

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

DIOGO RICARDO VALE MUNHOZ

**ANÁLISE DE SIMULAÇÕES DE UM CARREGADOR POR TRANSFERÊNCIA DE
ENERGIA SEM FIO PARA SENSORES INDUSTRIAIS**

**Alegrete/RS
2023**

DIOGO RICARDO VALE MUNHOZ

ANÁLISE DE SIMULAÇÕES DE UM CARREGADOR POR TRANSFERÊNCIA DE ENERGIA SEM FIO PARA SENSORES INDUSTRIAIS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientadora: Natalia Braun Chagas.

**Alegrete/RS
2023**

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais).

M9662023a Munhoz, Diogo Ricardo Vale

Análise de simulações de um carregador por transferência de energia sem fio para sensores industriais / Diogo Ricardo Vale Munhoz.

86 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) -- Universidade Federal do Pampa, ENGENHARIA ELÉTRICA, 2023.

"Orientação: Natalia Braun Chagas".

1. WPT. 2. WSN. 3. Simulação . 4. Carregador . 5. Sensor. I. Título.

DIOGO RICARDO VALE MUNHOZ

ANÁLISE DE SIMULAÇÕES DE UM CARREGADOR POR TRANSFERÊNCIA DE ENERGIA SEM FIO PARA SENSORES INDUSTRIAIS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Dissertação defendida e aprovada em: 07 de julho de 2023.

Banca examinadora:

Prof^ª. Dr^ª. Natalia Braun Chagas

Orientadora

UNIPAMPA

Prof. Dr. Giovanni Guarienti Pozzebon

UNIPAMPA

Me. Eng. Gabriel Castelo Branco



Assinado eletronicamente por **NATALIA BRAUN CHAGAS, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 18/07/2023, às 10:44, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **Gabriel Garcia Castelo Branco, Usuário Externo**, em 18/07/2023, às 20:18, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **GIOVANI GUARIENTI POZZEBON, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 19/07/2023, às 17:07, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1166480** e o código CRC **6B896F4B**.

RESUMO

O projeto teve como objetivo analisar o comportamento de um sistema de transmissão de energia sem fio (WPT) para um sensor industrial de temperatura, variando parâmetros como coeficiente de acoplamento, número de enrolamentos, raio das bobinas e distância entre elas. Para isso, foi realizada uma revisão bibliográfica sobre transmissão de energia sem fio e redes de sensores sem fio, fundamentando a compreensão do sistema. Um código no MATLAB foi desenvolvido para gerar o arquivo de simulação e o LTspice foi utilizado para realizar as simulações com diferentes combinações de parâmetros. Os resultados foram minuciosamente analisados, destacando as influências de cada parâmetro no desempenho do sistema, como a eficiência de transferência de energia e a potência recebida. Com base nas conclusões, foram destacadas vantagens e limitações do sistema, bem como possíveis aplicações práticas dos resultados encontrados. Essa abordagem metodológica proporcionou uma investigação detalhada dos efeitos dos parâmetros, contribuindo para o avanço do conhecimento na área e fornecendo subsídios para futuras aplicações práticas.

Palavras-chave: WPT; WSN; Matlab; LTspice; simulação; carregador.

ABSTRACT

The project aimed to analyze the behavior of a wireless power transmission (WPT) system for an industrial temperature sensor, varying parameters such as coupling coefficient, number of windings, coil radius, and distance between them. To achieve this, a literature review on wireless power transmission and wireless sensor networks was conducted to build a foundation for understanding the system. A MATLAB code was developed to generate the simulation file, and LTspice was used to perform simulations with different parameter combinations. The results were thoroughly analyzed, highlighting the influences of each parameter on the system's performance, such as energy transfer efficiency and received power. Based on the conclusions, advantages and limitations of the system were emphasized, as well as potential practical applications of the findings. This methodological approach provided a detailed investigation of parameter effects, contributing to the advancement of knowledge in the field and offering insights for future practical applications.

Keywords: WPT; WSN; Matlab; LTspice; simulation; charger.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Comparação entre sistemas: Sistema 4-20mA vs Sistemas Fieldbus.	20
Figura 2 - Evolução dos Fieldbuses.	21
Figura 3 - Hierarquia na Ethernet Industrial moderna.	23
Figura 4 - Topologias de redes mais utilizadas: a) estrela; b) anel; c) barramento; d) árvore.	24
Figura 5 – Arquitetura geral do modelo IWSN.	27
Figura 6 - Arquitetura geral do modelo IWSAN.	28
Figura 7 - Principais diferenças entre WSN e WSAN.	30
Figura 8 - Experimento do grupo Witricity em 2007.	31
Figura 9 - Breve evolução do conceito WPT.	32
Figura 10 - Modelo representativo sobre as regiões do campo.	37
Figura 11 - Transferência de energia sem fio por acoplamento indutivo.	40
Figura 12- Fluxograma.	42
Figura 13 - Arquivo “Proposto.cir”.	47
Figura 14 - Circuito elétrico equivalente WPT.	50
Figura 15 - Circuito elétrico equivalente ao subcircuito ideal.	51
Figura 16 - Circuito elétrico equivalente ao modelado para simulação.	52
Figura 17 – Circuito elétrico no Spice Directive.	53
Figura 18 - Sensor de temperatura TBS-1ASF13506NM.	56
Figura 19 - Tabela de parâmetros do circuito da simulação 1.	58
Figura 20 - Resultado da Simulação 1.	59
Figura 21 - Tabela de parâmetros do circuito da simulação 2.	60
Figura 22 – Resultado da Simulação 2.	60
Figura 23 – Tabela de parâmetros do circuito da simulação 3.	61
Figura 24 – Resultado da Simulação 3.	62
Figura 25 – Tabela de parâmetros do circuito da simulação 4.	63
Figura 26 – Resultado da Simulação 4.	63
Figura 27 — Tabela de parâmetros do circuito da simulação 5.	64
Figura 28 – Resultado da Simulação 5.	65
Figura 29 - Tabela de parâmetros do circuito da simulação 6.	66
Figura 30 – Resultado da Simulação 6.	67
Figura 31 – Tabela de parâmetros do circuito da simulação 7.	68

Figura 32 – Resultado da Simulação 7.	68
Figura 33 - Parâmetros definidos para simulação 8.	69
Figura 34 – Resultado da Simulação 8.	70
Figura 35 - Tabela de parâmetros do circuito da simulação 9.....	71
Figura 36 - Resultado da Simulação 9.	71
Figura 37 – Tabela de parâmetros do circuito da simulação 10.....	72
Figura 38 – Resultado da Simulação 10.	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros definidos para simulação 1	58
Tabela 2 – Parâmetros definidos para simulação 2.	59
Tabela 3 – Parâmetros definidos para simulação 3.	61
Tabela 4 – Parâmetros definidos para simulação 4.	62
Tabela 5 – Parâmetros definidos para simulação 5.	64
Tabela 6 – Parâmetros definidos para simulação 6.	66
Tabela 7 – Parâmetros definidos para simulação 7.	67
Tabela 8 – Parâmetros definidos para simulação 8.	69
Tabela 9 – Parâmetros definidos para simulação 9.	70
Tabela 10 – Parâmetros definidos para simulação 10.	72

LISTA DE ABREVIATURAS

CPS - *Cyber Physical Systems*
CSMA/CD - *Carrier Multiple Access with Collision Detection*
DCS – *Distributed Control System*
FIP - *Factory Instrumentation Protocol*
IoT – *Internet of Things*
IIoT – *Industrial Internet of Things*
IWSN – *Industrial Wireless Sensor Networks*
LAN – *Local Area Network*
M2M – *Machine to Machine*
MIT - *Massachusetts Institute of Technology*
MPT - *Microwave Power*
PARC - *Palo Alto Research Center*
PLC – *Programmable Logic Controller*
PROFIBUS - *PROcess Field BUS*
RFID - *Radio Frequency Identification*
SN – *Sensor Node*
WPT – *Wireless Power Transfer*
WSAN – *Wireless Sensor and Actuators Networks*
WSN – *Wireless Sensor Networks*

LISTA DE SÍMBOLOS

\vec{E} – Vetor campo elétrico (V/m)

\vec{B} – Vetor campo magnético (T)

\vec{H} – Vetor intensidade magnética (A/m)

\vec{D} – Vetor densidade de fluxo elétrico (C/m²)

\vec{J} – Densidade de corrente (A/m²)

ρ – Densidade volúmica de carga (C/m³)

ϵ – Permitividade do meio (F/m)

μ – Permeabilidade do meio (H/m)

L – Indutância própria ou auto-indutância.

μ_0 – Permeabilidade magnética do vácuo (H/m).

N_1 – Número de espiras da bobina transmissora

N_2 – Número de espiras da bobina receptora

l – Comprimento da bobina

A – Área da seção transversal da bobina (m²)

M – Indutância mútua

R_s – Raio da bobina transmissora (m)

R_r – Raio da bobina receptora (m)

D_{sr} – Distância entre as bobinas transmissora e receptora (m)

k – Coeficiente de acoplamento

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	14
1.1 Contextualização do tema de pesquisa.....	14
1.2 Objetivo Geral	15
1.3 Justificativa.....	15
1.3.1 Tecnologias principais para a indústria 4.0.....	15
1.3.2 Papel da IWSN's na indústria 4.0.....	17
1.3.3 Importância do WPT para as redes de sensores sem fio	18
2. CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA	18
2.1. Redes Protocolos	18
2.2. Fieldbus.....	19
2.3. Rede Ethernet	22
2.3.1. Arquitetura Ethernet Industrial.....	22
2.3.2. Topologia de Rede	23
2.3.4. Protocolos Ethernet Industrial	24
2.4. Rede de sensores sem fio	25
2.4.1. IWSN.....	26
2.4.2. IWSAN	27
2.4.2.1. Características do WSAN	29
2.5. Transferência de energia sem fio.....	30
2.5.1. Princípios de Funcionamento da Transmissão de Energia Sem Fios	
33	
2.5.1.1. 1ª Equação de Maxwell	33
2.5.1.2. 2ª Equação de Maxwell	34
2.5.1.3. 3ª Equação de Maxwell	34
2.5.1.4. 4ªEquação de Maxwell	35
2.5.2. As Regiões do Campo	35
2.5.3. Acoplamento indutivo ressonante.....	37
2.5.4. Relação das bobinas ao WPT.....	38

3. METODOLOGIA	40
4. APLICAÇÕES PRÁTICAS E CONSIDERAÇÕES	43
4.1 MATLAB	43
4.1.1 Auto-Indutância, Indutância Mútua e Coeficiente de Acoplamento ..	43
4.1.2 Implementação do código	46
4.2 LTspice.....	50
5. RESULTADOS E ANÁLISE.....	55
5.1. Simulações	57
5.1.1. Simulações com distâncias fixas para cada sensor	57
5.1.2. Simulações com diferentes distâncias para cada sensor	65
5.2. Análise das simulações	73
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	77
7. PROPOSTAS PARA TRABALHO FUTURO	78
REFERÊNCIAS.....	83

1. INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização do tema de pesquisa

A automação na indústria possibilita à melhora da velocidade de processamento de informações, eficiência energética, confiabilidade, segurança, entre outras (ROGGIA, 2016). Independentemente dos desafios mais complexos e variáveis propostos, que são iminentes ao avanço tecnológico.

Com a evolução das indústrias, nasceram novos temas de pesquisas, como o *Industrial Wireless Sensor Networks (IWSN)* que está se tornando uma solução eficiente e econômica para automação industrial. Isto ocorre devido ao seu baixo custo de instalação em comparação aos custos de cabeamento, manutenção de redes e tempo de manutenção. Além disso, ele possui características ideais para ambientes industriais, para implementação de topologias de acordo com o modelo da indústria (RAZA; FAHEEM; GUENES, 2019). Suas vantagens fundamentais incluem flexibilidade, auto-organização, baixo custo, interoperabilidade e a facilidade de instalação. Entretanto, existe diversos desafios neste conceito como alcance de comunicação restrito, tempo de resposta entre os nodes, largura de banda limitada, ameaças à segurança da tecnologia e sua capacidade de bateria limitada (SAUTER, 210) (WARREN, 2011).

O início da transmissão de energia através da corrente contínua e a transmissão por meio de corrente alternada, desenvolvimento da revolução industrial, tornou o ritmo de evolução acelerado. Cientistas e engenheiros, por exemplo, James Clerk Maxwell e Nikolas Tesla, entre outras. Essas mentes contribuíram ao longo dos anos para implementação de tais técnicas surreais comparando se com as épocas. Mas cada pesquisa, experimentos, desenvolvimento matemáticos tornou se possível a implementação de tal conceito. Os benefícios que o *Wireless Power Transfer (WPT)* consegue trazer são a comodidade, proteção, conforto, custos, segurança e a redução de contato de ambas partes (BORGES, 2021).

O WPT permite a transmissão de energia através do ar, sem precisar de cabos, entre o transmissor e o receptor. Desta forma, está tecnologia se encontra cada vez mais presente em diversas áreas e aplicações, por exemplo o recarregamento sem fio de veículos elétricos. Está técnica de alimentação de diversos dispositivos como, telemóveis, carros elétricos, drones e sensores, se torna um papel fundamental

para exploração de tal conceito. Entretanto, sua eficiência energética é a principal característica de pesquisa, com objetivo de aumentá-la. Isto ocorre, devido a eficiência do sistema diminuir conforme a distância entre as antenas de transmissão e recepção aumenta (BAIKOVA , 2018).

1.2 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho consiste em realizar um estudo sobre a implementação de um recarregador para redes sem fio focados nas indústrias 4.0, propondo um modelo de recarga para os dispositivos. Para atingir o objetivo geral da dissertação, alguns objetivos específicos foram elencados, sendo eles:

- Determinar os parâmetros das propriedades dos recarregadores *Wireless Power Transfer* (WPT);
- observar e analisar as características do modelo proposto para uma avaliação;
- analisar a viabilidade de implementação de um algoritmo por Matlab;
- utilizar implementação do algoritmo para análise e interpretação dos resultados no LTspice.

1.3 Justificativa

1.3.1 Tecnologias principais para a indústria 4.0

Uma das fundamentais tecnologias que está conduzindo a evolução das indústrias, é a *Internet of Things* (IoT), que tem o objetivo de transformar e aperfeiçoar cada aplicação como, por exemplo: doméstica, comercial ou industrial, para uma sociedade mais sustentável, confiável e protegida (RAZA; FAHEEM; GUENES, 2019). Mas para isso, realizar a transformação de objetos comuns em objetos inteligentes conectados através de recursos como a detecção, a computação e a comunicação (RAZA; FAHEEM; GUENES, 2019). A IoT, está tecnologia interconecta diversos objetos a cada dia à internet, com intenção de construir um ciclo de feedback em rede

de detecção, transmissão e comunicação, mas também entre eles, para que aumente a busca de objetos co

muns. Portanto, IoT começou ser conduzida para área industrial por causas de suas diversas vantagens apresentadas, assim resultando em *Internet Industrial of Things* (IIoT), basicamente suas tarefas são a concentração entre dispositivos de comunicação, como máquina a máquina (M2M) e industrial, na transferência e controle de aplicativos de missão crítica. Uma das partes principais que são consideradas importantes para IIoT, chamada de *Cyber Physical Systems* (CPS), definidas como um intermediário desses sistemas, integrantes que envolvem tudo através da rede e processos físicos, mas com foco em uma indústria inteligente, automação industrial, atuadores, etc. (RAZA; FAHEEM; GUENES, 2019).

Estes fatores, são fundamentais para que o ocorra uma nova evolução industrial, que esperada mundialmente e que se denomina como Indústria 4.0. Por sua vez, tem tudo para dar mais um passo para evolução, relacionando todas as tecnologias essenciais para tornar se mais digital, orientada por informações, customizada e ecológica. Entretanto, começaram a discutir essa ideia em 2011, na Feira de Hannover, como uma estratégia de alta tecnologia para 2020, por assim, ideias semelhantes, surgiram em pauta em outras grandes potências da industrialização. Pois a Indústria 4.0, promete duas coisas nesta evolução, sendo elas: um enorme impacto econômico e grandes oportunidades para institutos de pesquisa ou corporações (WARREN, 2011).

Todas essas tecnologias não podem ser plenamente eficazes sem a base essencial do *Industrial Wireless Sensor Networks* (IWSN) e *Industrial Wireless Sensor and Actuator Networks* (IWSAN), que são responsáveis pelo sensoriamento e atuação. Garantir uma comunicação confiável, escalonável, eficiente em termos energéticos, segura e protegida entre essas redes é de extrema importância. Somente assim é possível assegurar a qualidade de serviço (QoS) das aplicações industriais (RAZA; FAHEEM; GUENES, 2019).

No entanto, alcançar esses objetivos de desempenho apresenta vários desafios. Em primeiro lugar, temos as questões relacionadas à tecnologia sem fio, como as variações nas condições do canal, na qualidade da conexão, além dos fenômenos de desvanecimento. Em segundo lugar, é preciso garantir uma comunicação determinística e com baixa latência. O terceiro desafio consiste em

operar com baixo consumo de energia, o que é especialmente importante devido às limitações dos nós sensores (RAZA; FAHEEM; GUENES, 2019).

Portanto, é necessário investir em mais pesquisas para superar esses desafios e garantir um desempenho de rede satisfatório, acelerando assim a adoção do IWSAN. Dessa forma, poderemos aproveitar plenamente os benefícios dessas tecnologias e impulsionar ainda mais o progresso no campo das redes de sensores sem fio em aplicações industriais (RAZA; FAHEEM; GUENES, 2019).

1.3.2 Papel da IWSN's na indústria 4.0

Nestes tipos de indústrias, não há contextualização em dizer que no meio deste ambiente, não há como perceber que elas são fundamentais para agregação da tecnologia IWSN. Como pode ser visto, as recentes indústrias estão sendo constituídas por esses elementos, pois sabem de seu enorme valor. Mas nodes multifuncionais com baixo custo que além de sua função principal, de sensoriamento, mas com recursos de processamento e comunicação. Eles têm objetivo de coletar o máximo de informações para a área designada, como temperatura, vibrações, pressão, entre outros.

No contexto da Indústria 4.0, as redes de sensores sem fio desempenham um papel fundamental. Essas redes são compostas por nós multifuncionais, conhecidos como nodes, que possuem a capacidade de sensoriamento, processamento e comunicação. Estes nós são dispositivos de baixo custo, equipados com processadores e transceptores, permitindo a comunicação sem fio em curtas distâncias (RAZA; FAHEEM; GUENES, 2019).

Esses nós de sensor são implantados de forma densa em áreas de interesse para coletar dados sensoriais, como temperatura, pressão e vibração. Eles operam de forma colaborativa, trocando informações entre si e formando redes ad hoc sem fio. Essas redes, chamadas de WSN's, desempenham um papel crucial na coleta e transmissão de dados em ambientes industriais (RAZA; FAHEEM; GUENES, 2019).

No entanto, é importante destacar que os nós de sensor possuem limitações. Devido ao seu tamanho compacto e uso de baterias, eles enfrentam restrições de energia, processamento e comunicação. Essas limitações exigem soluções eficientes para maximizar o desempenho da rede e garantir o funcionamento adequado dos nós de sensor (RAZA; FAHEEM; GUENES, 2019).

Em resumo, as WSN's são elementos essenciais na Indústria 4.0, permitindo o monitoramento e controle de diversos parâmetros em ambientes industriais. Por meio de uma rede de nós de sensor, é possível coletar dados em tempo real e tomar decisões baseadas em informações precisas e atualizadas. No entanto, é necessário considerar as limitações dos nós de sensor e buscar soluções que otimizem o desempenho da rede (RAZA; FAHEEM; GUENES, 2019).

1.3.3 Importância do WPT para as redes de sensores sem fio

O conceito de rede de sensores sem fio vem criando um espaço gigantesco na tecnologia atualmente, com inúmeras aplicações em diversas áreas, se tornando algo inevitável futuramente. De acordo com estudos, cada nó na rede possui diversos sensores inteligentes interligados, dispositivos com baixa potência e implementados em locais de difícil acesso por pessoas. Geralmente constituídos por uma única fonte de alimentação, que no caso seria sua bateria (BAIKOVA, 2018).

Devido a tais fatores recorrentes, principalmente a simplicidade do sistema seja constituída por baterias. Portanto, a transmissão de energia sem fios, tem a capacidade de ser implementada para o fornecimento de energia para os sensores, buscando a utilização de baterias e eficiência energética para cada dispositivo (BAIKOVA, 2018).

2. CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA

Para dar início ao desenvolvimento deste trabalho abordou-se identificar quais aspectos e o que eles abrangem.

