

**UNIVERSIDADE REGIONAL INTEGRADA DO ALTO URUGUAI E DAS MISSÕES
PRÓ-REITORIA DE ENSINO, PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
CÂMPUS DE ERECHIM
ÁREA DE ENGENHARIAS E CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

EDUARDO SPANHOL LOREIAN

**SISTEMA DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA SEM FIO POR RADIOFREQUÊNCIA
PARA ALIMENTAÇÃO DE SENSORES SEM FIO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**ERECHIM - RS
2024**

EDUARDO SPANHOL LOREIAN

**SISTEMA DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA SEM FIO POR RADIOFREQUÊNCIA
PARA ALIMENTAÇÃO DE SENSORES SEM FIO**

**Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Engenharia Elétrica como
requisito parcial à obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Elétrica, Área de
Engenharias e Ciência da Computação da
Universidade Regional Integrada do Alto
Uruguai e das Missões - Câmpus de Erechim.**

Orientador: Prof. Me. Deividi Felipe Zaions

**ERECHIM - RS
2024**

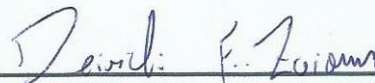
EDUARDO SPANHOL LOREIAN

**SISTEMA DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA SEM FIO POR RADIOFREQUÊNCIA
PARA ALIMENTAÇÃO DE SENSORES SEM FIO**


**Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Engenharia Elétrica como
requisito parcial à obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Elétrica, Área de
Engenharias e Ciência da Computação da
Universidade Regional Integrada do Alto
Uruguai e das Missões – Câmpus de Erechim.**

Erechim, 13 de dezembro de 2024.

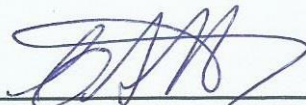
BANCA EXAMINADORA



Prof. Me. Deividi Felipe Zaions (Orientador)
URI Erechim



Prof. Dr. Cássio Luciano Baratieri (Examinador)
URI Erechim



Prof. Me. Clodomir Antônio Martinazzo (Examinador)
URI Erechim

Dedico este trabalho à minha família, por todo o apoio, carinho e compreensão ao longo desta jornada.

*The present is theirs; the future, for which I
really worked, is mine.*

(Nikola Tesla)

RESUMO

O presente trabalho propõe o estudo e desenvolvimento de um sistema de transmissão de energia sem fio por radiofrequência com objetivo de alimentar sensores sem fio. A fundamentação e contextualização foram realizadas com base na revisão bibliográfica, que apresenta um histórico da transmissão de energia sem fio, destacando os pioneiros como Nikola Tesla e os avanços tecnológicos subsequentes que tornaram essa tecnologia viável para aplicações modernas. Diferentes métodos de transmissão são explorados, incluindo acoplamento indutivo, ressonante e capacitivo, além da transmissão por laser e micro-ondas. Conceitos fundamentais como ondas de rádio, propagação em espaço livre e casamento de impedâncias são abordados, juntamente com os componentes chave do sistema, como transmissores, receptores, colheita de energia e antenas. Em seguida foram definidos os componentes do sistema, primeiramente o circuito transmissor, composto por um *Phase-Locked Loop* para estabilização da frequência, um oscilador controlado por tensão, um amplificador de potência, um filtro passa-faixa e uma antena transmissora. Com foco na comparação de desempenho, foram projetados três receptores utilizando diferentes métodos de retificação: retificador de onda completa, retificador multiplicador de tensão com dois diodos e multiplicador de tensão Dickson. Os receptores foram desenvolvidos tendo como foco operar com uma antena compacta adequada para captar o sinal de radiofrequência, um filtro passa-faixa LC para filtrar a faixa de frequência desejada e o circuito retificador. O sinal de radiofrequência recebido é inicialmente convertido em corrente alternada pela antena e, em seguida, transformado em corrente contínua pelo circuito retificador. A partir disso, foram simulados circuitos essenciais, como o oscilador e o filtro passa-faixa, fundamentais para o correto funcionamento do sistema de transmissão. Posteriormente foram realizadas simulações para o sistema do receptor, os três circuitos retificadores do receptor e o filtro LC do circuito foram simulados. Permitindo avaliar o desempenho do filtro e de cada método de retificação, onde o retificador multiplicador de tensão Dickson apresentou o melhor desempenho. Em seguida, foram construídos três protótipos do receptor utilizando placas perfuradas de fenolite como base para os componentes. Foram realizados testes no modo de colheita de energia e utilizando um transmissor pré-fabricado, alimentando os receptores a uma distância de três metros. Durante os testes, observou-se que somente utilizando o transmissor foi possível obter tensões superiores a 3V, o que indicou que o modo de colheita de energia, apesar de funcional, não foi capaz de fornecer a potência desejada. Por fim, a análise comparativa dos protótipos demonstrou que os receptores com retificação de onda completa e multiplicador de tensão com dois diodos não forneceram tensão estável ou suficiente para alimentar o sistema do sensor de forma contínua. Em contrapartida, o multiplicador de tensão Dickson se destacou por fornecer energia estável para alimentar o sistema. Diante dos resultados obtidos, conclui-se que, para sistemas de sensores sem fio de baixa potência, o receptor com retificador multiplicador de tensão Dickson se apresenta como a alternativa mais eficiente e confiável. Sua capacidade de fornecer energia estável destaca-se frente às limitações observadas nos outros protótipos, tornando-o uma solução promissora para aplicações que demandam eficiência e estabilidade energética.

Palavras-chave: Radiofrequência. Transmissão de Energia Sem Fio. Transmissor. Antena. Receptor.

ABSTRACT

The present academic work proposes the study and development of a wireless energy transmission system using radiofrequency to power wireless sensors. The foundation and contextualization were carried out based on a literature review, presenting the history of wireless energy transmission, highlighting pioneers such as Nikola Tesla, and the subsequent technological advancements that made this technology viable for modern applications. Different transmission methods are explored, including inductive, resonant, and capacitive coupling, as well as laser and microwave transmission. Fundamental concepts such as radio waves, free-space propagation, and impedance matching are addressed, along with key system components such as transmitters, receivers, energy harvesting, and antennas. The system components were then defined, starting with the transmitter circuit, which comprises a Phase-Locked Loop for frequency stabilization, a voltage-controlled oscillator, a power amplifier, a band-pass filter, and a transmitting antenna. Focusing on performance comparison, three receivers were designed using different rectification methods, full-wave rectifier, voltage multiplier rectifier with two diodes, and Dickson voltage multiplier. The receivers were developed to operate with a compact antenna suitable for capturing the radiofrequency signal, an LC band-pass filter to filter the desired frequency range, and the rectifier circuit. The radiofrequency signal received is initially converted into alternating current by the antenna and then transformed into direct current by the rectifier circuit. Essential circuits such as the oscillator and the band-pass filter, fundamental for the proper functioning of the transmission system, were simulated. Subsequently, simulations were performed for the receiver system, including the three rectifier circuits and the LC filter. This allowed for evaluating the performance of the filter and each rectification method, where the Dickson voltage multiplier rectifier showed the best performance. Three receiver prototypes were then built using perforated phenolic boards as a base for the components. Tests were conducted in energy harvesting mode and using a prefabricated transmitter, powering the receivers at a distance of three meters. During the tests, it was observed that only by using the transmitter was it possible to obtain voltages above 3V, indicating that the energy harvesting mode, although functional, was not capable of providing the desired power. Finally, the comparative analysis of the prototypes demonstrated that the receivers with full-wave rectification and the voltage multiplier with two diodes did not provide stable or sufficient voltage to continuously power the sensor system. In contrast, the Dickson voltage multiplier stood out for providing stable energy to power the system. Based on the results obtained, it is concluded that for low-power wireless sensor systems, the receiver with a Dickson voltage multiplier rectifier is the most efficient and reliable alternative. Its ability to provide stable energy stands out compared to the limitations observed in the other prototypes, making it a promising solution for applications requiring energy efficiency and stability.

Keywords: Radio Frequency. Wireless Power Transmission. Transmitter. Antenna. Receiver.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Torre de Wardencllyffe	16
Figura 2 - Tipos de Transmissão de Energia Sem Fio	18
Figura 3 - Acoplamento Indutivo	19
Figura 4 - Acoplamento Ressonante	20
Figura 5 - Acoplamento Capacitivo.....	21
Figura 6 - Transmissão de Energia por Laser.....	23
Figura 7 - Transmissão de Energia por Micro-ondas.....	23
Figura 8 - Faixa de Frequência das Ondas de Rádio	25
Figura 9 - Classificação das Ondas de Rádio	25
Figura 10 - Perda de Sinal em Espaço Livre	26
Figura 11 - Circuitos para Casamento de Impedâncias.....	27
Figura 12 - Sistema de Transmissor RF.....	28
Figura 13 - Retificador de Onda Completa	32
Figura 14 - Rectenna.....	33
Figura 15 - Antena de Patch e Antena Dipolo.....	34
Figura 16 - Rede de Sensores Sem Fio	35
Figura 17 - Diagrama de Blocos do Transmissor	39
Figura 18 - Controlador PLL.....	40
Figura 19 - Circuito do VCO.....	41
Figura 20 - Transistor 2SC1971	42
Figura 21 - Circuito do Transmissor Completo.....	43
Figura 22 - Diagrama de Blocos do Receptor	44
Figura 23 - Cálculos do Filtro Passa-Faixa do Receptor	45
Figura 24 - Retificador de Onda Completa	46
Figura 25 - Circuito do Amplificador de Tensão.....	47
Figura 26 - Multiplicador de Tensão Dickson.....	47
Figura 27 - Antena do Transmissor	49
Figura 28 - Antena do Receptor.....	49
Figura 29 - Carga a ser utilizada.....	50
Figura 30 - Senoide do Oscilador	52
Figura 31 - Simulação do Filtro Passa-Faixa do Transmissor.....	52
Figura 32 - Atenuação do Filtro do Transmissor.....	53

Figura 33 - Circuito do Filtro Passa-Faixa Simulado	54
Figura 34 - Simulação do Filtro Passa-Faixa do Receptor.....	54
Figura 35 - Atenuação do Filtro do Receptor.....	55
Figura 36 - Receptor com Retificador de Onda Completa.....	56
Figura 37 - Tensões do Receptor com Retificador de Onda Completa	57
Figura 38 - Receptor com Retificador Multiplicador de Tensão.....	57
Figura 39 - Tensões do Receptor com Retificador Multiplicador de Tensão	58
Figura 40 - Receptor com Retificador Multiplicador de Tensão Dickson	58
Figura 41 - Tensões do Receptor com Retificador Multiplicador de Tensão Dickson.....	59
Figura 42 - Ajuste da Antena.....	59
Figura 43 - Antena Ajustada.....	60
Figura 44 - Antena Conectada ao Protótipo do Receptor	61
Figura 45 - Sistema do Sensor.....	62
Figura 46 - Sistema Completo Montado	62

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
FSPL	<i>Free Space Path Loss</i> - Perdas em Espaço Livre
IoT	<i>Internet of Things</i> - Internet das Coisas
LCD	Display de Cristal Líquido
LPT	<i>Laser Power Transfer</i> - Transmissão de Energia por Laser
PLL	<i>Phase Locked Loop</i>
RF	Radiofrequência
RFID	<i>Radio Frequency Identification</i>
RSSF	Rede de Sensores Sem Fio
VCO	<i>Voltage-controlled Oscillator</i> - Oscilador Controlado por Tensão

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 Objetivos	14
1.1.1 Objetivos Específicos	14
2 REVISÃO DE LITERATURA	15
2.1 História e Evolução da Transmissão de Energia Sem Fio	15
2.2 Tipos de Transmissão de Energia Sem Fio	17
2.2.1 Transmissão de Campo Próximo (<i>Near-Field</i>)	18
2.2.1.1 Acoplamento Indutivo	18
2.2.1.2 Acoplamento Indutivo Ressonante	19
2.2.1.3 Acoplamento Capacitivo	21
2.2.2 Transmissão de Campo Distante (<i>Far-Field</i>)	21
2.2.2.1 Transmissão por Laser	22
2.2.2.2 Transmissão por Micro-ondas	23
2.3 Conceitos da Transmissão de Energia por Radiofrequência	24
2.3.1 Ondas de Rádio	24
2.3.2 Propagação em Espaço Livre	26
2.3.3 Casamento de Impedâncias	27
2.4 Componentes e Tecnologias Envolvidas	28
2.4.1 Transmissor de Radiofrequências	28
2.4.1.1 Oscilador	29
2.4.1.2 PLL	29
2.4.1.3 Amplificador de Radiofrequências	30
2.4.1.4 Filtragem de Sinal	30
2.4.2 Receptor de Radiofrequências	31
2.4.2.1 Retificador	31
2.4.2.2 Filtro do Receptor	32
2.4.3 Colheita de Energia de Radiofrequência	32
2.4.4 Antena Transmissora	33
2.5 Sensores Sem Fio	34
2.6 Trabalhos Correlacionados	36
3 METODOLOGIA	39

3.1 Transmissor	39
3.1.1 PLL (Phase-Locked Loop).....	39
3.1.2 VCO.....	40
3.1.3 Amplificador de Potência	42
3.1.4 Circuito Completo do Transmissor	42
3.2 Receptor	44
3.2.1 Filtro LC.....	44
3.2.2 Circuito Retificador	45
3.2.3 Retificador de Onda Completa.....	46
3.2.4 Retificador Multiplicador de Tensão	46
3.2.5 Retificador Multiplicador de Tensão Dickson	47
3.3 Antenas	48
3.4 Carga de Sensor	49
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	51
4.1 Sistema do Transmissor	51
4.1.1 Simulações do Transmissor	51
4.2 Sistema do Receptor	53
4.2.1 Simulações do Receptor.....	53
4.2.2 Implementação na Prática do Receptor	55
4.2.2.1 Receptor com Retificador de Onda Completa	56
4.2.2.2 Receptor com Retificador Multiplicador de Tensão	57
4.2.2.3 Receptor com Retificador Multiplicador de Tensão Dickson	58
4.3 Antenas	59
4.4 Sistema do Sensor	61
4.4.1 Testes e Alimentação do Sistema.....	62
5 CONCLUSÕES	63
5.1 Perspectivas Futuras	63
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	65

1 INTRODUÇÃO

A ideia de transmitir energia elétrica sem o uso fios, tem sido um sonho da humanidade desde os primórdios da era da energia elétrica, um campo em que Nikola Tesla obteve as primeiras conquistas a partir do final do século XIX e início do século XX. (ANDREI; CLAUDIU; VADAN, 2019).

Tesla, um dos maiores inventores e visionários de sua época, explorou o potencial da eletricidade e do eletromagnetismo, vislumbrando um mundo onde a energia poderia ser transmitida sem a necessidade de cabos físicos. Seus experimentos, incluindo os famosos testes na Torre de Wardencllyffe, projeto ambicioso que visava fornecer energia sem fio para todo o mundo, lançaram as bases para o desenvolvimento futuro de sistemas modernos de transmissão de energia sem fio.

Ao longo do século XX, houve avanços significativos na compreensão da física das ondas eletromagnéticas, bem como no desenvolvimento de tecnologias de comunicação sem fio, como rádio e televisão. Esses avanços proporcionaram uma base sólida para o desenvolvimento de sistemas mais avançados.

No entanto, foi somente nas últimas décadas que esses sistemas começaram a ser explorados em aplicações práticas, impulsionados pelo aumento da demanda por soluções de energia sem fio em uma variedade de setores. Dentre essas soluções, a transmissão de energia sem fio por radiofrequência destaca-se como uma alternativa promissora para um uso em específico, alimentar sensores sem fio.

De acordo com Ishii et al. (2021) rede de sensores sem fio é um sistema que constrói uma rede independente de vários sensores. As informações coletadas por esses sensores podem ser usadas para várias aplicações. Como por exemplo, detecção de anomalias em sistemas de cidades inteligentes. Muitas dessas aplicações são para fins de monitoramento e exigem manutenção constante. Alocar muitas baterias para cada sensor é caro, então uma tecnologia chamada transmissão de energia sem fio por RF tem chamado a atenção.

O crescimento exponencial de dispositivos conectados sem fio de baixo consumo (estimados em 40 bilhões de dispositivos até 2025) traz desafios energéticos significativos para sua operação autônoma. O uso de baterias é desafiador por uma série de razões ambientais, econômicas e práticas. Fontes de energia alternativas, podem complementar ou substituir o uso de baterias. (NIOTAKI et al., 2023)

A transmissão de energia via radiofrequência oferece várias vantagens para alimentar sensores sem fio, incluindo a capacidade de fornecer energia a múltiplos dispositivos

simultaneamente, sem a necessidade de contato físico ou alinhamento preciso. Além disso, as ondas de rádio podem atravessar objetos, permitindo uma maior flexibilidade na colocação dos sensores e configuração da rede.

No entanto, a implementação eficaz da transmissão de energia por radiofrequência enfrenta desafios significativos, como a eficiência da conversão de energia, a distância de transmissão, e a interferência com outros sistemas de comunicação. Esses desafios exigem uma abordagem multidisciplinar, envolvendo avanços em tecnologia de antenas, circuitos de RF, gerenciamento de energia e protocolos de comunicação.

Desta maneira, o seguinte trabalho propõe o estudo e desenvolvimento de um sistema de transmissão de energia por rádio frequência, com o objetivo de alimentar sensores sem fio.

1.1 Objetivos

- Este trabalho tem o objetivo de projetar, desenvolver e avaliar um sistema de transmissão de energia sem fio por radiofrequência para alimentar sensores sem fio.

1.1.1 Objetivos Específicos

Dos objetivos específicos a serem cumpridos, destacam-se:

- Projetar e implementar um sistema de transmissão de energia sem fio com eficiência energética, considerando aspectos como seleção de frequência, modulação e controle de potência;
- Construir um protótipo funcional do sistema de transmissão de energia, integrando sensores e realizando testes de funcionamento em ambiente controlado;
- Avaliar o desempenho do sistema de transmissão de energia em termos de alcance de transmissão, taxa de transferência de energia e estabilidade da alimentação dos sensores;
- Investigar e aplicar técnicas de otimização para melhorar a eficiência e a robustez do sistema de transmissão de energia, buscando minimizar perdas e maximizar a confiabilidade da transmissão.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Este capítulo visa explorar os desenvolvimentos tecnológicos, conceitos básicos e componentes utilizados no desenvolvimento dessa abordagem. Esta revisão fundamenta a teoria que guiará o desenvolvimento de protótipos, destacando-se como um passo essencial na exploração eficiente dessas tecnologias.

2.1 História e Evolução da Transmissão de Energia Sem Fio

O estudo dos fenômenos eletromagnéticos apresentou um desenvolvimento significativo ao longo dos séculos XIX e XX, resultando em uma série de descobertas fundamentais que estabeleceram as bases da teoria e tecnologia da transmissão de energia sem fio. Nikola Tesla, em suas investigações sobre a transmissão de energia elétrica, destacou a possibilidade de desenvolver um sistema que permitisse a transferência de energia sem fios, o que poderia revolucionar a forma como a eletricidade é distribuída e utilizada. (TESLA, 1914).

Os experimentos iniciais e as observações feitas por cientistas pioneiros contribuíram para a compreensão dos princípios que governam a interação entre eletricidade e magnetismo. Esses avanços foram cruciais para o desenvolvimento de tecnologias que possibilitaram a transmissão de sinais e, eventualmente, de energia elétrica sem o uso de fios.

Em 1820, Hans Oersted, durante uma palestra, observou a deflexão de uma agulha de uma bússola quando a corrente elétrica passava por um fio, comprovando assim o efeito magnético da eletricidade. Em 1826, André-Marie Ampère, por meio de sua lei de circuito, formulou a relação entre a corrente elétrica e o campo magnético gerado. Em 1831, a lei de Faraday descreveu que a força eletromagnética pode ser induzida em um condutor por um fluxo magnético variável. Em 1888, Heinrich Hertz confirmou a existência da radiação eletromagnética. Em 1891, Nikola Tesla aprimorou o transmissor sem fio de Hertz e o registrou em uma patente. (SHADID et al., 2016).

