto, devido às perdas no caminho de propagação de RF, entre transmissor e o circuito retificador de RF na frequência de 2.45 GHz, para obter uma potência de recepção que seja suficiente para o retificador de RF converter energia eletromagnética em CC o sistema precisa estar localizado a alguns centímetros do transmissor. Por este motivo, não é suficiente somente aumentar a eficiência do retificador apenas para níveis elevados de potência, no projeto do retificador de RF, o casamento de impedância entre a antena e o diodo retificador também é importante para maximizar a transferência de potência para a carga. No artigo, (CASELLA et.al 2019), foram analisadas diferentes topologias de retificadores de RF na frequência de 2,45 GHz e analisado que uma eficiência de 76% foi alcançada para uma potência de 19 dBm e 25% para -20dBm. Em (LEE, 2015), o autor reportou a eficiência de alguns diodos retificadores na frequência de 2.45 GHz com potências variando entre -10 dBm e -20 dBm e comparou com outros artigos. Uma eficiência de 39,2% foi alcançada para uma potência de recepção de -15 dBm e uma eficiência de 61,7% para uma potência de recepção de -0,4 dBm.

*Figura 1: Diagrama representando um retificador de RF*



Fonte: Autor

Além desta introdução, este artigo está organizado na seguinte ordem. No capítulo 2, iremos mostrar a formulação do problema apresentando um modelo de RF para o diodo proposto. No capítulo 3, iremos abordar o funcionamento do circuito retificador de RF proposto com análises suportadas pelo software ADS (Advanced Design System). No capítulo 4, será discutido sobre os resultados encontrados nas simulações e, finalmente no capítulo 5, abordaremos sobre trabalhos futuros e nossas considerações finais sobre o trabalho desenvolvido.

## 2 - FORMULAÇÃO DO PROBLEMA.

A energia de RF é continuamente irradiada por várias fontes de energia por diferentes polarizações e uma ampla faixa de frequências a partir de sinais de RF. Embora haja várias antenas que irradiam energia de RF, a densidade de potência de RF no ambiente é muito baixo (PINUELA, 2013). Dessa forma, um bom projeto de sistema de colheita de energia de RF é necessário para tirar o máximo proveito dos baixos níveis de potência. Por outro lado, a energia também pode ser irradiada deliberadamente sem licença nas bandas de frequência em aplicações industriais, científicas e médicas (ISM). A densidade de potência ( $S$ ) pode ser obtida a partir da Equação (1),

$$S = \frac{P_{EIRP}}{4\pi d^2} \quad (1),$$

onde  $P_{EIRP}$  é a potência efetiva irradiada e  $d$  a distância entre transmissor e receptor.

Diferente da energia captada pelo sol, possível somente na presença de radiação solar durante o dia, as ondas de RF estão presentes tanto nas áreas urbanas quanto nas áreas rurais, por 24 horas. Conforme (SALLEH, S., et.al., 2021) aborda em seu trabalho, a colheita de energia de sinais eletromagnéticos depende da integração de uma antena de recepção e de um circuito retificador de RF. Tal circuito irá converter as ondas eletromagnéticas captadas em corrente contínua, com a adição de um circuito de casamento de impedância entre a antena e o diodo retificador de RF, para aumentar a eficiência do sistema. No desenvolvimento de dispositivos de colheita de energia de RF o projeto do circuito retificador de RF é muito importante para que haja a máxima transferência de potência para a carga. O circuito é composto por uma rede de casamento de impedância, um diodo, um filtro passa-baixo de saída e uma carga, conforme mostrado na Figura 1.

No projeto de retificadores de RF a escolha do tipo de diodo é crucial para o funcionamento do circuito retificador. A escolha por diodos Schottky é devido à baixa queda

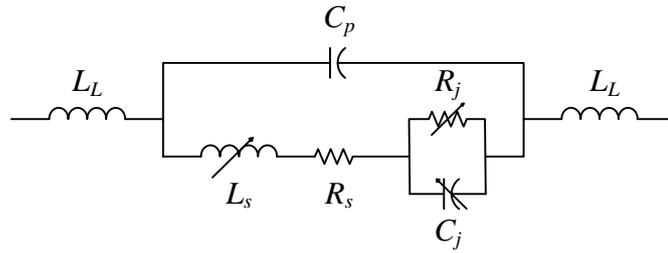
de tensão no sentido direto, que é extremamente baixa se comparada com a queda de tensão de outros modelos de diodos, pequenas dimensões do componente, baixa capacitância e indutância parasita (LEE, 2015). De acordo com (CASELLA et.al, 2019), em aplicações de RF, os efeitos parasitas do diodo têm um impacto significativo sobre as perdas e na impedância reativa do diodo além da não linearidade do componente. Na simulação do circuito retificador será adotado as especificações do diodo SMS-7630, pois o componente apresentou os menores valores parasitas e a menor tensão de polarização direta. A eficiência  $\eta$  do circuito retificador é considerada um fator importante no desenvolvimento do circuito e o objetivo é alcançar a maior eficiência possível na conversão do sinal de RF para uma tensão contínua que é definida pela Equação 2 (CURTY, 2005),

$$\eta = \frac{\text{Tensão de saída DC}}{\text{Potência de RF incidente}} \quad (2).$$

Segundo (CASELLA et.al, 2019), o projeto de um retificador de RF é comumente desenvolvido para níveis de potência elevados em sua entrada, acima de -10 dBm, considerando a banda de frequência em 2,45 GHz. Roteadores WiFi, por exemplo, são limitados por uma potência máxima EIRP (Effective Isotropic Radiated Power) entre 20 dBm e 18 dBm para os protocolos IEEE 802.11be IEEE 802.11g, respectivamente. No entanto, devido às perdas de propagação no ambiente interno, para obter níveis de potência acima de -10 dBm no receptor, a antena precisa estar localizada extremamente próximo ao transmissor. Este fator destaca a necessidade de elevar a eficiência dos retificadores de RF para níveis de captação de sinais de RF na ordem de dezenas de microwatts. Além disso, o aumento da eficiência também está correlacionado a um incremento da distância máxima de operação do sistema de colheita de energia de RF. Para conseguirmos uma transferência de energia entre o retificador e a antena mais eficiente é necessário um casamento de impedância, e para isto utilizaremos neste trabalho uma impedância característica de 50  $\Omega$  (SHIEH, 2018).