2.1. Redes Protocolos

Em meados de 1970, surge dois conceitos importantes na área de automatização, *Distributed Control System* (DCS) e *Programmable Logic Controller* (PLC), ambos com o objetivo pela otimização de processos de automação (ROSA, 2012). Eles foram direcionados nesta época para aplicação em diversos sistemas de automação industrial, os principais, sistemas de controle de potência, fabrico de automóvel, refinarias de petróleo e gás, entre outros. Paralelamente havia o

desenvolvimento da Ethernet, através da pioneira Arpanet, que visava a construção de uma rede de computadores que pudesse trocar informações (ROSA, 2012).

Ocorre uma evolução com os controladores analógicos, sendo substituídos pelos controladores digitais, acompanhado de um avanço crescente na velocidade de processamento dos computadores. Assim em 1980, criou-se *Local Area Network* (LAN) um modelo de comunicação que possui um conceito de permitir a comunicação entre as redes comunicação digitais, devido a sua arquitetura aberta distribuída, com o objetivo de haver comunicação entre LAN's através de um intermediário, efetua o papel de ponte entre as redes, denominado como gateway (ROSA, 2012).

Entretanto, ocorreu um crescimento significativo na demanda da comunicação relacionados aos números de redes e dispositivos conectados, resultando assim na necessidade de implementação de comunicação de dados entre os dispositivos de campo e os controladores. Porém, o investimento demasiado e a resposta em tempo real, transformou-se em grande obstáculo para o recurso LAN, mesmo obtendo soluções, demonstrava que não correspondia para tal progresso na automação industrial. Todo este processo apenas somou para obter-se o Fieldbus, um padrão específico para a comunicação entre controladores industriais e os dispositivos de campo (DIAS, 2015).

2.2. Fieldbus

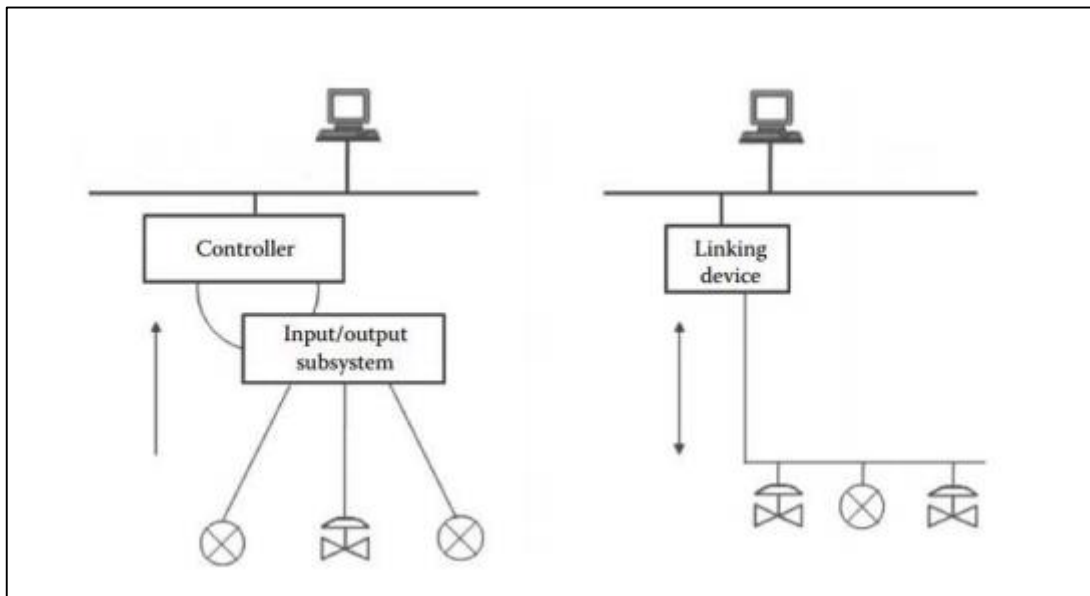
A Fieldbus surgiu com o propósito de substituir os esquemas de ligação em estrela ponto a ponto de modo a ligar controladores, sensores e atuadores através de um único sistema de barramento. De modo, o conceito Fieldbus forneceu diversos benefícios, nos quais se destacam o aumento de flexibilidade e modulação de instalações, aumento de inteligência nos dispositivos, facilidade na configuração do sistema e melhoria no comissionamento e manutenção (ZURAWSKI, 2015).

Mencionado anteriormente, Fieldbus, termo genérico que incisivamente substituiu-se os padrões 4-20mA, sinais analógicos, na figura 1 pode ser observado dois sistemas, o sistema 4-20mA e o sistema Fieldbus. Com resultados promissores em relação as comunicações de rede na época, aparentemente tornando as conectividades em uma rede padronizadas para o controle de instrumentos inteligentes (DIAS, 2015).

Com o avanço do sistema Fieldbus, diversos benefícios surgem-se devido a este sistema. Dentre esses benefícios, podemos destacar:

- Redução de custos em cabos;
- diminuição do tempo em relação a instalação da rede;
- dispositivos se tornando mais inteligentes.

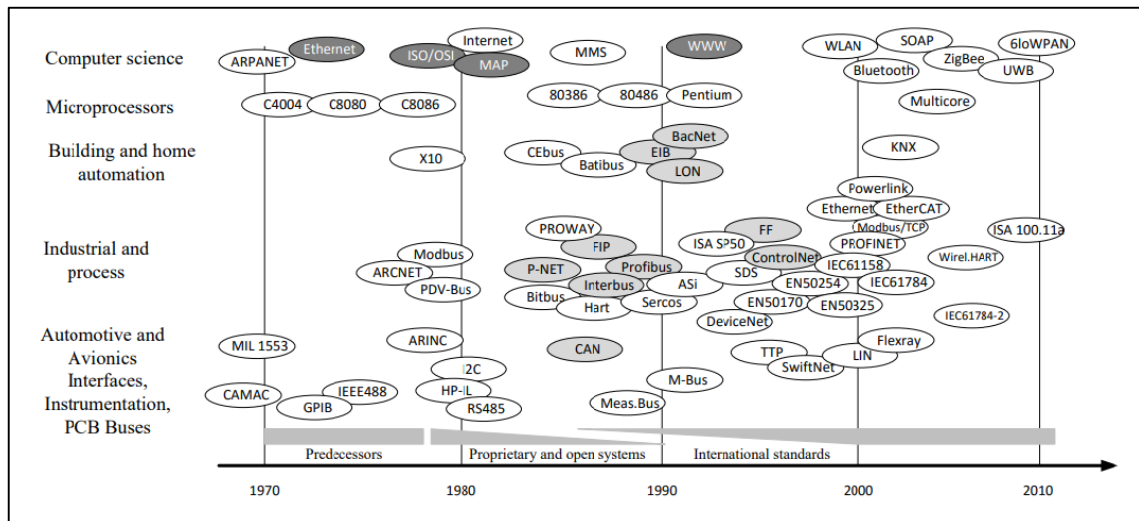
Figura 1 – Comparação entre sistemas: Sistema 4-20mA vs Sistemas Fiedlbus.



Fonte: FERTIG (2018).

Em torno de 1980, se observa a vantagem de implementação de PLC's e dispositivos inteligentes, resultando em um avanço significativo tecnológico na área de automação, como o desenvolvimento de novos sistemas de comunicação, enfatiza-se a necessidade de diminuir a cablagem e a evolução da microeletrônica. Portanto, surge-se distintas empresas de automação, elaborando seus próprios modelos de Fieldbus (DIAS, 2015). Na figura 2, é possível observar a evolução dos sistemas e os campos de aplicação.

Figura 2 - Evolução dos Fieldbuses.



Fonte: FERTIG (2018).

Depois de alguns anos de conflito e confusão tanto do lado dos fabricantes como do lado dos utilizadores, ficou visível que os únicos que tinham hipóteses de singrar no mercado eram os sistemas abertos. Os utilizadores fundaram organizações de modo a promover e definir os sistemas que eram independentes das empresas individuais. Este foi um dos primeiros avanços para o conceito Fieldbus (ZURAWSKI, 2015). O último passo para estabelecer o Fieldbus no mundo da automação foi a sua normalização internacional. O fato de o sistema estar normalizado estabelece uma especificação formal e rígida, permitindo mudanças rápidas no mesmo, transmitindo confiança e credibilidade ao utilizador, assegurando uma posição segura no mercado. Reconhecendo esta necessidade, em 1985 com os esforços do IEC no subcomité técnico SC65C iniciou o projeto Fieldbus (ZURAWSKI, 2015), que tinha o objetivo de criar uma norma Fieldbus universal que pudesse ser aplicada na automação de processo e de fábrica, com base em dois sistemas, nomeadamente o *PROcess FieldBUS* (PROFIBUS) e o *Factory Instrumentation Protocol* (FIP). Contudo, os grandes investimentos já realizados em sistemas existentes e comprovados, juntamente com os interesses económicos de diversos países e empresas, a par das restrições e exigências, impediram o alcance da norma Fieldbus única. Por isso, ao fim de 14 anos de discordâncias políticas e técnicas, o objetivo original foi posto de lado com a implementação das normas IEC 61158 e IEC 61784 (SAUTER, 2010).

2.3. Rede Ethernet

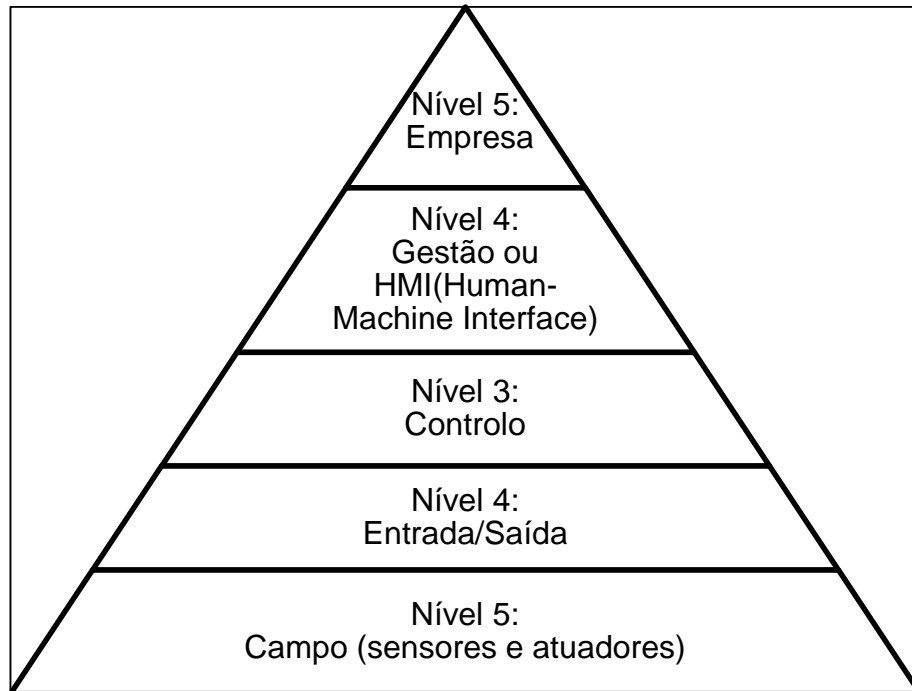
A rede Ethernet foi fundada pelas pioneiras Xerox que deu o primeiro passo no ano de 1973, através dos pesquisadores Bob Metcalfe e David Boggs, projetaram e implementaram a primeira rede local com topologia de barramento no *Xerox Palo Alto Research Center* (PARC). No entanto, o protótipo do Ethernet, atingiu seu sucesso ao ser executado, apenas em 1976. Com isso, há interesses de outras corporações, como *Digital Equipment Corporation* (DEC) e a Intel, que se uniram com a Xerox e criaram um padrão para uma Ethernet de 10Mbps. Posteriormente normalizadas pelo IEE (norma IEE 802.3), utilizando o conceito de *Carrier Multiple Access with Collision Detection* (CSMA/CD) para controlar uma rede de topologia de barramento. Inicialmente foi desenvolvida para redes com topologia em bus físico recorrendo à utilização de cabo coaxial, mas com o avançar do tempo foi evoluindo (ROSA, 2012).

Atualmente a rede Ethernet suporta uma grande variedade de meios físicos. Da mesma forma, a topologia evoluiu, passando de um bus físico para um bus lógico. A Ethernet, normalmente é atribuído uma topologia em estrela ou árvore. Em paralelo com estas mudanças, o mecanismo CSMA/CD tem vindo a sofrer alterações, de maneira a proporcionar uma rede eficiente a débitos elevados (com valores de débito de 100Mbps e 1Gbps) (FERTIG, 2018).

2.3.1. Arquitetura Ethernet Industrial

Independentemente do perfil da indústria, a sua estrutura característica apresenta-se hierárquica, com cinco níveis, sendo eles: empresa, gestão ou *Human-Machine Interface* (HMI), controle, entrada ou saída e campo (sensores e atuadores). Devido a esse sistema, disponibiliza-se buscar o controlo e o fluxo de dados, desde o primeiro nível até quinto. A estrutura da hierarquia apresenta-se na seguinte figura 3.

Figura 3 - Hierarquia na Ethernet Industrial moderna.

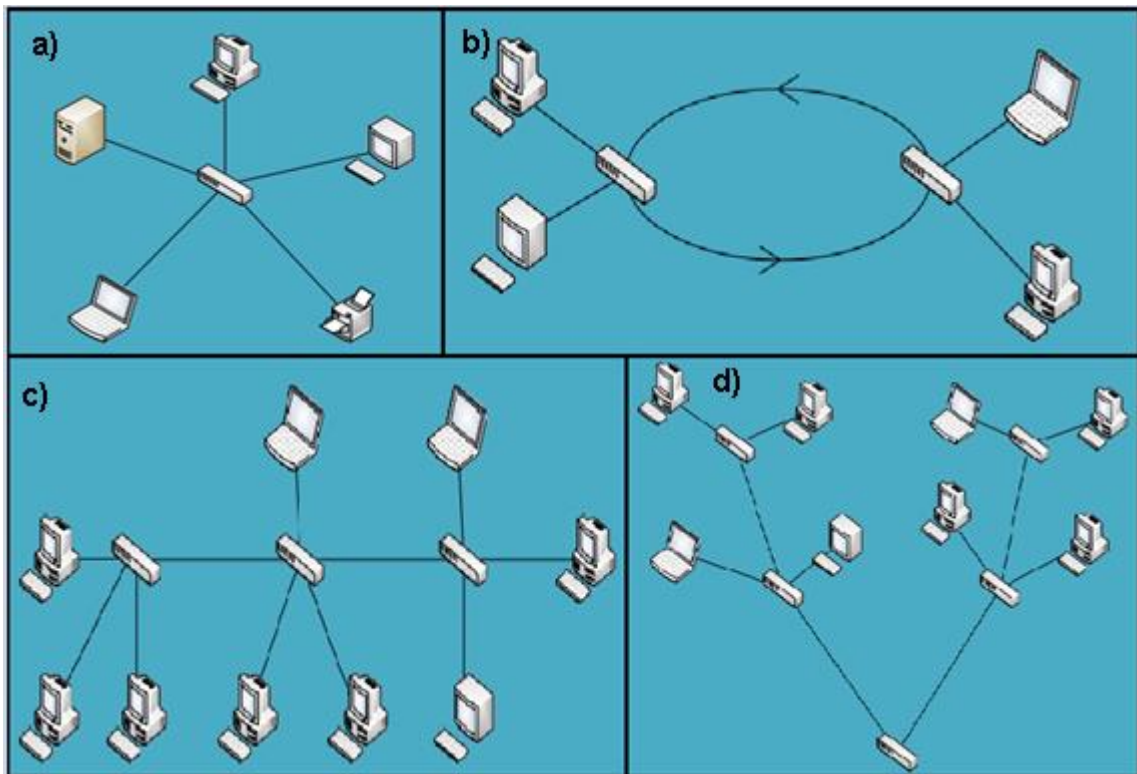


Fonte: FERTIG (2018).

2.3.2. Topologia de Rede

Há diversas topologias de rede, dependendo dos sistemas que estão conectados seus dispositivos, podemos defini-la e descrever do ponto central para suas ramificações finais. As mais utilizadas topologias nas indústrias são determinadas como estrela, anel, barramento e árvore, sendo representadas na figura 4. Cada topologia desenvolvida apresenta diferentes questões fundamentais que resultam em vantagens e desvantagens para indústria. Basicamente existe uma influência por meio de cada topologia que se ressalta esses pontos considerados importantes nas redes, como a flexibilidade, velocidade e segurança (DIAS, 2015).

Figura 4 - Topologias de redes mais utilizadas:
a) estrela; b) anel; c) barramento; d) árvore.



Fonte: FERTIG (2018).

2.3.4. Protocolos Ethernet Industrial

A ethernet não foi desenvolvida para a automação industrial, porém com sua evolução constante durante as décadas, encaminhou-se para que os fabricantes agregassem os sistemas de controle em rede em seus equipamentos. Isto resultou em uma escolha absoluta nas comunicações industriais, pois apresenta um controle mais preciso e a sua transmissão de dados é mais abrangente que as comunicações anteriores.

A ethernet industrial é definida como “uma aplicação bem sucedida das normas IEEE 802.3 com sistemas de fios, conectores e hardware que atendam ao ruído elétrico, vibração, temperatura, e requisitos de durabilidade do equipamento de fábrica, e protocolos de rede que forneçam interoperabilidade e controle do tempo-crítico dos dispositivos e máquinas inteligentes. Este conceito é uma força em

crescimento nas redes industriais devido ao amadurecimento das camadas de hardware e de software” (WARREN, 2011).

A ethernet industrial sofreu modificações para que ocorresse uma transformação que seria crucial para tal evolução, a fim de serem empregadas em suas devidas aplicações. Mas encontrava-se fatores fundamentais como, entrega de dados determinísticos, suportar a eventos acionados pelo tempo e suas topologias devem-se certificar a segurança e confiabilidade das redes.

Alguns dos protocolos mais destacados na Ethernet Industrial:

- Ethercat;
- Ethernet/IP;
- POWERLINK;
- PROFINET;
- Modbus/TCP.

2.4. Rede de sensores sem fio

Seu conceito é definido como uma rede sem fio de dispositivos independentes, distribuídos em uma região considerando-se seu alcance, por inúmeros nós ou nodo que são constituídos por sensores com objetivo de monitorar e detectar fenômenos físicos. Estes próprios nós de sensoriamento tendem-se ser utilizados em larga escala nas redes, devido seu o desempenho, distintos dos sensores tradicionais. Basicamente compostos por um sensor, memória, microcontrolador, transceptor sem fio e uma bateria. Porém, sua crescente evolução provém de um desenvolvimento tecnológico conseqüentemente da influência sofrida com a evolução industrial, causando constantes otimizações em seus dispositivos (WARREN, 2011).

Algumas de suas características importantes que devem-se ser consideradas relevantes, como pode se executar seu funcionamento independente de alguma interação humana, capacidade de suportar condições ambientais adversas, substituir ou implementar um nó a qualquer momento não afetara o funcionamento da rede e sua topologia de rede pode ser alterada. Portanto os protocolos de comunicação e o gerenciamento de redes possuem a eficácia em auto-organização. A sua fonte de energia, as baterias, se mostrou limitadas. Portanto, existe uma

cooperação entre os nós para transportar os dados com objetivo de conservar e evitar o máximo gasto de energia, assim aumentando a vida útil da rede.

Conforme a rede, estes nodos eventualmente são organizados em grupo (Clusters), caso ocorra um evento em alguma área, atua-se um dos sensores com a capacidade de detectar, processa-lo e imediatamente decidir-se deve compartilhar o resultado ou não, com os demais nodos. Há diversos sensores que podem ser acoplados em cada nodo, tais como:

- Acústico;
- umidade;
- pressão;
- temperatura;
- infravermelho;
- medidas de posição, velocidade ou aceleração de um objeto;
- sísmico.