A evolução da tecnologia de transmissão de energia sem fio é marcada por feitos significativos ao longo dos séculos XIX, XX e XXI. Inicialmente, a ideia de transmitir energia sem fio foi proposta por Nikola Tesla no final do século XIX. Tesla, um inventor prolífico e visionário, desenvolveu teorias e experimentos sobre a transmissão de energia elétrica sem o uso de fios, utilizando campos magnéticos e elétricos.

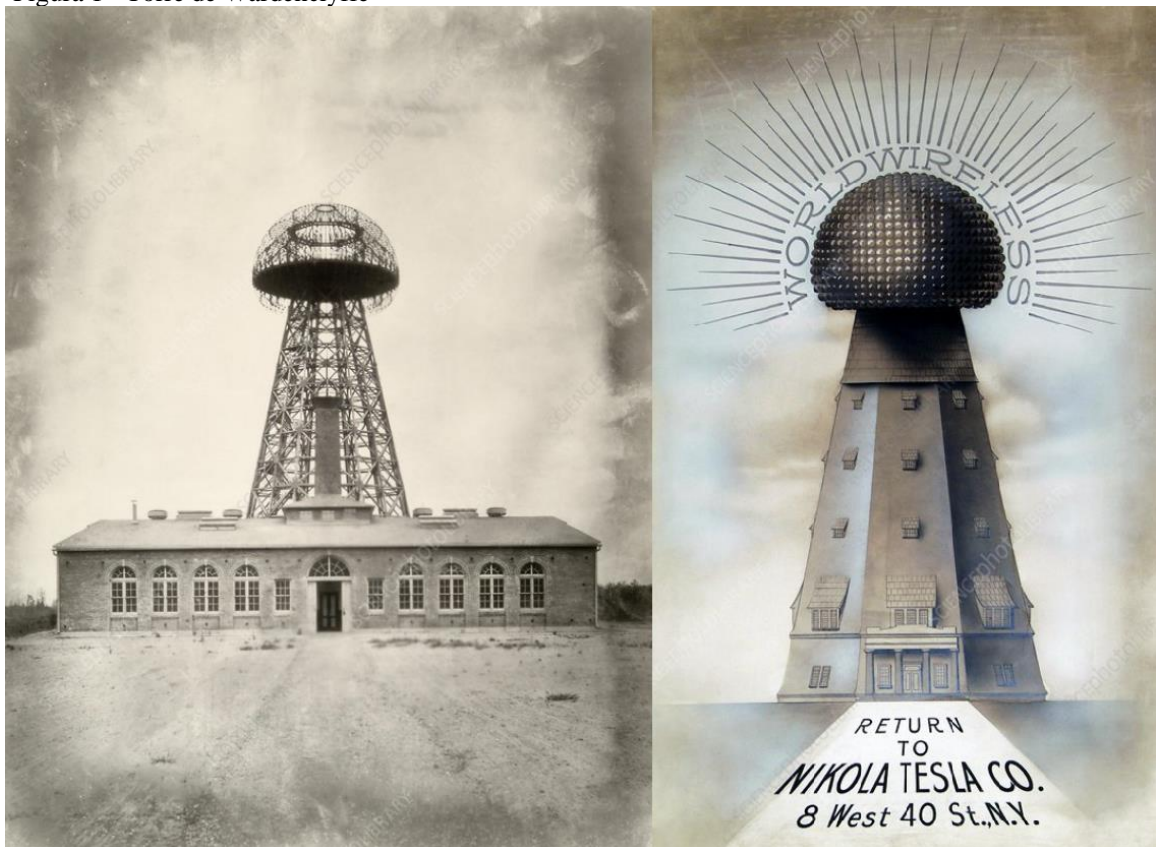
De acordo com Andrei et al. (2019), mesmo antes do desenvolvimento das redes elétricas, Nikola Tesla tentou implementar um sistema de transmissão de energia em larga

escala para longas distâncias. Em 1893, Tesla demonstrou a iluminação de lâmpadas a partir do vácuo por meio de um circuito ressonante, sem utilizar fios para a transmissão de energia, na Exposição Mundial em Chicago. Em 1899, Nikola Tesla realizou uma demonstração de transmissão de energia sem fio, energizando um campo de lâmpadas fluorescentes localizadas a quarenta quilômetros de sua fonte de energia inicial.

A principal ideia de Tesla era transmitir eletricidade para qualquer lugar do mundo. Nesse sentido, ele realizou experimentos bem-sucedidos em seu laboratório em Colorado Springs, Colorado, na década de 1900. Utilizando uma frequência de 150 kHz e uma potência de 300 kW no transmissor, ele conseguiu coletar algumas descargas elétricas a 50 km da fonte. (ANDREI et al., 2019).

Um dos experimentos mais notáveis de Tesla foi a Torre de Wardenclyffe, um projeto ambicioso concebido para transmitir energia elétrica sem fio em larga escala. Embora o projeto tenha sido interrompido devido a questões financeiras, a visão de Tesla influenciou significativamente o desenvolvimento da tecnologia. Conforme ilustrado na Figura 1 observa-se a esquerda estágio final que a construção da torre atingiu, e direita a projeção do resultado planejado.

Figura 1 - Torre de Wardenclyffe



Fonte: Science Photo Library (2024).

Durante o século XX, houve avanços significativos na compreensão dos princípios físicos por trás da transmissão de energia sem fio. A radiofrequência tornou-se amplamente utilizada para comunicações, mas por outro lado a transmissão de energia sem fio permaneceu sendo um desafio devido às limitações tecnológicas e de eficiência energética. Apesar desses desafios, foram realizados avanços significativos para o futuro da tecnologia.

De acordo com Shadid et al. (2016), em 1926, Yagi e Uda inventaram a antena de matriz direcional. Posteriormente, William Brown publicou um artigo sobre as possibilidades de transferência de energia por micro-ondas e demonstrou um modelo de helicóptero que recebia energia de um feixe de micro-ondas. Em 1968, Peter Glaser propôs o conceito de satélite de energia solar, demonstrando o princípio de que a energia solar poderia ser capturada e transmitida sem fio. Em 1973, o primeiro sistema passivo de identificação por radiofrequência (RFID) foi energizado por meio de indução eletromagnética a poucos metros de distância no *Los Alamos National Laboratory*.

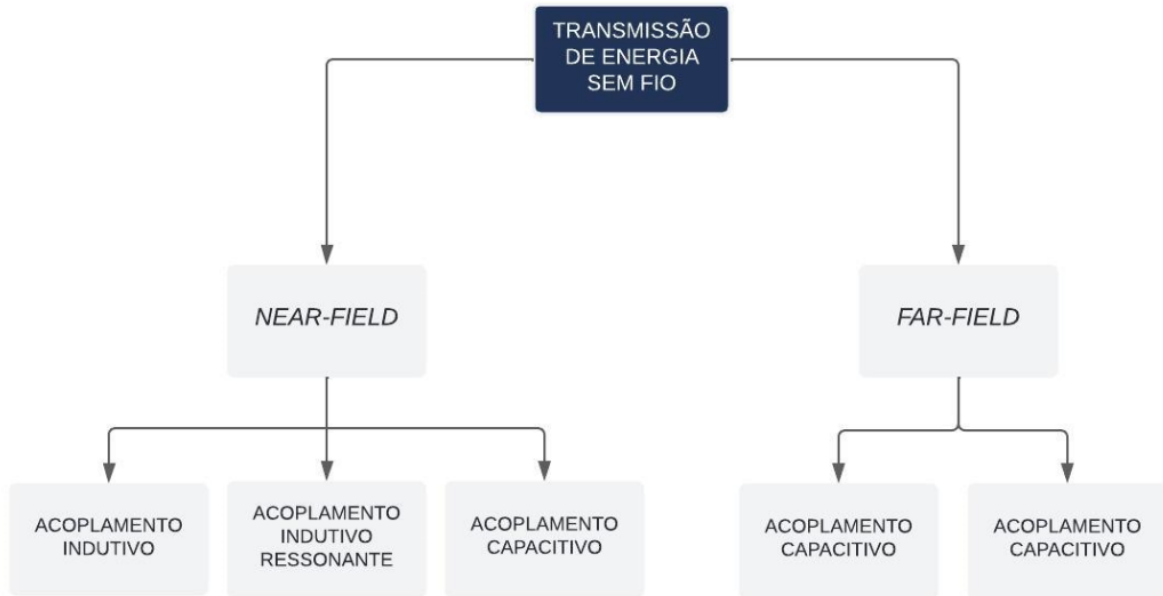
Mas foi somente na última década que a transmissão de energia sem fio começou a se tornar uma área de pesquisa e desenvolvimento ativa. Avanços em eletrônica de potência, diminuição do tamanho de componentes e maior eficiência energética permitiram que os pesquisadores explorassem novos métodos e tecnologias para essa área. Além disso, o crescente interesse em tecnologias sem fio, como Internet das Coisas, impulsionou o desenvolvimento de soluções práticas.

2.2 Tipos de Transmissão de Energia Sem Fio

A transmissão de energia sem fio é classificada como transmissão de campo próximo (*near-field*) e transmissão de campo distante (*far-field*). Ambas as técnicas funcionam com base no princípio da transmissão de energia eletromagnética. A classificação depende principalmente da distância de separação entre o receptor e o transmissor. (KANAUJIA et al., 2021).

A Figura 2 evidencia que cada um desses métodos utiliza princípios físicos distintos, sendo adequados para aplicações diferentes.

Figura 2 - Tipos de Transmissão de Energia Sem Fio



Fonte: Elaborado pelo Autor

2.2.1 Transmissão de Campo Próximo (*Near-Field*)

A transmissão de energia sem fio *near-field* tem um alcance limitado, onde a distância é menor que o comprimento de onda da frequência utilizada, sendo por isso também referida como transmissão de ondas curtas. A energia transmitida via campo magnético é conhecida como acoplamento indutivo, enquanto a energia transmitida via campo elétrico é denominada acoplamento capacitivo. (KANAUJIA et al., 2021).

2.2.1.1 Acoplamento Indutivo

Neste método, dois componentes principais são utilizados, uma bobina transmissora e uma bobina receptora. Essas bobinas são projetadas para funcionar em poucos centímetros de distância, como demonstrado pela Figura 3.

O campo magnético, originado por um campo elétrico que varia temporalmente, induz uma corrente na bobina secundária. Esta bobina primária cria um campo elétrico oscilante e, por consequência, gera um campo magnético que também varia no tempo. A bobina secundária capta o campo magnético produzido pela primária. A transferência de energia ocorre de maneira eficiente quando a distância entre as bobinas é inferior a um comprimento de onda. O campo magnético induzido é o responsável pelo fluxo da corrente elétrica, que pode ser utilizada

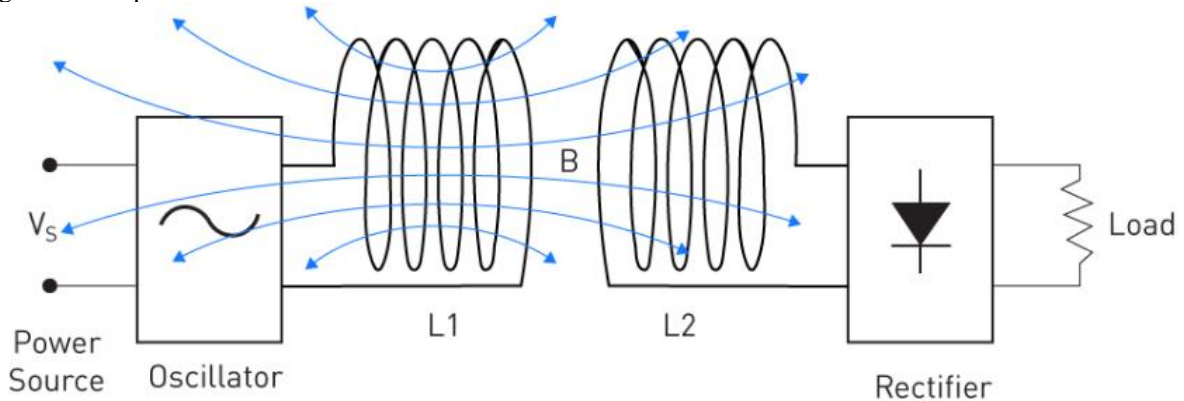
imediatamente ou armazenada em dispositivos de armazenamento de energia, tais como capacitores ou baterias, para utilização futura. (KANAUJIA et al., 2021).

Este método só funciona quando as bobinas estão alinhadas no mesmo eixo, sendo que o desalinhamento pode afetar a transferência de energia, similar ao que acontece no processo de moldagem do fluxo magnético. Com um desalinhamento de até 25%, é possível alcançar uma eficiência de transmissão de energia de 92%. No entanto, o acoplamento indutivo é limitado a circuitos com um único receptor e não suporta o carregamento de múltiplos dispositivos simultaneamente. (CHANDRASEKAR RAO e GEETHA, 2016).

A eficácia do acoplamento indutivo é suscetível a múltiplos fatores, tais como a distância entre as bobinas e as propriedades dos materiais das bobinas. Progressos recentes nessa área incluem o desenvolvimento de sistemas de acoplamento indutivo ressonante que apresentam maior flexibilidade de alinhamento e reduzida sensibilidade à posição relativa das bobinas, potencializando ainda mais a gama de suas aplicações práticas.

Este método apresenta diversas aplicações práticas significativas. Uma das mais recorrentes é o carregamento de baterias de dispositivos eletrônicos portáteis, como *smartphones* e tablets.

Figura 3 - Acoplamento Indutivo



Fonte: Monolithic Power Systems (2024)

2.2.1.2 Acoplamento Indutivo Ressonante

O acoplamento indutivo ressonante é uma técnica que se destaca por combinar os princípios do acoplamento indutivo com a eficiência da ressonância magnética. Este método é projetado para melhorar tanto a distância de transmissão quanto a eficiência energética em comparação com os sistemas de acoplamento indutivo tradicionais, que são limitados por

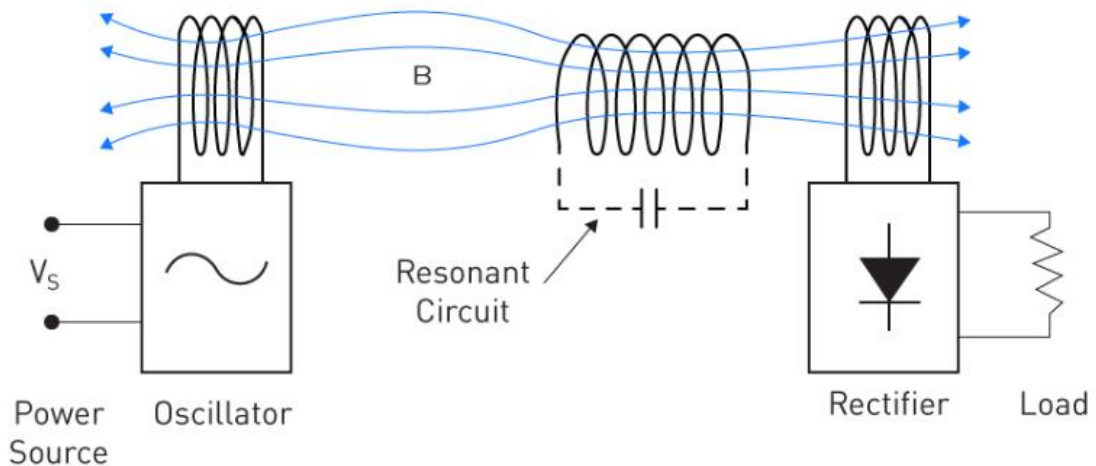
distâncias mais curtas e geralmente tendo a necessidade de alinhamento preciso entre transmissor e receptor.

Na Figura 4, observa-se que neste método encontram-se duas bobinas, uma bobina transmissora e uma bobina receptora, sendo sintonizadas na mesma frequência ressonante. Isso permite que a energia seja transferida de forma mais eficiente por meio de um campo magnético oscilante, mesmo que as bobinas estejam relativamente distantes uma da outra ou ligeiramente desalinhadas.

Bobinas com um número reduzido de voltas são configuradas com uma corrente oscilante, que por sua vez geram um campo magnético oscilante. Devido à elevada ressonância da bobina, a energia desta se esgota na forma de arcos elétricos ao longo do tempo. Esse desperdício de energia pode ser mitigado por meio da instalação de uma bobina receptora, capaz de capturar a energia elétrica antes de sua perda. Esse processo é denominado transferência de energia por ressonância e é considerado superior ao acoplamento indutivo. (CHANDRASEKAR RAO e GEETHA, 2016).

Atualmente, a tecnologia está começando a ser implementada em estações de carregamento para veículos elétricos, proporcionando maior praticidade e agilidade no cotidiano. Da mesma forma, é aplicável no carregamento de dispositivos móveis, onde a necessidade de alinhamento exato entre o dispositivo e a base de carregamento é minimizada.

Figura 4 - Acoplamento Ressonante



Fonte: Monolithic Power Systems (2024)

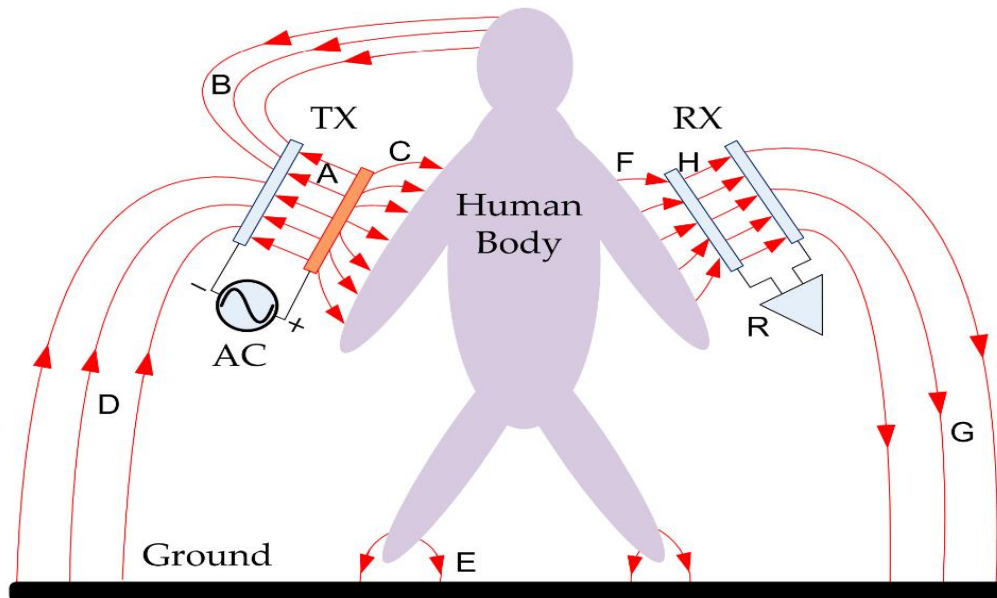
2.2.1.3 Acoplamento Capacitivo

Este método opera por meio de princípios semelhantes aos de um capacitor, envolve o uso de eletrodos transmissores e receptores que funcionam como as placas de um capacitor. Quando uma tensão alternada é aplicada ao eletrodo transmissor, um campo elétrico oscilante é criado entre os dois eletrodos, e essa oscilação induz uma corrente alternada no receptor.

O espaço entre os eletrodos transmissor e receptor é denominado dielétrico. O eletrodo transmissor produz um campo elétrico que varia temporalmente, induzindo um potencial variável na placa metálica do receptor. Conforme a frequência e a capacitância entre os eletrodos se elevam, aumenta-se igualmente a eficiência na transferência de energia. (KANAUJIA et al., 2021).

