

Projeto de Iniciação Científica

Edital (04/2022)

Título do projeto: **Estudo e projeto de retificadores de RF com rede de casamento adaptativa em temperatura**

Palavras-chave do projeto: **Rede de Casamento Adaptativa, Temperatura, Retificador de RF, Coleta de Energia**

Área de conhecimento do projeto: **Teoria Eletromagnética, Micro-ondas, Propagação de Ondas, Antenas**

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ABC

PROGRAMA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA

**Estudo e projeto de retificadores de RF com rede de casamento
adaptativa em temperatura**

RESUMO

O presente projeto de IC (Iniciação Científica) tem como escopo o desenvolvimento de competências na área de circuitos de RF e micro-ondas, por meio do estudo e projeto de redes de casamento de impedância adaptativa para retificadores de RF.

Devido a impedância do diodo *Schottky* variar com a temperatura, será alvo dessa IC o estudo e desenvolvimento de uma rede de casamento adaptativa para dois modelos de retificadores de RF (série e paralelo) de maneira que os componentes da rede de casamento possam ser chaveados, mantendo assim, a máxima transferência de potência na maior faixa possível de temperatura de operação.

O projeto e implementação da rede de casamento adaptativa será realizado com o auxílio dos softwares ADS (*Advanced Design System*) e/ou QUCS (*Quite Universal Circuit Simulator*). Posteriormente, tais redes de casamento serão implementadas junto aos protótipos dos retificadores para testes em bancada de maneira a validar a proposta inicial.

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, houve uma constante evolução de circuitos de processamento integrado e redes de sensoriamento remoto que utilizam sensores sem fio e, com isso, surgiram preocupações sobre o consumo e dissipação de energia que afetam o ciclo de vida útil desses dispositivos [1, 2]. Então, inicia-se debates sobre formas de tornar tais dispositivos autossuficientes com relação ao seu consumo energético, pois dispositivos como sensores são alimentados normalmente por baterias, necessitando assim de constantes recargas ou substituições [1, 2]. Tal fato reacendeu as pesquisas sobre coleta de energias disponíveis no ambiente de forma que possibilite maior liberdade para tais dispositivos [3 – 6]. Assim, verifica-se a necessidade da construção de dispositivos autônomos que independem de cabos ou baterias e utilizem, preferencialmente, fontes renováveis. Posto isso, a captação de energia por ondas eletromagnéticas de radio frequência (RF) se torna uma alternativa próspera para a alimentação de dispositivos de baixa potência, de maneira a se buscar a sua autonomia energética [1, 7].

Para a coleta de energia RF é utilizado uma rectena, de maneira simplista, uma antena acoplada a um retificador de RF, que é capaz de coletar energia proveniente de ondas eletromagnéticas e converter em corrente contínua (DC) [8,9].

Para aplicações mais amplas, como em redes de sensoriamento remoto, a banda 2,4 GHz ISM (*Industrial, Scientific, and Medical*) mostra-se como uma opção favorável, pois é livre para desenvolvimento mundial e é utilizada para redes WLAN (*Wireless Local Area Network*) com aplicações principalmente em roteadores Wi-Fi [1, 7].

No trabalho [7] foi apresentado o problema da variação de temperatura no retificador de RF, de modo que, soluções para amenizar tal comportamento necessitam claramente ainda serem estudadas e implementadas, estando até o momento em aberto na literatura.

Em síntese, podemos observar o fenômeno da variação do desempenho de retificadores de RF, devido à alteração da temperatura, com base na análise

do comportamento do diodo *Schottky*, sendo este o elemento chave dos modelos de retificadores de RF estudados nesse projeto.

1.1 Dependência do Diodo *Schottky* com a Temperatura

O diodo *Schottky* possui alguns componentes parasitários e sua impedância (Z_d) em função da frequência angular (ω) é dada por [7]:

$$Z_d(\omega) = \left[\frac{1}{((j\omega C_j + \frac{1}{R_j})^{-1} + R_s + j\omega L_s)^{-1} + j\omega C_p} \right]^{-1} \quad (1.1)$$

Na qual C_j é a capacitância de junção, R_j é a resistência de junção, R_s a resistência série interna, L_s a indutância em série e C_p a capacitância paralela. Pela eq. (1.1), Z_d possui um elemento dependente da temperatura que é a resistência R_j descrita em [7]:

$$R_j = 8.33 \times 10^{-5} n T I_s^{-1} \left[1 - V_d + \frac{V_d^2}{2} \right]^{\frac{1}{nV_t}} \quad (1.2)$$

Na qual T é a temperatura em Kelvin, n o fator ideal, I_s a corrente de saturação e V_d a tensão aplicada no diodo. Assim, a partir da eq. (1.2), verifica-se a relação de R_j com a temperatura.