2.4.1. IWSN

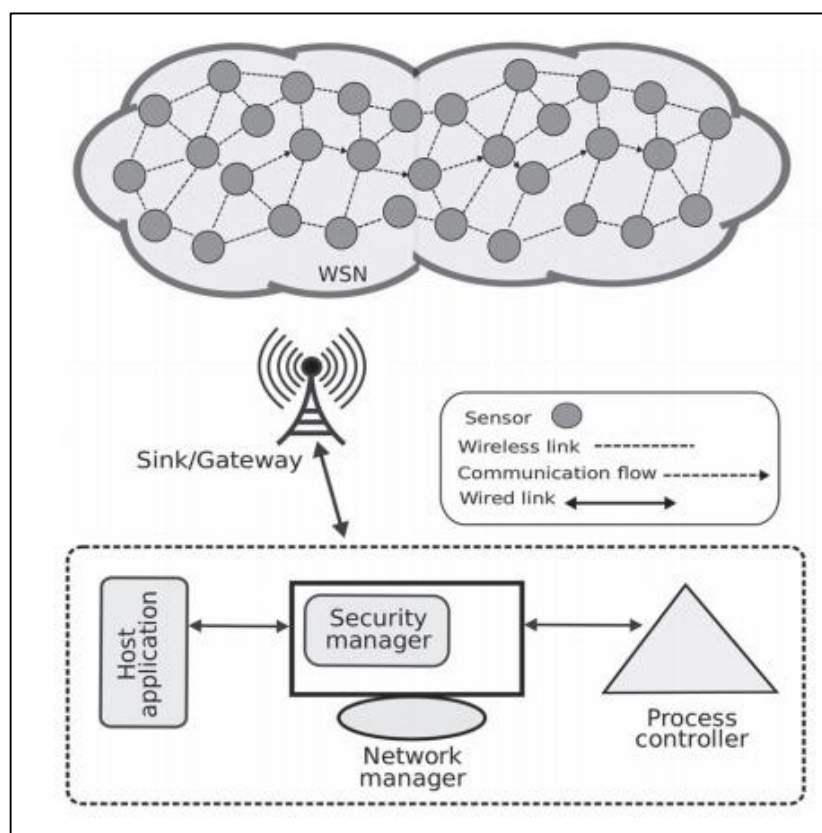
Com a evolução iminente da WSN (Wireless sensor networks) e a Indústria 4.0, proporcionou aplicações benéficas, resultando em desenvolver mais afincos o conceito de uma indústria inteligente. Com seus processos de busca de informações através dos sensores, atuadores e de controle, independentes e autônomos em diversas áreas. Porém, grandes desafios para as indústrias, assim resultando em IWSN (RAZA; FAHEEM; GUENES, 2019)..

Diferente de uma rede convencional, por exemplo de topologia ponto-a-ponto, a rede IWSN tem uma flexibilidade considerável durante a instalação e operação, não existem uma topologia definida, de acordo com a indústria, assim tornando-as mais interessantes. Porém, a topologia de malha se destaca, devido a sua confiabilidade ao sistema, que se apresenta baixo custo e menor complexidade em relação, de uma rede com fio.

Atualmente a arquitetura do IWSN se encontra basicamente igual a figura 5, onde se observa que o processo em seu campo, inicia pelos os nodes sensoriais, uma vez que possuem o objetivo de detectar as variáveis designadas durante o processo e transmitir imediatamente para o *gateway*. Porém, sua transmissão

depende de nós intermediários para que as informações alcancem seu destino, através do meio de comunicação *mutihop*. As setas que se encontra na figura 5, demonstra a direção que o fluxo de informações deve prosseguir. Por sua vez, o *gateway* é responsável encaminhar os dados para *controller process*, que tem a função de controlar as variáveis sob determinado valor desejado, no qual é gerenciado pelo bloco *host application* e o *security manager* garante a segurança da rede contra ataques (RAZA; FAHEEM; GUENES, 2019).

Figura 5 – Arquitetura geral do modelo IWSN.



Fonte: RAZA; FAHEEM; GUENES (2019).

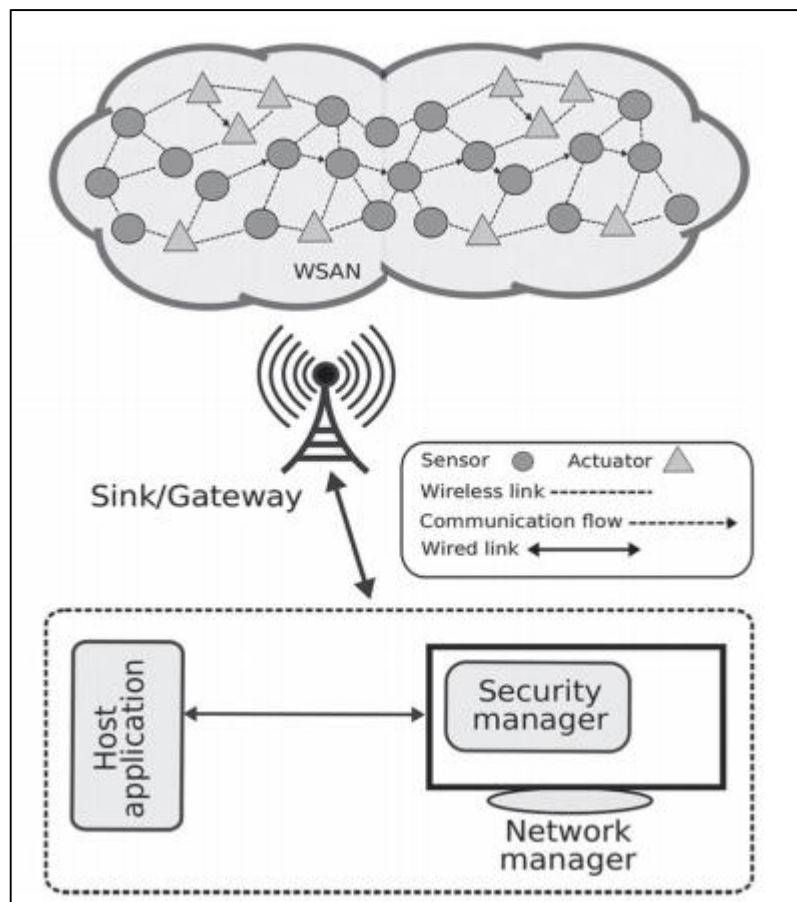
2.4.2. IWSAN

Devido ao crescimento da implementação dos IWSN, deu-se início para novos caminhos, como de integrar os sensores e os controladores de processo, assim resultando em um atuador. Desta forma, o atuador é capaz de realizar as tarefas ou atuar nelas. Mas também com recursos como um sensor na rede, de receber,

transmitir, processar e retransmitir os dados. Basicamente, os atuadores são parecidos com os transdutores, que tem a função de transformar um sinal elétrico em uma ação física.

Como pode se perceber a importância para as indústrias, essa relação de sensores e atuadores, demonstra diversos benefícios. Figura 6, apresenta essa nova classe gerada por esta combinação.

Figura 6 - Arquitetura geral do modelo IWSAN.



Fonte: RAZA; FAHEEM; GUENES (2019).

No campo desse modelo, pode se visualizar que não existe controlador de processo, pois se encontra vinculado aos atuadores, mas ainda são gerenciados pelo *host application*. Porém, os sensores passam diretamente as informações coletadas para os atuadores e não mais para coletor, mas o coletor é importante para monitorar a rede geral. Além que os atuadores podem transmitir estas informações para si mesmo, através de via salto único ou transmissões *multihop* (RAZA; FAHEEM; GUENES, 2019).

2.4.2.1. Características do WSN

As características de *Wireless Sensor and Actuator Networks* (WSAN) possuem extrema importância, mas a atividade de realizar a tarefa é mais complicada do que apenas detectar. Como pode se ver a seguir, suas características principais, motivos pelo qual este meio tem crescido.

Garantia em tempo real – há restrições para que o tempo estabelecido seja limitado, para não acontecer um atraso de informações. No entanto, caso aconteça, conseqüentemente torna menos eficazes, mas em uma indústria, pode ser um enorme prejuízo. Este atraso, significaria o tempo que o atuador, possa ser acionado para agir no momento (RAZA; FAHEEM; GUENES, 2019).

Coordenação Confiável – como havia mencionado no tópico anterior, os sensores não se comunicam apenas entre si, também com os atuadores e de atuadores para atuadores. Mas não é apenas exatamente isto, existe uma coordenação entre eles, que pode ser simplificada com uma seleção de qual atuador da rede, estaria apto para realizar tal tarefa considerando suas condições, como energia, localização, distância, etc. Entretanto, essas coordenações existem, pois são de extrema importância para rede, para manter a confiabilidade, auto-organização e QoS (RAZA; FAHEEM; GUENES, 2019).

Diferenciação de tráfego – devidos os recursos utilizados nessa implementação demonstrarem um modelo heterogêneo e possuírem uma grande área para ser explorada. Os recursos para os atuadores, são bem relevantes, enquanto nos sensores, são restritos. Porém a eficiência energética do ponto de vista dos sensores, deve ser abordada minuciosamente, não haveria algum problema, caso o sensor apenas detecta-se as variáveis. No entanto, enviar mensagens para acionar os atuadores, que são de extrema importância. Além disso, mensagens são muitas sensíveis ao atraso, esta prioridade é que difere entre ambos (RAZA; FAHEEM; GUENES, 2019).

De qualquer forma, deve ser explorado com mais afinco, pois são de extrema importância para as indústrias, fornece soluções para melhor implementação de acordo com a planta. Na figura 7, é demonstrado as comparações das principais diferenças entre WSN e WSAN.

Figura 7 - Principais diferenças entre WSN e WSNAN.

WSN	WSAN
Resource constrained nodes	Resource resource rich nodes like actuators
Short distance communication	Long distance communication due to actuators
Flexible in terms of real time requirements	Strict real time requirements
Not complex coordination	Complex coordination among sensors & actuators
Homogeneous environment	Heterogeneous environment

Fonte: RAZA; FAHEEM; GUENES (2019).

2.5. Transferência de energia sem fio

A transferência de energia sem fios é uma realidade presente na tecnologia atualmente, apesar de ser uma tecnologia que havia sido protagonizada por Nikola Tesla em 1887, com experiências que se denominou por indução magnética. Logo em 1893, na exposição “World’s Columbian Exposition”, em Chicago realizou-se um dos maiores avanços na área, onde obteve-se sucesso em efetuar de ligar ou desligar, diversas lâmpadas à distância, através da indução magnética (AGUIAR, 2013). Um de seus maiores experimentos, denomina-se como a Torre de Wardenclyffe, pois seu sonho era em distribuir energia elétrica gratuitamente recorrente da condução pela atmosfera, mas sua torre foi destruída durante a Primeira Guerra Mundial (DE CASTRO, 2021).

Entretanto, os primeiros passos fundamentais para elaboração da transferência de energia sem fio, ocorre ao ano de 1826, quando André Marie-Ampère demonstrou o surgimento de um campo magnético ao torno de um condutor quando uma corrente elétrica passando através dele. Logo após, no ano de 1861, James C. Maxwell previu a existência de ondas eletromagnéticas e descreveu-as matematicamente, resultando nas equações de Maxwell (BAIKOVA, 2018).

Nikolas Tesla, considerado como o pioneiro, avançou com mais afinco nos estudos desenvolvidos na área de transmissão de energia por meio de ondas de rádio, visando no processo de transmissão de energia entre dois pontos, mas sem utilizar cabos (BAIKOVA, 2018).

A Primeira e a Segunda Guerra Mundial, tiveram uma grande influência na área tecnologia, obtendo desenvolvimento e aperfeiçoamento notáveis, como ocorreu no mundo da rádio frequência (RF). O radar, motivou o surgimento de aplicações para funcionar com frequências e potências superiores, resultando um aumento relativo no

rendimento do processo de transmissão sem fio, utilizando micro-ondas, denominada como Microwave Power Transfer (MPT) (BAIKOVA, 2018).

Na década de 1960, William C. Brown, Engenheiro Eletricista que residia nos Estados Unidos, foi responsável pelo primeiro experimento com WPT via micro-ondas através de uma rectena, sistema composto por uma antena e um retificador, com objetivo de captar energia RF e transforma-la em DC. Utilizando essa aplicação em um pequeno helicóptero, fez com que ele fosse capaz de voar mais de 12 metros de altura em relação ao solo (FERREIRA, 2021) (BAIKOVA, 2018).

O primeiro sistema de identificação por radiofrequência (RFID, Radio Frequency Identification) passivo, foi demonstrado em 1973 no Los-Alamos National Lab motivando etiquetas RFID por indução, que consiste em uma tecnologia que possui as funções de identificar automaticamente por sinais de rádio, ler e armazenar informações remotamente (AGUIAR, 2013) (FERREIRA, 2021).

Um grupo de pesquisadores, em 2007, denominado como Witricity liderado pelo Massachusetts Institute of Technology (MIT), pesquisou sobre a viabilidade de um sistema de transferência de energia sem fio, com intuito de operar em ressonância e com acoplamento indutivo. O objetivo deste experimento era aplicar o conceito WPT em alimentar lâmpadas de 60 W, utilizando a ressonância magnética através de bobinas de acoplamento. Conseguiu obter ótimos resultados, como demonstrado na Figura 7, com a eficiência de transmissão de energia em 40%, a distância entre o transmissor e o receptor, sendo no caso de 2 metros, a frequência da ressonância estava em torno de 10 MHz (FERREIRA, 2021) (ABREU, 2017).

Figura 8 - Experimento do grupo Witricity em 2007.



Fonte: FERREIRA (2021).

No início do século XXI, houve um aumento gigantesco ao número de dispositivos portáteis, desenvolvimento dos veículos elétricos, equipamentos tanto na saúde como industrial. Conseqüentemente atraindo pesquisas, resultando em uma nova percepção do conceito WPT. No entanto, experimentos históricos relatados foram fundamentais ao desenvolver as técnicas atuais, mas esta percepção do século XXI, proporcionou contribuir no avanço e descobertas eficientes sobre as técnicas existentes, assim a tecnologia WPT se tornou efetivamente aplicável e benéfica à sociedade, conseqüentemente as necessidades tecnológicas inerentes ao mundo moderno motivou para tal acontecimento. Entretanto, outro motivo que é o desenvolvimento de técnicas de implementação mais eficazes de modelos WPT para aplicação de dispositivos compactos, principalmente nas áreas industriais (SOUZA, 2016) (FERREIRA, 2021).

Evolução do WPT:

Figura 9 - Breve evolução do conceito WPT.

1826	• André Marie-Ampère demonstrou a relação entre campo magnético e campo elétrico
1864	• Maxwell descreveu as ondas eletromagnéticas matematicamente
1888	• Heinrich Hertz demonstra a propagação das ondas eletromagnéticas em espaço livre
1893	• Tesla apresentou em Chicago as primeiras lâmpadas alimentadas por WPT
1894	• M.Huntin e M.Le-Blanc efetuaram uma experiência para carregamento de um carro elétrico
1901	• Nicola Tesla dá início ao projeto "Wardenclyffe Tower"
1917	• Torre de Tesla foi demolida
1963	• Brown desenvolveu uma rectena
1964	• William C.Brown desenvolveu um helicóptero alimentado por WPT
1968	• William C.Brown desenvolveu o "beam positioned helicopter"
1968	• Peter Glaser propôs o conceito SPS
1972	• Professor Universitário Don Otto propôs um protótipo para carregamento de um carro elétrico
1975	• Brown e Dickinson demonstram o primeiro sistema MPT apresentado na época
1983	• Cientistas Japoneses realizam o primeiro projeto WPT realizado no espaço intitulada MINIX
1987	• Cientistas canadenses demonstram o primeiro protótipo avião WPT (SHARP)
1990	• Protótipo de um autocarro alimentado por WPT é apresentado na Califórnia
1992	• Cientistas Japoneses realizam a experiência com phased arrays, intitulada MILAX
1993	• Cientistas Japoneses conduzem a experiência designada ISY-METS
2007	• Experiência do MIT demonstra a alimentação de uma lâmpada de 60 W a 2 m de distância
2008	• Formou-se o Consórcio WPT (WPC)
2008	• Realizou-se com sucesso a transmissão de energia sem fios entre duas ilhas do Hawaii
2010	• Estabeleceu-se a primeira norma de carregamento intitulada "Qi"
2010	• O Japão anunciou a primeira televisão HD WPT
2015	• Japão fornece com 1.8 kW de potência a um recetor localizado a 55 metros

Fonte: BAIKOVA (2018).

2.5.1. Princípios de Funcionamento da Transmissão de Energia Sem Fios

Maxwell estudou cada experiência efetuadas pelos seus antecessores, respeitando cada detalhe e identificando as similaridades dos fenômenos incluídos. Ele utilizou os conceitos como potencial, vetor, gradiente, circuitação, divergente, rotacional, são desenvolvidos em seus trabalhos. No próximo tópico, serão descritas brevemente as 4 equações fundamentais, que são os pilares do princípio dos modelos da transmissão de energia sem fios (BAIKOVA, 2018) (CARDOSO, 2011).

2.5.1.1. 1ª Equação de Maxwell

O próprio Maxwell possuía admiração pelo trabalho de Michael Faraday tendo assistido diversas apresentações, inclusive seu trabalho sobre a indução magnética se tornou crucial para o início das equações (CARDOSO, 2011). Um campo magnético (B) no tempo provoca o surgimento de um campo elétrico (E) igualmente variável no tempo. O campo elétrico gerado é proporcional à variação do fluxo magnético (BAIKOVA, 2018). A seguir dois modelos das equações, são apresentados como em forma diferencial ou integral. A diferença entre ambas, consiste que a forma diferencial está modelada para uma relação entre os campos elétrico e magnético em um certo ponto do espaço. Porém, a forma integral está envolvida em uma área limitada por um contorno fechado, sobre o qual se apoia uma superfície (CARDOSO, 2011).

- Forma Integral:

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (1).$$

- Forma Diferencial:

$$\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{t} = - \int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{S} \quad (2).$$

2.5.1.2. 2ª Equação de Maxwell

A lei de Ampère descreve que as cargas elétricas em movimento geram um campo magnético, pois devido um experimento, Ampère consegue observar que quando uma corrente percorre por um fio condutor, surge em torno um campo magnético (BAIKOVA, 2018). Maxwell percebeu que as propriedades da corrente elétrica de condução poderiam ser aplicadas à corrente elétrica de deslocamento, demonstrando interesse em reescrever a lei circuital de Ampère, pois possuía de extrema importância (CARDOSO, 2011).

- Forma Integral:

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (3).$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (4).$$

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu} \quad (5).$$

- Forma Diferencial:

$$\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{t} = \int_S (\vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}) \cdot d\vec{S} \quad (6).$$

2.5.1.3. 3ª Equação de Maxwell

Nesta equação, consiste na lei de Gauss sobre a eletrostática, relaciona o comportamento do campo (E) com as cargas elétricas (q). Porém, se existir as cargas elétricas, no caso o divergente da densidade de carga elétrica resultará um valor que não seja zero (BAIKOVA, 2018).

- Forma Integral:

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (7).$$

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (8).$$

- Forma Diferencial:

$$\oint_S \vec{D} \cdot d\vec{S} = \int_V \rho \cdot dV \quad (9).$$

2.5.1.4. 4ª Equação de Maxwell

Segundo Cardoso (2011), descreve que tal equação traduz o comportamento das linhas de campo magnético, retiradas de análises dos experimentos realizados, no qual houve a verificação de que suas linhas são fechadas. Afirma-se que os campos de força com tais características não constituem fontes pontuais, assim conclui-se que não há carga magnéticas isoladas, resultando que o divergente do campo magnético é sempre nulo.

- Forma Integral:

$$\nabla \times \vec{B} = 0 \quad (10).$$

- Forma Diferencial:

$$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0 \quad (11).$$

2.5.2. As Regiões do Campo

O campo eletromagnético possui três diferentes regiões, sendo elas como, campo distante e campos próximo reativo e radiante. A figura 10, representa fundamentalmente a antena no centro de dois círculos com raios diferentes, onde r_1 seria para o campo próximo reativo e r_2 para campo radiante. Desta forma, pode-se perceber que se o raio for superior a r_2 , então seria campo distante. No caso, o λ é o

comprimento da onda de operação e D representa a maior dimensão da antena (FERREIRA, 2021) (BAIKOVA, 2018).