Para este trabalho iremos reproduzir o modelo de diodo apresentado por (SHIEH, 2018) e (GU, 2018), mostrado na Figura 2. No projeto de circuitos de RF, os efeitos parasitas dos componentes eletrônicos têm um impacto significativo causando perdas. Portanto, devido às não linearidades dos componentes somadas aos efeitos parasitas, é importante descrever o diodo Schottky usando um modelo equivalente para análise de pequenos sinais de RF (REHMAN, 2017). Conforme mostrado na Figura 2,  $R_s$  representa a resistência em série que é constante.  $R_j$  e  $C_j$  são a resistência e a capacitância de junção,  $C_p$  é a capacitância parasita em paralelo,  $L_s$  é a indutância parasita em série e  $L_L$  são as indutâncias parasitas nos terminais do diodo.

Figura 1: Modelo equivalente de diodo para pequenos sinais de RF.



Fonte: Autor

Na Equação (3), observamos que  $R_j$  não está relacionado com a tensão direta  $V_d$ . Porém  $R_j$  e  $C_j$  são dependentes da tensão de polarização direta do diodo  $V_d$  e a Equação (5) calcula a corrente direta  $I_d$  sendo  $V_i$  a tensão térmica da junção PN do diodo. Substituindo a Equação (5) na Equação (3) e aplicando uma expansão de Taylor ao longo do termo exponencial e truncando-o ao termo resultante de terceira ordem na Equação (6) passamos a ter relação direta de  $R_j$  com  $V_d$  (GU, 2018).

$$R_j = \frac{8.331' \cdot 10^{-5} nT}{I_s + I_d} \quad (3),$$

$$C_j = \frac{C_{j0}}{1 - \frac{V_d}{V_j} \frac{\partial I_d}{\partial V_d}} \quad (4),$$

onde  $V_j$  se refere a tensão de junção,  $C_{j0}$  é a capacitância de tensão zero,  $m$  é uma constante cujo valor depende da maneira pela qual a concentração varia do lado p para o lado n da junção chamada de coeficiente de graduação da junção e seu valor varia de 1/3 a 1/2.  $I_s$  é a corrente de saturação,  $n$  é a constante cujo valor varia entre 1 e 2 e depende do material e da estrutura física do diodo e  $T$  é a temperatura em kelvin.

$$I_d = I_s \left( e^{\frac{V_d}{V_i}} - 1 \right) \quad (5),$$

$$R_j = 8.331' \cdot 10^{-5} nT I_s^{-1} \left( 1 - \frac{V_d}{V_i} + \frac{V_d^2}{2} \frac{\partial^2}{\partial V_i^2} \right) \quad (6).$$

O valor de  $R_j$  aumenta de acordo com  $|V_d|$  para valores negativos devido aos termos de primeira ordem da Equação (6). Assim, podemos calcular a impedância vista pela carga e antena do diodo conforme a Equação (7),

$$Z_d = \frac{I}{j\omega C_j + \frac{I}{R_j} + R_s + j\omega L_s} + j\omega C_p \quad (7).$$

A Tabela 1 apresenta os parâmetros para análise de impedância do diodo SMS7630, fornecidos pelo fabricante Skyworks (SKYWORKS, 2021), com a capacidade de operar na frequência de 2.45GHz. O parâmetro  $B_v$  representa a tensão reversa máxima sobre o diodo, quando  $V_d < -B_v$ . A eficiência do diodo decai significativamente devido a um efeito de ruptura de avalanche. No entanto, esse fator pode ser colocado de lado nesta análise, considerando o objetivo do projeto devido ao baixo nível de potência de recepção deste estudo.

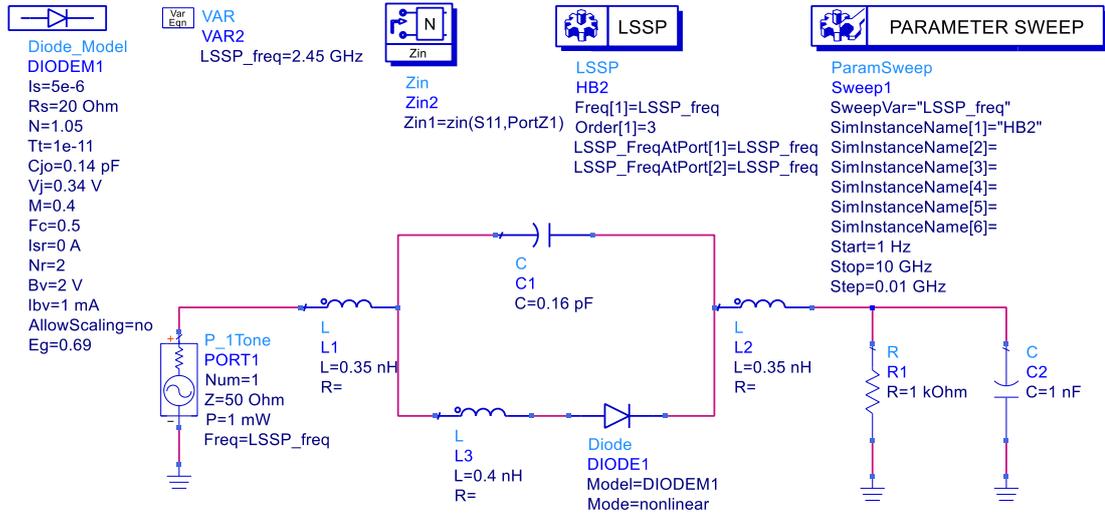
Tabela 1: Parâmetros de díodos para análise de impedância.

Diode	SMS7630
$I_s$ (uA)	5
$R_s$ (Ohm)	20
$C_{j0}$ (pF)	0.14
$V_j$ (V)	0.34
$M$	0.4
$n$	1.05
$B_v$ (V)	2
Package	079LF
$C_p$ (pF)	0.16
$L_s$ (nF)	0.8

Fonte: (SKYWORKS, 2019)

Com valores dos parâmetros do diodo da Tabela 1, o modelo para altas frequências do diodo foi simulado na Figura 3 a partir do modelo equivalente da Figura 2. Em altas frequências, a impedância do diodo  $Z_d$  tem um papel importante para a eficiência de conversão do sinal de RF captado pela antena. A impedância do diodo varia de acordo com a frequência, potência captada de RF e da impedância da carga (SHIN, 2014). Para quantificar o valor da impedância  $Z_d$  do diodo, será utilizado o software ADS (Advanced Design System) da Keysight que é um software para aplicações de circuito de RF, micro-ondas, e aplicações digitais de alta velocidade, utilizando o parâmetro de simulação Large Signal S-Parameter (LSSP), pois este parâmetro inclui efeitos não lineares como compressão de ganho e variações nos níveis de potência. As condições de simulação foram definidas para potência de entrada de 1 mW (0 dBm) com impedância interna do gerador igual a  $50 \Omega$ , com até 3 componentes harmônicos, carga de referência de  $R1 = 1k \Omega$  com o capacitor de  $C2 = 1nF$  em paralelo e uma frequência de simulação de 2.54 GHz.