Embora menos utilizado, este método destaca-se pela simplicidade de design, sendo vantajoso em ambientes com espaço limitado. Sua capacidade de transferir energia por meio de campos elétricos o torna adequado para aplicações médicas, conforme ilustrado na Figura 5, onde componentes magnéticos podem ser impraticáveis ou indesejáveis.

Figura 5 - Acoplamento Capacitivo



Fonte: Ma et al. (2017)

2.2.2 Transmissão de Campo Distante (*Far-Field*)

A transmissão de energia sem fio de campo distante, refere-se à transferência de energia entre um transmissor e um receptor que estão separados por uma distância maior que o

comprimento de onda da radiação utilizada. Este método utiliza ondas eletromagnéticas, como micro-ondas ou laser, para transmitir energia por meio do espaço livre, sem a necessidade de qualquer meio físico entre os dois pontos.

2.2.2.1 Transmissão por Laser

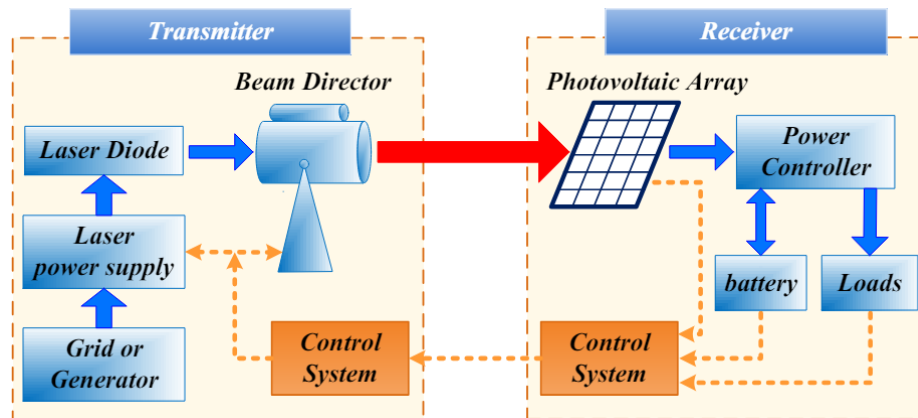
A transmissão de energia por laser é considerada uma maneira potencialmente eficiente de entrega de energia, especialmente para aplicações sem fio de longa distância e em condições ambientais adversas e perigosas. Em contraste com outros métodos de transmissão de energia sem fio a *Laser Power Transmission* oferece várias vantagens, como tamanho reduzido dos dispositivos, direção de transmissão focada e alta densidade de potência. Com o avanço tecnológico, a LPT tem sido amplamente adotada em diversos campos. (LIU et al., 2021).

O sistema funciona da seguinte forma, o transmissor transforma a energia de uma fonte padrão (bateria, gerador ou rede) em um feixe de luz monocromático por intermédio de um laser. Este feixe é posteriormente configurado por um sistema óptico composto de lentes e espelhos e direcionado ao receptor. No receptor, células solares, especificamente adaptadas ao comprimento de onda e intensidade do feixe do laser, reconvertem a luz laser em eletricidade para carregar uma bateria, operar um motor ou realizar outras tarefas. O sistema pode ser considerado um tipo de cabo de extensão, onde a energia elétrica é inserida em uma extremidade e extraída na outra. (JIN e ZHOU, 2019).

Ainda de acordo com Jin e Zhou (2019), idealmente, esse sistema teria a capacidade de transmitir qualquer quantidade de energia para qualquer ponto no espaço, mas limitações práticas, como a eficiência de conversão na fonte e no receptor, limitam o desempenho do sistema implementado.

Um dos principais benefícios da transmissão por laser trata-se da sua capacidade de enviar energia para locais precisos, o que se mostra útil em ambientes onde outras formas de transmissão são impraticáveis. Por exemplo, pode ser usada para carregar baterias de drones em pleno voo, fornecendo energia para áreas remotas ou inacessíveis. Abaixo, a Figura 6 destaca o funcionamento deste método de transmissão de energia.

Figura 6 - Transmissão de Energia por Laser



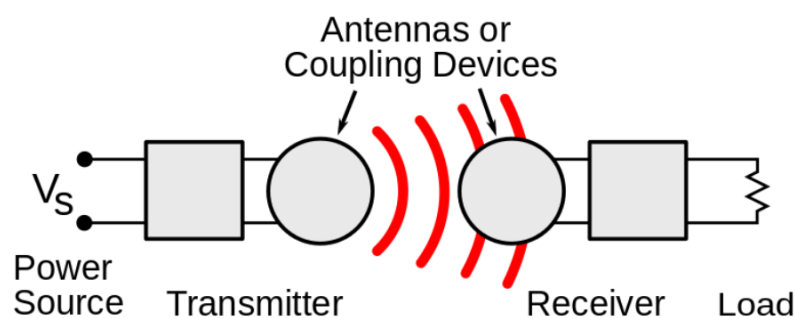
Fonte: Jin e Zhou (2019)

2.2.2.2 Transmissão por Micro-ondas

A transmissão de energia sem fio por micro-ondas, ondas de rádio ou radiofrequência é uma tecnologia que utiliza dispositivos de transmissores para converter energia elétrica em energia eletromagnética e transmitir essa energia no espaço por intermédio de uma antena.

No destino, a energia é recebida por uma rectenna, um sistema composto por uma antena retificadora. Sendo convertida novamente em energia elétrica, após a retificação, filtragem e outras transformações. Esta energia pode ser utilizada imediatamente ou armazenada para uso posterior. A Figura 7, a seguir, resume o funcionamento desse sistema.

Figura 7 - Transmissão de Energia por Micro-ondas



Fonte: Steemit (2018)

A tecnologia de transmissão de energia sem fio por micro-ondas apresenta extensas perspectivas de aplicação no aprimoramento da autonomia e do alcance de equipamentos não tripulados. Esta tecnologia é particularmente relevante no domínio da Internet das Coisas, onde pode solucionar de forma eficaz as questões de abastecimento energético dos dispositivos. Adicionalmente, a implementação de sistemas de transmissão de energia sem fio por micro-

ondas em veículos para alimentar grupos de veículos aéreos não tripulados e estabelecer uma rede de transmissão de energia integrada entre ar e terra representa uma inovação significativa. (WANG et al., 2022)

As aplicações potenciais desta tecnologia incluem o fornecimento de energia para regiões remotas ou de difícil acesso e a alimentação de sensores sem fio, onde a independência de baterias é uma vantagem considerável.

2.3 Conceitos da Transmissão de Energia por Radiofrequência

A transmissão de energia sem fios constitui uma operação que se manifesta em todo arranjo eletromagnético no qual, a energia é transferida de uma fonte de potência para uma carga, sem a conexão de fios condutores.

Essa tecnologia não é útil apenas em situações em que a conexão de dois fios é inviável, como no caso da recarga de marca-passos, mas também contribui para a redução de substâncias tóxicas resultantes do descarte anual de 6 bilhões de baterias utilizadas em dispositivos eletrônicos, como laptops, celulares e brinquedos. (SHADID et al., 2016).

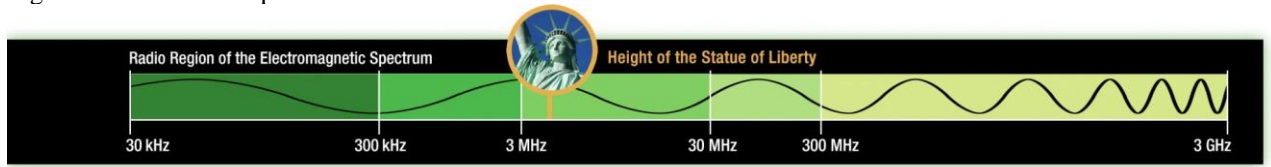
A transmissão de energia por radiofrequência trata-se de uma tecnologia inovadora que permite a transferência de energia sem fio por meio de ondas de rádio. Este método é particularmente útil em aplicações onde a conexão física é inviável ou indesejável. A seguir serão apresentados alguns dos conceitos mais importantes relacionados a essa tecnologia.

2.3.1 Ondas de Rádio

As ondas de rádio são as que possuem os maiores comprimentos de onda dentro do espectro eletromagnético, estendendo-se desde o tamanho de uma bola de futebol até dimensões superiores às do nosso planeta. Heinrich Hertz validou a existência de ondas de rádio por meio de experimentos nos anos 1880. (NASA, 2010).

Esse tipo de radiação eletromagnética apresenta frequências que variam de 3 kHz até 300 GHz. Como todas as radiações eletromagnéticas, as ondas de rádio têm a capacidade de se propagar no vácuo. Sendo não visíveis e não audíveis para o ser humano. A Figura 8 a seguir oferece uma visão sobre o comprimento das ondas de rádio.

Figura 8 - Faixa de Frequência das Ondas de Rádio



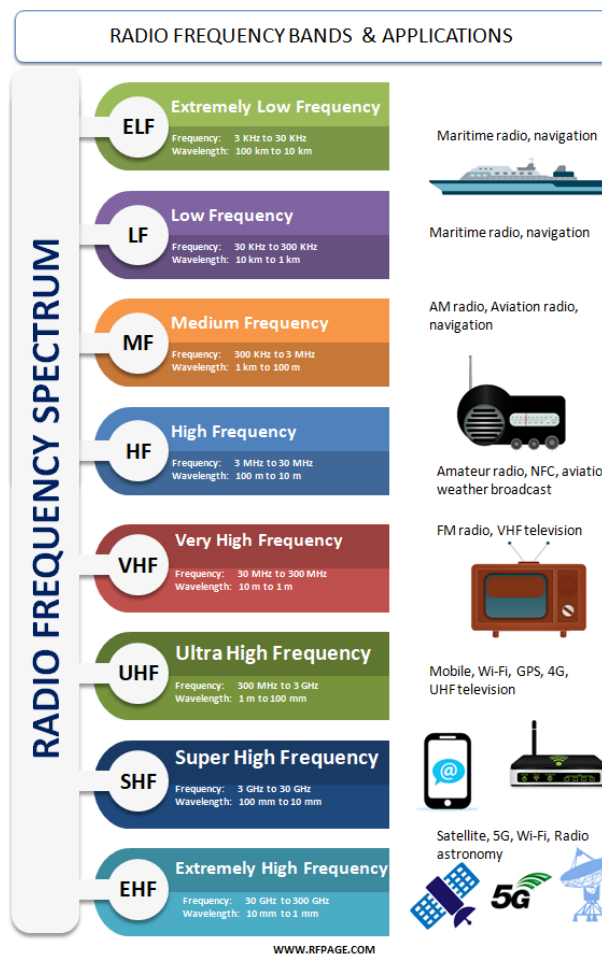
Fonte: Nasa (2010)

Ao contrário dos raios X e raios gama, as ondas de rádio são um tipo de radiação não ionizante. O que significa que elas não possuem energia suficiente para ionizar átomos ou moléculas, tornando-as seguras para uma grande variedade de usos.

Para uma melhor organização das faixas de frequência do espectro eletromagnético a União Internacional de Telecomunicações (ITU) e o Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (IEEE), regulamentaram e padronizaram essas faixas, promovendo a interoperabilidade e minimizando interferências entre diferentes tecnologias.

Conforme foi ilustrado na Figura 9, as categorias são classificadas em diversos grupos.

Figura 9 - Classificação das Ondas de Rádio



Fonte: RFPAGE (2024)

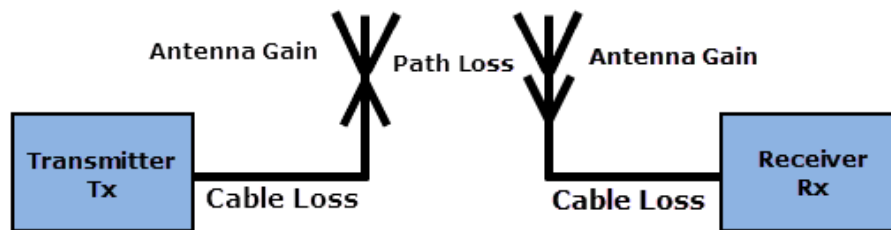
2.3.2 Propagação em Espaço Livre

Vários fatores influenciam como as ondas de rádio se propagam por intermédio do espaço, cada um impactando diretamente a eficiência e a eficácia da comunicação sem fio.

Na propagação em espaço livre, o caminho entre um transmissor e um receptor é direto. Se não houver obstruções presentes, há uma atenuação mínima ou nula dos sinais. No entanto, ainda ocorre a perda em espaço livre, definida como *Free Space Path Loss* (FSPL). (AFRICA et al., 2020).

Free Space Path Loss refere-se a um dos fatores mais significativos que afetam a transmissão de ondas eletromagnéticas. Ela descreve a diminuição da intensidade do sinal à medida que ele se propaga pelo espaço. Esta perda aumenta com a distância entre o transmissor e o receptor e é mais evidente em frequências mais altas. A Figura 10 ilustra essa perda.

Figura 10 - Perda de Sinal em Espaço Livre



Fonte: Pasternack (2019)

Levando isso em consideração, Harald Tap Friis criou a equação de transmissão de Friis, sendo fundamental para calcular a potência do sinal recebida em função da potência transmitida. A equação 1 leva em consideração a potência transmitida P_t , potência recebida P_r , o ganho das antenas transmissora e receptora G_t e G_r , o comprimento de onda do sinal λ e a distância entre as antenas d .

$$P_r = P_t = \frac{G_t G_r \lambda^2}{(4\pi d)^2} \quad (1)$$

Outro aspecto que afeta a diminuição do sinal é a interferência de outras ondas de rádio ou de barreiras físicas. A quantidade e o tipo de obstáculos presentes entre o transmissor e o receptor, bem como o material desses obstáculos, influenciam significativamente o grau de atenuação que o sinal experimenta. Certos objetos de obstrução comuns, como janelas de vidro,

portas, blocos de cimento e paredes de tijolos, podem causar uma atenuação do sinal que varia de 2 a 8 decibéis, respectivamente.

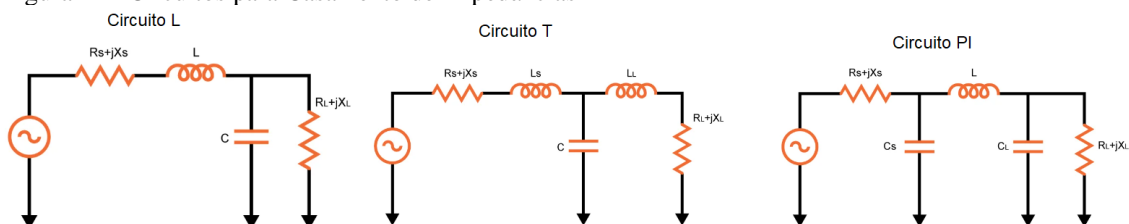
2.3.3 Casamento de Impedâncias

O casamento de impedância é essencial por diversos motivos. Primeiramente, ele permite a transferência máxima de potência quando a fonte e a carga estão perfeitamente alinhadas. Além disso, em redes de distribuição de energia, como em arranjos de antenas, é possível reduzir os erros de amplitude e fase por meio do uso de um circuito de casamento de impedância. Por fim, em sistemas receptores, que incluem um amplificador de baixo ruído e uma antena, o casamento de impedância pode significativamente melhorar a relação sinal-ruído. (KANAUIA et al., 2021).

As impedâncias que necessitam ser compatibilizadas são indicadas de diversas formas nas fichas técnicas de componentes ou módulos. É possível especificar uma impedância complexa diretamente para a frequência de operação desejada ou para múltiplas frequências potenciais. Outra abordagem de especificação envolve a utilização de uma resistência associada a um capacitor ou indutor, configurados tanto em paralelo quanto em série. O nível de adequação a uma impedância estabelecida, comumente 50 ohms, pode ser quantificado pelo coeficiente de reflexão. (BENSKY, 2019).

Ao projetar um circuito de casamento de impedância, vários fatores devem ser considerados. Inicialmente, deve-se identificar as impedâncias de entrada e saída do sistema para determinar a discrepância entre elas. Com base nessa análise, seleciona-se a configuração de circuito mais apropriada, como L, T ou Pi, ilustrados na Figura 11. Após a escolha da estrutura do circuito, os valores dos componentes, tais como capacitores e indutores, são calculados para acomodar as exigências do circuito. O circuito então é montado e submetido a testes com equipamentos como analisadores de rede, que então avaliam sua eficácia do casamento.

Figura 11 - Circuitos para Casamento de Impedâncias



Fonte: Adaptado pelo Autor e All About Circuits (2024)

2.4 Componentes e Tecnologias Envolvidas

A transmissão de energia por radiofrequência consiste na conversão de energia elétrica em ondas de radiofrequência, que são então transmitidas pelo ar e reconvertidas em energia elétrica utilizável pelo dispositivo receptor. Este procedimento inclui diversos componentes essenciais que serão discutidos a seguir.

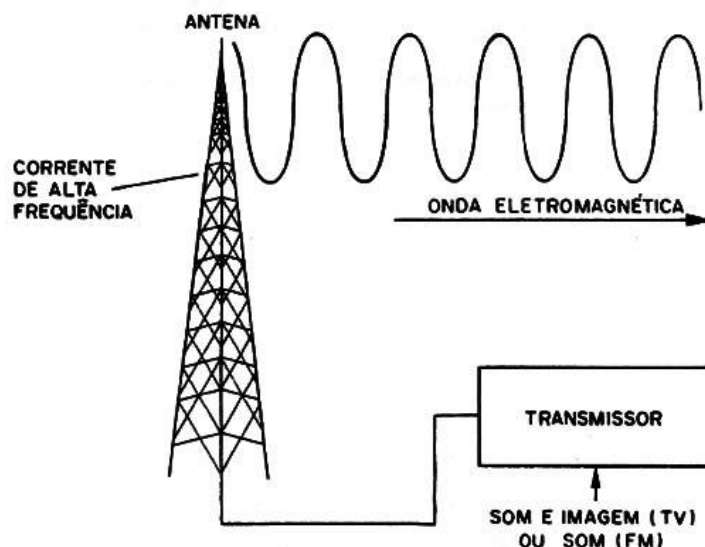
2.4.1 Transmissor de Radiofrequências

Os transmissores geram correntes de alta frequência que, quando aplicadas a uma antena, produzem perturbações no espaço conhecidas como ondas de rádio ou ondas eletromagnéticas. Essas ondas propagam-se à velocidade da luz, aproximadamente 300.000 quilômetros por segundo, e podem ser captadas por dispositivos chamados receptores. (Braga, 2018).

Um transmissor RF é responsável por converter sinais elétricos de baixa frequência em sinais eletromagnéticos que podem ser irradiados por intermédio do espaço por antenas. O sinal de RF transmitido pode carregar dados (telecomunicações), e conseqüentemente, energia.

Os transmissores de radiofrequência são usados em uma grande quantidade de aplicações, como radiodifusão (rádio e TV), comunicações móveis (celulares), conexão de dados sem fio (Wi-Fi e Bluetooth), e em tecnologias emergentes de transmissão de energia sem fios. Na sequência, a Figura 12 demonstra a estrutura do sistema.

Figura 12 - Sistema de Transmissor RF



Fonte: Instituto NCB (2019)

A estrutura do transmissor é composta por alguns componentes essenciais, os quais serão detalhadamente apresentados nas seções subsequentes.

2.4.1.1 Oscilador

O núcleo desses transmissores trata-se do oscilador, responsável por gerar a onda portadora em uma frequência específica. Esses osciladores podem ser de cristal, oferecendo alta estabilidade e precisão, ou sintetizados, que permitem alterações programáveis da frequência para uma maior flexibilidade operacional.

Os osciladores de cristal são escolhidos por sua alta precisão e estabilidade, sendo ideais para aplicações que exigem uma frequência precisa. No caso dos osciladores sintetizados, eles oferecem a flexibilidade de produzir uma ampla gama de frequências a partir de um único dispositivo, adequados para sistemas que operam em múltiplas bandas de frequência ou que necessitam de adaptabilidade operacional.