Ratificando tal comportamento, na Figura 1 pode ser observado o comportamento de Z_d em função de V_d para diferentes temperaturas adotadas no modelamento do diodo *Schottky*.

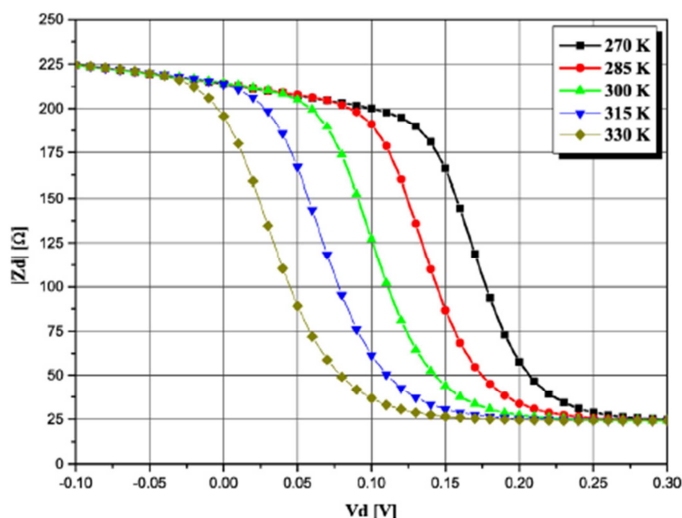


Figura 1 – Z_d em função de V_d variando a temperatura [7].

A partir do gráfico apresentado na Figura 1, observam-se cinco curvas de diferentes temperaturas, nas quais para uma dada tensão V_d , verifica-se que a impedância do diodo varia, como esperado teoricamente, conforme mostrado para cada valor de temperatura.

1.2 Topologias de Retificadores de RF

Um retificador de RF é um circuito capaz de converter um sinal de RF em DC, sendo que tal retificador é composto, basicamente, por uma rede de casamento, um diodo, um filtro passa-baixas e uma carga, como visto na Figura 2.

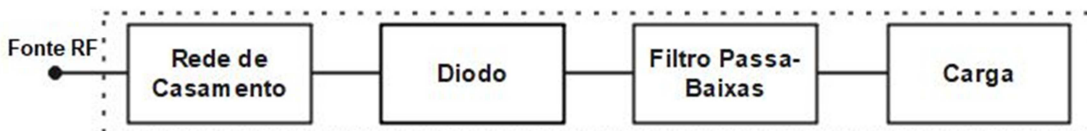


Figura 2 – Diagrama de bloco de um retificador de RF.

Já a eficiência de conversão do retificador de RF, denominada de η_{RF-DC} , é dada pela relação entre a potência na entrada da rede de

casamento (P_{in}) com a potência entregue a carga do retificador (P_{out}). A eficiência de conversão é descrita em [2]:

$$\eta_{RF-DC} = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (2)$$

Existem diversas topologias de retificadores de RF, como o retificador série, retificador paralelo, retificador simétrico, retificador dobrador, entre outras [10, 11]. Para este projeto de IC, as topologias trabalhadas serão o retificador de RF série e o retificador de RF paralelo, pois ambas as topologias apresentaram as melhores eficiências de conversão em baixas potências [7].

As Figuras 3.1 e 3.2 ilustram as topologias dos retificadores de RF que serão utilizadas neste projeto de IC.

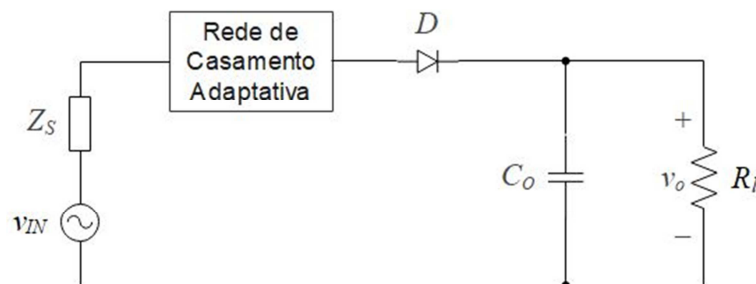


Figura 3.1 – Topologia: Retificador série.

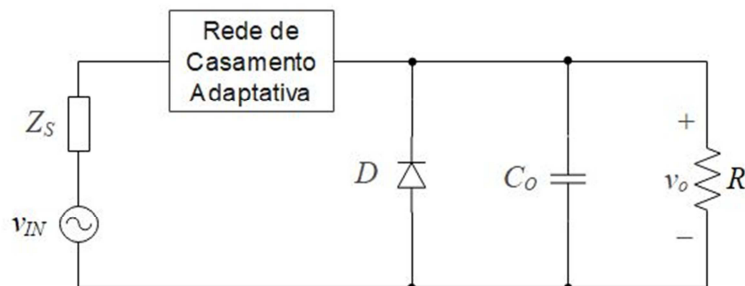


Figura 3.2 – Topologia: Retificador paralelo.

