

16º Congresso de Inovação, Ciência e Tecnologia do IFSP - 2025

PROJETO E DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE CAPTAÇÃO DE ENERGIA SEM FIO, A PARTIR DE SINAIS DE RÁDIO FREQUÊNCIA DE 100MHz

RICHARD A. SANTANA¹, MARCIO B. MACHADO²

¹Graduando em Bacharelado de Engenharia Elétrica, Bolsista PIBIFSP, campus Sertãozinho, richard.a@aluno.ifsp.edu.br.

²Doutor e Coordenador em Engenharia Elétrica, Orientador, Campus Sertãozinho, bender.machado@ifsp.edu.br.

Área de conhecimento (Tabela CNPq): 3.04.03.03-0 Circuitos Eletrônicos.

RESUMO: Este projeto tem como objetivo investigar e desenvolver uma fonte de energia limpa e de baixo consumo, por meio da captação de sinais de radiofrequência (RF) — técnica conhecida como *Energy Harvesting*. A proposta busca coletar energia eletromagnética emitida por fontes normalmente desperdiçadas, como antenas de rádio, satélites e variações de campo eletromagnético, e convertê-la em energia elétrica utilizável por dispositivos eletrônicos. Essa abordagem é especialmente relevante para aplicações em áreas como medicina e microeletrônica, onde há demanda por soluções energéticas sustentáveis, confiáveis e autossuficientes, como em roteadores para comunicação 6G e até mesmo sistemas de processamento autossuficientes. Para isso, o projeto envolveu o estudo e simulação de casamento de impedância, modelagem de retificadores AC/DC de alta eficiência, análise de reguladores de tensão. As atividades incluíram pesquisas teóricas, modelagens matemáticas e simulações no software LTspice, visando otimizar o desempenho dos circuitos e maximizar a captação de energia. A importância do projeto está na criação de soluções de baixo custo e alta eficiência, alinhadas às exigências da eletrônica moderna, contribuindo com tecnologias mais sustentáveis e acessíveis para dispositivos que operam com baixa potência e necessitam de fontes energéticas alternativas.

PALAVRAS-CHAVE: Energy Harvesting; Radiofrequência (RF); Retificadores AC/DC; Eletrônica analógica; Microeletrônica.

DESIGN AND DEVELOPMENT OF A WIRELESS ENERGY HARVESTING SYSTEM, AT 100 MHz

ABSTRACT: This project aims to investigate and develop a clean and low-power energy source through the harvesting of radio frequency (RF) signals — a technique known as Energy Harvesting. The proposal seeks to capture electromagnetic energy emitted by commonly wasted sources, such as radio antennas, satellites, and electromagnetic field variations, and convert it into usable electrical energy for electronic devices. This approach is particularly relevant for applications in fields such as medicine and microelectronics, where there is a growing demand for sustainable, reliable, and self-sufficient energy solutions — such as in 6G communication routers and even autonomous processing systems. To achieve this, the project involved the study and simulation of impedance matching, modeling of high-efficiency AC/DC rectifiers, analysis of voltage regulators, and development of charge controllers. Activities included theoretical research, mathematical modeling, and simulations using LTspice software, aimed at optimizing circuit performance and maximizing energy harvesting efficiency. The significance of this project lies in the creation of low-cost, high-efficiency solutions aligned with the demands of modern electronics, contributing to more sustainable and accessible technologies for low-power devices that require alternative energy sources.

KEYWORDS: Energy Harvesting; Radio Frequency (RF); AC/DC Rectifiers; Analog Electronics; Microelectronics.