O projeto de osciladores de RF e micro-ondas pode ser realizado utilizando abordagens baseadas em duas portas ou em uma única porta. A abordagem clássica fundamenta-se no uso de um dispositivo amplificador de duas portas em conjunto com um circuito de realimentação. Contudo, em frequências de micro-ondas, os osciladores podem frequentemente ser analisados, e projetados de maneira mais eficiente, como dispositivos de uma única porta, onde um circuito ressonante, denominado circuito tanque, é conectado a um circuito ativo que apresenta resistência negativa. (STEER, 2019).

Os osciladores controlados por tensão são usados em situações que requerem ajustes rápidos e dinâmicos da frequência de saída, esses osciladores permitem uma otimização em tempo real da transmissão de energia, adaptando-se a variações operacionais. São geralmente controlados por um PLL.

2.4.1.2 PLL

Os circuitos PLLs (*Phase-Locked Loop*) são dispositivos eletrônicos projetados para manter a fase de um oscilador local alinhada ou sincronizada (travada) com a fase de um sinal externo. Essa técnica foi desenvolvida inicialmente na década de 1930. (BRENNAN, 1996).

O *Phase-Locked Loop* garante que a frequência do sinal produzido pelo oscilador permaneça constante e dentro de parâmetros exatos. Ele realiza isso monitorando e ajustando continuamente a frequência do oscilador para alinhar exatamente com uma frequência de

referência precisa, derivada de um cristal ou outra fonte estável. Além de estabilizar a frequência, o PLL é empregado para gerar múltiplas frequências a partir de uma única frequência de referência por intermédio de divisores de frequência programáveis, permitindo uma flexibilidade operacional significativa em sistemas que exigem operação em várias bandas de frequência.

2.4.1.3 Amplificador de Radiofrequências

Para garantir que o sinal de RF possa viajar longas distâncias ou superar o ruído de fundo, um amplificador de RF eleva a potência do sinal. A eficiência destes amplificadores é vital, pois a energia desperdiçada geralmente se transforma em calor, podendo danificar os componentes internos.

2.4.1.4 Filtragem de Sinal

Antes da transmissão final, um filtro é usado para refinar o sinal, removendo frequências indesejadas e melhorando a qualidade geral do sinal. Isso torna-se essencial para evitar interferências com outros dispositivos e para atender às normas regulamentares de transmissão.

Um filtro elétrico trata-se de um quadripolo capaz de atenuar determinadas frequências do espectro do sinal de entrada e permitir a passagem das demais. (PERTENCE JR., 2003).

Os filtros podem ser desenvolvidos nos níveis elétrico, mecânico ou eletromecânico, podendo ser concebidos como componentes discretos ou distribuídos. No caso dos filtros elétricos, sua implementação pode ser realizada por meio de circuitos passivos ou ativos. (PANTOLI e STORNELLI, 2020).

Os filtros desempenham um papel essencial na eliminação de harmônicas e outras frequências indesejadas. Os tipos mais comuns incluem, os filtros passa-baixa que são utilizados para permitir a passagem de sinais abaixo de uma frequência de corte específica, bloqueando as frequências mais altas. Os filtros passa-alta eliminam os sinais de baixa frequência ao bloquear frequências abaixo de um determinado ponto desejado.

O filtro passa-banda ou passa-faixa tem a função de isolar um intervalo específico de frequências, permitindo a passagem da banda de frequência escolhida enquanto bloqueia frequências fora desse intervalo. Adicionalmente, o filtro rejeita-faixa, também referido como filtro notch, tem a função de eliminar faixas específicas de frequências, permitindo que todas as outras passem.

2.4.2 Receptor de Radiofrequências

O receptor trata-se de um componente essencial nesses sistemas, desempenhando a função crítica de captar ondas de RF e convertê-las de volta em energia elétrica utilizável. Este processo envolve vários passos e componentes específicos que garantem a eficácia e eficiência da conversão.

No ponto de recepção, a onda modulada captada por uma antena, é encaminhada para a entrada do receptor. No interior do receptor, o sinal é isolado da portadora de radiofrequência e transmitido para a carga do dispositivo receptor, podendo consistir em um alto-falante, um gravador, um tubo de raios catódicos, entre outros. (BARKAN e ZHDANOV, 1970).

Em sistemas de comunicação, são utilizados componentes chamados de *mixer* ou misturador, que diminui a frequência do sinal de RF ao combiná-lo com um sinal de frequência fixa gerado internamente, facilitando o processamento subsequente. Após a mistura, um filtro é utilizado para eliminar frequências indesejadas, permitindo que apenas o sinal desejado prossiga. O sinal é então levado ao demodulador, onde o sinal RF modulado é convertido de volta ao seu formato original de *baseband*.

De acordo com Barkan e Zhdanov (1970) as características importantes para qualquer receptor são potência de saída, tensão de saída, sensibilidade, seletividade, largura de banda, faixa de frequência e fidelidade.

Para aplicações de recepção de energia, que é o caso deste projeto, um circuito de retificação é essencial.

2.4.2.1 Retificador

Um retificador consiste em um dispositivo elétrico utilizado para converter corrente alternada em corrente contínua. Os retificadores controlados são caracterizados pela presença de dispositivos controláveis em sua estrutura, como os tiristores, que permitem o controle do fluxo de corrente. Em contraste, os retificadores não controlados utilizam diodos em sua composição, operando de forma automática, sem a possibilidade de controle externo. (Nunes, 2018).

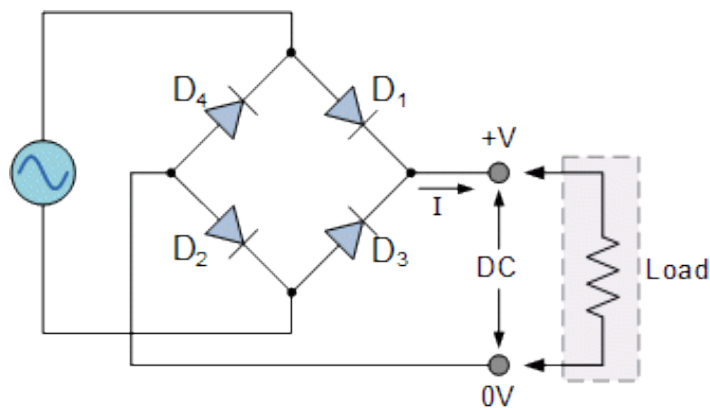
No contexto de transmissão de energia, um circuito de retificação desempenha uma função essencial. A conversão de corrente alternada em corrente contínua tem função crucial para o receptor, pois transforma a energia CA recebida pela antena em energia CC. Esse processo de conversão é fundamental não apenas para a operação de dispositivos eletrônicos,

mas também para o armazenamento de energia em baterias ou capacitores. Existem diversos tipos de retificadores, com destaque para os retificadores de meia-onda e de onda completa como ilustrado na Figura 13.

Ainda de acordo com Nunes (2018) o sinal de entrada pode ser retificado de duas formas: totalmente, no ciclo positivo e negativo da onda CA, por meio de um retificador de onda completa, ou parcialmente, utilizando apenas um dos ciclos (positivo ou negativo), através de um retificador de meia onda.

Os retificadores de meia-onda utilizam um único diodo para converter apenas uma parte do ciclo de corrente alternada, sendo mais simples e econômicos, porém menos eficientes. Já os retificadores de onda completa empregam uma configuração de ponte de quatro diodos, permitindo a conversão de ambos os ciclos da corrente alternada em corrente contínua, o que melhora significativamente a eficiência do dispositivo.

Figura 13 - Retificador de Onda Completa



Fonte: Electronics Tutorials (2023)

2.4.2.2 Filtro do Receptor

A função primordial dos filtros em um receptor torna-se a seleção de frequência. Isolando as frequências desejadas dentre as ondas captadas, permitindo que apenas o intervalo específico de frequências de interesse seja processado. Os filtros comumente usados são os mesmo que foram abordados anteriormente.

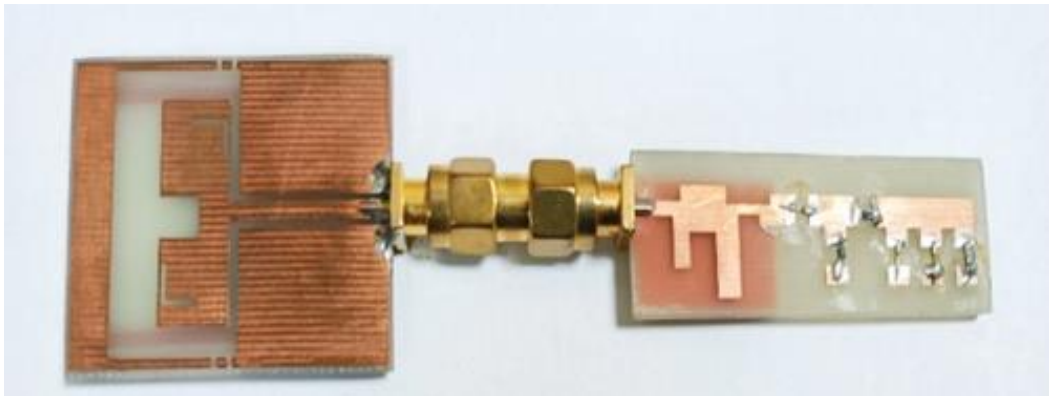
2.4.3 Colheita de Energia de Radiofrequência

A colheita de energia de radiofrequência consiste em uma técnica de conversão de energia utilizada para transformar energia proveniente do campo eletromagnético em energia

elétrica. Em particular, constitui uma solução altamente atraente para aplicação em redes de baixo consumo, uma vez que possibilita a alimentação sem fio de sensores e sistemas de baixo consumo energético tendo uma grande variedade de cenários para aplicação. (SERDIJN et al., 2014).

A colheita de energia ou, em inglês, *power harvesting* utiliza um dispositivo denominado rectenna (antena retificadora, ilustrada na Figura 14), cujo funcionamento é similar ao de um receptor de energia, mas com diferenças em termos de estrutura. Composta por uma antena e um diodo retificador integrado, projetada para captar ondas de RF e convertê-las diretamente em corrente contínua de forma eficiente. Apresenta uma integração mais compacta dos componentes. Tem como objetivo principal capturar sinais de rádio disponíveis no ambiente, ao contrário do receptor que tem foco em trabalhar com um transmissor. Essa tecnologia aproveita as ondas de radiofrequência que são naturalmente emitidas por diversas fontes, como torres de transmissão de rádio, redes Wi-Fi, sinais de celular e outros dispositivos de comunicação sem fio.

Figura 14 - Rectenna



Fonte: International Journal of Electronics e Sharma et al. (2024)

2.4.4 Antena Transmissora

A antena é um componente fundamental dos sistemas de comunicação sem fio, funcionando como um transdutor que converte energia elétrica em ondas eletromagnéticas e vice-versa. Com o aumento da demanda por antenas nas aplicações sem fio modernas, tem-se observado um desenvolvimento contínuo nessa tecnologia. (KANAUJIA et al., 2021).

O design de antenas torna-se essencial para determinar tanto sua eficiência quanto sua adequação para aplicações específicas. Fatores como ganho, que se trata da capacidade de uma antena direcionar mais energia em uma direção específica, e diretividade, que indica a eficiência

com que a antena foca energia em uma direção particular, são fundamentais. A largura de banda da antena, que é a gama de frequências na qual opera com mais eficiência, e a polarização, que é a orientação do campo elétrico da onda eletromagnética, também são considerados aspectos importantes do design.

Existem diversos tipos de antenas, cada um com características e aplicações específicas. Antenas dipolo são simples e frequentemente usadas para rádio FM e televisão. As antenas Yagi-Uda, conhecidas pelo seu alto ganho, são comuns em comunicações de rádio e televisão. Antenas parabólicas, que proporcionam ganhos muito altos, são empregadas em aplicações de satélite e radar. Antenas de patch, que são compactas e planas, são utilizadas em comunicações móveis e por satélite. A seguir, a Figura 15 ilustra a antena de patch e a antena dipolo.

Figura 15 - Antena de Patch e Antena Dipolo



Fonte: Cinco TI (2015) e Planeta do Rádio (2023)

A escolha e o design da antena devem considerar cuidadosamente a impedância de entrada, que deve ser compatível com o transmissor para maximizar a transferência de energia e minimizar reflexões de sinal. Além disso, a localização física e o ambiente ao redor da antena podem influenciar drasticamente seu desempenho, sendo necessário levar em conta fatores como obstruções físicas e interferências de outros sinais.

2.5 Sensores Sem Fio

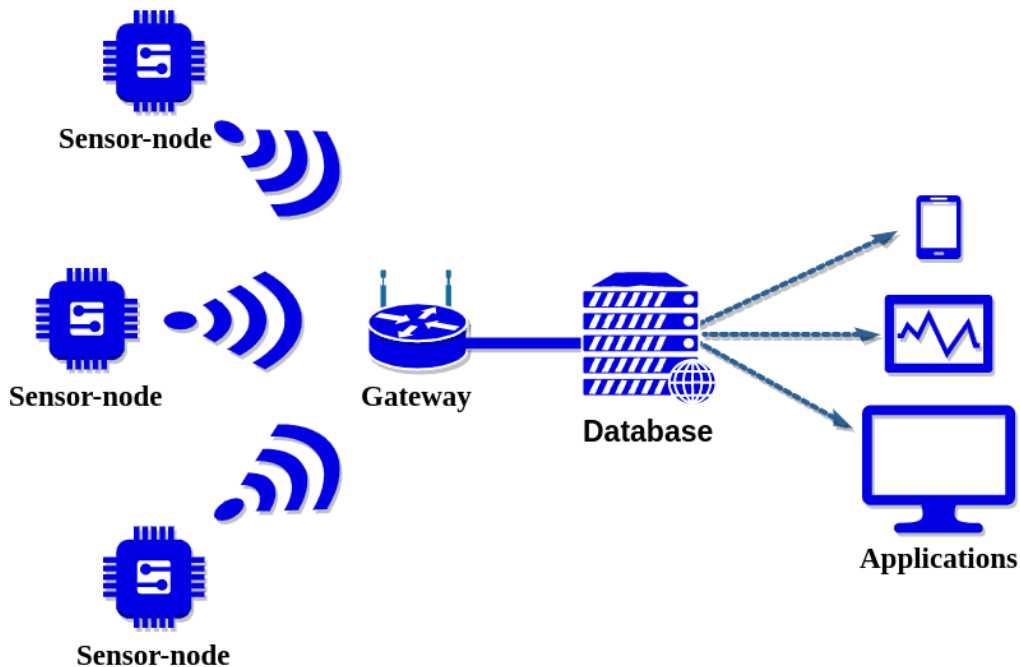
Com a evolução da tecnologia de telecomunicações, especialmente com o advento da comunicação sem fio, mais esforços foram feitos para integrar os sensores com as antenas sem

fibro, que são capazes de transmitir informações de sensoriamento por longas distâncias. A integração da tecnologia de comunicação sem fio com os sensores permitiu aos humanos obterem informações úteis de áreas de difícil acesso. Na era atual da Quinta Geração (5G) de comunicação móvel e além, e com a adição da Comunicação de Tipo Máquina em massa (mMTC) e Comunicações Ultra-confiáveis de Baixa Latência (URLLC), o uso dessas tecnologias aumentou a conectividade e a confiabilidade dos dispositivos de Internet das Coisas. (ABBASI et al., 2022).

Tipicamente, esses sensores compõem uma rede de sensores sem fio podendo ser definida como conjuntos de dispositivos de detecção que capturam e transmitem dados sobre variáveis. Os sensores utilizam uma conexão sem fio e usam essa conexão para se comunicar entre si. A arquitetura de uma RSSF típica consiste nos seguintes 3 componentes: sensores, gateway e observador (usuário). Sensores e gateways constituem o campo de sensores. Gateways e observadores são interconectados via redes especiais ou mais comumente via internet. (KOCAKULAK e BUTUN, 2022).

Abaixo, a Figura 16 exemplifica o funcionamento de uma rede de sensores sem fio.

Figura 16 - Rede de Sensores Sem Fio



Fonte: Embarcados (2018)

As aplicações de sensores sem fio são diversas e têm um impacto significativo em vários campos, incluindo monitoramento ambiental, saúde, agricultura, cidades inteligentes e na indústria.

No monitoramento ambiental sensores sem fio são frequentemente usados para monitorar condições como temperatura, umidade, qualidade do ar e níveis de poluição. No contexto da agricultura, esses sensores podem monitorar condições do solo, umidade e outros fatores que influenciam o crescimento das culturas. Esses dados ajudam os agricultores a otimizar o uso de recursos e a aumentar a eficiência na produção.

Na área saúde, sensores sem fio podem ser usados para monitorar condições de pacientes remotamente, coletando dados como frequência cardíaca, pressão arterial e outros indicadores vitais. Nas cidades inteligentes esses sensores contribuem para o seu desenvolvimento por meio do monitoramento de estruturas críticas, como pontes e edifícios, além de melhorar a gestão de tráfego e sistemas de iluminação pública. Já em ambientes industriais, sensores sem fio são utilizados para monitorar máquinas e equipamentos, detectando possíveis problemas até mesmo antes que aconteçam.

2.6 Trabalhos Correlacionados

O presente tópico apresenta os principais estudos relacionados à transmissão de energia por radiofrequência para alimentação de sensores sem fio, com foco nas tecnologias aplicadas, destacando sua viabilidade e potencial em diferentes contextos.

Tepper et al. (2020) realizaram uma investigação sobre a viabilidade da Transmissão de Energia Sem Fio por Radiofrequência para alimentar sensores de baixa potência em cabines de aeronaves. Tradicionalmente, esses sensores são alimentados por cabos ou baterias, soluções que apresentam desvantagens significativas para a eficiência geral das aeronaves. O estudo incluiu experimentos realizados em uma maquete de cabine, os quais demonstraram que a tecnologia em questão pode cobrir uma área de até 20 assentos, recebendo sinais de até 28 mW. Adicionalmente, testes em laboratório utilizando ondas senoidais de múltiplos tons permitiram a identificação de métodos para aprimorar a sensibilidade dos receptores, ampliando a cobertura sem a necessidade de aumentar a potência média de transmissão. Os resultados obtidos indicam que sensores de baixa potência, voltados para aplicações específicas em cabines, podem ser alimentados de maneira eficiente por sistemas comerciais de transmissão de energia por RF, evidenciando o potencial dessa tecnologia para eliminar a necessidade de cabos e reduzir a dependência de baterias em sistemas embarcados.

O estudo de Park et al. (2021) propõe um sistema de transferência de energia sem fio por radiofrequência operando na faixa de 5,8 GHz, composto por 64 antenas de transmissão e 16 antenas de recepção, destacando-se por sua capacidade de transferir energia a longas

distâncias, o que representa uma solução promissora para alimentar dispositivos de baixo consumo, como os utilizados na Internet das Coisas. O trabalho também introduz um algoritmo de varredura de feixe, que otimiza a transferência de energia, independentemente da localização do receptor, seja na zona de campo próximo ou distante. A eficácia do algoritmo foi validada por meio de experimentos práticos, nos quais foi demonstrado que o sistema proposto é capaz de transferir 3,67 mW a uma distância de 25 metros, com uma eficiência de transferência de 20,32% a 0,5 metros e 0,24% a 5 metros. Além disso, o algoritmo de varredura de feixe desenvolvido supera os métodos tradicionais de varredura, que se baseiam exclusivamente na zona de campo distante, oferecendo uma solução mais eficaz para a transferência de energia em diferentes condições de distância. A pesquisa também considera o limite de Fraunhofer, que define a transição entre as zonas de campo próximo e distante, utilizando esse conceito para otimizar o desempenho do sistema. Com uma dimensão linear máxima de 299,12 mm para a matriz de antenas de transmissão, a distância de 3,45 metros foi identificada como o limite entre os campos próximo e distante, com base no cálculo da distância de Fraunhofer. Os resultados obtidos demonstram que o algoritmo proposto é capaz de cobrir eficientemente a região de campo próximo, ao contrário dos esquemas convencionais, que consideram apenas a operação na zona de campo distante. Este estudo apresenta um sistema eficiente para a alimentação de dispositivos IoT em diferentes distâncias e condições de campo, utilizando um algoritmo de varredura de feixe que maximiza a eficiência da transferência de energia em ambientes variados.