Conforme supracitado observa-se que a rede de casamento de impedância de entrada do retificador é totalmente dependente da impedância do diodo e a mesma varia com a temperatura. Posto isso, nesse contexto se engaja o estudo e projeto de uma rede de casamento que se adapte a diferentes temperaturas de forma que sempre ocorra o casamento mais adequado possível de impedâncias. Logo, devido à ausência de estudos na literatura versando sobre análise de temperatura em retificadores de RF, espera-se que o projeto otimize o retificador de RF e preencha uma lacuna com uma proposta de solução inovadora, e nunca explorada, baseada em redes adaptativas, assim, contribuindo positivamente para as linhas de pesquisas de micro-ondas aplicadas em coleta de energia.

2. OBJETIVOS

O objetivo geral dessa IC consiste no estudo e projeto de redes de casamento para dois retificadores de RF, sendo que as redes de casamento se adaptam a mudança de temperatura, com o intuito de otimizar e solucionar um problema presente em retificadores de RF, no contexto de coleta de energia.

Entre os objetivos específicos, encontram-se:

- Estudo das topologias dos retificadores de RF série e paralelo;
- Projeto e simulação das redes de casamento para os retificadores de RF otimizadas para diferentes temperaturas por meio do uso das ferramentas ADS e/ou QUCS;
- Confecção dos protótipos de retificadores de RF, com a rede de casamento adaptativa, utilizando componentes circuitais e elementos de linhas de transmissão;
- Caracterização dos protótipos e análise dos resultados obtidos;
- A participação no evento “Simpósio de IC (SIC)” da UFABC de 2023 e divulgação dos resultados à comunidade científica.

3. METODOLOGIA

Inicialmente serão utilizadas as ferramentas ADS e/ou QUCS para projetar e analisar as topologias dos retificadores de RF, série e paralelo, e seus respectivos comportamentos em relação à variação de temperatura.

O retificador de RF será composto pela rede de casamento adaptativa, por um diodo *Schottky* (modelo SMS7630-079LF da *Skyworks*), um filtro passa baixas e uma carga, cujo valor também será otimizada para a maximização da eficiência de conversão RF-DC. Para a rede adaptativa em questão, será adotada inicialmente nesse projeto de IC, três temperatura de trabalho, sendo elas 15 °C, 27 °C e 40 °C. Assim, o retificador possuirá três redes de casamento distintas (uma para cada temperatura), as quais serão escolhidas manualmente de maneira discreta entre si, de maneira a que nessa IC seja testado isoladamente o comportamento de cada rede.

A escolha da rede de casamento em questão se dará por meio de *jumpers* de solda entre os componentes dos retificadores de RF. A implementação da rede adaptativa de casamento será por meio de uma micro-linha acoplada a componentes discretos como capacitores e indutores e/ou elementos de linhas de transmissão como micro-linhas, capacitores de toco radial, entre outros.

Então, com o projeto finalizado, inicia-se a etapa de confecção do protótipo dos retificadores. O material utilizado para produzir elementos de linha de transmissão será o substrato de baixo custo FR-4, sendo que o *layout* do circuito pode ser manufaturado sobre a placa de FR-4 por meio de técnicas de corrosão de circuito impresso ou prototipagem via fresadora.

Em seguida, após a prototipagem dos retificadores de meia-onda série e paralelo, será realizada a etapa de caracterização, variando-se a temperatura e consequentemente os *jumpers* de solda, para que seja possível analisar o desempenho da rede de casamento adaptativa e do retificador de RF, dentro da faixa de trabalho alvo do projeto.

4. VIABILIDADE

Para este projeto de IC, os materiais utilizados serão componentes eletrônicos como indutores, capacitores, diodos *Schottky* e elementos de linha de transmissão fabricados em substrato FR-4. Todos os materiais são de fácil obtenção e encontram-se disponíveis na UFABC.

Os principais equipamentos utilizados serão uma câmara climática (*Votsch VTL 4010*) para testes em que serão necessárias as mudanças de temperatura, um analisador de rede (*Rohde & Schwarz ZVB8*) para medir e caracterizar a impedância de entrada do retificador, um gerador de sinais de RF (*Keysight N931A*), um sensor de potência para calibrar as medidas (*Rodhe & Schwarz NRP-Z91*) e um voltímetro (*DMM4040 Tektronix*) para medir sinais DC sobre a carga. Todos os equipamentos descritos também estão disponíveis na UFABC.