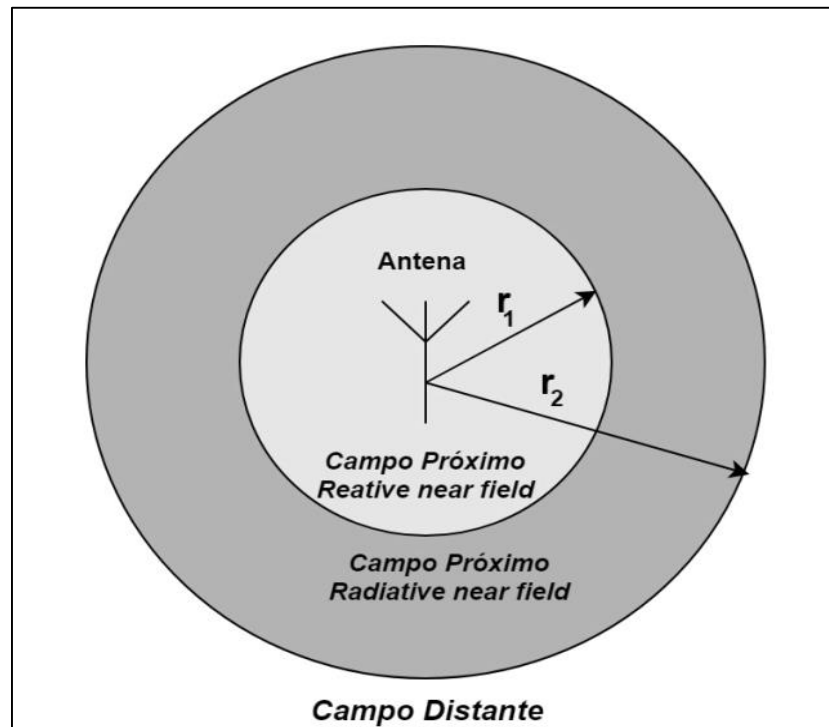
$$r_2 < \frac{2D^2}{\lambda} \quad (12).$$

A região de campo próximo reativo, simplesmente demonstrada como a região mais próxima da antena, local onde pode ser armazenar uma quantidade relativa de energia por ser associada aos campos reativos ou como zona indutiva. Assim, sendo que existe uma relação entre a intensidade do campo elétrico e magnético com dificuldades de prever ou medir. Possuindo um desfasamento de 90° entre si e a grande parte de energia (FERREIRA, 2021) (BAIKOVA, 2018).

A região de campo próximo radiante ou região de Fresnel, localizada no intervalo das regiões de campo próximo reativo e campo distante, predominante a energia estabelecida nesta área, resulta de uma combinação de ambas características dos componentes elétricos e magnéticos (FERREIRA, 2021) (ABREU, 2017) (BAIKOVA, 2018).

A região do campo distante ou região de Fraunhofer, define-se onde os campos elétricos e magnéticos são ortogonais ou perpendiculares entre si e possuem características de direção de propagação igual à de uma onda plana (FERREIRA, 2021). Segundo o Daniel Almeida (2018), a “sua intensidade demonstrada no campo é inversamente proporcional à distância da antes de transmissão, ou seja, a potência radiada diminui com o quadrado da distância e não existe retorno da energia radiada pela antena transmissora.

Figura 10 - Modelo representativo sobre as regiões do campo.



Fonte: BAIKOVA (2018).

2.5.3. Acoplamento indutivo ressonante

O acoplamento indutivo ressonante é uma técnica avançada de transferência de energia sem fio que tem ganhado destaque nos últimos anos. Essa tecnologia permite a transmissão eficiente de energia entre dois dispositivos acoplados magneticamente, sem a necessidade de fios ou contatos físicos. É baseada na ressonância magnética, que ocorre quando a frequência de operação do sistema é ajustada para coincidir com a frequência natural do circuito (MOTTA, 2016).

O princípio básico do acoplamento indutivo ressonante envolve o uso de bobinas de transmissão (transmissor) e recepção (receptor) ressonantes. Essas bobinas são projetadas para terem a mesma frequência de ressonância e são posicionadas próximas uma da outra. Quando uma corrente alternada é aplicada à bobina de transmissão, ela cria um campo magnético oscilante ao seu redor. Esse campo magnético varia de intensidade de acordo com a frequência de operação (MOTTA, 2016).

A bobina de recepção, sintonizada na mesma frequência, capta parte desse campo magnético e converte-o em uma tensão elétrica. A quantidade de energia

transferida depende do acoplamento entre as bobinas e da distância entre elas. Idealmente, quando o acoplamento é máximo e as bobinas estão próximas, a transferência de energia é mais eficiente.

Uma das principais vantagens do acoplamento indutivo ressonante é a capacidade de transferir energia a distâncias relativamente longas, geralmente na faixa de centímetros a alguns metros. Isso permite a aplicação em sistemas de carregamento sem fio, como carregadores de smartphones, dispositivos médicos implantáveis e veículos elétricos. Além disso, o acoplamento indutivo ressonante é altamente eficiente em termos de transferência de energia, reduzindo perdas e desperdícios de energia (MOTTA, 2016).

No entanto, existem alguns desafios associados ao acoplamento indutivo ressonante. Um deles é o controle da distância entre as bobinas para garantir o acoplamento adequado. Pequenas variações na distância podem afetar significativamente a eficiência da transferência de energia. Além disso, a interferência eletromagnética de outros dispositivos próximos pode prejudicar o desempenho do sistema.

Para superar esses desafios, técnicas avançadas de controle, como circuitos de ajuste automático de frequência e controle de fase, são utilizadas para otimizar a transferência de energia. Além disso, a pesquisa continua a explorar novos materiais e geometrias de bobinas para melhorar o desempenho e a eficiência do acoplamento indutivo ressonante (MOTTA, 2016).

Em resumo, o acoplamento indutivo ressonante é uma tecnologia promissora para transferência de energia sem fio. Sua capacidade de transferir energia de forma eficiente a curtas distâncias tem implicações significativas em várias áreas, desde eletrônicos de consumo até aplicações médicas e de transporte. Com pesquisas contínuas e avanços tecnológicos, espera-se que o acoplamento indutivo ressonante desempenhe um papel cada vez mais importante no futuro da transmissão de energia sem fio.

2.5.4. Relação das bobinas ao WPT

As bobinas desempenham um papel fundamental na transmissão de energia sem fio, especialmente no contexto do acoplamento indutivo ressonante.

Esses dispositivos são responsáveis por criar campos magnéticos oscilantes que permitem a transferência eficiente de energia entre um transmissor e um receptor, sem a necessidade de fios ou contato físico (MOTTA, 2016).

As bobinas de transmissão e recepção são projetadas para serem ressonantes na mesma frequência, o que garante a máxima eficiência na transferência de energia. A ressonância ocorre quando a frequência natural da bobina coincide com a frequência de operação do sistema. Isso é alcançado por meio de um projeto cuidadoso da geometria da bobina, como o número de espiras, o diâmetro e a espessura do fio utilizado (MOTTA, 2016).

A geometria da bobina desempenha um papel crucial na determinação do campo magnético gerado. As bobinas normalmente são construídas em forma de espiral ou solenoide, permitindo a criação de um campo magnético uniforme e direcionado. Além disso, a escolha dos materiais utilizados na construção da bobina também é importante, pois influencia a resistência elétrica e a permeabilidade magnética do sistema (MOTTA, 2016).

A distância entre as bobinas também é um fator crítico a ser considerado. Idealmente, as bobinas devem estar posicionadas próximas uma da outra para garantir um acoplamento magnético máximo. Pequenas variações na distância podem afetar significativamente a eficiência da transferência de energia, portanto, o controle preciso dessa distância é essencial.

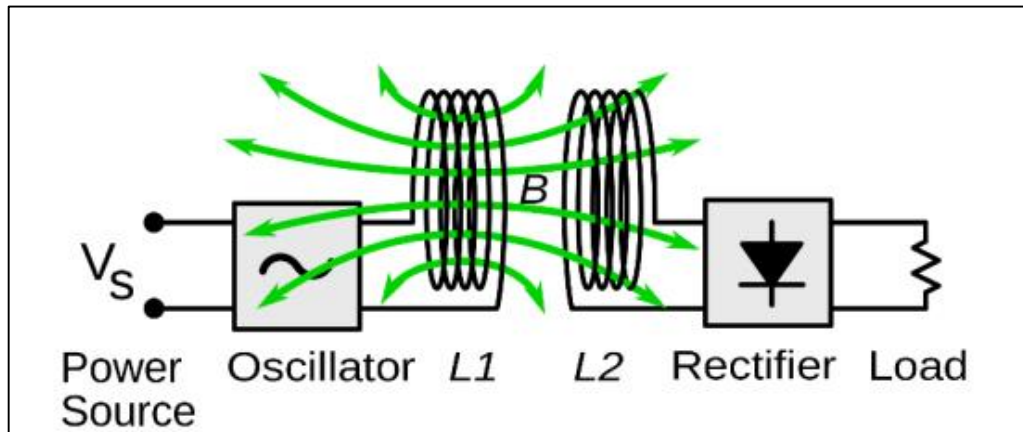
Além disso, é importante considerar o projeto das bobinas levando em conta a potência a ser transferida. Bobinas de transmissão com maior número de espiras e maior área efetiva tendem a permitir a transmissão de maior quantidade de energia. No entanto, isso também pode resultar em uma maior resistência elétrica e perdas de energia. Portanto, um equilíbrio entre eficiência e capacidade de transmissão deve ser alcançado no projeto das bobinas.

Vale ressaltar que a eficiência da transferência de energia também pode ser afetada por fatores externos, como interferência eletromagnética e objetos metálicos próximos. Portanto, a localização e o ambiente em que as bobinas são instaladas devem ser cuidadosamente considerados.

No geral, as bobinas para transmissão de energia sem fio são componentes essenciais e desafiadores no desenvolvimento de sistemas de carregamento sem fio e outras aplicações de transferência de energia. Através de um projeto adequado, considerando geometria, materiais e distância entre as bobinas, é possível alcançar

altos níveis de eficiência na transmissão de energia sem fio, abrindo caminho para o avanço e a adoção dessas tecnologias em diversos setores.

Figura 11 - Transferência de energia sem fio por acoplamento indutivo.



Fonte: MOTTA (2016).

3. METODOLOGIA

Inicialmente, foram estabelecidos os objetivos gerais e específicos do projeto. O objetivo geral consistiu em analisar o comportamento de um sistema de transmissão de energia sem fio (WPT) através da variação de parâmetros como o coeficiente de acoplamento, o número de enrolamentos, o raio das bobinas e a distância entre elas. Os objetivos específicos foram formulados com base na revisão bibliográfica e na identificação das necessidades na área de estudo.

Foi realizada uma revisão bibliográfica abrangente sobre transmissão de energia sem fio, princípios do acoplamento magnético e conceitos relacionados. Essa revisão permitiu obter um embasamento teórico sólido para compreender o funcionamento do sistema e os parâmetros que seriam analisados. Foram consultados livros, artigos científicos e fontes confiáveis para obter informações atualizadas e relevantes sobre o tema.

Com base nos objetivos estabelecidos e no conhecimento adquirido na revisão bibliográfica, foi desenvolvido um código no MATLAB para gerar o arquivo "Proposto.cir". O código foi elaborado de forma a permitir a inserção dos parâmetros de interesse, número de enrolamentos, raio das bobinas e distância entre elas. Esse

código foi fundamental para a automatização do processo de geração do arquivo de simulação para o LTspice.

O arquivo "Proposto.cir" gerado pelo MATLAB foi importado para o LTspice, um software de simulação de circuitos elétricos. No LTSpice, foram realizadas as configurações necessárias para a simulação, como a definição dos modelos de componentes, a especificação dos parâmetros de simulação e a configuração dos gráficos de saída desejados.

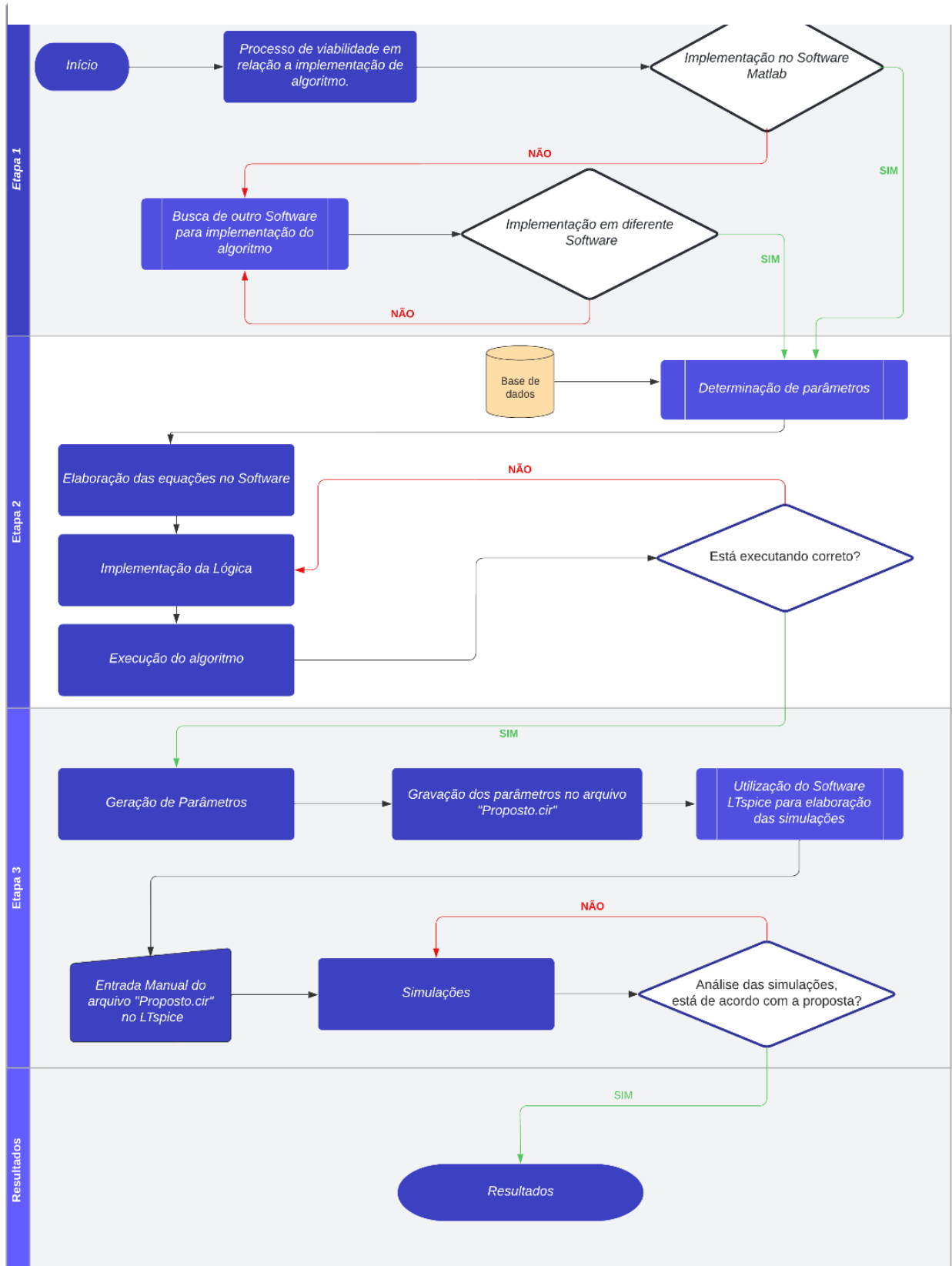
Neste arquivo se encontra resultados de parâmetros fundamentais para as simulações desejadas no LTspice, como indutância própria, indutância mútua, coeficiente de acoplamento, resistores, capacitores, em seus respectivos nós de cada circuito. As simulações foram executadas considerando diferentes combinações desses parâmetros, gerando resultados específicos para cada configuração.

Os resultados das simulações foram analisados de forma minuciosa, levando em consideração os objetivos do projeto. Foram observadas as relações entre os parâmetros variados e as respostas do sistema de transmissão de energia sem fio. A interpretação dos resultados permitiu compreender como cada parâmetro influencia no desempenho do sistema, destacando os efeitos nas variáveis de interesse, como a eficiência de transferência de energia e a potência recebida.

Com base na análise dos resultados obtidos e nas discussões realizadas, foram traçadas conclusões relevantes sobre o comportamento do sistema de transmissão de energia sem fio em relação aos parâmetros variados. Foram destacadas as vantagens e limitações do sistema, bem como possíveis aplicações práticas dos resultados encontrados. A discussão e as conclusões foram fundamentadas nas análises realizadas e nos objetivos estabelecidos no início do projeto.

Em suma, a metodologia empregada neste trabalho consistiu em realizar uma revisão bibliográfica, implementar um código no MATLAB para gerar o arquivo de simulação, executar as simulações no LTspice, analisar e interpretar os resultados, e, por fim, realizar discussões e conclusões embasadas nos resultados obtidos, demonstrado no fluxograma (Figura 12). Essa abordagem permitiu uma investigação detalhada dos efeitos dos parâmetros do sistema de transmissão de energia sem fio, contribuindo para o avanço do conhecimento na área e fornecendo subsídios para possíveis aplicações práticas.

Figura 12- Fluxograma.



Fonte: Elaboração Própria.

4. APLICAÇÕES PRÁTICAS E CONSIDERAÇÕES

Para buscar os resultados necessários para ter mais clareza e entendimento sobre o conteúdo proposto, trilhando entre a teoria e a prática. Os *softwares* Matlab e LTspice, tornaram-se os pilares para obter tais resultados com diferentes modelos de simulações, entretanto, com o mesmo objetivo. Fundamentalmente para início deste processo, também essencial ter conhecimento no conceito de coeficiente de indutância.

4.1 MATLAB

Nesta etapa, apresenta-se os detalhes para embasamento, criação e lógica para obter o objetivo, um código que forneça os parâmetros necessários para realizações de simulações no LTspice.

4.1.1 Auto-Indutância, Indutância Mútua e Coeficiente de Acoplamento

A indutância própria, representada por L , é uma propriedade de uma bobina que descreve sua capacidade de armazenar energia na forma de um campo magnético quando uma corrente elétrica passa por ela. A indutância própria é calculada utilizando a seguinte fórmula:

$$L = \frac{\mu_0 * N^2 * A}{l} \quad (13).$$

- L : Indutância própria ou auto-indutância.
- μ_0 : Permeabilidade magnética do vácuo (aproximadamente $4\pi \times 10^{-7}$ H/m).
- N : Número de espiras da bobina.
- A : Área da seção transversal da bobina.
- l : Comprimento da bobina.

Essa fórmula relaciona a indutância própria com o número de espiras, a área da seção transversal da bobina e o comprimento da bobina. Ela indica que a indutância própria é diretamente proporcional ao quadrado do número de espiras N^2

e à área da seção transversal A da bobina, e inversamente proporcional ao comprimento da bobina l .

Em termos práticos, a indutância própria determina a taxa de variação do fluxo magnético gerado por uma bobina quando uma corrente elétrica passa por ela. Quanto maior a indutância própria, maior será a energia armazenada no campo magnético da bobina.

No contexto da transferência de energia sem fio, a indutância própria é um parâmetro importante a ser considerado ao projetar as bobinas transmissora e receptora. Valores adequados de indutância própria nas bobinas contribuem para uma transferência de energia eficiente e minimizam as perdas durante o processo.

Portanto, a fórmula da indutância própria, descrita na equação (13), permite calcular o valor da indutância de uma bobina com base em suas características geométricas, fornecendo informações essenciais para o projeto e otimização de sistemas de transferência de energia sem fio.

A indutância mútua, representada por M , é uma medida da interação magnética entre duas bobinas em um sistema de transferência de energia sem fio. Ela descreve o quanto o fluxo magnético gerado por uma bobina que influencia a outra bobina. De acordo com estudo nas referências, obteve-se tal fórmula da indutância mútua (MOTTA, 2016) (ARIFFIN; INAMORI, 2018) (ZOU; HE, 2020) (IRWANTO; NUGRAHA; HUSSIN; NISZA; PERANGIN-ANGIN; ALAM, 2022).

$$M = \frac{\pi * \mu_0 * N_1 * N_2 * R_s^2 * R_r^2}{2 * \sqrt[3]{R_s^2 + D_{rs}^2}} \quad (14).$$

- M : Indutância mútua.
- μ_0 : Permeabilidade magnética do vácuo (aproximadamente $4\pi \times 10^{-7}$ H/m).
- N_1 e N_2 : São o número de espiras das bobinas transmissora e receptora, respectivamente.
- R_s e R_r : São os raios das bobinas transmissora e receptora, respectivamente.
- D_{rs} : É a distância entre as bobinas transmissora e receptora

O resultado da indutância mútua indica a quantidade de fluxo magnético que é compartilhada entre as bobinas. Quanto maior o valor da indutância mútua,

maior será a influência mútua entre as bobinas e maior será a transferência de energia entre elas.

A fórmula utiliza esses parâmetros para calcular a indutância mútua entre as bobinas. O denominador da fórmula, $2 \cdot (\sqrt{R_s^2 + D_{r_s}^2})^3$, representa o cálculo da distância efetiva entre as bobinas, levando em consideração a geometria do sistema.

Essa fórmula é essencial para determinar a indutância mútua e, conseqüentemente, o grau de acoplamento magnético entre as bobinas. Um valor maior de indutância mútua resulta em um acoplamento mais forte e, portanto, uma transferência de energia mais eficiente.

Lembrando que a fórmula assume que as bobinas têm formato circular e são perfeitamente alinhadas. Em sistemas reais, outros fatores, como a geometria das bobinas, a distribuição do campo magnético e perdas do sistema, podem afetar a eficiência da transferência de energia.