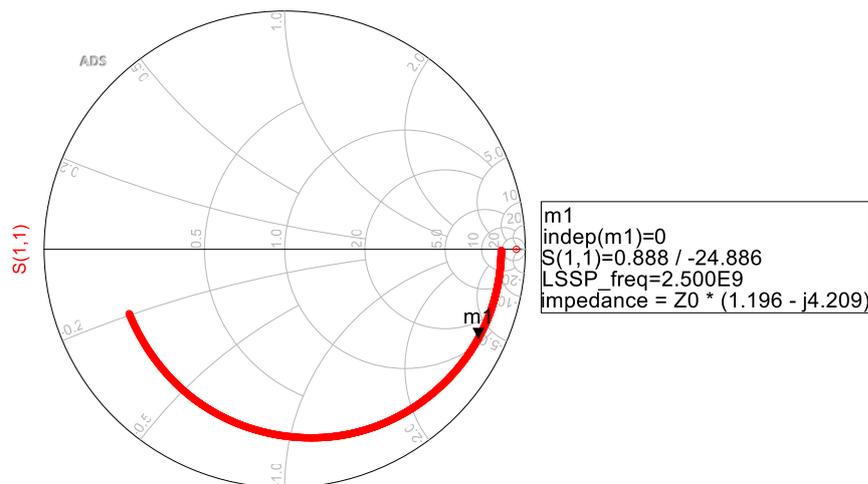
Figura 3: Simulação do modelo equivalente do diodo SMS7630 para pequenos sinais de RF.



Fonte: Autor.

Os valores dos parâmetros do diodo Schottky SMS-7630, listados na Tabela 1, foram inseridos no modelo do diodo (Diode\_Model). O valor do capacitor  $C_p$  da Figura 2 não foi inserido no modelo do diodo, mas simulado como C1 na Figura 3. O mesmo critério foi adotado para os indutores L1 e L2 que simulam a indutância parasita  $L_L$  para os terminais do diodo e para a indutância  $L_3 = L_S$  em série com o diodo (DIODE1). O valor da impedância do diodo obtido por simulação para 2.5 GHz foi de  $(59.8 - j210.45) \Omega$ . A carta de Smith mostra o valor da impedância  $Z_d$  do diodo em função da frequência na Figura 4, onde  $Z_0 = 50 \Omega$ .

Figura 4: Resultado da simulação da impedância do diodo SMS7630 por carta de Smith.

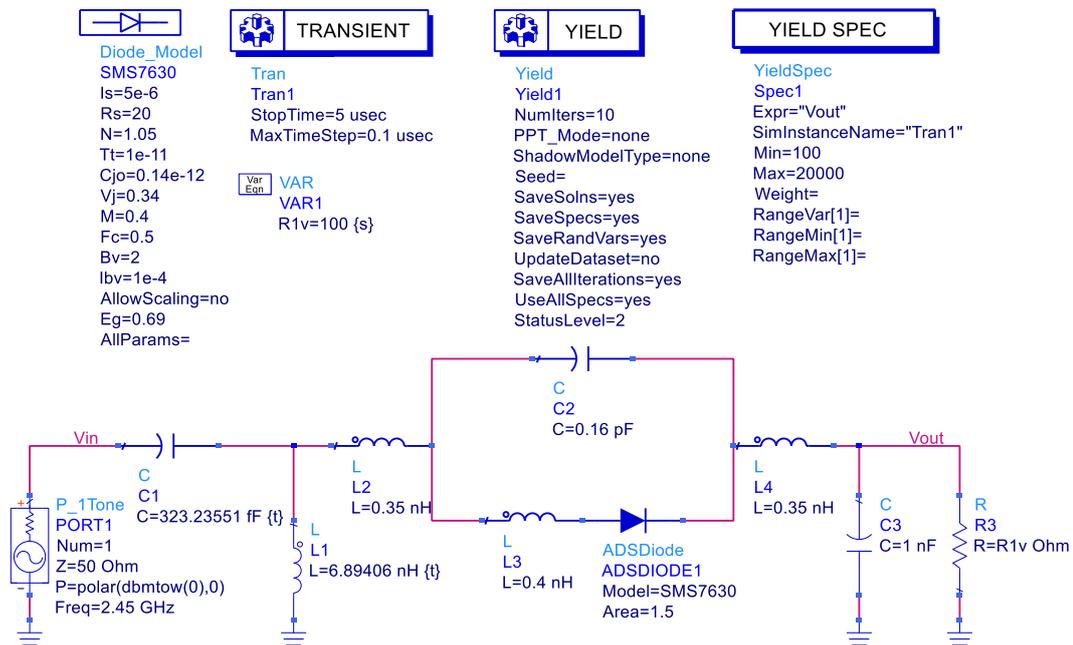


Fonte: Autor

### 3 - ANÁLISE DE CIRCUITO E SIMULAÇÃO.

A partir das simulações propostas na Figura 5, será analisado a variação da impedância da carga (R3) e a variação da potência do sinal de RF captado pela antena, representado por (P\_1Tone), para análise da performance do circuito medindo a variação de tensão na carga (Vout).

Figura 5: Proposta do circuito de simulação com o software ADS.