Por fim, a pesquisa de Tavana (2022) também investiga a aplicação da Transferência de Energia Sem Fio por Radiofrequência para alimentar dispositivos da Internet das Coisas em ambientes desafiadores, como aeronaves. O estudo enfatiza a necessidade de reduzir o peso e os custos de manutenção associados aos sistemas de cabeamento, especialmente em aeronaves, onde a utilização de sensores IoT com conectividade com fio é predominante. A proposta de adotar esse sistema para alimentar sensores IoT sem fio visa minimizar esses problemas, embora enfrente desafios relacionados ao fornecimento de energia dentro da cabine da aeronave. A pesquisa propõe uma abordagem otimizada para determinar a quantidade mínima de transmissores e seus posicionamentos, levando em consideração a geometria da cabine e os requisitos de ciclo de trabalho dos sensores. Esse problema de projeto é abordado por meio de um modelo de programação linear, com o objetivo de implantar os transmissores de forma ideal para atender às necessidades dos sensores IoT em um ambiente aeronáutico. Além disso, o estudo investiga a captação de energia de estações base existentes para dispositivos IoT em ambientes externos, analisando a cobertura e os limites da transferência de energia sem fio. A

pesquisa revela um *trade-off* entre o alcance da cobertura e a taxa de medição dos sensores, ressaltando a importância de otimizar os parâmetros de operação para assegurar a eficiência do sistema.

Em síntese, os estudos revisados apresentam abordagens convergentes para a aplicação da transmissão de energia sem fio por radiofrequência para a alimentação de sensores sem fio, embora cada um com suas particularidades em termos de metodologias e parâmetros adotados. A principal diferença observada está nas potências de saída, quantidades de antenas e nas frequências de operação, que variam conforme as necessidades dos cenários estudados. Embora sejam observadas variações, os resultados indicam que o sistema oferece uma solução viável e eficiente para alimentar dispositivos de baixo consumo, especialmente em ambientes de difícil acesso e manutenção complexa, como no caso das aeronaves discutidas nos estudos analisados.

3 METODOLOGIA

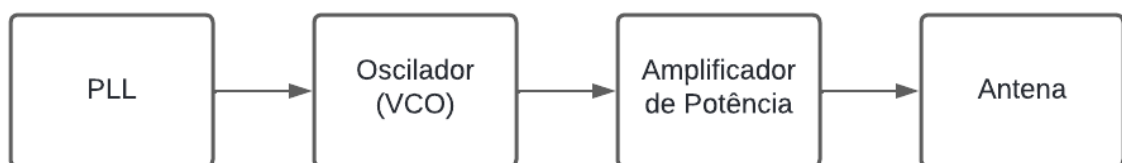
Este capítulo busca apresentar os procedimentos metodológicos empregados para desenvolver o sistema proposto de transmissão de energia por radiofrequência. Portanto, serão explorados os detalhes do desenvolvimento dos sistemas. O tipo de carga específica a ser alimentada por este sistema também será descrito. Além disso, serão apresentadas as características técnicas das antenas usadas na recepção e transmissão do sinal, como também outros parâmetros relevantes que influenciam diretamente no desempenho geral do sistema.

3.1 Transmissor

O transmissor será estruturado em uma sequência de quatro blocos essenciais, conforme ilustrado na Figura 17. Inicialmente, o sistema integra um *Phase-Locked Loop*, que estabiliza a frequência do oscilador controlado por tensão a ele acoplado. O PLL ajustará de forma contínua a frequência do VCO para assegurar uma frequência precisa, que será de 100 MHz.

O VCO é responsável pela geração da onda de rádio que será utilizada na transmissão. O sinal de RF produzido é então enviado ao amplificador de potência, cuja função consiste em elevar a potência do sinal de RF para níveis que garantam uma transmissão eficaz. A última etapa do sistema trata-se da antena, que emite o sinal de RF amplificado para o ambiente.

Figura 17 - Diagrama de Blocos do Transmissor



Fonte: Elaborado pelo Autor

3.1.1 PLL (Phase-Locked Loop)

Para o controle de frequência do sistema, será implementado um módulo PLL pré-fabricado, ilustrado na Figura 18. Ele terá a função de controlar o VCO. O PLL ajustará continuamente a frequência do VCO, assegurando que ele permaneça sincronizado com a frequência escolhida de 100 MHz, reduzindo desvios de frequência e possíveis perdas.

A escolha por um módulo pré-fabricado simplifica o processo de design ao eliminar a necessidade de desenvolver um circuito PLL. Isso tem como objetivo acelerar o desenvolvimento e garantir a confiabilidade do sistema.

Além disso, considerando que o sistema se trata de um projeto exclusivamente voltado para a transferência de energia, sem a necessidade de transmissão de dados, o transmissor não exige um alto grau de precisão, o que permite uma maior flexibilidade na escolha do módulo.

O modelo em discussão trata-se do PLL DSP, produzido pela empresa DIY More. Este dispositivo de baixo custo comumente empregado no controle de transmissores FM, aceita uma entrada de tensão contínua de 5 V. Adicionalmente, o modelo está equipado com display e botões que permitem ao usuário selecionar a frequência de operação desejada.

Figura 18 - Controlador PLL



Fonte: Mercado Livre (2024)

3.1.2 VCO

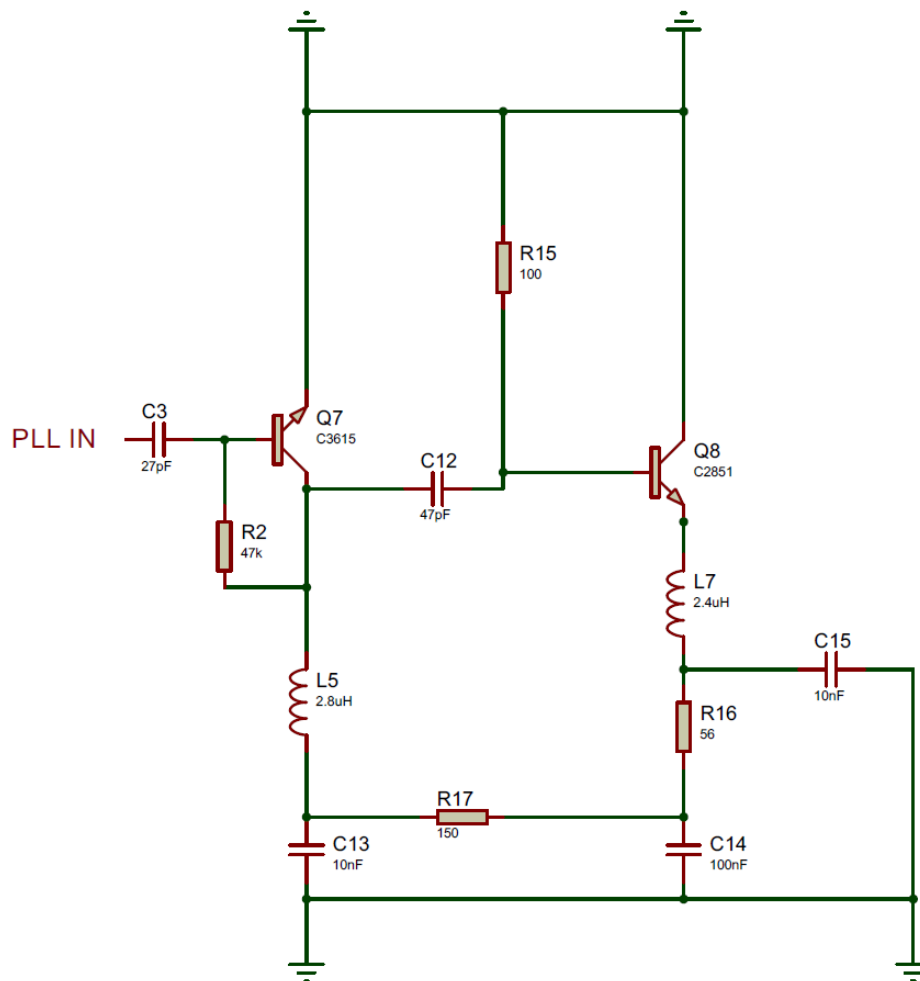
Os circuitos osciladores desempenham um papel fundamental na geração de oscilações elétricas e, no circuito do transmissor, são eles que produzem a onda sinusoidal na frequência definida no PLL.

Neste caso, dois transistores desempenham funções centrais. O primeiro, um transistor modelo 2SC3615, consiste no componente central do VCO. Ele está diretamente envolvido na geração da frequência de oscilação. Este transistor opera juntamente com resistores e capacitores para formar o circuito oscilador, sendo crucial na determinação da estabilidade e geração do sinal. As principais características deste transistor incluem uma tensão máxima do coletor-emissor de cerca de 50 V e uma corrente máxima de coletor de até 0,3 A, tendo uma

capacidade de dissipação de potência de aproximadamente 0,75 watts sob condições normais de operação. No contexto de um VCO, a capacidade de dissipação de potência do 2SC3615 mostra-se adequada para gerar e manter a estabilidade do sinal sem gerar excesso de calor.

O segundo transistor modelo 2SC2851, atua como um amplificador de sinal dentro do circuito. Ele é utilizado para aumentar a amplitude do sinal oscilado gerado antes de enviar esse sinal até o amplificador de potência final, este transistor tem a função de atuar como um “pré-amplificador”. A sua utilização ajuda a garantir que o sinal gerado tenha potência suficiente para excitar o transistor responsável pela amplificação do sinal. Ele pode suportar uma tensão coletor-emissor de até 36 V, uma corrente de coletor de até 0.5 A, podendo dissipar até 1 watt de potência sob operação normal. O que o torna ideal para amplificar os sinais oscilados produzidos anteriormente a níveis mais elevados sem degradação. A Figura 19 apresenta o circuito completo do VCO.

Figura 19 - Circuito do VCO



Fonte: Elaborado pelo autor por meio do software Proteus®

3.1.3 Amplificador de Potência

O circuito do amplificador de potência utiliza o transistor 2SC1971, ilustrado na Figura 20, que consiste em um transistor NPN especializado em aplicações de radiofrequência. Este transistor tem capacidade para suportar uma tensão coletor-emissor de até 18 V e uma corrente de coletor de até 1 A, com uma dissipação máxima de potência de 12 W. Sua frequência de transição é de aproximadamente 175 MHz, permitindo operações eficazes nas frequências desejadas.

No circuito, o transistor desempenha um papel crucial ao amplificar o sinal de RF de baixa potência recebido, elevando sua amplitude a níveis adequados para transmissão por meio da antena. O circuito também inclui uma série de indutores e capacitores, que configuram uma rede de filtragem para moldar e estabilizar o sinal amplificado. Este arranjo garante que a amplificação ocorra dentro das frequências desejadas e com o mínimo possível de distorção.

Figura 20 - Transistor 2SC1971



Fonte: Mercado Livre (2024)

3.1.4 Circuito Completo do Transmissor

Foram analisados diversos diagramas de circuitos e informações técnicas relacionadas a diferentes configurações de transmissores, levando em consideração fatores como estabilidade de frequência, dissipação de potência e compatibilidade com os componentes

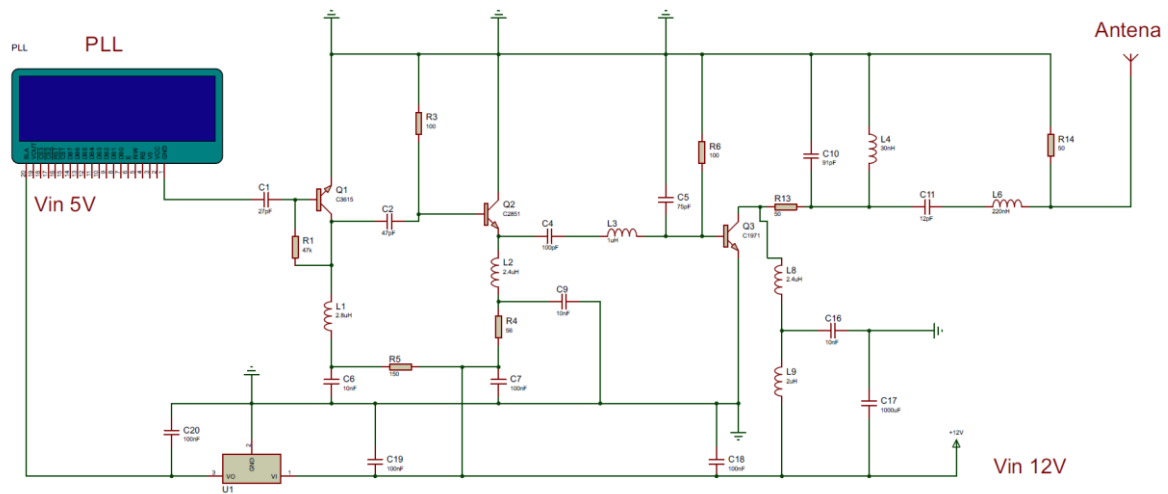
disponíveis. Com base nessa análise, foi possível concluir que o circuito selecionado, satisfaz às especificações necessárias para a transmissão de energia.

Portanto, o circuito final do transmissor ilustrado na Figura 21, resulta da junção de todas as partes anteriormente descritas, que combina um módulo PLL para estabilidade de frequência, um circuito oscilador, e estágios de amplificação para aumentar a potência do sinal.

Além disso o circuito final inclui um arranjo de gerenciamento de alimentação, contendo uma entrada principal de alimentação de 12 V, comum em circuitos de transmissores de RF devido à necessidade de uma maior potência para os estágios de amplificação. No entanto, o módulo PLL requer uma tensão de operação mais baixa, de 5 V. Para atender a essa necessidade específica, o circuito inclui um regulador de tensão. Este regulador de tensão tem a função de reduzir a tensão de entrada de 12 V para 5 V estáveis. Este método se torna vantajoso por eliminar a necessidade de uma segunda entrada de alimentação, permitindo que o sistema opere somente com uma única fonte.

Antes de atingir a antena, o sistema conta com um filtro passa-faixa de segunda ordem, que é crucial para assegurar a eficácia da transmissão de energia por radiofrequência. Projetado para operar na faixa de frequências de 88 MHz até 108 MHz, este filtro permite um controle preciso sobre a faixa de frequências utilizadas, o que é vital para minimizar a interferência com outros dispositivos e maximizar a eficiência energética. Composto por dois estágios LC, a configuração do filtro garante que apenas as frequências desejadas sejam utilizadas, a especificação dessa banda de frequência é particularmente importante em ambientes densos e potencialmente disruptivos, assegurando que o sistema de transmissão de energia funcione dentro dos parâmetros otimizados para sua aplicação.

Figura 21 - Circuito do Transmissor Completo

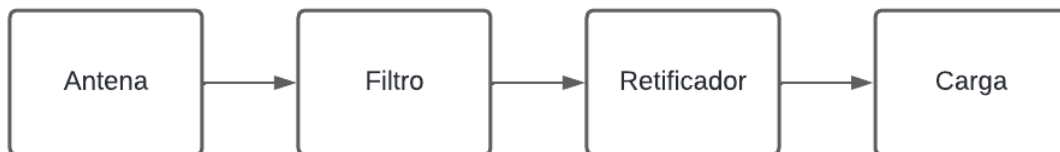


Fonte: Elaborado pelo autor por meio do software Proteus®

3.2 Receptor

O receptor de radiofrequência opera em quatro etapas principais para processar sinais de rádio, conforme ilustrado na Figura 22. Inicialmente, a antena capta as ondas eletromagnéticas que foram transmitidas, convertendo-as em corrente alternada. Estes sinais são então encaminhados para um filtro passa-faixa, configurado para uma frequência central de 100 MHz, sendo responsável por permitir apenas a passagem de sinais dentro dessa faixa específica. Ao mesmo tempo bloqueia ou atenua outras frequências, ajudando a evitar interferências de sinais indesejados. Após a filtragem, o sinal é enviado ao retificador, que transforma a corrente alternada em uma corrente contínua. Por fim, o sinal retificado é entregue à carga, utilizando a energia para funções específicas, como alimentar os sensores diretamente ou então guardar está carga em uma bateria ou capacitor.

Figura 22 - Diagrama de Blocos do Receptor



Fonte: Elaborado pelo Autor

3.2.1 Filtro LC

No sistema do receptor, será implementado um filtro passa-faixa LC paralelo para garantir a seletividade adequada e eficiência na recepção de sinais na frequência desejada. O filtro LC, foi calculado para operar na frequência central específica, permitindo que apenas sinais dentro de uma faixa estreita de frequências ao redor de 100 MHz passem, enquanto sinais de frequências indesejadas são atenuados. Esta configuração é essencial para minimizar a interferência de outros sinais. A utilização deste filtro passa-faixa contribui significativamente para a eficácia geral do sistema do receptor, otimizando o desempenho em ambientes com múltiplas fontes de sinal e potenciais perturbações eletromagnéticas.

Com base nos cálculos ilustrados na figura Figura 23, tornou-se viável especificar os componentes para o filtro. Neste contexto, f representa a frequência desejada, Q indica o fator

de qualidade, e R corresponde à impedância padrão do receptor de 50 ohms. Ademais, C refere-se à capacitância e L à indutância.

Figura 23 - Cálculos do Filtro Passa-Faixa do Receptor

$$\begin{aligned}
 f &:= 100000000 & Q &:= 6,4 \\
 R &:= 50 & Wn &:= 2 \cdot \pi \cdot f = 6,2832 \cdot 10^8 \\
 L &:= \frac{R \cdot Q}{Wn} = 5,093 \cdot 10^{-7} & & H \\
 C &:= \frac{1}{L \cdot (Wn)^2} = 4,9736 \cdot 10^{-12} & & F
 \end{aligned}$$

Fonte: Elaborado pelo autor por meio do software Smath®

3.2.2 Circuito Retificador

O circuito retificador do receptor tem a fundamental função em converter a corrente alternada, recebida das ondas de RF, em corrente contínua. Este circuito utiliza diodos para efetuar a conversão, assegurando que a energia captada possa ser eficientemente utilizada posteriormente. Ao selecionar qual circuito retificador utilizar, realizou-se uma comparação entre um circuito retificador de onda completa, um circuito multiplicador de tensão e um multiplicador de tensão Dickson.

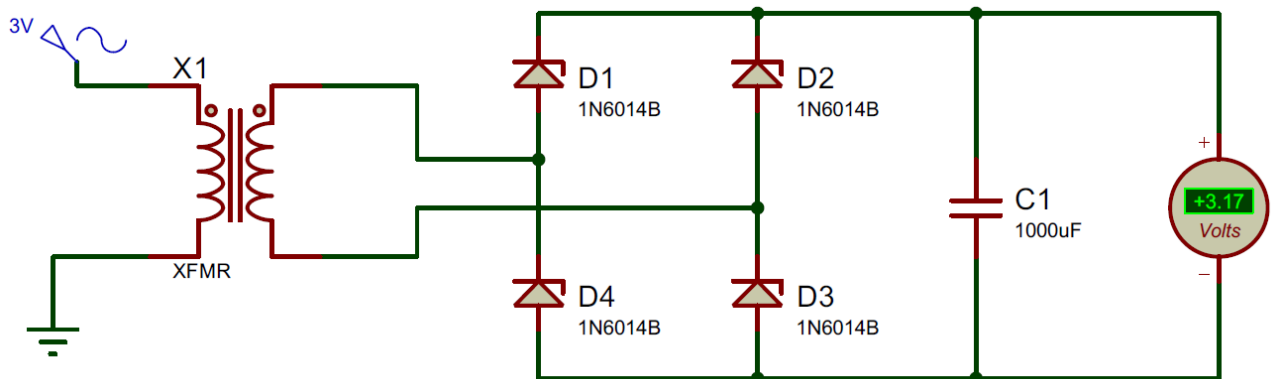
A montagem prática do protótipo do receptor tem como objetivo utilizar placas perfuradas de fenolite como base. O processo inclui a integração do filtro passa-faixa ao circuito principal, garantindo a seletividade e a filtragem adequada das frequências desejadas. Para a conexão da antena, é utilizado um conector do tipo SMA fêmea.