5. CRONOGRAMA

Para a execução deste projeto estima-se um prazo de um ano, contado a partir de setembro de 2022. O cronograma de execução dos trabalhos encontra-se subdividido em 5 etapas, facilitando assim a execução do projeto.

Com esse cronograma, pretende-se seguir um fluxo de projeto em circuitos de micro-ondas, possibilitando ao estudante a aquisição de múltiplos conhecimentos na área.

Na Tabela 1 consta o cronograma detalhado com a definição dos prazos ao longo do ano base deste projeto (Setembro 2022 / Agosto 2023). As atividades detalhadas serão descritas logo abaixo da tabela.

Tabela 1: Cronograma básico (Mês/ano)

Atividades Mês-Ano	set/22	out/22	nov/22	dez/22	jan/23	fev/23	mar/23	abr/23	mai/23	jun/23	jul/23	ago/23
<i>Etapa I</i>												
<i>Etapa II</i>												
<i>Etapa III</i>												
<i>Etapa IV</i>												
<i>Etapa V</i>												

Etapa I (Projeto retificador série) – Estudo da topologia do retificador série e projeto de rede de casamento adaptativa para o retificador nas ferramentas de simulação/otimização ADS e/ou QUCS.

Etapa II (Projeto retificador paralelo) – Estudo da topologia do retificador paralelo e projeto de rede de casamento adaptativa para o retificador nas ferramentas de simulação/otimização ADS e/ou QUCS.

Etapa III (Confecção de layout) – Prototipagem dos circuitos retificadores de RF com rede de casamento adaptativa.

Etapa IV (Fase de testes) – Caracterização dos protótipos dos circuitos retificadores de RF e análise dos resultados obtidos.

Etapa V (Apresentação de Resultados) – Documentação e Relatório Técnico.

REFERÊNCIAS

[1] PAZ, H. P. Estudo e implementação de retificadores de radiofrequência para rectenas. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do ABC, 2020.

[2] SILVA, V. S. Projeto de antenas para recepção simultânea de energia e informação: uma abordagem out-of-band. *Dissertação (Mestrado)* – Universidade Federal do ABC, 2020.

- [3] FAN, S. et al. A novel rectenna array with RBR for long-distance WLAN energy harvesting system. In: *2018 IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTC)*. 2018. p. 1–3.
- [4] CHUMA, E. L. et al. Compact rectenna based on a fractal geometry with a high conversion energy efficiency per area. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, v. 12, n. 2, p. 173–178, Feb. 2018.
- [5] ALZHRANI, B.; EJAZ, W. Resource management for cognitive IoT systems with RF energy harvesting in smart cities. *IEEE Access*, v. 6, p. 62717–62727, 2018. ISSN 2169-3536.
- [6] MANSOUR, M. M. et al. Experimental investigation of wireless energy harvesting with a bluetooth low energy sensing unit. In: *2018 International Conference on Electronics Packaging and iMAPS All Asia Conference (ICEP-IAAC)*. 2018. p. 189–193.
- [7] PAZ, H. P.; SILVA, V. S.; CAMBERO, E. V. V.; ARAÚJO, H. X.; CASELLA, I. R. S.; CAPOVILLA, C. E. A survey on low power RF rectifiers efficiency for low cost energy harvesting applications., *AEÜ - International Journal of Eletronics and Communications*, v. 0112, p. 152963, 2019.
- [8] CAMBERO, E. V. V.; PAZ, H. P.; SILVA, V. S.; CONSONNI, D.; CAPOVILLA, C. E.; CASELLA, I. R. S. A Revised Methodology to Analyze the Rectenna Power Conversion Efficiency based on Antenna/Rectifier Interface Losses. *AEÜ - International Journal of Eletronics and Communications*, p. 153686, 2021.
- [9] VALDES CAMBERO, EDUARDO VICENTE; PAZ, HUMBERTO P.; SILVA, VINICIUS S.; ARAUJO, HUMBERTO XAVIER; CASELLA, IVAN R. S.; CAPOVILLA, CARLOS EDUARDO. A 2.4 GHz Rectenna based on a Solar Cell Antenna Array. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, v. 18, p. 2716-2720, 2019.

[10] J. LIU, M. HUANG and Z. DU, "Design of Compact Dual-Band RF Rectifiers for Wireless Power Transfer and Energy Harvesting," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 184901-184908, 2020.

[11] N. SWANGPATTARAPHON and Y. K. TEH, "Impact of Circuit Parameters on Input Impedance of 433.92MHz ISM Band RF Rectifiers," *IEEE International Conference on Semiconductor Electronics (ICSE)*, pp. 1-4, 2020.