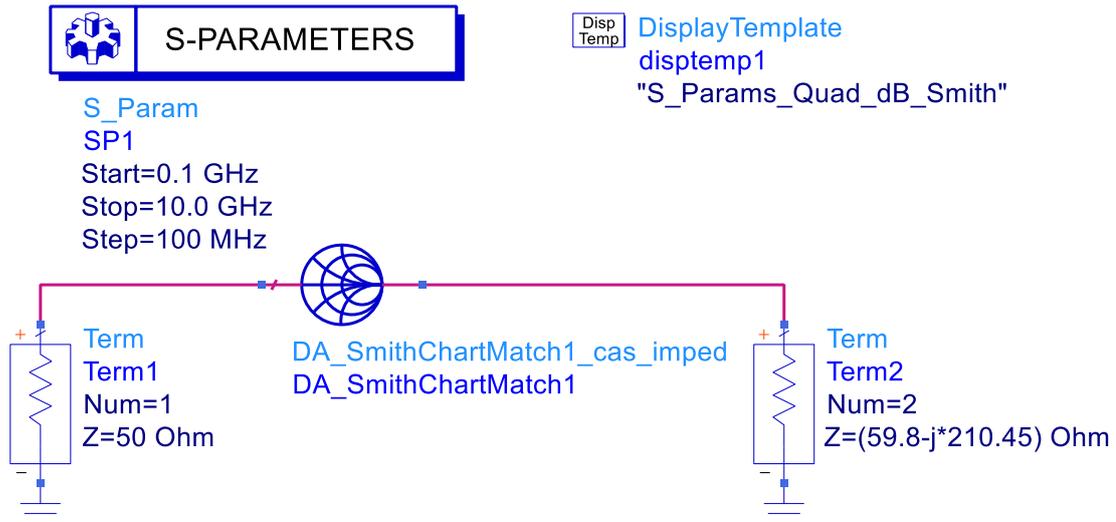
Fonte: Autor

Para contabilizar as variações aleatórias (estatísticas) nos parâmetros do circuito proposto, simulando tais variações ao longo de um determinado número de tentativas, utilizamos os parâmetros de simulação YIELD e YIELD SPEC configurando valores que variam aleatoriamente em relação a seus valores nominais com números máximos de tentativas (NumIters) para calcular uma estimativa da tensão de saída na carga Vout. Na Figura 5, para análise da tensão na carga  $R=R1v \Omega$  foi configurado em YIELD SPEC valores de impedância da carga em um mínimo de 100  $\Omega$  e máximo de 20.000  $\Omega$  fixando a potência captada pela antena em 0 dBm ( $P=polar(dBmtow(0),0)$ ) com 10 interações configurado em YIELD. Para contabilizar as variações de amplitude induzida na antena em YIELD SPEC configuramos a variação de potência mínima em -20 dBm e potência máxima em 10 dBm.

Analisando o circuito retificador de RF proposto na Figura 5, o indutor L1 e o capacitor C1 foram projetados para proporcionar o casamento de impedância entre o diodo Schottky

(ADSDIODE1) e a antena representado pela fonte de RF P\_1Tone com impedância interna  $Z=50 \Omega$  a partir do resultado desenvolvido na simulação da Figura 4. Para o cálculo de L1 e C1 foi utilizado o parâmetro de simulação Smith Chart Matching do ADS, mostrado na Figura 6, onde a terminação 1 (Term1) representa a impedância da antena e a terminação 2 (Term2) representa a impedância complexa do diodo obtido pela simulação da Figura 3.

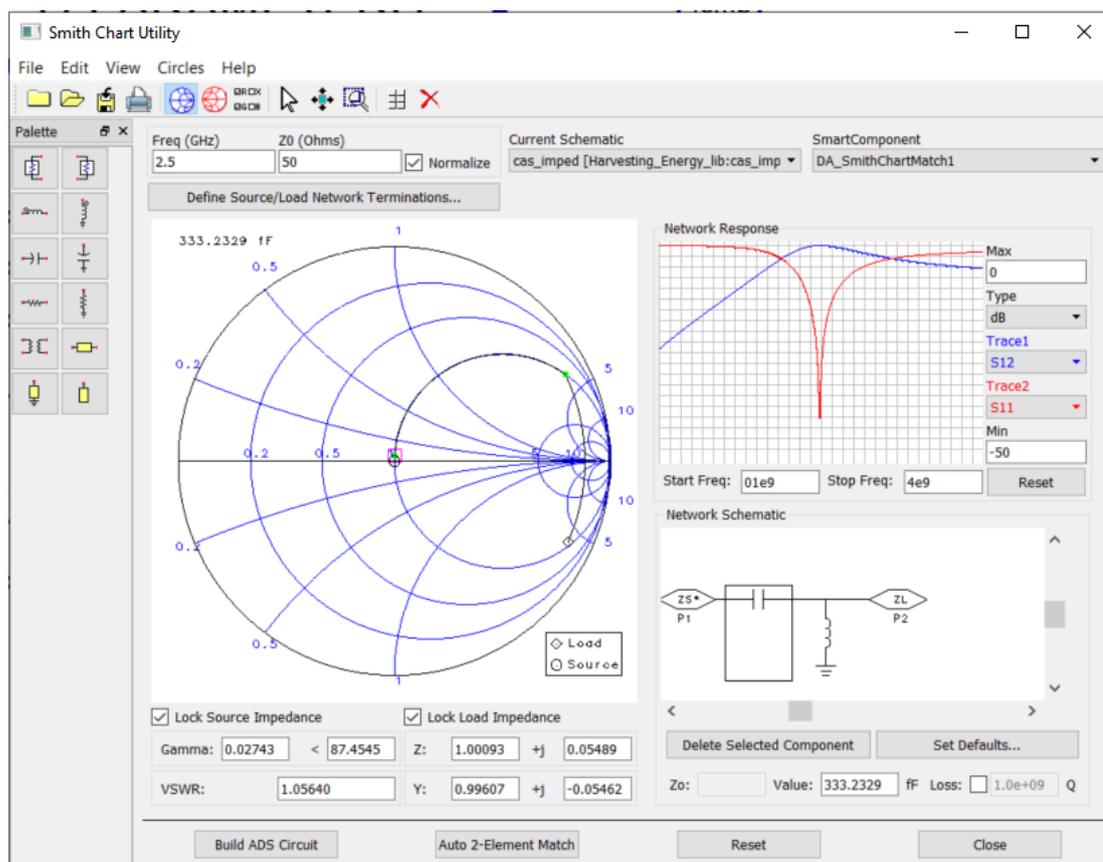
Figura 6: Simulação para casamento de impedância entre a antena e o diodo Schottky.