3.2.3 Retificador de Onda Completa

Os retificadores de onda completa são amplamente utilizados em diversos produtos devido à sua implementação simples e funcionamento eficaz. No entanto, uma desvantagem considerável dos circuitos retificadores de ponte reside no fato de que a corrente deve passar por mais diodos durante o processo de retificação, o que leva a uma eficiência menor.

A performance do circuito foi testada por meio de simulações pelo *software* Proteus. A frequência de entrada configurada foi de 100 MHz, com uma tensão CA de 3 V. Utilizou-se um capacitor de 1000 uF para armazenamento de energia. Quatro diodos de germânio 1N60 fazem parte da ponte retificadora. O circuito retificou a tensão de CA para CC elevando levemente a tensão para 3.17 V, conforme ilustrado na Figura 24.

Figura 24 - Retificador de Onda Completa



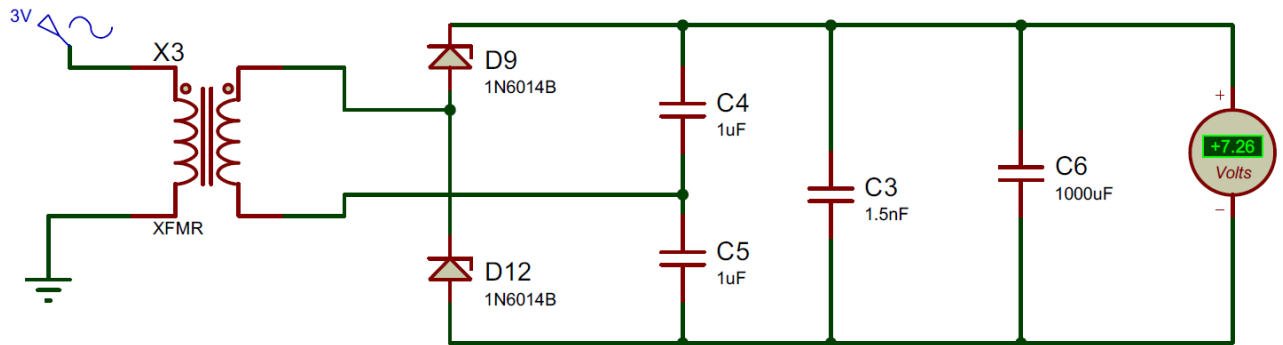
Fonte: Elaborado pelo autor por meio do software Proteus®

3.2.4 Retificador Multiplicador de Tensão

O retificador multiplicador de tensão empregado nesse circuito faz uso de uma quantidade reduzida de diodos, sendo capaz de produzir uma tensão de saída significativamente superior à tensão de entrada aplicada.

A performance do circuito retificador foi demonstrada por meio de simulações pelo *software* Proteus. A frequência de entrada configurada foi de 100 MHz, com uma tensão CA de 3 V. Utilizou-se dois capacitores de 1 μ F, um capacitor de 1,5 nF para suavização e um capacitor de 1000 μ F para armazenamento de energia. Juntamente com dois diodos de germânio 1N60. O circuito elevou a tensão de 3 V para 7,26 V, conforme ilustrado na Figura 25.

Figura 25 - Circuito do Amplificador de Tensão



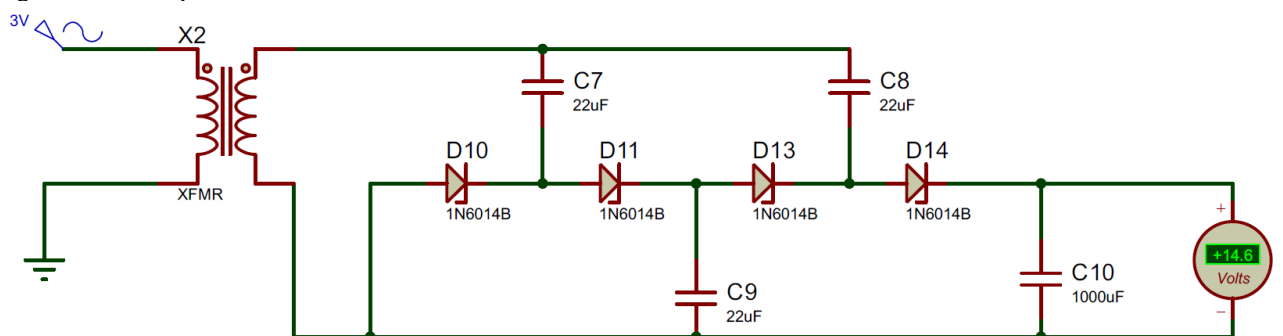
Fonte: Elaborado pelo autor por meio do software Proteus®

3.2.5 Retificador Multiplicador de Tensão Dickson

Criado por John Francis Dickson, o retificador multiplicador de tensão Dickson tem o objetivo de converter a tensão CA em CC utilizando uma combinação de diodos e capacitores organizados em forma de cascata. O funcionamento desse retificador envolve o carregamento sequencial dos capacitores durante os ciclos positivos e negativos da tensão de entrada, permitindo que a tensão seja acumulada progressivamente através dos estágios do circuito.

O desempenho desse retificador foi demonstrado por meio de simulações pelo *software* Proteus. A frequência de entrada configurada foi de 100 MHz, com uma tensão CA de 3 V. Foram utilizados três capacitores de 22 nF, quatro diodos 1N60 e um capacitor de 1000 uF para armazenamento de energia. O resultado obtido foi um aumento de 3 V para 14,6 V, conforme ilustrado na Figura 26.

Figura 26 - Multiplicador de Tensão Dickson



Fonte: Elaborado pelo autor por meio do software Proteus®

3.3 Antenas

Para este projeto, a decisão foi por uma antena que satisfizesse critérios específicos, devendo possuir características que se alinhem perfeitamente com os requisitos da aplicação proposta, tais como a faixa de frequência e impedância adequadas. A escolha foi por uma antena dipolo plano terra modelo LCH201501, ilustrada na Figura 27.

Esta antena foi projetada para operar na faixa de 65 a 375 Mhz, contendo impedância de 50 ohms, satisfazendo os requisitos do transmissor. Inclui um elemento irradiante vertical e três elementos condutores horizontais chamados radiais, que refletem os sinais como um espelho, o que melhora a eficiência e o ganho da antena. Além disso, os elementos possuem comprimentos ajustáveis, variando de 20 a 112 centímetros.

Por conta da possibilidade de ajuste que a antena proporciona, é possível fazer um ajuste fino de acordo com a frequência escolhida. O elemento vertical deve ter um comprimento de aproximadamente um quarto do comprimento de onda da frequência desejada. O comprimento pode ser calculado pela Equação 2.

$$L = \frac{\lambda}{4} = \frac{c}{f} \quad (2)$$

$$\lambda = \frac{300000}{100000} = 3 \quad (3)$$

$$L = \frac{3}{4} = 75 \text{ cm} \quad (4)$$

Onde L designa o comprimento do elemento irradiante, λ consiste no comprimento da onda em metros. C expressa a velocidade da luz, que consiste em de 300.000 quilômetros por segundo. E por fim f retrata a frequência de operação da antena em hertz, que nesse caso corresponde a 100 MHz. De acordo com os cálculos realizados, a antena de elemento vertical positiva deve ter 75 centímetros de comprimento.

Para os elementos radiais, configura-se como recomendável que seu comprimento seja equivalente a 112% do comprimento do elemento vertical. Assim, o comprimento ideal dos elementos radiais seria de 84 centímetros. Além disso, a orientação desses elementos radiais é crucial, sendo benéfico posicioná-los inclinados para baixo em um ângulo de aproximadamente 45 graus a partir do ponto de conexão com o elemento vertical, para otimizar a impedância de terra e melhorar o padrão de radiação da antena.

Figura 27 - Antena do Transmissor



Fonte: Aliexpress (2024)

A escolha da antena para o receptor, ilustrada na Figura 28, foi baseada na necessidade de um design compacto. A antena escolhida possui um comprimento de 21,8 cm, operando na faixa de frequência de 95 a 1100 MHz e apresentando uma impedância de 50 ohms.

Figura 28 - Antena do Receptor



Fonte: Aliexpress (2024)

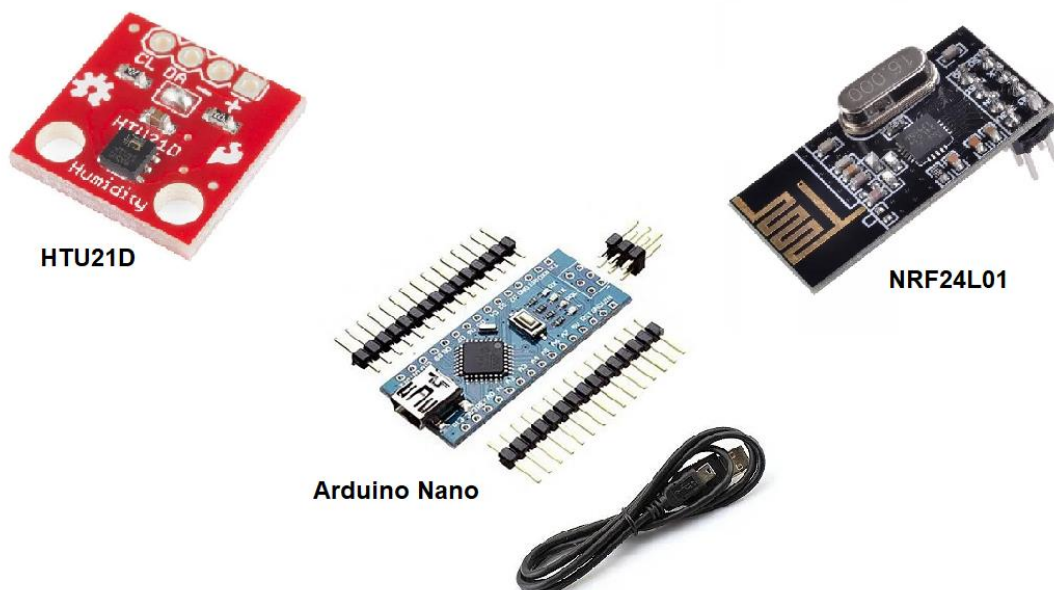
3.4 Carga de Sensor

Neste sistema, a carga destinada a ser alimentada consiste em sensores de baixa potência. Estes sensores são projetados para operar de maneira eficiente em termos energéticos,

acordando periodicamente a cada hora para realizar medições antes de retornarem ao modo *sleep*. Essa estratégia de consumo cíclico minimiza o uso de energia, permitindo que os sensores mantenham sua operacionalidade por longos períodos e economizem uma quantidade significativa de energia. Este design é particularmente vantajoso para aplicações em locais de difícil acesso ou em ambientes onde a substituição de baterias seria impraticável, oferecendo uma solução sustentável e de baixa manutenção para monitoramento contínuo.

O modelo de sensor a ser empregado será o HTU21D, que se trata de um módulo digital de alta precisão que foi projetado para medir umidade relativa do ar e a temperatura. Amplamente utilizado em projetos de IoT, o sensor foi escolhido devido ao seu tamanho compacto e baixo consumo de energia de aproximadamente 500 μA em modo normal e 0,14 μA em modo *sleep*. Para a comunicação sem fio, foi escolhido o módulo NRF24L01, que consiste em um transceptor de RF de 2,4 GHz que permite a troca de dados entre dispositivos. O módulo possui baixo consumo de energia, sendo aproximadamente 12 mA em modo de operação normal e cerca de 900 nA em modo *power down*. Também possui uma antena integrada, tornando-o adequado para aplicações que exigem eficiência e confiabilidade em comunicação sem fio. Para a integração e controle desses módulos, foi escolhido o microcontrolador Arduino Nano, que se destaca pelo seu formato compacto e pelo baixo consumo eficiente de energia, consumindo aproximadamente 20 mA em modo de operação normal e 100 μA em modo *deep sleep*. A Figura 29 ilustra os componentes a serem utilizados como carga.

Figura 29 - Carga a ser utilizada



Fonte: Baú da Eletrônica (2024)

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, serão apresentados os resultados obtidos por meio de cálculos, simulações computacionais e montagem de protótipo na prática. As simulações foram realizadas utilizando *softwares* como Proteus e LTSpice, sendo possível simular o comportamento e a eficácia dos componentes e sistemas em estudo. Após a realização das simulações, procedeu-se à montagem prática dos três modelos de receptores desenvolvidos, visando validar os resultados obtidos teoricamente e avaliar o desempenho dos dispositivos em condições reais de operação.

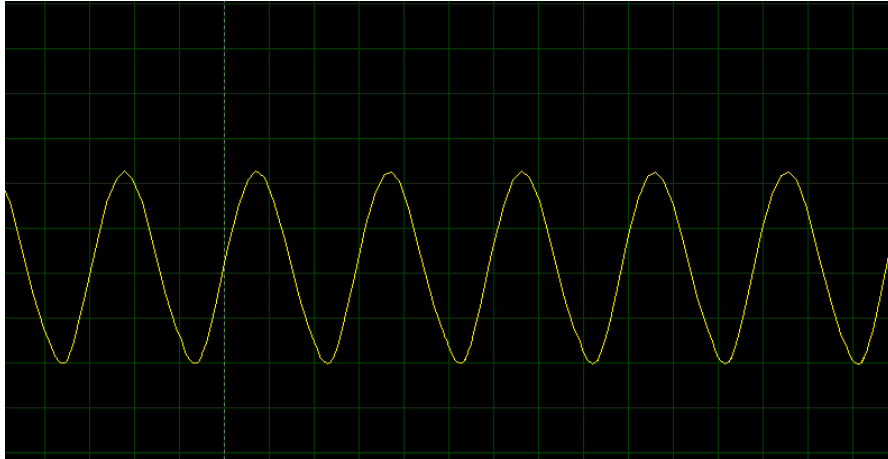
4.1 Sistema do Transmissor

A implementação prática do transmissor não pôde ser realizada, dessa forma, serão apresentados apenas os resultados obtidos por meio de simulações, que permitiram analisar e validar o funcionamento teórico do transmissor de acordo com as especificações propostas.

4.1.1 Simulações do Transmissor

Devido a restrições no *software* utilizado, não foi possível realizar a simulação do circuito completo do transmissor. No entanto, foi factível simular partes individuais do circuito para entender melhor seu comportamento e otimizar componentes específicos. Uma parte do circuito que permite a realização de simulação trata-se do oscilador. Por intermédio da simulação pelo *software* Proteus, como pode ser visto na Figura 30, foi possível visualizar a senoide gerada pelo oscilador. Essa visualização confirma a operação correta do oscilador e permite ajustes finos nos componentes para garantir que a forma de onda gerada esteja dentro das especificações necessárias para uma transmissão eficiente de energia.

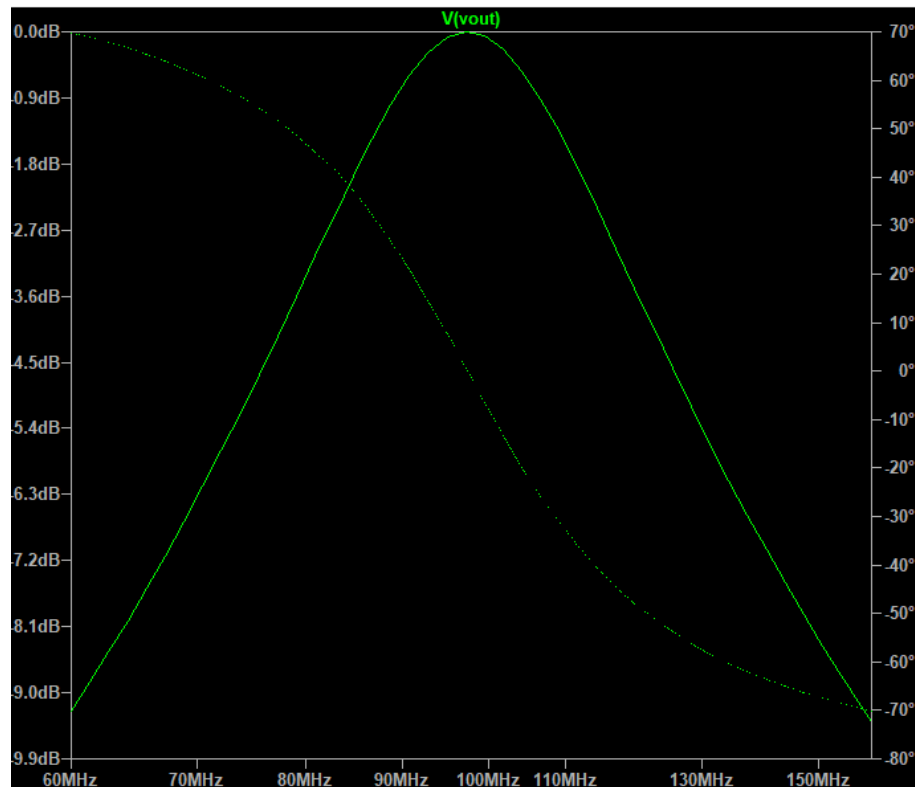
Figura 30 - Senoide do Oscilador



Fonte: Elaborado pelo autor por meio do software Proteus®

Outra parte do circuito que foi objeto de simulação refere-se ao filtro passa-faixa. Utilizando simulações como a apresentada na Figura 31, torna-se possível determinar a resposta em frequência do filtro, crucial para garantir que apenas as frequências desejadas sejam transmitidas. A curva mostra a atenuação do filtro, evidenciando a frequência de corte onde o filtro é mais eficaz, que se trata da faixa de frequência entre 88 MHz e 108 MHz.

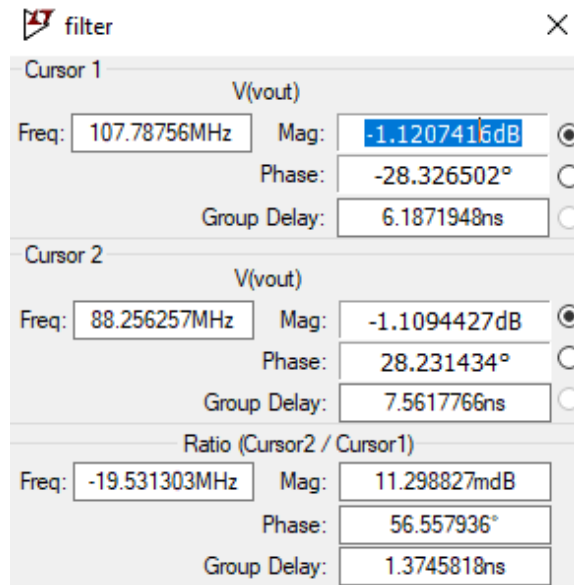
Figura 31 - Simulação do Filtro Passa-Faixa do Transmissor



Fonte: Elaborado pelo autor por meio do software LTSpice®

A Figura 32 evidencia a faixa de atenuação do filtro do transmissor, como relatado anteriormente, entre 88 e 100 MHz.