INTRODUÇÃO

A crescente necessidade por fontes de energia sustentáveis e autossuficientes para dispositivos eletrônicos de baixo consumo tem impulsionado o desenvolvimento de tecnologias baseadas em *Energy Harvesting*, com

destaque para a captação de energia via sinais de rádio frequência (RF). A técnica se mostra especialmente promissora em aplicações como dispositivos biomédicos implantáveis e sensores de telemetria, que demandam operação contínua com potências na ordem de microwatts (Gao et al., 2024; Yang et al., 2024; Shi et al., 2020). Nesse cenário, converter eficientemente pequenas quantidades de energia de RF em tensão utilizável exige o uso de conversores adaptados a ultra-baixas tensões, como os modelos para a conversor Dickson, amplamente estudados por Machado (2016), que propõe metodologias de projeto e análise voltadas à maximização da eficiência em condições extremas de baixa potência. Além disso, técnicas de retificação otimizadas e metodologias de casamento de impedância vêm sendo estudadas para aumentar a eficiência do sistema (Ziyue et al., 2022; Chou; Hsieh, 2015; Radin et al., 2022). Este trabalho tem como objetivo projetar, simular e implementar um sistema de captação de energia sem fio operando a 100 MHz, com foco no desenvolvimento de circuitos otimizados para casamento de impedância, retificação AC/DC, controle de carga e armazenamento em bateria. A hipótese central é que, com o uso de técnicas apropriadas de microeletrônica, é possível obter níveis de tensão superiores a 1 V mesmo a partir de potências extremamente baixas, validando o sistema como alternativa viável para aplicações reais (Sidhu et al., 2019; Zhou et al., 2024).

MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia adotada neste projeto seguiu os princípios das metodologias ágeis, com integração contínua entre pesquisa, simulação, desenvolvimento e testes experimentais. Todas as etapas foram realizadas no campus Sertãozinho do IFSP, que oferece infraestrutura adequada para o desenvolvimento e caracterização de circuitos eletrônicos. O projeto foi dividido nas seguintes etapas metodológicas:

Pesquisa e caracterização dos componentes

Realizou-se uma análise dos blocos básicos do sistema, com foco na seleção de componentes comerciais adequados como os **Diodos Schottky**, foram considerados diversos modelos de diodos Schottky, priorizando aqueles com baixa tensão de barreira e alta capacidade de corrente, conforme recomendado por Machado (2016), a fim de otimizar a eficiência do retificador.

Projeto do bloco de casamento de impedância

O casamento de impedância entre a **antena de 50 Ω** e o retificador foi essencial para maximizar a transferência de energia. Para isso, foi adotado um modelo de rede L, onde o equacionamento do casamento de impedância entre a antena e o retificador foi implementado através da obtenção da equação (1), o equacionamento trata de uma função de transferência das impedâncias do circuito, utilizado para obter o diagrama de bode e extrair as faixas de trabalho do circuito. Utilizou-se o software LTSpice para simulação e dimensionamento dos componentes, com o objetivo de obter nível de tensão otimizado na entrada do retificador.

$$F(s) = \frac{S \cdot H}{Xh \cdot H \cdot C \cdot S^2 + H \cdot S + Xh} \quad , \quad (1)$$

onde $F(S)$ é a função de transferência do matching de impedância; S é a variável no domínio da frequência; H é a indutância e C é a capacitância usada no matching de impedância. Xh se refere a indutância interna da antena RF;

Projeto e teste do circuito retificador

Nesta etapa, foi desenvolvido o bloco de retificação AC/DC a partir da metodologia proposta por Radin (2022). O retificador foi projetado como um multiplicador de tensão de múltiplos estágios, utilizando diodos discretos. A partir das especificações de entrada (amplitude e forma de onda) e de saída (tensão contínua e corrente), foram calculados os parâmetros ótimos de operação, para a caracterização dos diodos, utilizou-se valores de corrente de saturação (I_s) e fator de não idealidade (n), conforme dados de Machado (2016).