Fonte: Autor

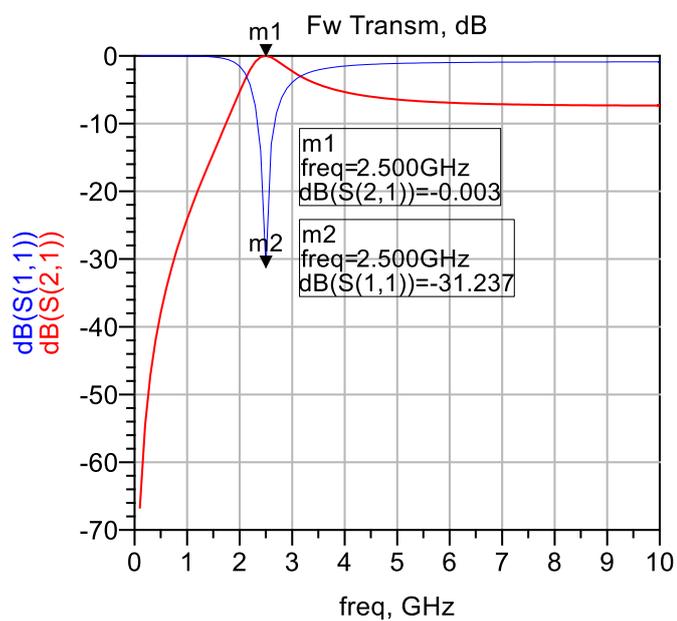
Em Smith Chart Utility, na Figura 7, foi configurado em DefineSource/Load Network Terminations o valor das terminações, Term1 e Term2. Após plotarmos os valores das impedâncias (Term1 e Term2) na carta de Smith, em Palette escolhemos os indutores e capacitores que representam o melhor casamento de impedância entre as duas terminações. Assim, os valores de  $L1 = 6.89406 \text{ nH}$  e  $C1 = 333.23551 \text{ fF}$  foram obtidos para o melhor casamento de impedância. Definido os valores de L1 e C1, os valores calculados foram inseridos no circuito da Figura 5 e o resultado da simulação do casamento de impedância está plotado conforme a Figura 8, onde o marker m1 representa o parâmetro de transmissão  $S21 = 0.003 \text{ dB}$  de atenuação e m2 que representa o parâmetro de simulação  $S11 = -31.237 \text{ dB}$  que é o parâmetro de reflexão entre a antena e o diodo Schottky. A Figura 8 mostra que houve um ótimo resultado obtido na simulação para casamento de impedância devido ao parâmetro de transmissão S21 está com baixa atenuação e o parâmetro de reflexão apresentou um bom casamento de impedância entre a antena e o diodo Schottky devido à baixa reflexão na frequência de 2.5 GHz.

Figura 7: Configuração dos parâmetros de impedância e frequência para cálculo de L1 e C1.



Fonte: Autor

Figura 8: Gráfico dos parâmetros S11 e S21 simulados para casamento de impedância.



Fonte: Autor

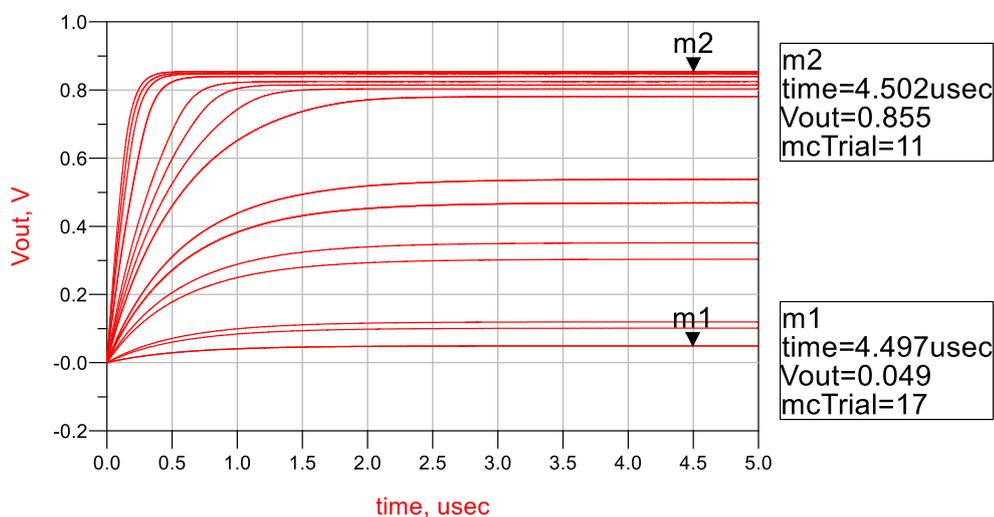
Na simulação do diodo Schottky foi inserido os valores do componente obtidos no Datasheet do fabricante em Diode Model em conjunto com o modelo de simulação do diodo da Figura 3. O capacitor C2 é o filtro passa-baixa na saída do circuito que é carregado pelo sinal de RF captado pela antena com período de carga e descarga de acordo com o valor do capacitor. O valor do capacitor deve ser escolhido para que a tensão de saída fique quase sem ondulações. Essa ondulação residual é conhecida como ripple e quanto menor o ripple, mais constante é a tensão na carga.

#### 4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO.

Para validação do circuito retificador de RF proposto na Figura 5, serão apresentados os resultados das simulações realizadas neste artigo onde o módulo da impedância da carga foi variado de  $100 \Omega$  até  $20 \text{ k}\Omega$  em passos de  $1 \text{ k}\Omega$ , plotado na Figura 9, e a potência de entrada, captada pela antena representada pela fonte P\_1Tone, variado entre  $-20 \text{ dBm}$  a  $+10 \text{ dBm}$ , plotado na Figura 10. Ambas variações foram analisadas medindo a tensão na saída do circuito retificador de RF em Vout conforme mostrado na Figura 5.

Na Figura 9, o comportamento da curva de tensão na saída em relação ao tempo mostra os respectivos valores obtidos, onde m1 mostra a maior tensão obtida com valor de tensão Vout =  $0.855 \text{ Vcc}$  para o maior valor da impedância da saída de  $20 \text{ k}\Omega$ . O menor valor de tensão obtido na simulação mostra que o valor de m2 apresenta um valor de  $0.049 \text{ Vcc}$  para um valor de impedância igual a  $100 \Omega$ . Os valores de Vout simulados na Figura 9 foram obtidos com potência de referência na entrada do circuito retificador de RF fixada em  $0 \text{ dBm}$  ( $1 \text{ mW}$ ) com impedância da antena igual a  $50 \Omega$  gerada pela fonte P1\_Tone.

Figura 9: Tensão de saída Vout com variação da impedância da carga.