O coeficiente de acoplamento, representado por k , é uma medida da eficiência do acoplamento magnético entre duas bobinas. Ele indica a proporção do fluxo magnético gerado por uma bobina que é efetivamente compartilhado com a outra bobina (MOTTA, 2016) (ARIFFIN; INAMORI, 2018) (ZOU; HE, 2020) (IRWANTO; NUGRAHA; HUSSIN; NISZA; PERANGIN-ANGIN; ALAM, 2022). O coeficiente de acoplamento é calculado pela fórmula:

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 \cdot L_2}} \quad (15).$$

- k : Coeficiente de acoplamento.
- M : Indutância mútua.
- L_1 : Indutância própria da primeira bobina.
- L_2 : Indutância própria da segunda bobina.

Essa fórmula mostra que o coeficiente de acoplamento é obtido dividindo a indutância mútua (M) pela raiz quadrada do produto das indutâncias próprias (L_1 e L_2) das bobinas.

O coeficiente de acoplamento varia de 0 a 1, sendo 1 indicativo de um acoplamento perfeito e eficiente, e 0 indicativo de um acoplamento nulo. Quando o coeficiente de acoplamento é igual a 1, todo o fluxo magnético gerado por uma bobina

é completamente compartilhado com a outra bobina, resultando em uma transferência de energia ideal.

Por outro lado, quando o coeficiente de acoplamento é menor que 1, parte do fluxo magnético gerado por uma bobina não é capturado pela outra bobina, o que leva a perdas de energia durante a transferência.

O coeficiente de acoplamento é um parâmetro importante na transferência de energia sem fio, pois influencia diretamente na eficiência do sistema. Um coeficiente de acoplamento maior resulta em um acoplamento mais forte entre as bobinas e, conseqüentemente, em uma transferência de energia mais eficiente.

Essas fórmulas fornecem uma base teórica para compreender e analisar o comportamento das bobinas em um sistema de transferência de energia sem fio. Através do cálculo da indutância própria, indutância mútua e coeficiente de acoplamento, é possível projetar e otimizar o sistema para alcançar uma transferência de energia eficiente e minimizar as perdas.

4.1.2 Implementação do código

O objetivo é calcular o coeficiente de indutância mútua (M) e o coeficiente de acoplamento (k) em um sistema de transferência de energia sem fio. Esses coeficientes são importantes para determinar o grau de acoplamento magnético entre as bobinas do sistema, o que influencia diretamente na eficiência da transferência de energia.

A lógica do código é baseada na utilização de loops e cálculos matemáticos para percorrer diferentes valores de parâmetros e realizar os cálculos necessários. Os loops são utilizados para variar o número de espiras das bobinas, os raios de cada bobina e a distância entre as bobinas, permitindo assim uma análise abrangente das diferentes configurações do sistema.

Dentro dos loops, são realizados os cálculos das indutâncias individuais das bobinas (L_1 e L_2) e do coeficiente de indutância mútua (M), utilizando fórmulas matemáticas, apresentadas anteriormente. Esses cálculos são baseados nas características geométricas das bobinas, como o comprimento, a área da espira e o número de espiras. Explicitando que a indutância L_1 (transmissora) se mantém fixa, variando L_2 (Receptora) de acordo com quantos sensores se encontrar em campo.

Após os cálculos, os valores obtidos são armazenados em um arquivo chamado "Proposto.cir", que é utilizado posteriormente para a simulação do sistema de transferência de energia sem fio no LTspice, demonstrado um exemplo na figura 13. Nesse arquivo, são adicionados os componentes necessários para a simulação, como os indutores, acopladores magnéticos, capacitores para ressonância magnética e resistores tanto para a carga do sensor, como para o terra virtual. Esses componentes são adicionados ao arquivo de acordo com os valores calculados, utilizando comandos específicos para escrita no arquivo.

Figura 13 - Arquivo "Proposto.cir".

```

scs$
Copy code

Vin 1 0 SINE(0 200 5250) AC 1 Rser=0.01
L1 1 0 0.003076739803554403348412327190
L2 2 200 0.000338109859677151363202551870
K1_2 L1 L2 0.004243242432307170464156342859
C2 2 200 0.000003
R2 2 200 1k
R200 200 0 5M
L3 3 300 0.000338109859677151363202551870
K1_3 L1 L3 0.002475156259944104493453398419
C3 3 300 0.000003
R3 3 300 1k
R300 300 0 5M

```

Fonte: Elaboração própria.

É importante ressaltar que o código fornecido, também tem a função de aplicar cada componente de forma correta no circuito elétrico no LTspice, descrevendo cada nó. Segue como exemplo o código, apresentado na sequência, de uma configuração simulada.

Código Principal em Matlab.

```

close all;
clear all;
clc;

format longEng

Parametros_Entrada;
fid=fopen('Proposto.cir','wt');

format longEng
netlist = sprintf('.subckt indutor 1 %d\n', 0);
    fid = fopen('Proposto.cir', 'r+');
    fseek(fid, 0, 'eof');
    fwrite(fid, netlist);
    fclose(fid);

for N1 = 40 %Nº de Espiras (Variável) - Bloco Transmissora
for N2 = 40 %Nº de Espiras (Variável) - Bloco Receptora

    for Rs = 2.0e-1 % Auto-Indutância Bloco Transmissora

        ls = dw * N1; % Comprimento da Solenóide
        A1 = pi*(Rs^2); % Área da espira
        L1 =(u0*((N1)^2)*A1)/ls; % Auto-Indutância

    for Rr = 2.0e-1 % Auto-Indutância Bloco Receptora

        lr = dw * N2; % Comprimento da Solenóide
        A2 = pi*(Rr^2); % Área da espira
        L =(u0*((N2)^2)*A2)/lr; % Auto-Indutância

        for j= 2:2

            netlist = sprintf('L1 1 0 %.30f \n', L1);
            fid = fopen('Proposto.cir', 'r+');
            fseek(fid, 0, 'eof');
            fwrite(fid, netlist);
            fclose(fid);

        end

    for Dsr = 0.5 % Distância entre Transmissora e Receptora (m)

        M = (pi*u0*N1*N2*Rs^2*Rr^2)/(2*(sqrt(Rs^2+Dsr^2)^3)); % Indutância Mútua
        k = M/(sqrt(L1*L)); % Coeficiente de Acoplamento
        C = 1/(4*(pi^2)*(f^2)*L); % Capacitor

```

```

netlist = sprintf('L%d %d %d %.30f \n', j, j,j*100, L);
fid = fopen('Proposto.cir', 'r+');
fseek(fid, 0, 'eof');
fwrite(fid, netlist);
fclose(fid);

netlist = sprintf('K%d_%d L%d L%d %.30f \n', 1, j, 1, j, k);
fid = fopen('Proposto.cir', 'r+');
fseek(fid, 0, 'eof');
fwrite(fid, netlist);
fclose(fid);

netlist = sprintf('C%d %d %d %.30f \n', j,j,j*100,C);
fid = fopen('Proposto.cir', 'r+');
fseek(fid, 0, 'eof');
fwrite(fid, netlist);
fclose(fid);

netlist = sprintf('R%d %d %d 1k \n', j,j,j*100);
fid = fopen('Proposto.cir', 'r+');
fseek(fid, 0, 'eof');
fwrite(fid, netlist);
fclose(fid);

netlist = sprintf('R%d %d 0 5M \n', j*100,j*100);
fid = fopen('Proposto.cir', 'r+');
fseek(fid, 0, 'eof');
fwrite(fid, netlist);
fclose(fid);

j=j+1;
    end

end
end

end
end

netlist = sprintf('.ends indutor');
    fid = fopen('Proposto.cir', 'r+');
    fseek(fid, 0, 'eof');
    fwrite(fid, netlist);
    fclose(fid);

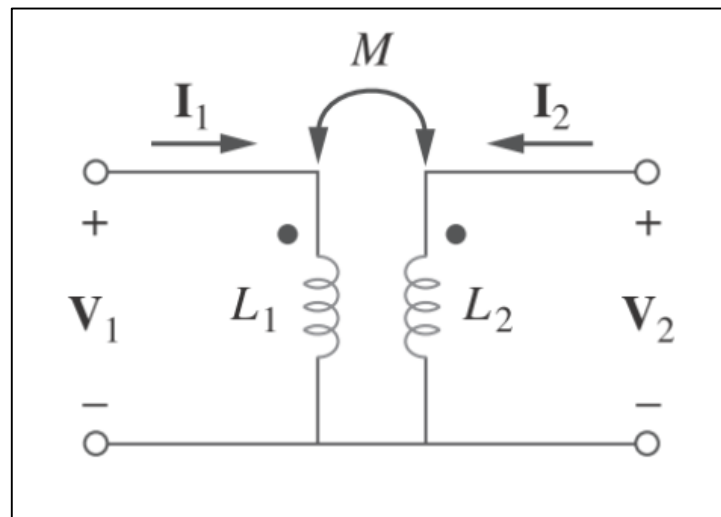
```

Fonte: Elaboração Própria.

4.2 LTspice

É possível simular um circuito de transmissão de energia sem fio ideal, baseado no circuito elétrico equivalente apresentado na figura 14, que descreve as polaridades das tensões indicadas pelos enrolamentos das bobinas primária e secundária (BUENO, 2015) (ABREU, 2017). Com o LTspice, é possível visualizar e analisar as formas de onda de tensão nas bobinas, avaliar o comportamento do sistema e realizar medições de eficiência e desempenho.

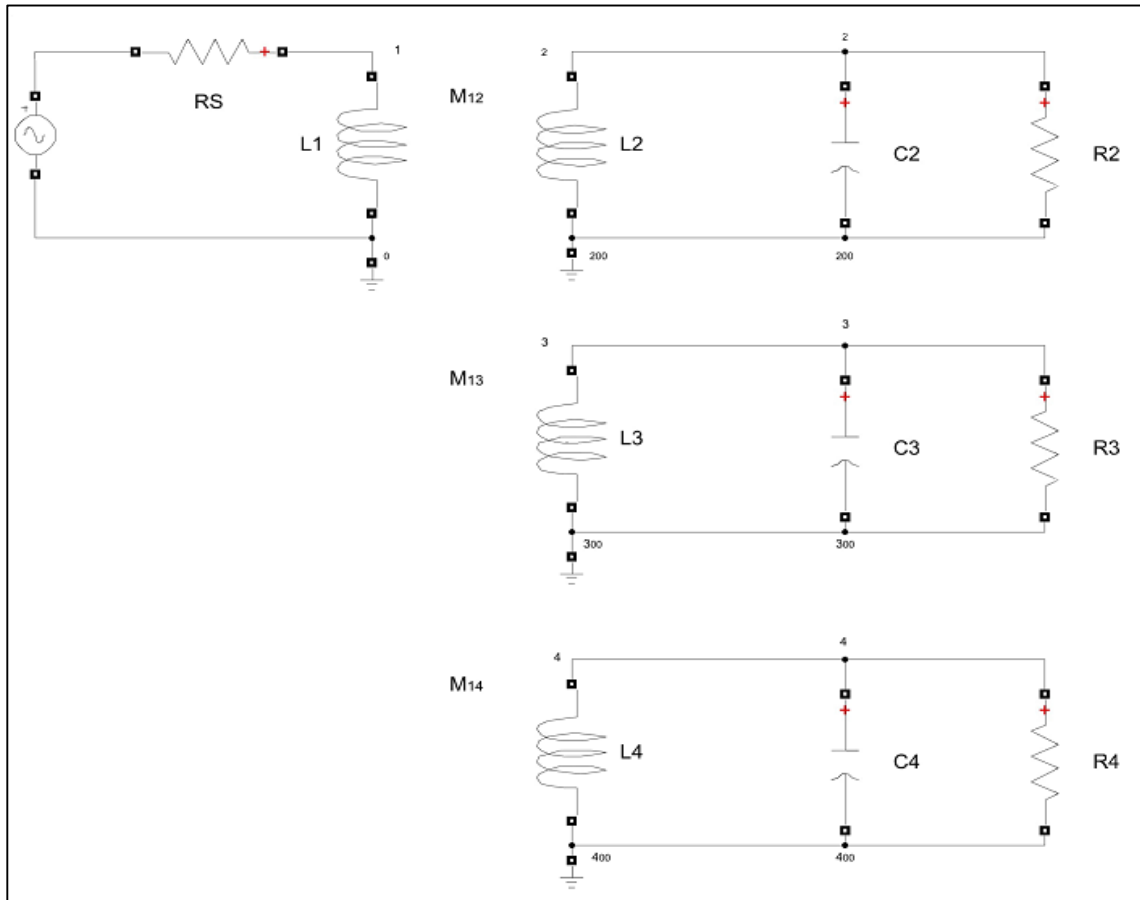
Figura 14 - Circuito elétrico equivalente WPT.



Fonte: BUENO (2015); ABREU (2017).

No contexto do LTspice, foi realizado um projeto de um circuito que envolvia a utilização de um subcircuito denominado "indutor". O objetivo era determinar os parâmetros desse indutor com base em um arquivo gerado pelo Matlab, chamado "Proposto.cir". No entanto, durante a implementação do circuito no LTspice, surgiu um problema relacionado aos nós flutuantes e à falta de referência de terra individual para cada um dos nós. Como na figura 15, descreve-se tal projeto para 3 sensores.

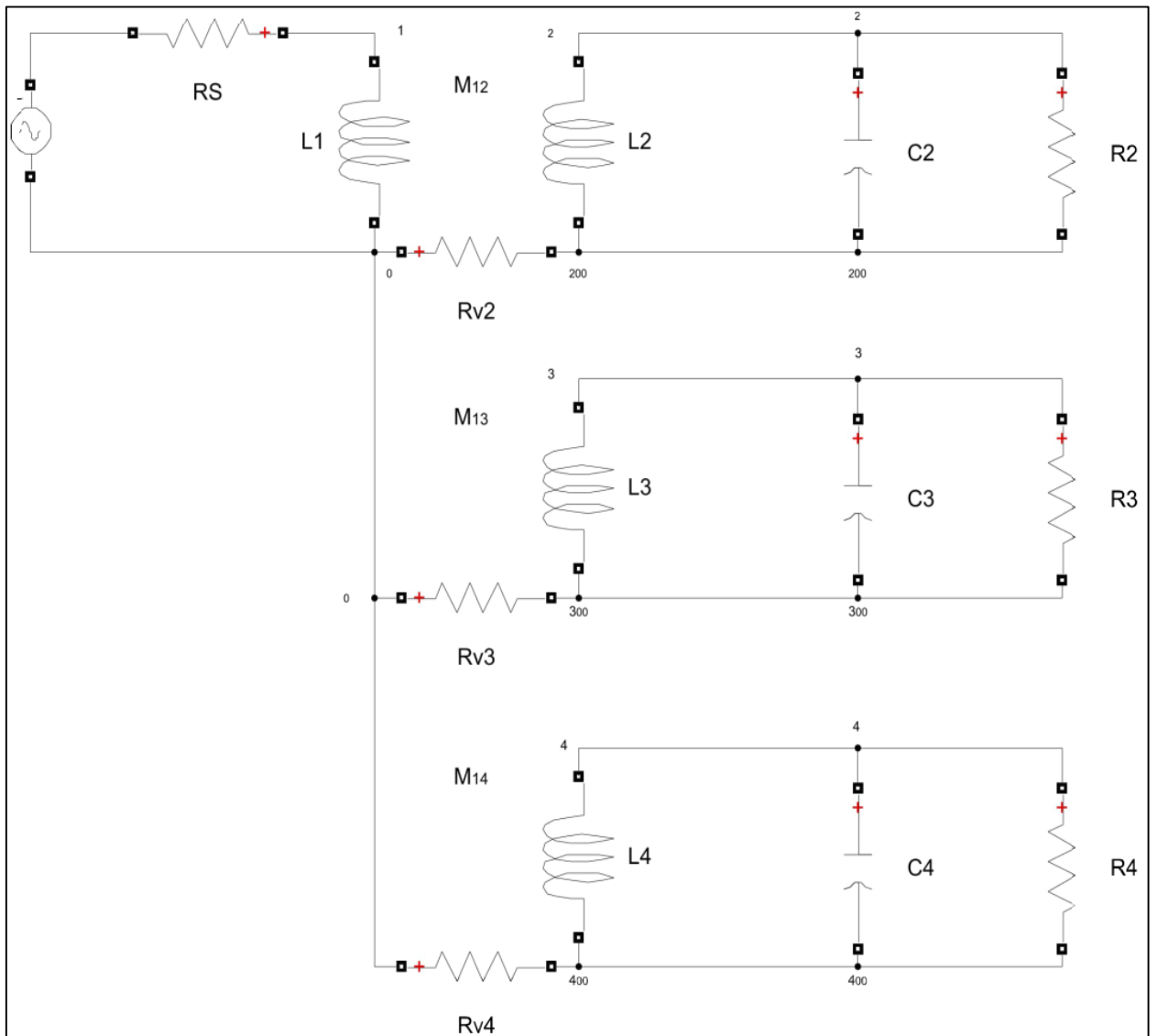
Figura 15 - Circuito elétrico equivalente ao subcircuito ideal.



Fonte: Elaboração Própria.

Para solucionar esse problema, uma abordagem adotada foi adicionar uma resistência muito alta de 5 M ($R_{v2}=R_{v3}=R_{v4}$), de acordo com a figura 16. Essa resistência em alta escala foi inserida para criar uma referência de terra para o circuito, evitando os nós flutuantes. É importante ressaltar que a adição de uma resistência tão alta como terra virtual pode afetar a precisão dos resultados da simulação.

Figura 16 - Circuito elétrico equivalente ao modelado para simulação.



Fonte: Elaboração Própria.

Dessa forma, foi possível definir corretamente os parâmetros determinando diretamente nas diretrizes do software, conseqüentemente obteve-se sucesso nas simulações, representado na figura 17.

Figura 17 – Circuito elétrico no Spice Directive.

```

                                .tran 0 100m 0 0.1

Vin 1 0 SINE(0 200 5250) AC 1 Rser=0.01
L1 1 0 0.003076739803554403348412327190
L2 2 200 0.003076739803554403348412327190
K1_2 L1 L2 0.010516759428344480201134025776
C2 2 200 0.000000298697017699361355540911
R2 2 200 1k
R200 200 0 5M
L3 3 300 0.003076739803554403348412327190
K1_3 L1 L3 0.006492156036325683575449740914
C3 3 300 0.000000298697017699361355540911
R3 3 300 1k
R300 300 0 5M
L4 4 400 0.003076739803554403348412327190
K1_4 L1 L4 0.004256622457157113216530408550
C4 4 400 0.000000298697017699361355540911
R4 4 400 1k
R400 400 0 5M

```

Fonte: Elaboração Própria.

O trecho de código apresentado é chamado de netlist e representa um circuito elétrico que será simulado no LTspice. Cada linha do código define um componente e suas conexões no circuito. Vamos analisar linha por linha para entender melhor:

A. Vin 1 0 SINE(0 200 5250) AC 1 Rser=0.01:

- Essa linha define uma fonte de tensão alternada chamada Vin.
- O valor 1 indica que o terminal positivo da fonte está conectado ao nó 1, e o valor 0 indica que o terminal negativo (terra) está conectado ao nó 0.
- A função SINE(0 200 5250) define um sinal senoidal com amplitude de 200V e frequência de 5250Hz.
- AC 1 Rser=0.01 especifica que a análise será em regime AC, com amplitude de 1V e uma resistência em série de 0.01Ω.

B. L1 1 0 0.003076739803554403348412327190:

- Essa linha define um indutor chamado L1.
- O valor 1 indica que uma extremidade do indutor está conectada ao nó 1, enquanto o valor 0 indica que a outra extremidade está conectada ao nó 0.

- O valor 0.003076739803554403348412327190 especifica a indutância do indutor, que é de aproximadamente 3.076739803554403348412327190 mH.
 - L2 2 200 0.003076739803554403348412327190:
 - Essa linha define outro indutor chamado L2.
 - O valor 2 indica que uma extremidade do indutor está conectada ao nó 2, enquanto o valor 200 indica que a outra extremidade está conectada ao nó 200.
 - O valor 0.003076739803554403348412327190 especifica a indutância do indutor, que também é de aproximadamente 3.076739803554403348412327190 mH.
- C. K1_2 L1 L2 0.010516759428344480201134025776:
- Essa linha define um coeficiente de acoplamento chamado K1_2 entre os indutores L1 e L2.
 - Os valores L1 e L2 indicam os indutores que estão acoplados.
 - O valor 0.010516759428344480201134025776 especifica o valor do coeficiente de acoplamento.
- D. C2 2 200 0.000000298697017699361355540911:
- Essa linha define um capacitor chamado C2.
 - O valor 2 indica que uma extremidade do capacitor está conectada ao nó 2, enquanto o valor 200 indica que a outra extremidade está conectada ao nó 200.
 - O valor 0.000000298697017699361355540911 especifica a capacitância do capacitor, que é de aproximadamente 298.697017699361355540911 fF.
- E. R2 2 200 1k:
- Essa linha define um resistor chamado R2.
 - O valor 2 indica que uma extremidade do resistor está conectada ao nó 2, enquanto o valor 200 indica que a outra extremidade está conectada ao nó 200.
 - O valor 1k especifica a resistência do resistor, que é de 1 k Ω .
- F. R200 200 0 5M:
- Essa linha define outro resistor chamado R200, o terra virtual.