Implementação e testes do sistema completo

Até o final do projeto, espera-se realizar a simulação e montagem do sistema completo. Considerando os componentes disponíveis no mercado, não só na montagem física, como, também na simulação do sistema completo e não ideal.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a modelagem matemática do circuito de matching de impedância, foram definidos os valores ideais dos componentes passivos para o casamento entre a antena de 50 ohms e o retificador. Com base nos cálculos realizados no MATLAB (Figura 1), os valores de indutância (1 μ H) e capacitância (10 pF) foram determinados como ideais para operação em 100 MHz.

```

1  clc
2  clear all
3
4  Xh = 50;
5  s = tf('s');
6
7  h = 10^-6; % indutância
8  c = 10^-11; % valor ajustado para 0 dB em 100 MHz
9
10 Sysa = (s*h) / (Xh*h*c*s^2 + h*s + Xh);
11
12 bode(Sysa, {1e3, 1e9}); % plota de 1 MHz a 1 GHz
13 grid on
14

```

Figura 1: Função matemática do matching de impedância na linguagem Matlab. Fonte: o autor.

A análise da resposta em frequência, obtida por meio da simulação do diagrama de Bode (Figura 2), confirmou o ganho unitário (0 dB) em 100 MHz. O sistema demonstrou estabilidade mesmo em frequências superiores, o que valida o correto casamento de impedância. Esse comportamento garante que a maior parte da potência do sinal de entrada seja transmitida eficientemente ao retificador, minimizando perdas.

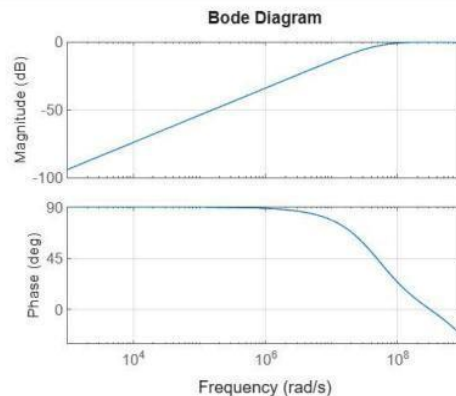


Figura 2: Diagrama de bode referente ao matching de impedância do circuito. Fonte: o autor.

Posteriormente, adotou-se o modelo de simulação apresentado na figura abaixo, (Figura para validar o comportamento da tensão após o casamento de impedância. Observou-se um ganho de tensão superior a 2 Vpp, indicando a efetiva transferência e manutenção da energia captada no circuito.

O resultado da simulação no LTSpice, confirmando a integridade do sinal na saída após o bloco de matching, com baixa perda e boa estabilidade do sinal AC.

Na etapa seguinte, foi construído o **circuito completo** com os blocos de casamento de impedância, amplificação e retificação dobrador de tensão (Figura 3). Esse circuito foi capaz de captar o sinal AC, amplificá-lo e convertê-lo eficientemente em tensão contínua. O circuito foi capaz de entregar uma tensão DC superior a 4V, mesmo a partir de uma entrada de baixa amplitude, validando o sistema proposto. Esse desempenho é coerente com os objetivos do projeto de Energy Harvesting, que busca alimentar dispositivos de baixa potência com fontes alternativas.

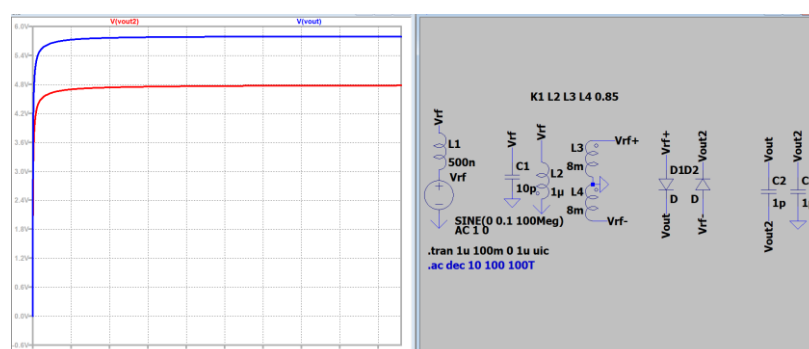


Figura 3: Simulação do circuito completo de matching, amplificação da tensão de entrada e retificação por circuito dobrador de tensão. Fonte: o autor.