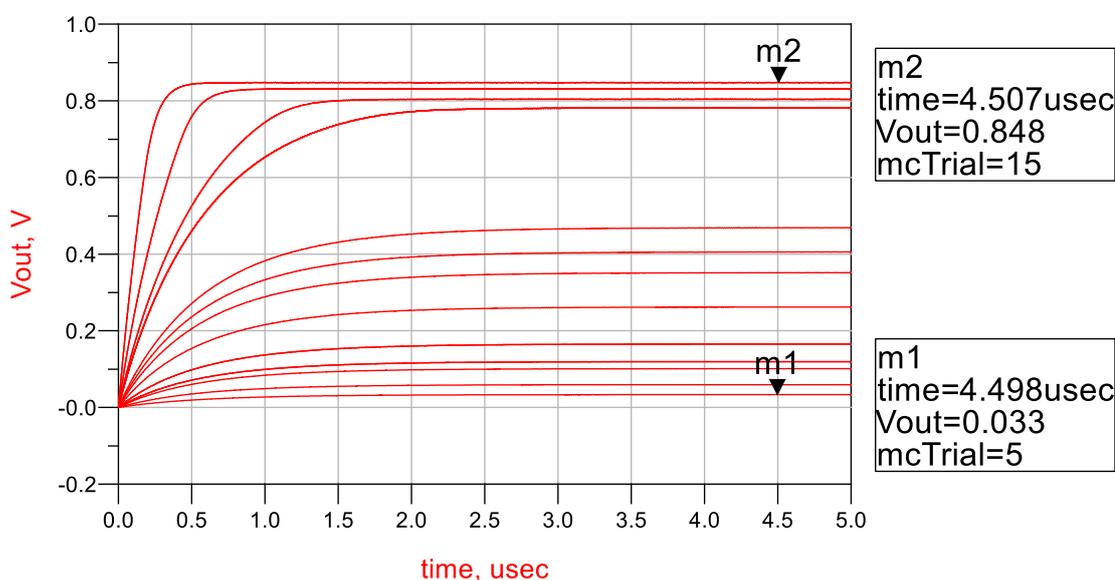


Fonte: Autor.

Os valores intermediários, entre m1 e m2, de  $V_{out}$  obtidos na simulação da Figura 9 são devido aos valores intermediários da impedância que variou entre  $100 \Omega$  e  $20 \text{ k}\Omega$  conforme programado em YIELD SPEC mostrado na Figura 5. O tempo de simulação foi programado no parâmetro Transient na Figura 9 de  $1 \mu\text{s}$  a  $5 \mu\text{s}$  e observamos que o período de transiente do circuito após a detecção da potência na entrada e o período de carga do capacitor C3 está em aproximadamente até  $0.5 \mu\text{s}$ . A estabilidade da tensão na saída do circuito retificador de RF  $V_{out}$  é obtida após o tempo de  $4 \mu\text{s}$ , com tempo de simulação máxima programada até  $5 \mu\text{s}$ .

Os resultados obtidos com a variação da potência de RF na entrada do circuito retificador de RF estão plotados na Figura 10 com o tempo de simulação adotado entre  $1 \mu\text{s}$  a  $5 \mu\text{s}$ . A variação da potência na entrada do circuito retificador de RF apresentou a máxima tensão de saída igual a  $0.848 \text{ Vcc}$  em m1 e a mínima tensão de saída  $0.033 \text{ Vcc}$ . É importante ressaltar que a impedância de saída foi fixada em  $1 \text{ k}\Omega$  e o tempo de simulação foi configurado entre  $1 \mu\text{s}$  a  $5 \mu\text{s}$ .

Figura 10: Tensão de saída  $V_{out}$  com variação da amplitude de RF na antena.

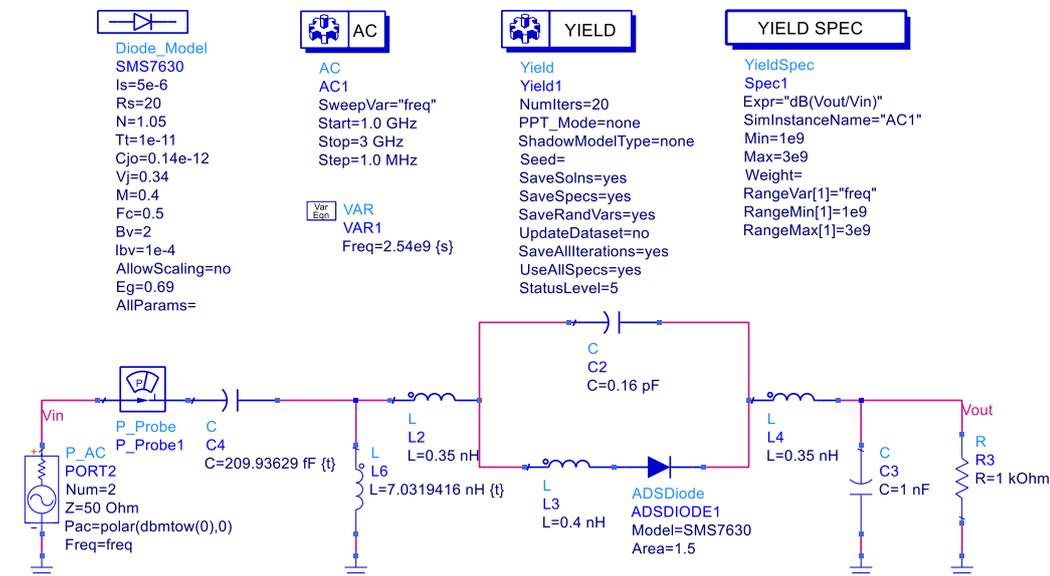


Fonte: Autor.

Para comprovar a eficiência ( $\eta$ ) do circuito retificador de RF, conforme discutido na Equação 2, a Figura 12 mostra o circuito de simulação proposto. Nesta simulação foi inserido a fonte P\_AC para variarmos a potência do sinal em função da frequência, com a fonte P\_AC simulando o sinal captado pela antena, e o Wattímetro P\_Probe para verificarmos a potência entregue para o circuito retificador de RF. A tensão DC será medida no ponto  $V_{out}$  do circuito

e como referência será adotado a carga de 1 kΩ e uma potência fixa de 1 mW (0 dBm) disponibilizada na antena programado em P\_AC.