- O valor 200 indica que uma extremidade do resistor está conectada ao nó 200, enquanto o valor 0 indica que a outra extremidade está conectada ao nó 0 (terra).
- O valor 5M especifica a resistência do resistor, que é de 5 M Ω .

O restante do código segue uma estrutura semelhante, definindo indutores, capacitores e resistores com suas respectivas conexões nos nós do circuito.

Ao utilizar o netlist no LTspice, é possível simular o circuito e obter resultados como formas de onda, tensões e correntes. No caso específico desse código, ele também inclui a linha ".tran 0 100m 0 0.1", que realiza uma análise transiente do circuito, calculando os valores de tensão e corrente ao longo do tempo de 0 a 100 milissegundos, com um passo de 0.1 milissegundos.

Através dessa simulação, é possível estudar o comportamento do circuito, verificar seu desempenho, avaliar a resposta em frequência e realizar análises de interesse para o projeto em questão.

5. RESULTADOS E ANÁLISE

Os resultados obtidos a partir da simulação do circuito elétrico proposto no LTspice fornecem informações valiosas sobre o comportamento do sistema de transmissão de energia sem fio. Essa análise permite avaliar a eficiência e a viabilidade do projeto, levando em consideração diferentes parâmetros, como coeficiente de acoplamento, número de enrolamentos, raio das bobinas e distância entre elas.

Nesta seção, apresentaremos os resultados obtidos por meio das simulações no LTspice, analisando os efeitos das variações nos parâmetros mencionados. Serão apresentados gráficos e dados que demonstram a influência desses fatores no desempenho do sistema de transmissão de energia sem fio.

Por meio desses resultados, buscaremos compreender o impacto das variações nos parâmetros na eficiência de transferência de energia, na potência recebida e nos níveis de perdas no circuito. Além disso, iremos avaliar a estabilidade do sistema em diferentes configurações e verificar se os valores simulados se condizem com as expectativas teóricas.

Essa análise detalhada dos resultados permitirá uma melhor compreensão do comportamento do sistema proposto, bem como a identificação de possíveis otimizações ou ajustes necessários para o aprimoramento do projeto.

Para as simulações, foi utilizado como exemplo, o sensor de temperatura industrial, modelo TBS-1ASF13506NM, é um componente de destaque quando se trata de monitoramento de temperatura em ambientes industriais. Com base nas especificações fornecidas no datasheet (SICK, 2017), foi considerado que o sensor é para operar com uma carga de 500 ohms, para considerar uma faixa de potência variando de 450mW a 2,45W.

Uma das vantagens desse sensor é sua ampla faixa de tensão de alimentação, que vai de 15V a 35V. Isso proporciona flexibilidade na integração do sensor em diferentes sistemas e ambientes industriais.

A figura 18 apresenta uma representação visual do sensor, permitindo visualizar sua estrutura e design. Com sua alta precisão e capacidade de resistir a condições adversas, o sensor de temperatura TBS-1ASF13506NM é uma escolha confiável para aplicações que exigem monitoramento preciso e confiável da temperatura em ambientes industriais.

A seguir, apresentaremos os resultados de cada experimento, acompanhados de análises e discussões relevantes. Esses resultados são fundamentais para embasar as conclusões e contribuir para o desenvolvimento de projetos futuros na área de transmissão de energia sem fio.

Figura 18 - Sensor de temperatura TBS-1ASF13506NM.



Fonte: site do fabricante.

5.1. Simulações

Nesta seção, apresentaremos os resultados das simulações realizadas, com o objetivo de resumir o projeto e fornecer uma análise objetiva. Para isso, selecionamos 10 simulações dentre as 35 realizadas, considerando variações nos parâmetros de número de espiras, raio da bobina transmissora, raio da bobina receptora e frequência. Dividiremos essa seção em dois subtópicos: "Simulações com distâncias fixas para cada sensor" e "Simulações com diferentes distâncias para cada sensor".

5.1.1. Simulações com distâncias fixas para cada sensor

Neste primeiro subtópico, realizamos cinco simulações com igual distância entre os sensores, visando analisar o efeito dos parâmetros mencionados na resposta do sistema. Para cada simulação, utilizamos a mesma distância fixa para cada sensor, a fim de comparar o impacto dos demais parâmetros. Os gráficos gerados a partir dessas simulações representam a relação entre os parâmetros e a variável de interesse.

Os parâmetros considerados nessas simulações incluíram o número de espiras da bobina transmissora (N_1) e número de espiras da bobina receptora (N_2), o raio da bobina transmissora (R_s), o raio da bobina receptora (R_r), frequência e a distância, como demonstrada na tabela 1. Essas variações permitiram explorar diferentes configurações e identificar tendências nos resultados. Os gráficos resultantes proporcionaram uma compreensão mais clara das interações entre os parâmetros e o desempenho do sistema.

Na primeira simulação consiste em um estudo com distâncias fixas para cada sensor. Durante a simulação, observamos um comportamento interessante no tempo de 0,1 segundo, no qual ocorre uma estabilidade na tensão na parte receptora do circuito e na tensão de alimentação dos sensores. Esse resultado é de grande relevância, pois indica a capacidade do circuito em alcançar um estado de equilíbrio operacional em um curto período de tempo. A seguir, apresentamos o gráfico que ilustra essa estabilidade ao longo do tempo, bem como a figura que detalha os parâmetros utilizados no circuito durante essa simulação.

Na simulação 1, é observada a estabilidade na tensão de alimentação dos sensores após aproximadamente 0,02 segundos, considerando o tempo total de simulação de 0,1 segundo. A seguir, são apresentados o gráfico que ilustra essa estabilidade ao longo do tempo e seus respectivos dados utilizados durante essa simulação.

- Simulação 1:

Tabela 1 - Parâmetros definidos para simulação 1

N1	N2	Rr (m)	Rs (m)	Frequência (Hz)	Distância (m)
40	40	0,20	0,20	1,5 k	0,5

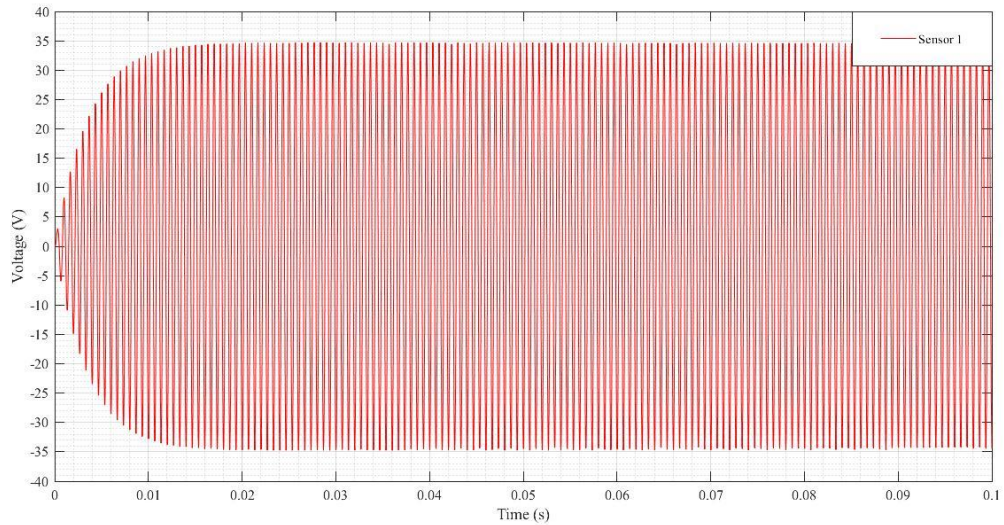
Fonte: Elaboração Própria.

Figura 19 - Tabela de parâmetros do circuito da simulação 1.

Componente	Nó 1	Nó 2	Valor
Vin	1	0	SINE(0 200 1500) AC 1 Rpar=001
L1	1	0	0.0030757358035544033 48412327190
L2	2	200	0.0030757358035544033 48412327190
K1_2	L1	L2	0.0105167594283 4448020113 4025776
C2	2	200	0.000003659038466817176750959942
R2	2	200	500
R200	200	0	5M
L3	3	300	0.0030757358035544033 48412327190
K1_3	L1	L3	0.0105167594283 4448020113 4025776
C3	3	300	0.000003659038466817176750959942
R3	3	300	500
R300	300	0	5M
L4	4	400	0.0030757358035544033 48412327190
K1_4	L1	L4	0.0105167594283 4448020113 4025776
C4	4	400	0.000003659038466817176750959942
R4	4	400	500
R400	400	0	5M
L5	5	500	0.0030757358035544033 48412327190
K1_5	L1	L5	0.0105167594283 4448020113 4025776
C5	5	500	0.000003659038466817176750959942
R5	5	500	500
R500	500	0	5M
L6	6	600	0.0030757358035544033 48412327190
K1_6	L1	L6	0.0105167594283 4448020113 4025776
C6	6	600	0.000003659038466817176750959942
R6	6	600	500
R600	600	0	5M
L7	7	700	0.0030757358035544033 48412327190
K1_7	L1	L7	0.0105167594283 4448020113 4025776
C7	7	700	0.000003659038466817176750959942
R7	7	700	500
R700	700	0	5M

Fonte: Elaboração própria.

Figura 20 - Resultado da Simulação 1.



Fonte: Elaboração própria.

Na simulação 2, é observada a estabilidade na tensão de alimentação dos sensores após aproximadamente 0,5 segundos, considerando o tempo total de simulação de 1 segundo. A seguir, são apresentados o gráfico que ilustra essa estabilidade ao longo do tempo e seus respectivos dados utilizados durante essa simulação.

- Simulação 2:

Tabela 2 – Parâmetros definidos para simulação 2.

N1	N2	Rr (m)	Rs (m)	Frequência (Hz)	Distância (m)
40	40	0,20	0,20	250	0,5

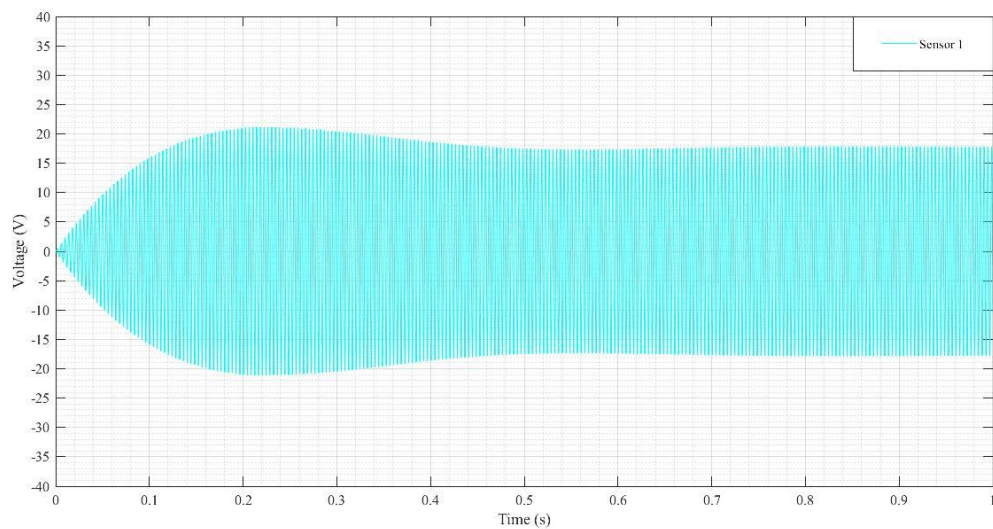
Fonte: Elaboração própria.

Figura 21 - Tabela de parâmetros do circuito da simulação 2.

Componente	Nó 1	Nó 2	Valor
Vin	1	0	SINE(0 200 2 50) AC 1 Rser=0.01
L1	1	0	0.003076739803554403348412327190
L2	2	200	0.003076739803554403348412327190
K1_2	L1	L2	0.001548563174764199402294595487
C2	2	200	0.000131725384805418395221809913
R2	2	200	500
R200	200	0	5M
L3	3	300	0.003076739803554403348412327190
K1_3	L1	L3	0.001548563174764199402294595487
C3	3	300	0.000131725384805418395221809913
R3	3	300	500
R300	300	0	5M
L4	4	400	0.003076739803554403348412327190
K1_4	L1	L4	0.001548563174764199402294595487
C4	4	400	0.000131725384805418395221809913
R4	4	400	500
R400	400	0	5M
L5	5	500	0.003076739803554403348412327190
K1_5	L1	L5	0.001548563174764199402294595487
C5	5	500	0.000131725384805418395221809913
R5	5	500	500
R500	500	0	5M
L6	6	600	0.003076739803554403348412327190
K1_6	L1	L6	0.001548563174764199402294595487
C6	6	600	0.000131725384805418395221809913
R6	6	600	500
R600	600	0	5M
L7	7	700	0.003076739803554403348412327190
K1_7	L1	L7	0.001548563174764199402294595487
C7	7	700	0.000131725384805418395221809913
R7	7	700	500
R700	700	0	5M

Fonte: Elaboração própria.

Figura 22 – Resultado da Simulação 2.



Fonte: Elaboração própria.

Na simulação 3, é observada a estabilidade na tensão de alimentação dos sensores após aproximadamente 18 segundos, considerando o tempo total de simulação de 25 segundos. A seguir, são apresentados o gráfico que ilustra essa estabilidade ao longo do tempo e seus respectivos dados utilizados durante essa simulação.

- Simulação 3:

Tabela 3 – Parâmetros definidos para simulação 3.

N1	N2	Rr (m)	Rs (m)	Frequência (Hz)	Distância (m)
80	80	0,20	0,20	50	1,5

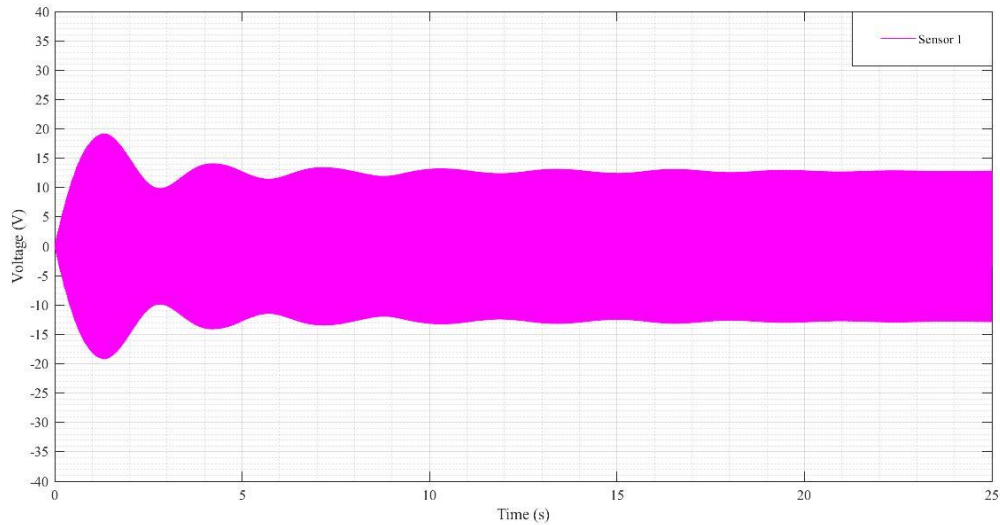
Fonte: Elaboração própria.

Figura 23 – Tabela de parâmetros do circuito da simulação 3.

Componente	Nó 1	Nó 2	Valor
Vin	1	0	SINE(0 200 50) AC 1 Raer=0.01
L1	1	0	0.006153 47960710880669682 465 4381
L2	2	200	0.006153 47960710880669682 465 4381
K1_2	L1	L2	0.000947885126102 567 487630158044
C2	2	200	0.001646567310067729777642298039
R2	2	200	500
R200	200	0	5 M
L3	3	300	0.006153 47960710880669682 465 4381
K1_3	L1	L3	0.000947885126102 567 487630158044
C3	3	300	0.001646567310067729777642298039
R3	3	300	500
R300	300	0	5 M
L4	4	400	0.006153 47960710880669682 465 4381
K1_4	L1	L4	0.000947885126102 567 487630158044
C4	4	400	0.001646567310067729777642298039
R4	4	400	500
R400	400	0	5 M
L5	5	500	0.006153 47960710880669682 465 4381
K1_5	L1	L5	0.000947885126102 567 487630158044
C5	5	500	0.001646567310067729777642298039
R5	5	500	500
R500	500	0	5 M
L6	6	600	0.006153 47960710880669682 465 4381
K1_6	L1	L6	0.000947885126102 567 487630158044
C6	6	600	0.001646567310067729777642298039
R6	6	600	500
R600	600	0	5 M
L7	7	700	0.006153 47960710880669682 465 4381
K1_7	L1	L7	0.000947885126102 567 487630158044
C7	7	700	0.001646567310067729777642298039
R7	7	700	500
R700	700	0	5 M

Fonte: Elaboração própria.

Figura 24 – Resultado da Simulação 3.



Fonte: Elaboração própria.

Na simulação 4, é observada a estabilidade na tensão de alimentação dos sensores após aproximadamente 2,0 segundos, considerando o tempo total de simulação de 5 segundos. A seguir, são apresentados o gráfico que ilustra essa estabilidade ao longo do tempo e seus respectivos dados utilizados durante essa simulação.

- Simulação 4:

Tabela 4 – Parâmetros definidos para simulação 4.

N1	N2	Rr (m)	Rs (m)	Frequência (Hz)	Distância (m)
80	80	0,40	0,40	50	1,5

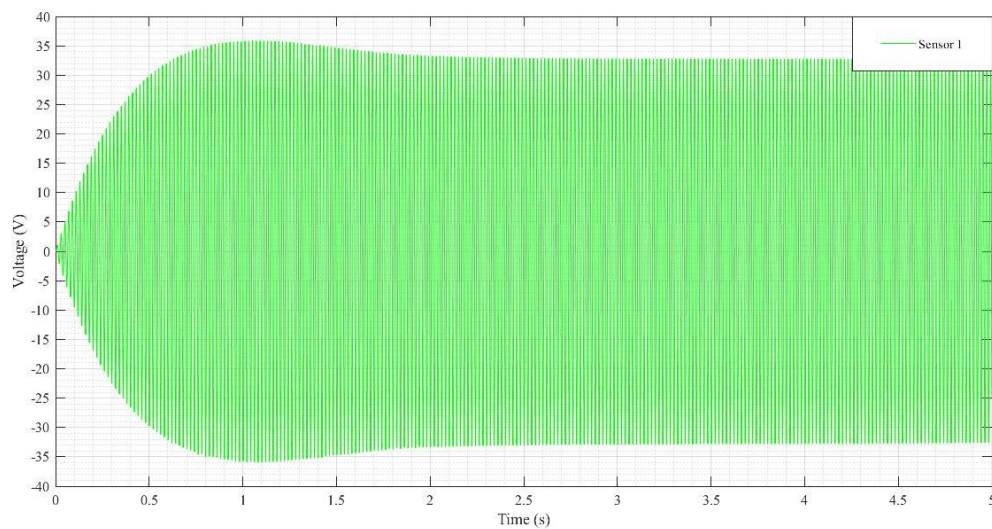
Fonte: Elaboração própria.

Figura 25 – Tabela de parâmetros do circuito da simulação 4.

Componente	Nó 1	Nó 2	Valor
Vin	1	0	SINE(0.200 50) AC 1 Rser=0.01
L1	1	0	0.02 461391842843 5226787298617523
L2	2	200	0.02 461391842843 5226787298617523
K1_2	L1	L2	0.003 511909852948 463719307659048
C2	2	200	0.000 4116 41827516932444 410574510
R2	2	200	500
R200	200	0	5 M
L3	3	300	0.02 461391842843 5226787298617523
K1_3	L1	L3	0.003 511909852948 463719307659048
C3	3	300	0.000 4116 41827516932444 410574510
R3	3	300	500
R300	300	0	5 M
L4	4	400	0.02 461391842843 5226787298617523
K1_4	L1	L4	0.003 511909852948 463719307659048
C4	4	400	0.000 4116 41827516932444 410574510
R4	4	400	500
R400	400	0	5 M
L5	5	500	0.02 461391842843 5226787298617523
K1_5	L1	L5	0.003 511909852948 463719307659048
C5	5	500	0.000 4116 41827516932444 410574510
R5	5	500	500
R500	500	0	5 M
L6	6	600	0.02 461391842843 5226787298617523
K1_6	L1	L6	0.003 511909852948 463719307659048
C6	6	600	0.000 4116 41827516932444 410574510
R6	6	600	500
R600	600	0	5 M
L7	7	700	0.02 461391842843 5226787298617523
K1_7	L1	L7	0.003 511909852948 463719307659048
C7	7	700	0.000 4116 41827516932444 410574510
R7	7	700	500
R700	700	0	5 M

Fonte: Elaboração própria.