Figura 32 - Atenuação do Filtro do Transmissor



Fonte: Elaborado pelo autor por meio do software LTSpice®

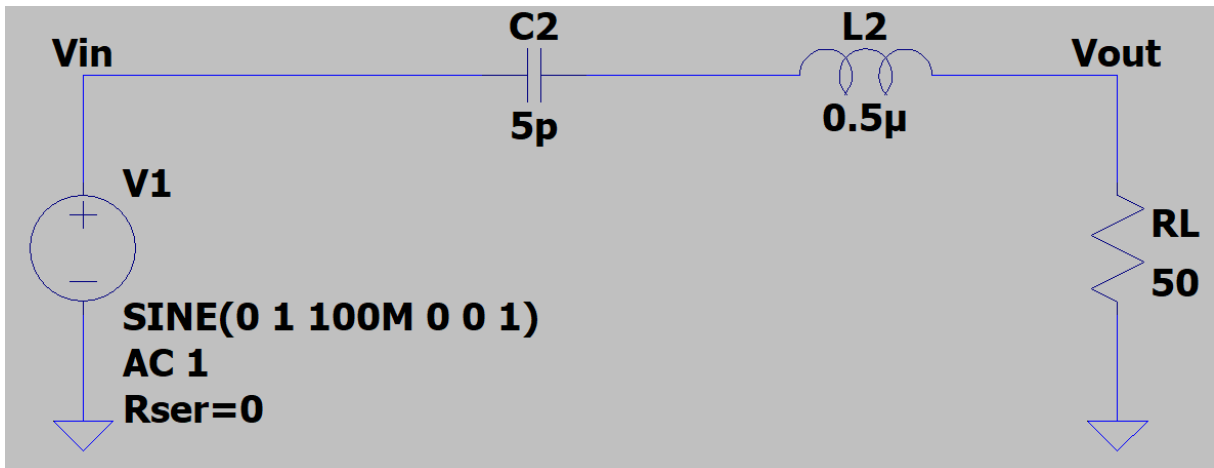
4.2 Sistema do Receptor

Para o receptor, foi possível realizar simulações do filtro passa-faixa, permitindo avaliar seu desempenho teórico e sua adequação aos requisitos do projeto. Além disso, foram implementados na prática os três modelos de retificadores propostos, cujos resultados foram obtidos e analisados. Para a validação dos receptores foi utilizado um transmissor pré-fabricado.

4.2.1 Simulações do Receptor

Com base nos cálculos realizados na metodologia, foi possível simular o filtro passa-faixa do receptor, cuja resposta em frequência foi otimizada para atingir máxima eficácia na faixa de 100 MHz. A simulação revelou uma atenuação efetiva das frequências adjacentes, assegurando a recepção do sinal dentro da banda especificada. Os resultados confirmaram a precisão dos cálculos teóricos, demonstrando que os componentes selecionados para o filtro, estão adequados para alcançar as características desejadas. A Figura 33 evidencia o circuito do filtro passa-faixa simulado.

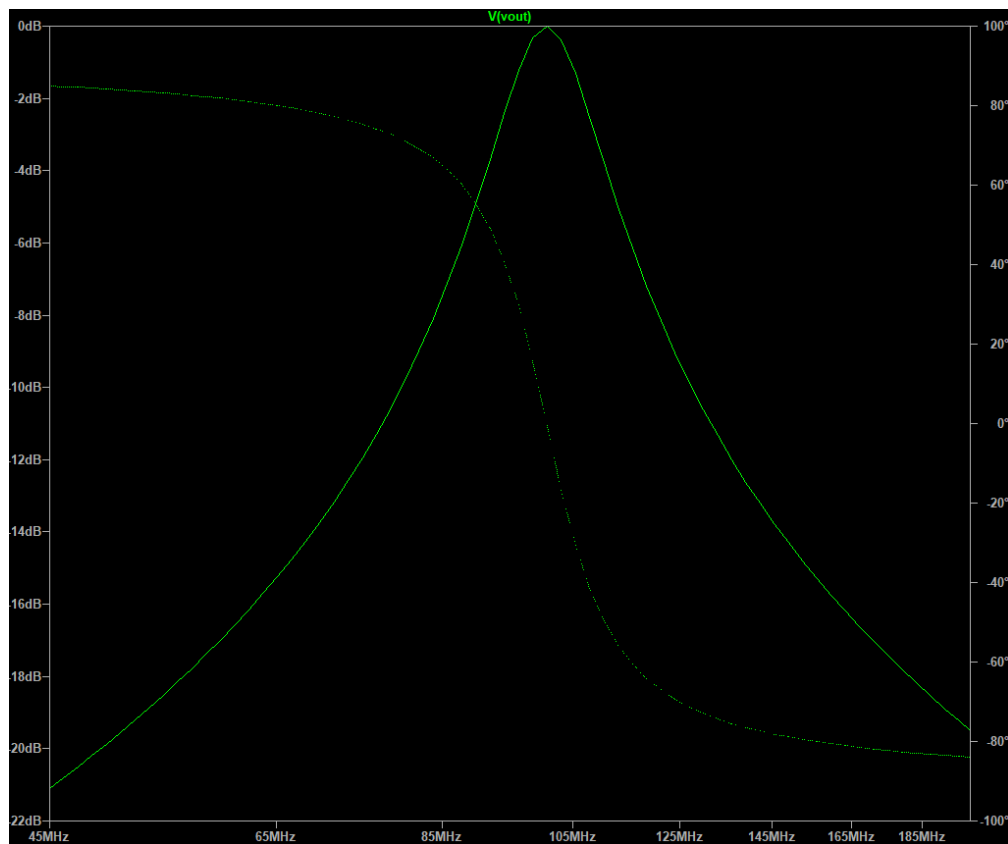
Figura 33 - Circuito do Filtro Passa-Faixa Simulado



Fonte: Elaborado pelo autor por meio do software LTSpice®

Por intermédio do gráfico de resposta em frequência, ilustrado na Figura 34, foi possível confirmar que o filtro passa-faixa efetivamente isola a banda de interesse e atenua as frequências fora dessa faixa.

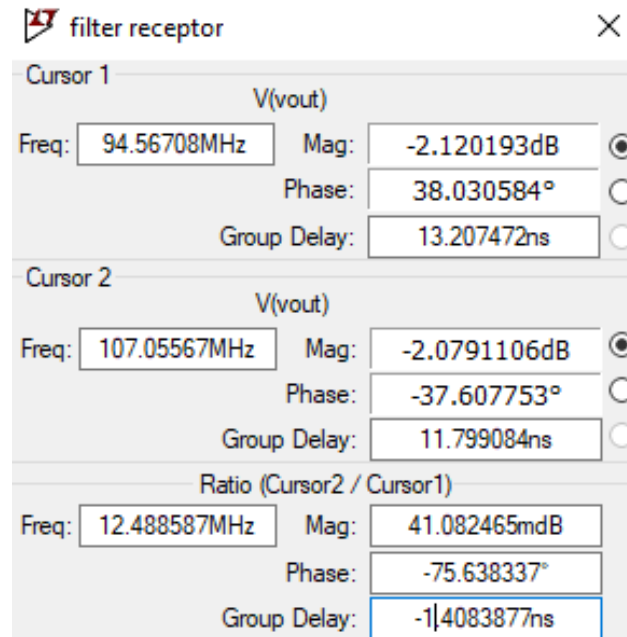
Figura 34 - Simulação do Filtro Passa-Faixa do Receptor



Fonte: Elaborado pelo autor por meio do software LTSpice®

A Figura 35 ilustra a faixa de atenuação do filtro do receptor, que possui uma banda de passagem mais restrita do que a do transmissor, abrangendo um intervalo de frequência que se estende de 95 MHz a 107 MHz.

Figura 35 - Atenuação do Filtro do Receptor



Fonte: Elaborado pelo autor por meio do software LTSpice®

4.2.2 Implementação na Prática do Receptor

Para a montagem na prática, os componentes foram organizados de forma a otimizar o espaço disponível na placa e minimizar interferências. Essa etapa permitiu validar a funcionalidade do circuito e verificar o desempenho do receptor em condições reais.

Os testes dos receptores foram realizados individualmente dentro de um ambiente residencial controlado, posicionados a uma distância de aproximadamente 3 metros do transmissor, garantindo a avaliação precisa do desempenho em condições controladas. Além disso, foram conduzidos testes no modo de *power harvesting*, com o objetivo de verificar a capacidade dos receptores de captar energia disponível no ambiente. Essa etapa foi essencial para analisar o potencial de funcionamento em cenários reais, onde a energia coletada seria proveniente de fontes distribuídas no espaço, sem dependência de uma transmissão focada.

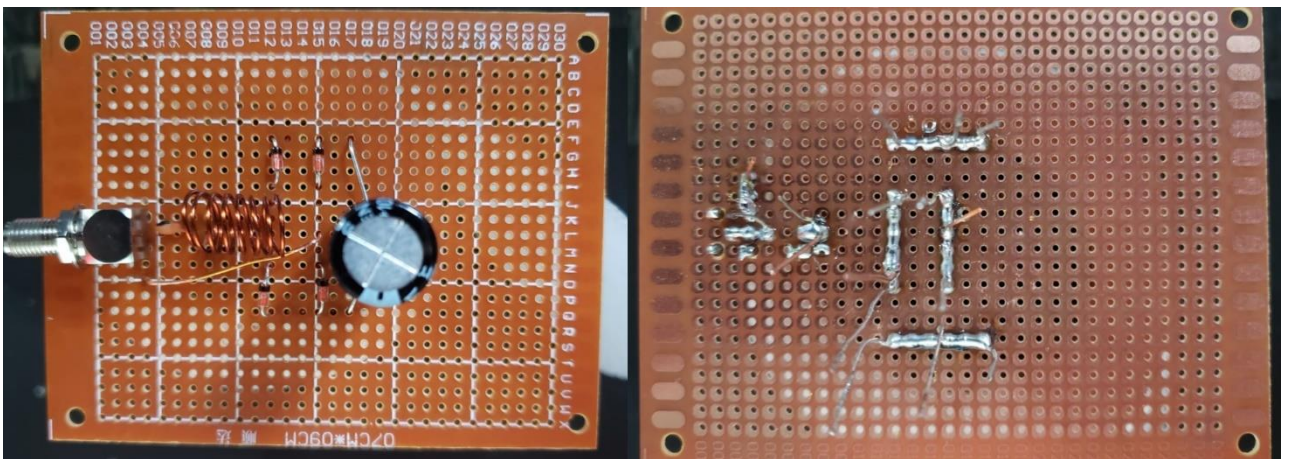
A tensão recebida pelo receptor pode variar devido à falta de precisão no processo de fabricação manual do filtro, especialmente no indutor. Como o filtro foi montado manualmente, as imperfeições no ajuste e na fabricação podem resultar em variações no desempenho do

circuito, afetando a sua eficiência. Essas variações são naturais em sistemas que dependem de componentes fabricados manualmente e com características variáveis. Além disso, a variação na fabricação da antena também pode influenciar na captação das ondas de rádio, uma vez que pequenas diferenças nos processos de produção podem alterar sua eficácia na recepção do sinal, impactando a tensão recebida no receptor.

4.2.2.1 Receptor com Retificador de Onda Completa

Na montagem deste receptor, foram utilizados quatro diodos de germânio 1N60, um capacitor de 1000 μF para armazenamento de energia. Para o filtro foi utilizado um capacitor de 5,6 pF e um indutor com indutância de 0.5 μH . O protótipo montado está apresentado na Figura 36.

Figura 36 - Receptor com Retificador de Onda Completa



Fonte: O autor

Durante os testes, o receptor operou de forma eficiente ao ser alimentado pelo transmissor, apresentando uma tensão de saída de 3,1 V e tendo potência de 1,36 mW sem carga conectada. No modo de *power harvesting*, em que o receptor capta ondas de rádio disponíveis no ambiente, o resultado apresentado foi de 0,64 V, o que reflete a capacidade do sistema de operar com fontes de energia ambientes, embora com uma tensão menor devido à baixa intensidade das ondas de rádio disponíveis. Os resultados estão ilustrados na Figura 37.

Figura 37 - Tensões do Receptor com Retificador de Onda Completa

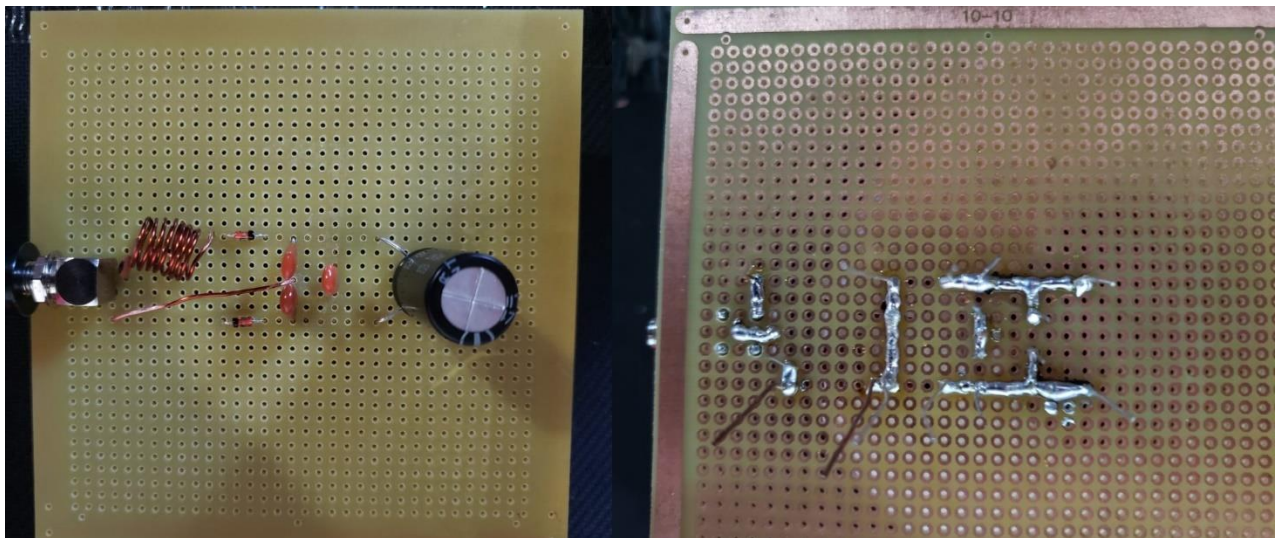


Fonte: O autor

4.2.2.2 Receptor com Retificador Multiplicador de Tensão

Os componentes empregados na montagem deste receptor incluíram dois diodos de germânio 1N60, dois capacitores de $1\ \mu\text{F}$, um capacitor de $1,5\ \text{nF}$, um capacitor de $1000\ \mu\text{F}$ para o armazenamento de energia, além de um filtro composto um capacitor de $5,6\ \text{pF}$ e um indutor com indutância de $0,5\ \mu\text{H}$. O protótipo montado está ilustrado na Figura 38 a seguir.

Figura 38 - Receptor com Retificador Multiplicador de Tensão



Fonte: O autor

Durante os testes, o receptor alimentado pelo transmissor apresentou uma tensão de saída de $5,4\ \text{V}$ e potência de $2,38\ \text{mW}$ sem carga conectada, o que mostra um grande aumento na tensão em comparação com o receptor anterior. No modo de colheita de energia das ondas

de rádio, a tensão captada foi de aproximadamente 1,5 V, que também representa um aumento significativo na tensão. Os resultados encontram-se representados na Figura 39.

Figura 39 - Tensões do Receptor com Retificador Multiplicador de Tensão

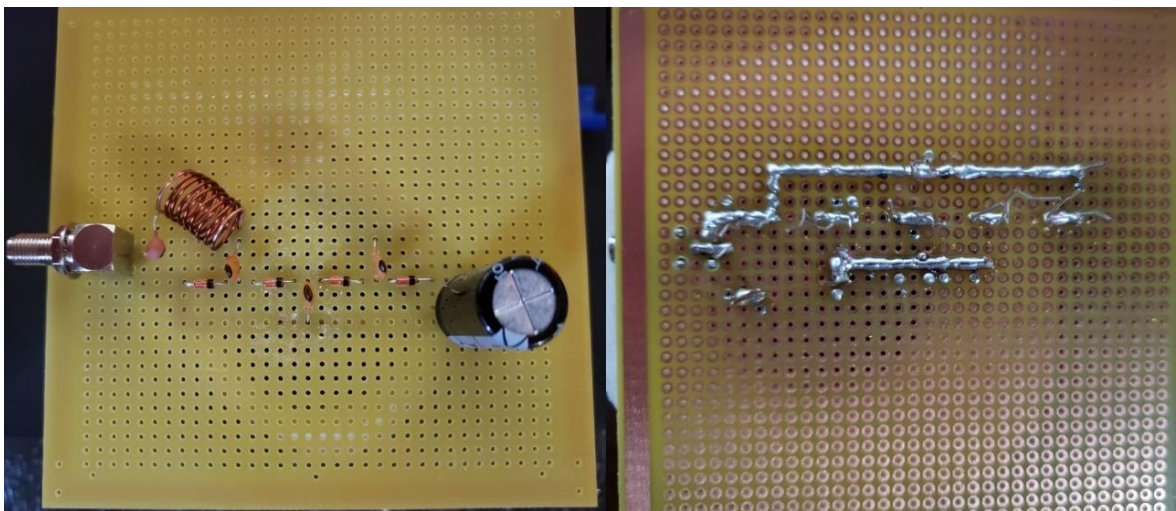


Fonte: O autor

4.2.2.3 Receptor com Retificador Multiplicador de Tensão Dickson

Os componentes utilizados na construção do receptor com o retificador Dickson incluíram quatro diodos de germânio modelo 1N60, três capacitores de 22 nF, um capacitor de 1000 μ F para o armazenamento de energia, além de um filtro composto por um capacitor de 5,6 pF e um indutor com indutância de 0,5 μ H. O protótipo montado está apresentado na Figura 40.

Figura 40 - Receptor com Retificador Multiplicador de Tensão Dickson



Fonte: O autor

Durante os ensaios realizados, o receptor, quando alimentado pelo transmissor, apresentou uma tensão de saída de 6,8 V e potência de 3,2 mW em circuito aberto, o que

demonstra um aumento moderado em comparação com o receptor multiplicador de tensão anterior. No modo de colheita de energia a tensão medida foi de 2,3 V, representando um incremento considerável na tensão obtida, sendo o receptor com o melhor desempenho entre os modelos testados. Os resultados estão apresentados na Figura 41.

Figura 41 - Tensões do Receptor com Retificador Multiplicador de Tensão Dickson

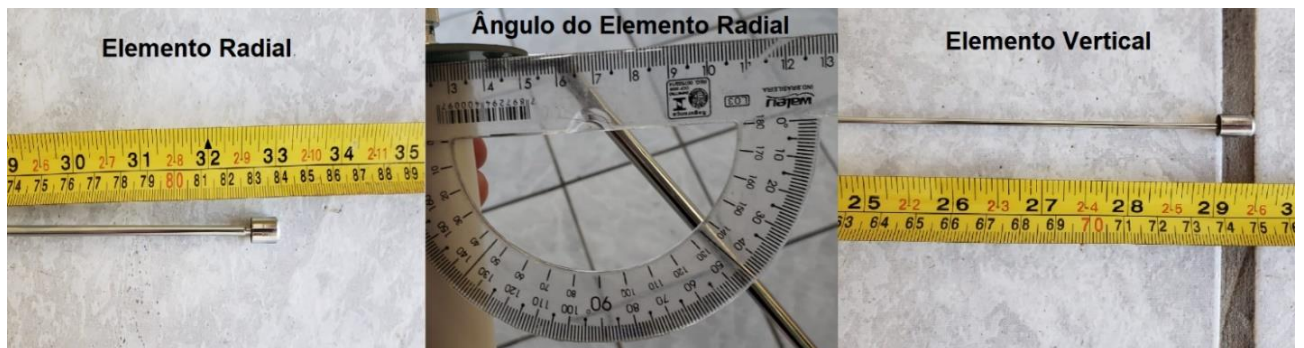


Fonte: O autor

4.3 Antenas

A antena transmissora foi calibrada com foco em trabalhar com mais eficiência na faixa de frequência de 100 MHz, conforme calculado, o elemento vertical foi ajustado em 75 centímetros. Os elementos radiais foram ajustados em 84 centímetros, com uma inclinação de 45 graus para otimizar a impedância de terra e aprimorar o padrão de radiação. Conforme apresentado na Figura 42.