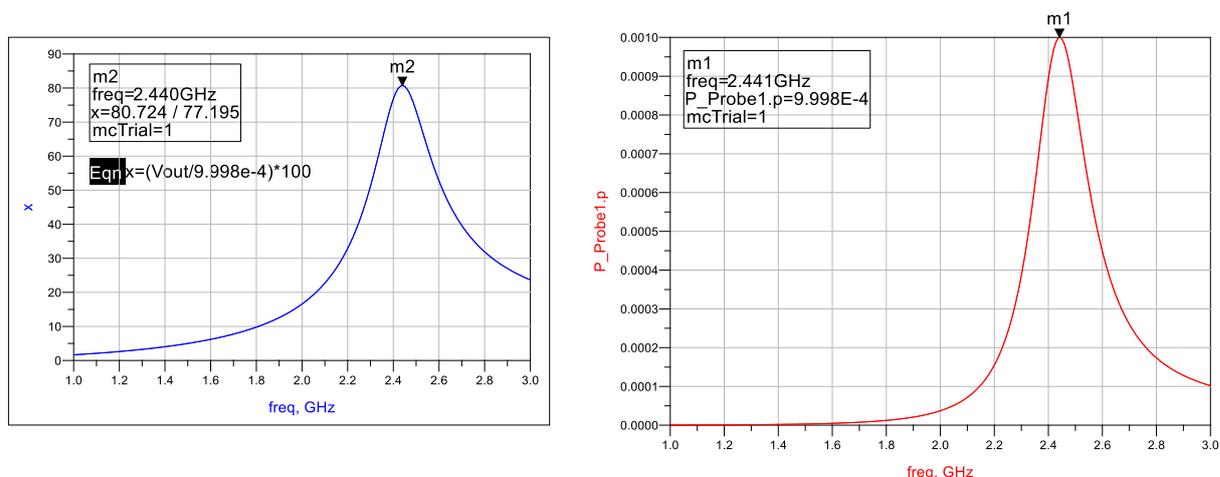
Figura 12 – Circuito proposto para teste de eficiência do retificador de RF.



Fonte: Autor.

A Figura 13 mostra os resultados obtidos e observamos que a máxima eficiência do circuito retificador de RF ficou em 80,72% (marker m2) na frequência de 2.44 GHz. Para as demais frequências a eficiência diminui de acordo com a frequência. Foi programado uma simulação variando as frequências de 1 GHz a 3 GHz para a mesma potência de 0 dBm.

Figura 13 – Eficiência pela variação da potência de entrada captada pela antena em 0 dBm.

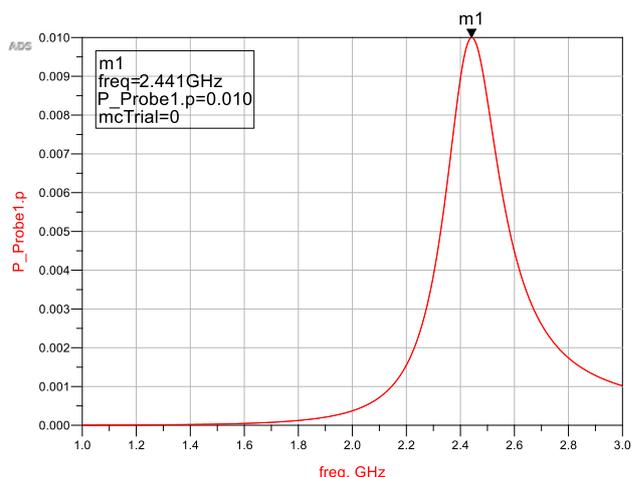
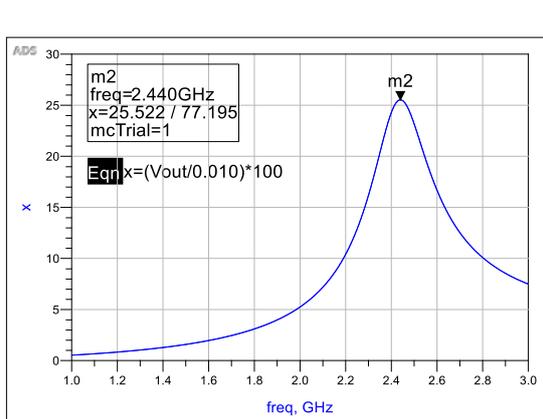


Fonte: Autor.

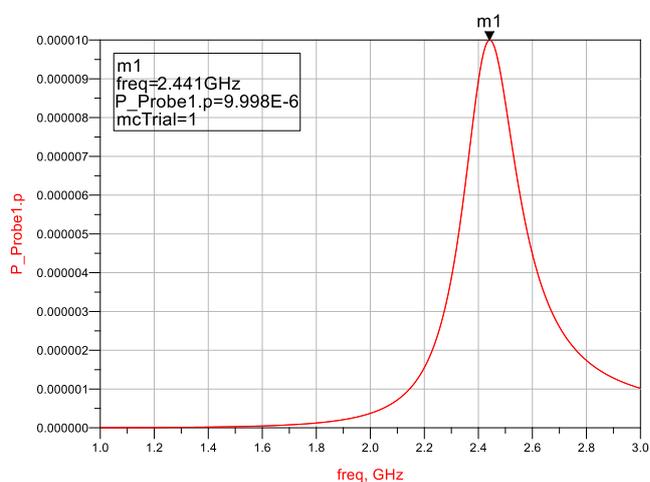
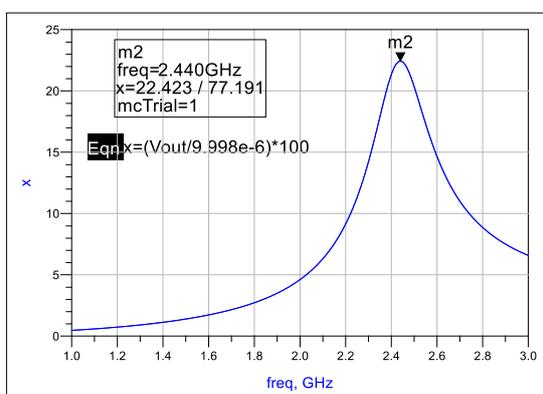
Podemos notar na Figura 13 que o marker m1 está mostrando a potência medida pelo Wattímetro P\_Probe e a potência entregue pela fonte P\_AC que está em 1mW. Para o cálculo da eficiência do circuito foi programado a equação  $Eqn\ x = (Vout/P\_Probe) \times 100$ , cujos valores

foram obtidos do gráfico da Figura 13. Para testar a eficiência para outros níveis de potência recebida pela antena foi simulado a potência de recepção para os valores de -20 dBm e +10 dBm, e os resultados mostrados na Figura 14. Na Figura 14(a), foi captado pela antena uma potência de +10 dBm (0.01 W marker m1) com eficiência de 25.52% (marker m2) e na Figura 14(b) foi captado uma potência de -20 dBm (0.00001 W marker m1) e com uma eficiência de 22.42% (marker m2).