Figura 26 – Resultado da Simulação 4.



Fonte: Elaboração própria.

Na simulação 5, é observada a estabilidade na tensão de alimentação dos sensores após aproximadamente 0,75 segundos, considerando o tempo total de simulação de 5 segundos. A seguir, são apresentados o gráfico que ilustra essa estabilidade ao longo do tempo e seus respectivos dados utilizados durante essa simulação.

- Simulação 5:

Tabela 5 – Parâmetros definidos para simulação 5.

N1	N2	Rr (m)	Rs (m)	Frequência (Hz)	Distância (m)
200	200	0,40	0,40	50	2,0

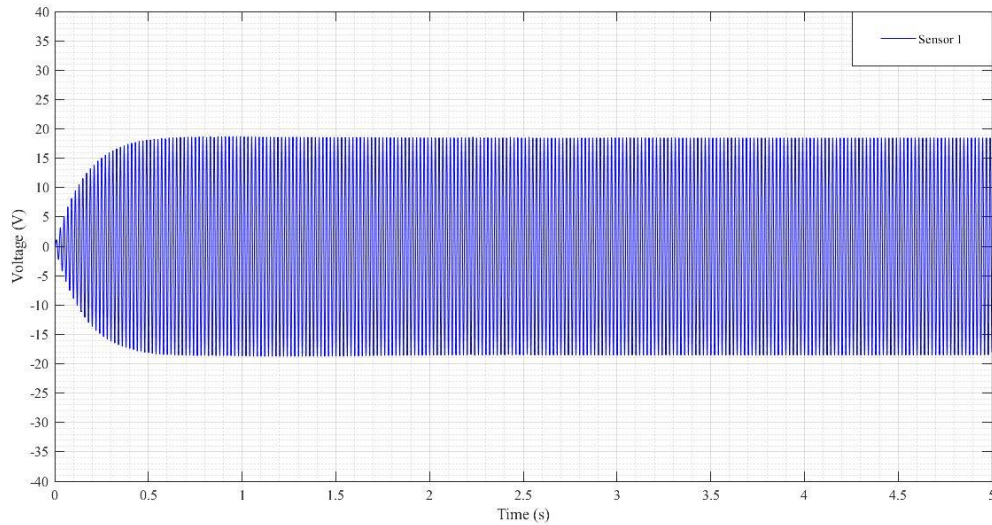
Fonte: Elaboração própria.

Figura 27 -- Tabela de parâmetros do circuito da simulação 5.

Componente	Nó 1	Nó 2	Valor
Vin	1	0	SINE(0 200 50) AC 1 Reer=0.01
L1	1	0	0.06153 4796071088061764076115878
L2	2	200	0.06153 4796071088061764076115878
K1_2	L1	L2	0.003871 407936910 48828889605 4220
C2	2	200	0.00016465673 100677299 402 7262391
R2	2	200	500
R200	200	0	5 M
L3	3	300	0.06153 4796071088061764076115878
K1_3	L1	L3	0.003871 407936910 48828889605 4220
C3	3	300	0.00016465673 100677299 402 7262391
R3	3	300	500
R300	300	0	5 M
L4	4	400	0.06153 4796071088061764076115878
K1_4	L1	L4	0.003871 407936910 48828889605 4220
C4	4	400	0.00016465673 100677299 402 7262391
R4	4	400	500
R400	400	0	5 M
L5	5	500	0.06153 4796071088061764076115878
K1_5	L1	L5	0.003871 407936910 48828889605 4220
C5	5	500	0.00016465673 100677299 402 7262391
R5	5	500	500
R500	500	0	5 M
L6	6	600	0.06153 4796071088061764076115878
K1_6	L1	L6	0.003871 407936910 48828889605 4220
C6	6	600	0.00016465673 100677299 402 7262391
R6	6	600	500
R600	600	0	5 M
L7	7	700	0.06153 4796071088061764076115878
K1_7	L1	L7	0.003871 407936910 48828889605 4220
C7	7	700	0.00016465673 100677299 402 7262391
R7	7	700	500
R700	700	0	5 M

Fonte: Elaboração própria.

Figura 28 – Resultado da Simulação 5.



Fonte: Elaboração própria.

5.1.2. Simulações com diferentes distâncias para cada sensor

No segundo subtópico, focamos em simulações com diferentes distâncias entre cada sensor. Realizamos cinco simulações com distâncias variando de 1,5m até 2m. O objetivo dessa abordagem foi investigar como as diferentes distâncias afetam a resposta do sistema.

Para cada simulação, foram ajustados os parâmetros de número de espiras, raio da bobina transmissora, raio da bobina receptora e frequência, mantendo-se uma distância diferente entre os sensores. Os gráficos gerados a partir dessas simulações representam a relação entre os parâmetros e a variável de interesse para cada distância analisada.

Através dessas simulações, buscamos identificar as configurações ideais dos parâmetros para alcançar um desempenho otimizado do sistema. Os resultados obtidos por meio dos gráficos permitiram uma análise comparativa entre as diferentes distâncias e suas influências nos resultados.

Na simulação 6, é observada a estabilidade na tensão de alimentação dos sensores após aproximadamente 2,75 segundos, considerando o tempo total de simulação de 5 segundos. A seguir, são apresentados o gráfico que ilustra essa estabilidade ao longo do tempo e seus respectivos dados utilizados durante essa simulação.

- Simulação 6:

Tabela 6 – Parâmetros definidos para simulação 6.

N1	N2	Rr (m)	Rs (m)	Frequência (Hz)	Distância (m)
160	160	0,40	0,20	50	1,5 até 2

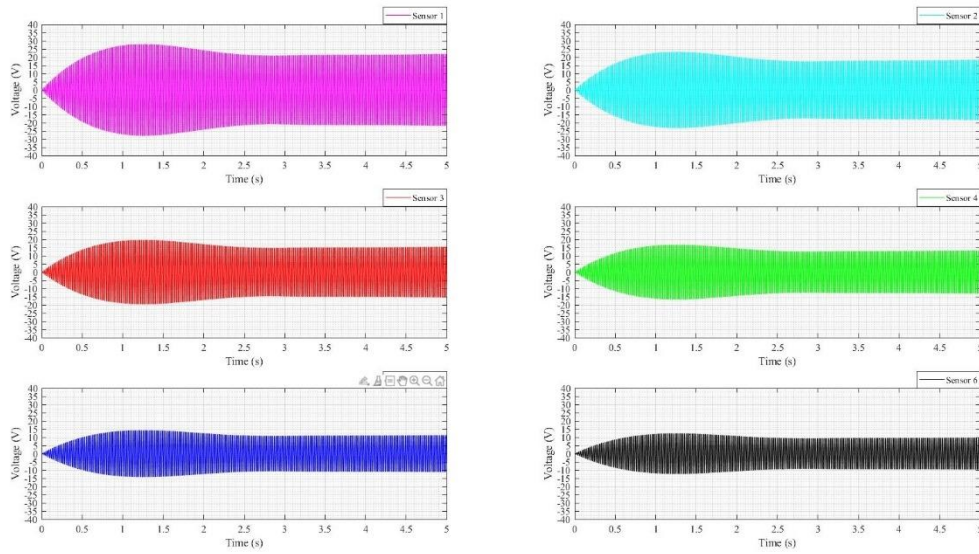
Fonte: Elaboração própria.

Figura 29 - Tabela de parâmetros do circuito da simulação 6.

Componente	Nó 1	Nó 2	Valor
Vin	1	0	SINE(0 200 50) AC 1 Raer=0.01
L1	1	0	0.0492278368568704535745597235047
L2	2	200	0.012306959214217613393648308762
K1_2	L1	L2	0.003511909852948463719307659048
C2	2	200	0.000823283655033864888821149020
R2	2	200	500
R200	200	0	5M
L3	3	300	0.012306959214217613393648308762
K1_3	L1	L3	0.002928574342350538096618750572
C3	3	300	0.000823283655033864888821149020
R3	3	300	500
R300	300	0	5M
L4	4	400	0.012306959214217613393648308762
K1_4	L1	L4	0.002466716076792386993371541948
C4	4	400	0.000823283655033864888821149020
R4	4	400	500
R400	400	0	5M
L5	5	500	0.012306959214217613393648308762
K1_5	L1	L5	0.002095803434831535177335082309
C5	5	500	0.000823283655033864888821149020
R5	5	500	500
R500	500	0	5M
L6	6	600	0.012306959214217613393648308762
K1_6	L1	L6	0.001794968774940373891155220853
C6	6	600	0.000823283655033864888821149020
R6	6	600	500
R600	600	0	5M
L7	7	700	0.012306959214217613393648308762
K1_7	L1	L7	0.001548563174764199402294595487
C7	7	700	0.000823283655033864888821149020
R7	7	700	500
R700	700	0	5M

Fonte: Elaboração própria.

Figura 30 – Resultado da Simulação 6.



Fonte: Elaboração própria.

Na simulação 7, é observada a estabilidade na tensão de alimentação dos sensores após aproximadamente 1 segundo, considerando o tempo total de simulação de 5 segundos. A seguir, são apresentados o gráfico que ilustra essa estabilidade ao longo do tempo e seus respectivos dados utilizados durante essa simulação.

- Simulação 7:

Tabela 7 – Parâmetros definidos para simulação 7.

N1	N2	Rr (m)	Rs (m)	Frequência (Hz)	Distância (m)
160	160	0,40	0,40	50	1,5 até 2,0

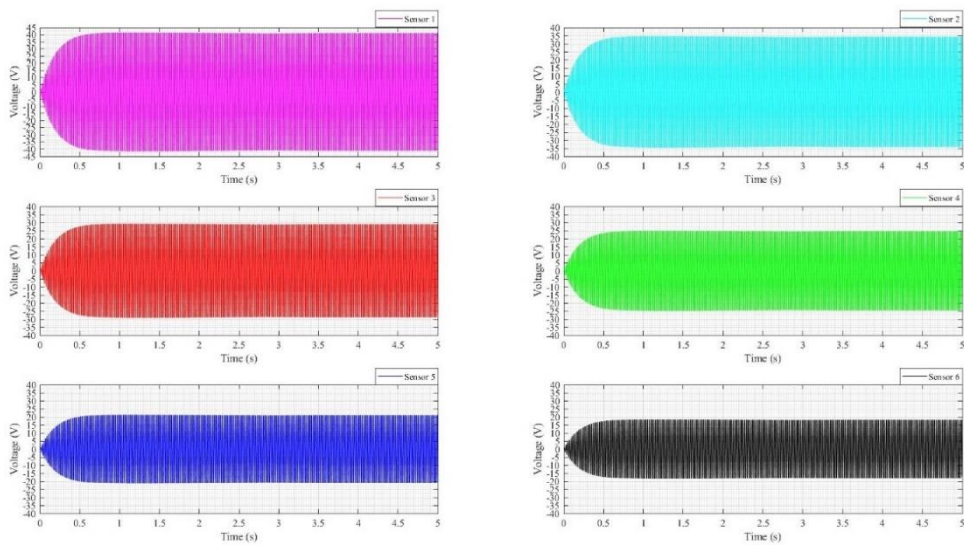
Fonte: Elaboração própria.

Figura 31 – Tabela de parâmetros do circuito da simulação 7.

Componente	Nó 1	Nó 2	Valor
Vin	1	0	SINE(0 200 50) AC 1 Rser=0.01
L1	1	0	0.049227836856870453574597235047
L2	2	200	0.049227836856870453574597235047
K1_2	L1	L2	0.007023819705896927438615318006
C2	2	200	0.000205820913758466222205287255
R2	2	200	500
R200	200	0	5 M
L3	3	300	0.049227836856870453574597235047
K1_3	L1	L3	0.005857948684701076193237501144
C3	3	300	0.000205820913758466222205287255
R3	3	300	500
R300	300	0	5 M
L4	4	400	0.049227836856870453574597235047
K1_4	L1	L4	0.004933432153584773986743083896
C4	4	400	0.000205820913758466222205287255
R4	4	400	500
R400	400	0	5 M
L5	5	500	0.049227836856870453574597235047
K1_5	L1	L5	0.004191608869663070354670164619
C5	5	500	0.000205820913758466222205287255
R5	5	500	500
R500	500	0	5 M
L6	6	600	0.049227836856870453574597235047
K1_6	L1	L6	0.00358993754988074782310441707
C6	6	600	0.000205820913758466222205287255
R6	6	600	500
R600	600	0	5 M
L7	7	700	0.049227836856870453574597235047
K1_7	L1	L7	0.003097126349528398804589190974
C7	7	700	0.000205820913758466222205287255
R7	7	700	500
R700	700	0	5 M

Fonte: Elaboração própria.

Figura 32 – Resultado da Simulação 7.



Fonte: Elaboração própria.

Na simulação 8, é observada a estabilidade na tensão de alimentação dos sensores após aproximadamente 2,75 segundos, considerando o tempo total de simulação de 5 segundos. A seguir, são apresentados o gráfico que ilustra essa estabilidade ao longo do tempo e seus respectivos dados utilizados durante essa simulação.

- Simulação 8:

Tabela 8 - Parâmetros definidos para simulação 8.

N1	N2	Rr (m)	Rs (m)	Frequência (Hz)	Distância (m)
200	200	0,40	0,20	50	1,5 até 2,0

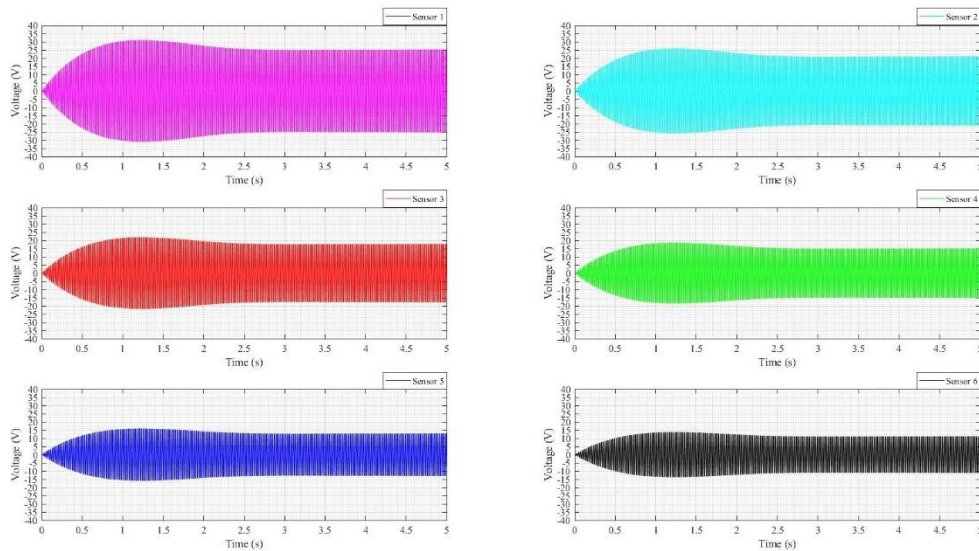
Fonte: Elaboração própria.

Figura 33 - Parâmetros definidos para simulação 8.

Componente	Nó 1	Nó 2	Valor
Vin	1	0	SINE(0 200 50) AC 1 Raer=001
L1	1	0	0.06153 4796071088061764076115878
L2	2	200	0.015383699017 772015 441019028970
K1_2	L1	L2	0.004388887316185 5797575 5 4791058
C2	2	200	0.00065862692 4027091976109049565
R2	2	200	500
R200	200	0	5M
L3	3	300	0.015383699017 772015 441019028970
K1_3	L1	L3	0.0036612179279381720785723 51972
C3	3	300	0.00065862692 4027091976109049565
R3	3	300	500
R300	300	0	5M
L4	4	400	0.015383699017 772015 441019028970
K1_4	L1	L4	0.003083395095990482982 772306695
C4	4	400	0.00065862692 4027091976109049565
R4	4	400	500
R400	400	0	5M
L5	5	500	0.015383699017 772015 441019028970
K1_5	L1	L5	0.00261975 4293 539418212727332147
C5	5	500	0.00065862692 4027091976109049565
R5	5	500	500
R500	500	0	5M
L6	6	600	0.015383699017 772015 441019028970
K1_6	L1	L6	0.002243710968675 466984473265687
C6	6	600	0.00065862692 4027091976109049565
R6	6	600	500
R600	600	0	5M
L7	7	700	0.015383699017 772015 441019028970
K1_7	L1	L7	0.00193 570396845 524914 4448027110
C7	7	700	0.00065862692 4027091976109049565
R7	7	700	500
R700	700	0	5M

Fonte: Elaboração própria.

Figura 34 – Resultado da Simulação 8.



Fonte: Elaboração própria.

Na simulação 9, é observada a estabilidade na tensão de alimentação dos sensores após aproximadamente 1 segundo, considerando o tempo total de simulação de 5 segundos. A seguir, são apresentados o gráfico que ilustra essa estabilidade ao longo do tempo e seus respectivos dados utilizados durante essa simulação.

- Simulação 9:

Tabela 9 – Parâmetros definidos para simulação 9.

N1	N2	Rr (m)	Rs (m)	Frequência (Hz)	Distância (m)
200	200	0,40	0,40	50	1,5 até 2,0

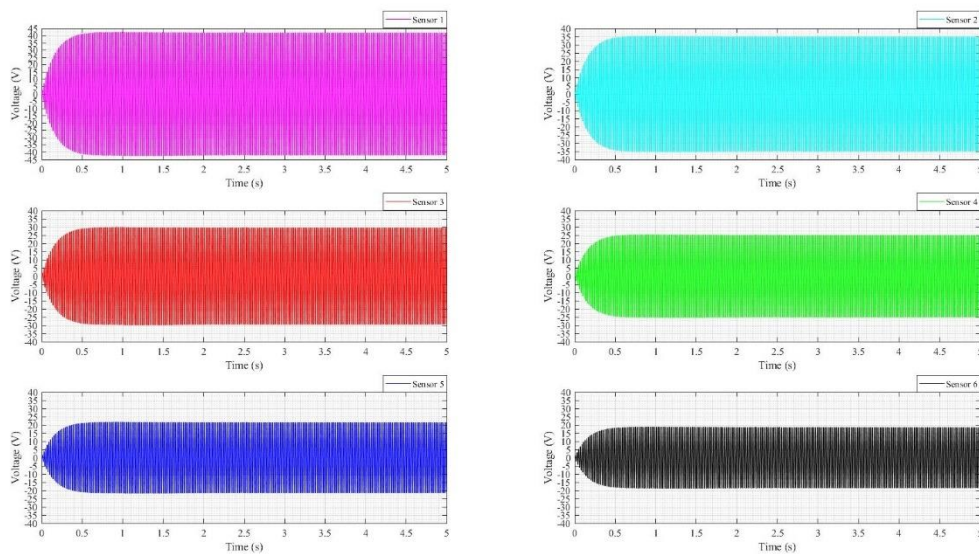
Fonte: Elaboração própria.

Figura 35 - Tabela de parâmetros do circuito da simulação 9.

Componente	Nó 1	Nó 2	Valor
Vin	1	0	SINE(0 200 50) AC 1 Rser=0.01
L1	1	0	0.06153 473607108806176 4076115878
L2	2	200	0.015383699017772015 441019028970
K1_2	L1	L2	0.004389887316185 5797575 5 4731058
C2	2	200	0.00065862692 40270919761090 49565
R2	2	200	500
R200	200	0	5 M
L3	3	300	0.015383699017772015 441019028970
K1_3	L1	L3	0.00366121792 79381720786723 51972
C3	3	300	0.00065862692 40270919761090 49565
R3	3	300	500
R300	300	0	5 M
L4	4	400	0.015383699017772015 441019028970
K1_4	L1	L4	0.003083395095990 482982 772906695
C4	4	400	0.00065862692 40270919761090 49565
R4	4	400	500
R400	400	0	5 M
L5	5	500	0.015383699017772015 441019028970
K1_5	L1	L5	0.00261976 4293 539418212 727332147
C5	5	500	0.00065862692 40270919761090 49565
R5	5	500	500
R500	500	0	5 M
L6	6	600	0.015383699017772015 441019028970
K1_6	L1	L6	0.002243 710968675 46898 4473265697
C6	6	600	0.00065862692 40270919761090 49565
R6	6	600	500
R600	600	0	5 M
L7	7	700	0.015383699017772015 441019028970
K1_7	L1	L7	0.00193 570396845 52 4914 444802 7110
C7	7	700	0.00065862692 40270919761090 49565
R7	7	700	500
R700	700	0	5 M

Fonte: Elaboração própria.