Figura 42 - Ajuste da Antena



Fonte: O autor

A seguir, a Figura 43 ilustra a antena totalmente ajustada para a frequência de 100 MHz.

Figura 43 - Antena Ajustada

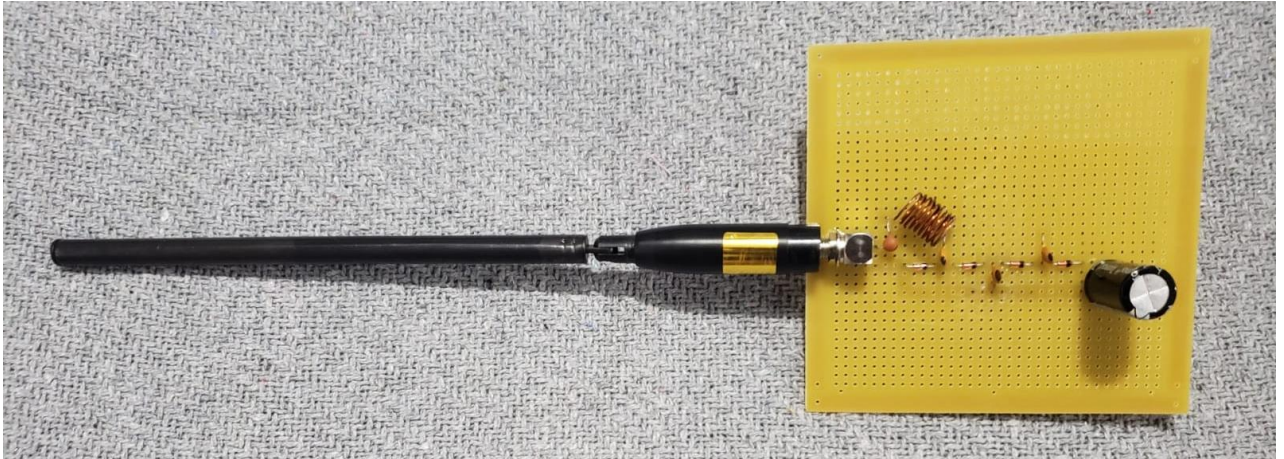


Fonte: O autor

A escolha da antena dipolo plano terra modelo atendeu aos critérios específicos estabelecidos para a aplicação proposta. Projetada para operar entre 65 e 375 MHz, a antena possui uma impedância de 50 ohms, alinhando-se perfeitamente com as exigências. A possibilidade de ajustar o comprimento dos elementos permitiu um ajuste fino conforme a frequência operacional, o que foi essencial para maximizar a eficácia da transmissão.

A escolha de uma antena compacta para o receptor, com aproximadamente 20 cm de comprimento, foi motivada pela busca pela máxima compactação. Alinhada à necessidade de otimizar a utilização em espaços limitados sem comprometer a eficiência na recepção dos sinais. Esse design também reflete a preocupação com o tamanho reduzido do protótipo, visando a eficiência e praticidade do sistema. A Figura 44 demonstra a antena conectada ao protótipo.

Figura 44 - Antena Conectada ao Protótipo do Receptor



Fonte: O autor

4.4 Sistema do Sensor

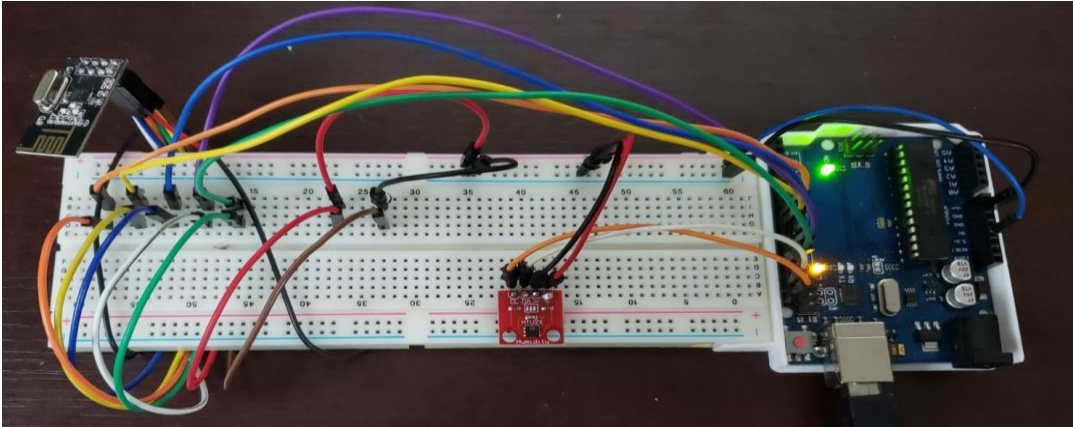
Nos testes realizados, o sistema foi configurado para operar com o Arduino Nano em modo *deep sleep*, mas, como não foi possível obter o Arduino Nano, utilizou-se o Arduino Uno para a realização dos experimentos.

O microcontrolador foi programado para acordar a cada uma hora, momento em que ativa o sensor HTU21D para realizar as medições de umidade relativa e temperatura. Após a leitura dos dados, o módulo NRF24L01 transmite as informações coletadas, concluindo o ciclo antes de retornar ao modo *deep sleep*.

O sistema foi montado em uma protoboard para facilitar ajustes e testes durante a fase de desenvolvimento. A alimentação do microcontrolador, do sensor HTU21D e do módulo NRF24L01 foi fornecida diretamente pelo protótipo do receptor de energia por RF, garantindo que o sistema operasse de forma autônoma e integrada. Permitindo testar a funcionalidade do protótipo montado.

Essa configuração permitiu avaliar a eficiência dos receptores de energia RF, verificando a capacidade de alimentar os dispositivos e assegurar o funcionamento contínuo do sistema. O sistema completo está ilustrado na Figura 45.

Figura 45 - Sistema do Sensor



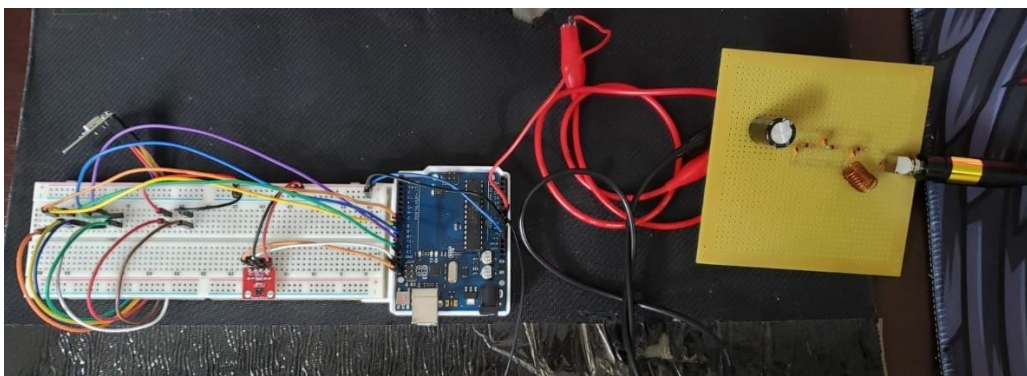
Fonte: O autor

4.4.1 Testes e Alimentação do Sistema

O sistema foi testado com os dois receptores que, enquanto alimentados pelo transmissor pré-fabricado, alcançaram tensões superiores a 5 V, adequadas para o funcionamento do Arduino Uno. Sendo eles, o receptor com retificador multiplicador de tensão com dois diodos, e o receptor com retificador multiplicador de tensão Dickson. No entanto, apenas o protótipo baseado no multiplicador de tensão Dickson foi capaz de fornecer uma alimentação estável durante todo o ciclo de operação, garantindo o funcionamento contínuo do sistema.

Os resultados indicam que o receptor Dickson apresentou superioridade em termos de eficiência e estabilidade, destacando sua viabilidade prática para a aplicação proposta. Em comparação com o outro modelo testado, que embora tenha atingido a tensão necessária, não conseguiu manter a estabilidade ao longo do tempo, evidenciando a necessidade de otimizações adicionais. Esses resultados reforçam o potencial do multiplicador de tensão Dickson como uma solução eficaz para o sistema. O sistema testado está ilustrado na Figura 46.

Figura 46 - Sistema Completo Montado



Fonte: O autor

5 CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo principal investigar a viabilidade e implementação de um sistema de transmissão de energia sem fio por radiofrequência, com foco no desenvolvimento e teste de receptores capazes de alimentar sensores de baixa potência.

Foram montados e avaliados três receptores com diferentes configurações de retificação, onda completa, multiplicador de tensão com dois diodos e multiplicador de tensão Dickson. Os resultados mostraram que os receptores com retificação de onda completa e multiplicador de tensão com dois diodos não conseguiram fornecer tensão suficiente para alimentar o sistema do sensor de forma contínua. Embora o segundo tenha apresentado tensão superior a 5 V em determinados momentos, a instabilidade observada inviabilizou sua aplicação prática. Por outro lado, o multiplicador de tensão Dickson destacou-se por fornecer energia estável e suficiente para alimentar o sistema, demonstrando ser uma solução viável e promissora para o uso em sistemas compostos por sensores sem fio de baixa potência.

A análise comparativa das configurações de receptores contribuiu significativamente para o entendimento das potencialidades e limitações da transmissão de energia por radiofrequência em aplicações práticas. Os resultados evidenciaram desafios, como a baixa eficiência e a dificuldade em alcançar estabilidade em determinadas configurações de receptores, o que reforça a necessidade de pesquisas futuras mais detalhadas e direcionadas à otimização desses sistemas.

Por fim, conclui-se que apesar de não ter sido possível implementar o transmissor planejado, o sistema demonstrou um desempenho satisfatório ao atender às necessidades de alimentação do sistema composto pelo sensor sem fio. Esse desempenho evidencia o potencial dessa tecnologia para aplicações práticas, especialmente no contexto sensores sem fio, e destaca as possibilidades e oportunidades para desenvolvimentos e inovações na área.

5.1 Perspectivas Futuras

Como perspectivas futuras, diversas frentes podem ser exploradas para aprimorar o desempenho e a aplicabilidade do sistema. O desenvolvimento de transmissores com estruturas variadas, adaptados a diferentes condições operacionais e requisitos específicos do receptor. Nesse contexto, a investigação de materiais e componentes com maior eficiência em frequências específicas também pode ser de grande valia.

Sugere-se, ainda, a exploração de outras configurações de retificação visando à otimização da eficiência energética. Simultaneamente, análises detalhadas sobre os mecanismos de perda durante a transmissão, como atenuação do sinal e interferências eletromagnéticas, podem contribuir para atingir maior estabilidade e alcance.

Adicionalmente, a investigação e testes realizados em diferentes faixas de frequência podem contribuir significativamente para o aprimoramento da eficiência e do alcance do sistema.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AFRICA, Aaron Don *et al.* Radio Wave Propagation: Simulation of Free Space Propagation Path Loss. **International Journal of Emerging Trends in Engineering Research**, [s. l.], 2020. Disponível em: <http://www.warse.org/IJETER/static/pdf/file/ijeter07822020.pdf>. Acesso em: 1 jun. 2024.
- ALIEXPRESS. Disponível em: <https://aliexpress.com/>. Acesso em: jul. 2024.
- ALL ABOUT CIRCUITS. Disponível em: <https://www.allaboutcircuits.com/>. Acesso em: jul. 2024.
- ANDREI, Muresan; CLAUDIU, Brad; VADAN, Ioan. Wireless Power Transmission — State of the Art and Applications. **8th International Conference on Modern Power Systems (MPS)**, Cluj-Napoca, Cluj, Romania, 2019. DOI 10.1109/MPS.2019.8759759. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8759759>. Acesso em: 11 maio 2024.
- BARKAN, V.; ZHDANOV, V. **Radio Receivers**. Moscow: Mir Publishers, 1970. 503 p.
- BAÚ DA ELETRÔNICA. Disponível em: <https://www.baudaeletronica.com.br/>. Acesso em: set. 2024.
- BRAGA, Newton C. **O Básico sobre Radiofrequência e Transmissores**. [S. l.: s. n.], 2018. 133 p. Disponível em: <https://www.newtonbraga.com.br/?view=article&catid=42&id=15321-o-basico-sobre-rf-e-transmissores>. Acesso em: 17 jul. 2024.
- BRENNAN, P. V. **Phase-Locked Loop: Principles and Practice**. [S. l.: s. n.], 1996. 204 p.
- CINCO TI. Disponível em: <https://www.5ti.com.br/>. Acesso em: jun. 2024.
- ELETRONICS TUTORIALS. Disponível em: <https://www.electronics-tutorials.ws/>. Acesso em: jun. 2024.
- EMBARCADOS. Disponível em: <https://embarcados.com.br/>. Acesso em: jun. 2024.
- INSTITUTO NCB. Disponível em: <https://www.newtonbraga.com.br/>. Acesso em: jul. 2024.
- INTRODUCTION to RF Energy Harvesting. *In*: SERDIJN, W.A.; MANSANO, A.L.R.; STOOPMAN, M. **Wearable Sensors: Fundamentals, Implementation and Applications**. [S. l.: s. n.], 2014. cap. 4.2, p. 299-322. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780124186620000192>. Acesso em: 5 nov. 2024.
- ISHII, Genta *et al.* Wireless Power Transmission Scheme Employing Phase Control for WSN. **IEEE 18th Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC)**, [s. l.], 2021. DOI 10.1109/CCNC49032.2021.9369527. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9369527>. Acesso em: 25 maio 2024.

JIN, K.; ZHOU, W. Wireless Laser Power Transmission: A Review of Recent Progress. **IEEE Transactions on Power Electronics**, [S. l.], p. 3842-3859, 5 jul. 2018. DOI 10.1109/TPEL.2018.2853156. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8404085>. Acesso em: 8 jun. 2024.

KANAUJIA, B. K.; SINGH, N.; KUMAR, S. **Rectenna: Wireless Energy Harvesting System**. [S. l.]: Springer, 2021.

KOČAKULAK, M.; BUTUN, I. An overview of Wireless Sensor Networks towards internet of things. **IEEE 7th Annual Computing and Communication Workshop and Conference (CCWC)**, [S. l.], 2017. DOI 10.1109/CCWC.2017.7868374. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/314204221_An_overview_of_Wireless_Sensor_Networks_towards_internet_of_things. Acesso em: 25 maio 2024.

LIU, H. *et al.* Laser Power Transmission and Its Application in Laser-Powered Electrical Motor Drive: A Review. **Power Electronics and Drives**, [S. l.], p. 167-184, 2021. DOI 10.2478/pead-2021-0010. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/356608201_Laser_Power_Transmission_and_Its_Application_in_Laser-Powered_Electrical_Motor_Drive_A_Review. Acesso em: 8 jun. 2024.

MA, C.; HUANG, Z.; ZHOU, L.; WANG, Z.; LI, Y. An Energy Efficient Technique Using Electric Active Shielding for Capacitive Coupling Intra-Body Communication. **MDPI Sensors** **2017**, [S. l.], p. 1-14, 8 set. 2017. DOI <https://doi.org/10.3390/s17092056>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/17/9/2056>. Acesso em: 19 jun. 2024.

MERCADO LIVRE. Disponível em: <https://www.mercadolivre.com.br/>. Acesso em: abr. 2024.

MONOLITHIC POWER SYSTEMS. Disponível em: <https://www.monolithicpower.com/>. Acesso em: jun. 2024.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION. Science Mission Directorate. **Radio Waves**. [S. l.], 2010. Disponível em: https://science.nasa.gov/ems/05_radiowaves/. Acesso em: 14 maio 2024.

NIOTAKI, K. *et al.* RF Energy Harvesting and Wireless Power Transfer for Energy Autonomous Wireless Devices and RFIDs. **IEEE Journal of Microwaves**, [S. l.], p. 763-782, 3 abr. 2023. DOI 10.1109/JMW.2023.3255581. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10091717>. Acesso em: 25 maio 2024.

NUNES, R. **Eletrônica e Circuitos de Potência**. [S. l.: s. n.], 2018. 232 p.

PANTOLI, L.; STORNELLI, V. **Filter Design Solutions for RF systems**. [S. l.: s. n.], 2020. DOI <https://doi.org/10.3390/books978-3-03943-548-7>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/books/reprint/3096-filter-design-solutions-for-rf-systems>. Acesso em: 25 jul. 2024.

PARK, J. H. *et al.* Design and Implementation of 5.8 GHz RF Wireless Power Transfer System. **IEEE**, [S. l.], p. 168520 - 168534, 21 dez. 2021. DOI

10.1109/ACCESS.2021.3138221. Disponível em:

<https://ieeexplore.ieee.org/document/9662351>. Acesso em: 22 out. 2024.

PASTERNAK. Disponível em: <https://br.pasternack.com/>. Acesso em: jun. 2024.

PERTECE JUNIOR, A. **Amplificadores Operacionais e Filtros Ativos**. [S. l.]: Bookman, 2014. 328 p.

PLANETA DO RÁDIO. Disponível em: <https://planetadoradio.com/>. Acesso em: maio 2024.

RAO, C.; KRISHNAN, G. Categories, Standards and Recent Trends in Wireless Power Transfer: A Survey. **Indian Journal of Science and Technology**, [s. l.], maio 2016.

Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/303954233_Categories_Standards_and_Recent_Trends_in_Wireless_Power_Transfer_A_Survey. Acesso em: 25 maio 2024.

RF PAGE. Disponível em: <https://www.rfpage.com/>. Acesso em: maio 2024.

SCIENCE PHOTO LIBRARY. Disponível em: <https://www.sciencephoto.com/>. Acesso em: abr. 2024.

SHADID, R.; NOGHANIAN, S.; NEJADPAK, A. A literature survey of wireless power transfer. **IEEE International Conference on Electro Information Technology (EIT)**, Grand Forks, ND, USA, 2016. DOI 10.1109/EIT.2016.7535339. Disponível em:

<https://ieeexplore.ieee.org/document/7535339>. Acesso em: 1 jun. 2024.

SHARMA, D. An overview of Wireless Sensor Networks. **International Journal of Enhanced Research in Management & Computer Applications**, [S. l.], p. 47-51, abril 2015. Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/319814207_An_overview_of_Wireless_Sensor_Networks. Acesso em: 9 jun. 2024.

STEEMIT. Disponível em: <https://steemit.com/steemstem/@ibk-gabriel/microwave-power-transmission-how-far-so-far>. Acesso em: jun. 2024.

STEER, M. **Fundamentals of Microwave and RF Design**. 3. ed. [S. l.]: NC State University, 2019. 244 p.

STEER, M. **Microwave and RF Design: Amplifiers and Oscillators**. 5. ed. [S. l.]: NC State University, 2019. 236 p.

TAVANA, M. **RF Wireless Power Transfer for IoT Applications**. 2022. Tese - Instituto Real de Tecnologia, Stockholm, Suécia, 2022. Disponível em: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1639872/FULLTEXT01.pdf>. Acesso em: 15 out. 2024.

TEPPER, J. *et al.* Evaluation of RF Wireless Power Transfer for Low-Power Aircraft Sensors. **2020 AIAA/IEEE 39th Digital Avionics Systems Conference (DASC)**, San Antonio, TX, USA, p. 1-6, 18 nov. 2020. DOI 10.1109/DASC50938.2020.9256404.

Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9256404>. Acesso em: 15 out. 2024.

TESLA, N. **Apparatus for Transmitting Electrical Energy** US1119732A. Depósito: 4 maio 1907. Concessão: 1 dez. 1914.

WANG, C. Microwave wireless power transmission technology index system and test evaluation methods. **EURASIP Journal on Advances in Signal Processing**, [s. l.], 2022. Disponível em: <https://asp-urasipjournals.springeropen.com/articles/10.1186/s13634-022-00846-7>. Acesso em: 8 jun. 2024.