Figura 14 – Eficiência pela variação da potência de entrada captada pela antena.



(a) Potência captada pela antena de +10 dBm



(b) Potência captada pela antena de -20 dBm.

Fonte: Autor.

Na Figura 14, é possível ver que há uma queda de eficiência nos valores obtidos por simulação diferentes do valor de referência de 0 dBm. É fundamental esclarecer que o nível de eficiência mais elevado alcançado pelo circuito retificador de RF pode ser obtido para diferentes níveis de potência captados pela antena. Esse comportamento é esperado que aconteça uma vez

que a porcentagem de potência dissipado sobre o diodo diminui com o aumento de potência na entrada, assumindo que a impedância de entrada é mantida relativamente casada com a antena.

Portanto, na Figura 14(b), para uma potência de entrada igual a -20 dBm, há um decréscimo da eficiência do circuito retificador de RF em comparação com a potência de 0 dBm captada pelo circuito na Figura 13 com uma diferença de eficiência de 58.3%. Para uma potência captada pela antena de +10 dBm também é observado uma queda na eficiência do circuito retificador de RF. Conforme observado a partir das simulações, os valores de potência de entrada que são próximos a 0 dBm mostraram maior eficiência em comparação com outros níveis de potência de entrada de -20 dBm e +10 dBm. Existe uma tendência de obter maiores eficiências para valores mais altos de potência de entrada, no entanto, este trabalho apresentou melhor eficiência em 0 dBm.

## **5 - CONSIDERAÇÕES FINAIS.**

Esse trabalho relata um projeto de retificador de RF para coleta de energia sem fio de baixa potência de entrada. Uma topologia montada com um único diodo é usada e otimizada na tentativa de alcançar alta eficiência. O modelo de diodo SMS-7630 é adotado e inserido os parâmetros na simulação para avaliação da eficiência do mesmo no circuito retificador de RF. O melhor resultado foi obtido ao simular uma potência na antena de 0 dBm com eficiência 80.72% com valores de simulação em aproximadamente 25% e 22% para potências de +10 dBm e -20 dBm.

Para uma melhor transferência de potência entre a antena e a carga foi proposto uma rede em L para casamento de impedância, que foi simulado pela carta de Smith do software ADS. A partir do circuito proposto foi mostrado como é possível captar sinais de RF e transformar em energia DC e vimos neste trabalho também que é necessário um estudo bem detalhado dos componentes a serem escolhidos para que possamos obter um melhor resultado na tensão de saída do circuito retificador de RF.

Como proposta para trabalhos futuros pode-se realizar o protótipo físico deste retificador de RF e comparar os dados das simulações deste artigo com os dados obtidos nas medições utilizando componentes reais além de comparar os resultados com os trabalhos anteriores propondo outras topologias de diodos retificadores como por exemplo dobradores de tensão, retificadores simétricos e retificadores Shunt.

## ABSTRACT

In this work, the analysis and simulation of a radio frequency (RF) rectifier for the ambient energy capture applications are evaluated, highlighting the effects on the output voltage due to the variation of the RF signal power at the antenna and the load impedance value. An impedance model based on a Schottky diode is proposed and its effects are analyzed when connected in the topology of an RF rectifier circuit for a frequency of 2.45 GHz. The simulation was based on a series rectifier diode topology using an L-shaped network for impedance matching with the simulation through the Advanced Design System (ADS) software. From the values obtained in the simulation, the efficiency of the proposed circuit was measured by varying the input power.

## REFERÊNCIAS

CAPOVILLA Carlos Eduardo, SILVA Vinícius S., PAZ Humberto P., CAMBERO Eduardo V. V., ARAÚJO Humberto X., CASELLA R.S. Ivan. **Dual-output quasi-Yagi antenna for out-of-band RF energy harvesting**, IET Microwave. Antennas Propag., 2020, Vol. 14. 10, pp. 1053-1060.

CAPOVILLA Carlos Eduardo, SILVA Vinícius S., PAZ Humberto P., CAMBERO Eduardo V. V., ARAÚJO Humberto X., CASELLA R.S. Ivan. **A Survey on Low Power RF Rectifiers Efficiency for Low Cost Energy Harvesting Applications**, International Journal of Electronics and Communications (2019).

LEE T. J., PATIL P., HU C. Y., RAJABI M., **Design of Efficient Rectifier for Low-Power Wireless Energy Harvesting at 2.45 GHz**, IEEE Radio and Wireless Symposium, 2015.

CURTY J. P., KRUMMENACHER J. F., DEHOLLAIN C., and DECLERQ M. J., **A model for  $\mu$ -power rectifier analysis and design**, IEEE Transactions Circuits and System. 2005.

CAPOVILLA Carlos Eduardo, SILVA Vinícius S., PAZ Humberto P., CAMBERO Eduardo V. V., ARAÚJO Humberto X., CASELLA R.S. Ivan., **Analysis of Rectifiers for RF Energy Harvesting Aiming Low Power Sensing Applications**, *IEEE 15th Brazilian Power Electronics Conference and 5th IEEE Southern Power Electronics Conference*, 2019.

REHMAN M. ur, AHMAD W., and KHAN W. T., **Highly efficient dual band 2.45/5.85 GHz rectifier for RF energy harvesting applications in ISM band**, IEEE Asia Pacific Microwave Conference (APMC), November, 2017.

SHIEH S. and KAMAREI M., **Transient input impedance modeling of rectifiers for RF energy harvesting applications**, IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, March, 2018.

#### SKYWORKS

Skyworks, <https://www.hkchipsource.com/chips/skyworks-solutions/SMS7630-061.html>.

Acessado em: 28. Novembro 2021.

PINUELA M., YATES D.C., LUCYSZYN S., MITCHESON P. D., **London RF survey**, 7th European Conference on Antennas and Propagation, June, 2013.

GU X., HEMOUR S., GUO L., WU K. **Integrated cooperative ambient power harvester collecting ubiquitous radio frequency and kinetic energy**, IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 66, no. 9, pp. 4178–4190, Sep. 2018.

SHIN, J., SEO, M., CHOI, J., SO, J., & CHEON, C, “**A compact and wideband circularly polarized rectenna with high efficiency at x-band,**” Progress in Electromagnetics Research, vol. 145, pp. 163 –173, March 2014.