CONCLUSÕES

O projeto comprovou a viabilidade de captar energia de sinais de rádio (RF) por meio de **Energy Harvesting**, convertendo-a em tensões DC com valores úteis para alimentar dispositivos de baixa potência. A modelagem e simulações indicaram **casamento de impedância ideal a 100 MHz**, garantindo máxima transferência de energia. O circuito retificador, baseado em diodos Schottky, apresentou bom desempenho, entregando **tensão contínua acima de 1V** a partir de sinais de baixa amplitude. O sistema completo mostrou-se eficiente em simulação, validando sua aplicação em **dispositivos autônomos**, como sensores e eletrônica vestível. Com recursos acessíveis e estrutura do IFSP, foi possível desenvolver uma solução **sustentável, funcional e aplicável**, alinhada às demandas da microeletrônica moderna.

Como continuação do trabalho ao longo do segundo semestre de 2025, espera-se a montagem e teste do protótipo em placa de circuito impresso.

CONTRIBUIÇÕES DOS AUTORES

R.A.S e M.B.M Atuaram na construção do projeto e contribuíram com o desenvolvimento da pesquisa.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que contribuíram de forma direta ou indireta para realização deste projeto. Dedico este artigo a todos que participaram para sua realização, em especial aos professores Marcio B. Machado e Daniel Castilho, pelo apoio e o tempo dedicado.

REFERÊNCIAS

- CHOU, C.; HSIEH, P. A 100-MHz radio-frequency energy harvester for passively powered devices. In: EUROPEAN CONFERENCE ON CIRCUIT THEORY AND DESIGN (ECCTD), 2015, Trondheim, Norway. *Anais... IEEE*, 2015. doi: 10.1109/ECCTD.2015.7300087.
- GAO, Z. et al. Advanced energy harvesters and energy storage for powering wearable and implantable medical devices. *Advanced Materials*, [S. l.]: John Wiley and Sons Inc., v. 36, 2024. doi: 10.1002/adma.202404492.
- MACHADO, Pedro Cominges. *Análise e metodologia de projeto de conversores Dickson modelados para ultrabaixas tensões*. 2016. 73 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso de Engenharia Elétrica, Instituto Federal Sul-rio-grandense, Pelotas, 2016. Disponível em: <https://biblioteca.ifsul.edu.br/acervo/54815>. Acesso em: 1 nov. 2024.
- RADIN, R. L. et al. *Ultralow voltage circuit techniques for energy harvesting*. 1. ed. Cham: Springer, 2022. 149 p.
- SHI, C.; COSTA, T.; ELLOIAN, J.; ZHANG, Y.; SHEPARD, K. L. A 0.065-mm³ monolithically-integrated ultrasonic wireless sensing mote for real-time physiological temperature monitoring. *IEEE Transactions on Biomedical Circuits and Systems*, v. 14, n. 3, p. 412-424, jun. 2020. doi: 10.1109/TBCAS.2020.2971066.
- SIDHU, R. K. et al. A survey study of different RF energy sources for RF energy harvesting. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON AUTOMATION, COMPUTATIONAL AND TECHNOLOGY MANAGEMENT (ICACTM), 2019, London, UK. *Anais... IEEE*, 2019. doi: 10.1109/ICACTM.2019.8776726.
- YANG, J.; ZHAO, S.; WANG, J.; SAWAN, M. Precise and low-power closed-loop neuromodulation through algorithm-integrated circuit co-design. *Frontiers in Neuroscience: Neural Technology*, v. 18, 2024. doi: 10.3389/fnins.2024.1340164.
- ZIYUE, X. et al. Analysis and design methodology of RF energy harvesting rectifier circuit for ultra-low power applications. *IEEE Open Journal of Circuits and Systems*, v. 3, p. 82–96, abr. 2022. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9761164>. Acesso em: 27 out. 2024.

ZHOU, Y. et al. A survey study of different RF energy sources for RF energy harvesting. *Advanced Materials*, [S. l.]: John Wiley and Sons Inc., v. 36, 2024. doi: 10.1002/adma.202404492.