Figura 36 - Resultado da Simulação 9.



Fonte: Elaboração própria.

Na simulação 10, é observada a estabilidade na tensão de alimentação dos sensores após aproximadamente 1 segundo, considerando o tempo total de simulação de 5 segundos. A seguir, são apresentados o gráfico que ilustra essa estabilidade ao longo do tempo e seus respectivos dados utilizados durante essa simulação.

- Simulação 10:

Tabela 10 - Parâmetros definidos para simulação 10.

N1	N2	Rr (m)	Rs (m)	Frequência (Hz)	Distância (m)
180	180	0,40	0,40	60	1,5 até 2,0

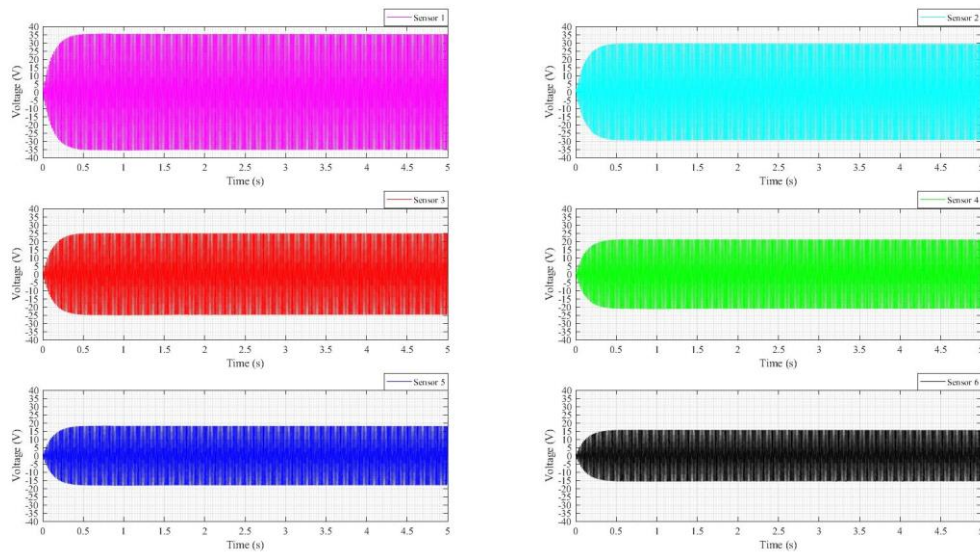
Fonte: Elaboração própria.

Figura 37 – Tabela de parâmetros do circuito da simulação 10.

Componente	Nó 1	Nó 2	Valor
Vin	1	0	SINE(0 200 60) AC 1
L1	1	0	0.05538131646397925
L2	2	200	0.05538131646397925
K1_2	L1	L2	0.007901797169134046
C2	2	200	0.00012704894676448534
R2	2	200	500
R200	200	0	5M
L3	3	300	0.05538131646397925
K1_3	L1	L3	0.006590192270288712
C3	3	300	0.00012704894676448534
R3	3	300	500
R300	300	0	5M
L4	4	400	0.05538131646397925
K1_4	L1	L4	0.00555011172782871
C4	4	400	0.00012704894676448534
R4	4	400	500
R400	400	0	5M
L5	5	500	0.05538131646397925
K1_5	L1	L5	0.004715557728370955
C5	5	500	0.00012704894676448534
R5	5	500	500
R500	500	0	5M
L6	6	600	0.05538131646397925
K1_6	L1	L6	0.004038679743615842
C6	6	600	0.00012704894676448534
R6	6	600	500
R600	600	0	5M
L7	7	700	0.05538131646397925
K1_7	L1	L7	0.00348426714321945
C7	7	700	0.00012704894676448534
R7	7	700	500
R700	700	0	5M

Fonte: Elaboração própria.

Figura 38 – Resultado da Simulação 10.



Fonte: Elaboração própria.

Como pode observar-se na simulação 10, obtém-se um resultado próximo ao desejado, possuindo os 6 sensores com diferentes distâncias na mesma configuração.

Em ambos os subtópicos, a seleção criteriosa das simulações buscou focar nas melhores opções para análise, visando obter conclusões relevantes e embasar decisões futuras no projeto.

5.2. Análise das simulações

A análise dos resultados das simulações do sistema de recarregador de energia por WPT revelou informações valiosas sobre o impacto das variações nos parâmetros nas características do sistema. Examinaremos mais detalhadamente esses resultados para obter uma compreensão clara das influências e tendências observadas.

Primeiramente, vamos analisar o efeito do número de espiras das bobinas (N_1 e N_2) na eficiência da transferência de energia. Nas simulações 1, 2 e 3, foram mantidos valores iguais de número de espiras para ambas as bobinas, enquanto nas simulações 4 e 5, aumentou-se o número de espiras. Observou-se que, nas simulações com maior número de espiras (simulações 4 e 5), a tensão nos sensores

foi maior em comparação às simulações com menor número de espiras (simulações 1, 2 e 3). Isso indica que um maior número de espiras contribui para uma transferência de energia mais eficiente.

Em relação ao raio das bobinas (R_s e R_r), foi possível observar o efeito dessa variável nas simulações 1, 2, 4 e 5. Nas simulações com raio de bobina maior (simulações 2, 4 e 5), a tensão nos sensores foi maior em comparação às simulações com raio de bobina menor (simulação 1). Isso sugere que um raio maior das bobinas contribui para uma melhor transferência de energia.

A frequência também mostrou ter um impacto significativo na eficiência da transferência de energia. Nas simulações 3, 4 e 5, onde a frequência foi reduzida em relação às simulações anteriores, observou-se que quanto maior a distância, mais precisava diminuir a frequência para a tensão fornecida se estabeleça na faixa de tensão proposta pelo sensor industrial. Uma frequência mais baixa pode resultar em um intervalo de tempo maior, para que ocorra estabilidade na tensão fornecida.

Além disso, a distância entre as bobinas (D_{sr}) revelou-se um fator crítico para a eficiência do sistema. Nas simulações 1,2,3,4 e 5, onde a distância entre as bobinas foi mantida fixa, a tensão nos sensores permaneceu estável ao longo do tempo. No entanto, nas simulações 6, 7, 8, 9 e 10, onde a distância entre as bobinas variou, observou-se uma queda na tensão fornecida aos sensores à medida que a distância aumentava. Isso indica que uma distância maior entre as bobinas resulta em uma transferência de energia menos eficiente.

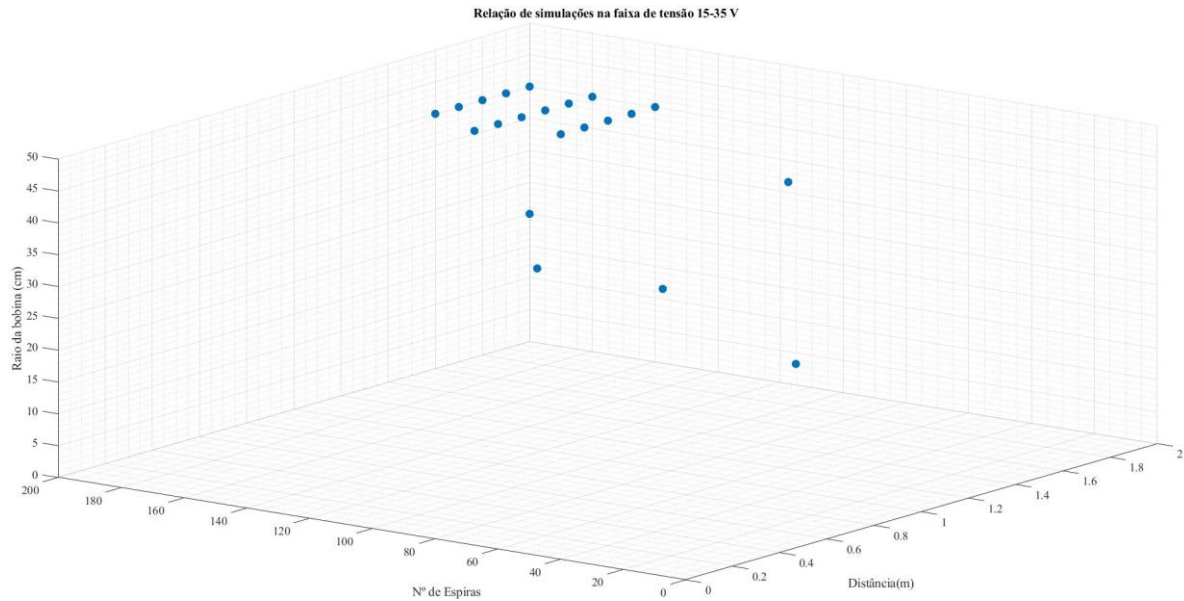
Aumentando apenas o número de espiras e mantendo o raio o mesmo, é possível observar um aumento na tensão, porém não tão significativo. Um exemplo disso são as simulações 6 e 8, que possuem o mesmo raio, mas apresentam uma variação no número de espiras. Isso resulta em uma diferença de aproximadamente 4 V na tensão medida pelo sensor 1.

Esses resultados indicam que aumentar apenas o número de espiras tem um impacto limitado na eficiência de transferência de energia nesse sistema. Indicando que os outros fatores desempenham papéis significativos na determinação do desempenho geral do sistema de transferência de energia sem fio.

Em resumo, os resultados das simulações mostram que o número de espiras, o raio das bobinas, a frequência e a distância entre as bobinas são fatores cruciais na eficiência da transferência de energia por WPT. Aumentar o número de espiras e o raio das bobinas, juntamente com uma frequência adequada e uma

distância otimizada entre as bobinas, pode levar a uma transferência de energia mais eficiente. Essas informações são essenciais para o projeto e otimização de sistemas de recarregadores de energia por WPT, permitindo a seleção adequada dos parâmetros para obter um desempenho ideal.

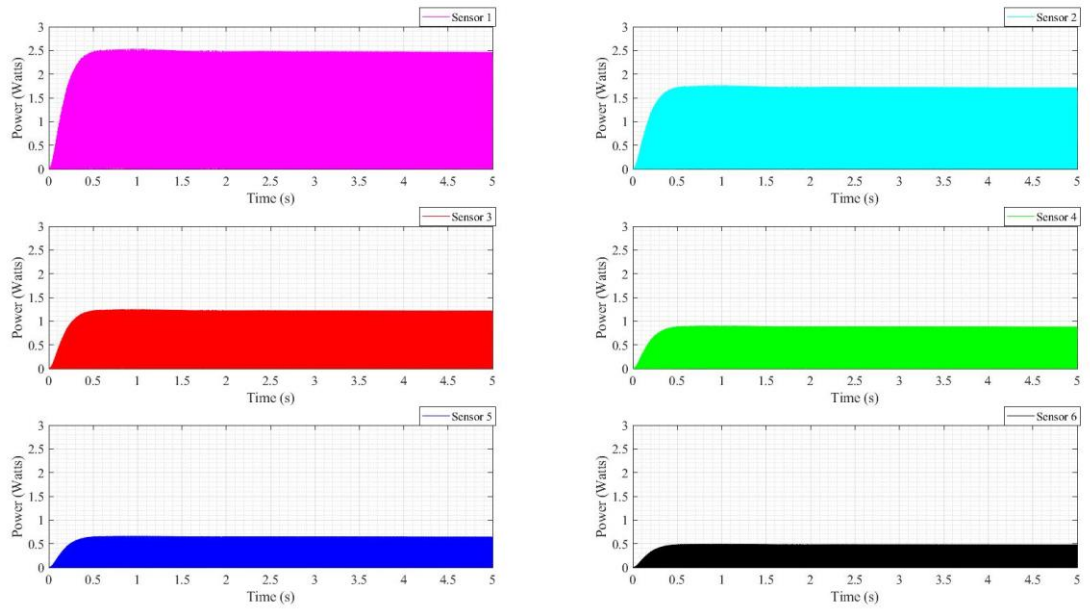
Figura 39 - Demonstração de simulações entre a faixa de tensão.



Fonte: Elaboração própria.

Na simulação 10, observou-se que a faixa de tensão fornecida aos sensores ficou entre 15 e 35 V, como considerado a faixa de potência no início a ser entregue, resultando na figura 40, que se encontra dentro do intervalo proposto pelo sensor de temperatura industrial. Portanto, o fato de a faixa de tensão estar dentro dos parâmetros recomendados demonstra que o sistema de recarga de energia por WPT possivelmente pode atender aos requisitos de alimentação do sensor.

Figura 40 – Simulação 10 resultado em relação a potência.



Fonte: Elaboração própria.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste estudo, foram realizadas simulações para investigar a viabilidade da transmissão de energia sem fio em um recarregador. As simulações foram conduzidas utilizando seis sensores posicionados em duas configurações diferentes: sensores localizados a uma mesma distância fixa em relação à fonte do sinal elétrico e outra os sensores estavam posicionados em diferentes distâncias, variando os parâmetros de raio das bobinas, número de espiras e frequência.

Na primeira etapa, com a mesma distância fixa, o objetivo era avaliar o desempenho dos sensores em condições controladas. Os parâmetros de raio das bobinas, número de espiras e frequência foram mantidos constantes em todos os sensores. Dessa forma, foi possível analisar a capacidade de detecção dos sinais elétricos pelos sensores em igualdade de condições. Os resultados mostraram que os sensores foram capazes de detectar os sinais elétricos de forma eficiente e consistente.

Na segunda etapa, os sensores foram posicionados em diferentes distâncias em relação à fonte do sinal elétrico. Além disso, foram realizadas variações nos parâmetros de raio das bobinas, número de espiras e frequência em cada sensor. O objetivo dessa configuração era analisar como esses parâmetros influenciam a capacidade de detecção dos sensores em diferentes distâncias. Os resultados revelaram que a distância entre o sensor e a fonte do sinal elétrico afetou significativamente a capacidade de detecção. Quanto maior a distância, menor foi a eficiência na detecção dos sinais elétricos.

Além disso, os parâmetros de raio das bobinas, número de espiras e frequência também mostraram ter impacto na capacidade de detecção dos sensores, mesmo em diferentes distâncias. Por exemplo, sensores com maior raio das bobinas e número de espiras demonstraram uma maior sensibilidade na detecção dos sinais elétricos, independentemente da distância. Da mesma forma, a frequência do sinal de entrada teve influência na eficiência de detecção, sendo que frequências mais altas foram mais eficazes em curtas distâncias.

Em resumo, os resultados obtidos com os seis sensores nas diferentes configurações permitiram concluir que a distância entre o sensor e a fonte do sinal elétrico, assim como os parâmetros de raio das bobinas, número de espiras e frequência, são fatores críticos para a capacidade de detecção dos sensores. Essas

informações são essenciais para o desenvolvimento de recarregadores de energia por transmissão sem fio mais eficientes, que possam atender às demandas de carregamento de dispositivos eletrônicos com maior precisão e desempenho.

7. PROPOSTAS PARA TRABALHO FUTURO

Um dos trabalhos futuros é buscar a automatização entre os softwares Matlab e LTspice permite uma integração eficiente entre as capacidades de simulação e análise de ambos os programas. Essa integração é especialmente útil quando se deseja que o Matlab acione o LTspice por meio de um código, definindo os parâmetros e o tempo de resposta de forma cada vez mais rápida.

O Matlab é uma poderosa ferramenta de programação e análise numérica, com uma ampla gama de recursos para processamento de sinais, modelagem matemática e simulações. Por outro lado, o LTspice é um software de simulação de circuitos eletrônicos amplamente utilizado, que oferece uma representação precisa e detalhada do comportamento de circuitos complexos.

Ao automatizar a interação entre o Matlab e o LTspice, é possível criar um fluxo de trabalho eficiente e repetitivo, onde o Matlab envia comandos para o LTspice e recebe os resultados das simulações de volta. Isso permite a análise rápida de diferentes configurações de circuitos, otimização de parâmetros e validação de modelos.

O código do Matlab pode ser utilizado para definir os parâmetros do circuito a ser simulado no LTspice, como resistores, capacitores, indutores, fontes de tensão e corrente, bem como especificar os valores iniciais e condições de contorno. Além disso, é possível controlar o tempo de resposta da simulação, definindo o intervalo de tempo desejado e a precisão necessária.

Uma vez que os parâmetros e as configurações são definidos no Matlab, o código pode acionar o LTspice automaticamente, iniciando a simulação e aguardando os resultados. Após a conclusão da simulação, os dados podem ser importados de volta para o Matlab para análise e visualização.

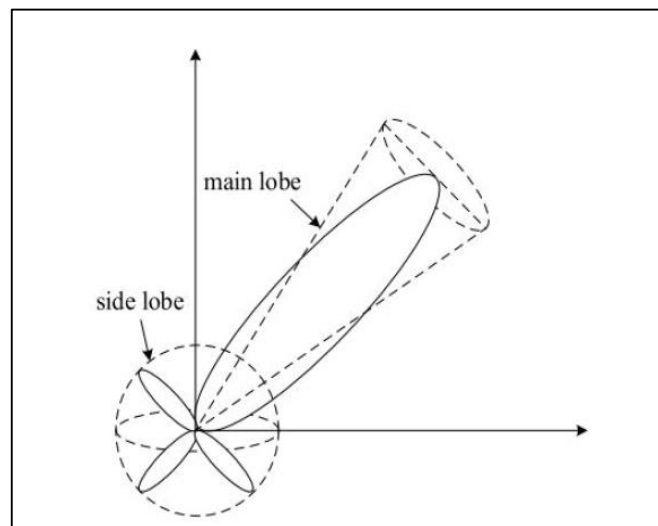
Essa automatização proporciona uma série de benefícios. Primeiramente, ela economiza tempo e esforço, pois elimina a necessidade de configurar manualmente os parâmetros no LTspice a cada simulação. Além disso, permite uma

exploração mais rápida e eficiente de diferentes configurações de circuitos, facilitando o processo de projeto e otimização.

Outra vantagem é a capacidade de realizar análises paramétricas, onde o Matlab pode iterar automaticamente por uma série de valores de parâmetros e executar simulações em lote no LTspice. Isso é especialmente útil quando se deseja avaliar o impacto de diferentes combinações de valores de componentes ou realizar estudos de sensibilidade.

Esse trabalho futuro, é estabelecer o modelo da antena que para uma implementação, como as antenas direcionais com objetivo de gerar feixes de energia para alimentar especificamente um *Sensor Node (SM)*. Entretanto, este modelo de antena gera dois tipos de lóbulos, como principal e o lateral. Na figura 41, representa o a antena direcional, demonstrando que o sinal do lóbulo principal possui sinal reforçado, enquanto um produto secundário gerado pela própria antena. Conseqüentemente, o principal possui um ganho de sinal maior que o lateral (DUAN; TAO; ZHANG, 2019).

Figura 41 - Modelo de antena direcional.



Fonte: DUAN; TAO; ZHANG (2019).

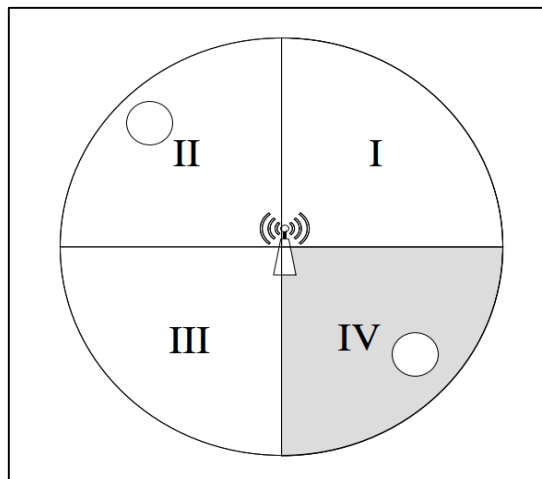
Na figura 42, pode-se observar em um espaço dimensional (2D), o modelo simplificado demonstrando por área que a antena estará direcionada. A área cinza está descrita como lóbulo principal e o restante como lóbulos laterais. De acordo com o modelo de ganho de antena, a equação 13 descreve exatamente tais ganhos do lóbulo principal e lateral, respectivamente, onde G_p^m e G_p^s . No caso p seria a área que

estaria direcionada a antena, θ representa a largura do feixe de energia, que pode ser encontrada pela equação 14, em que M seria a quantidade de áreas especificadas (DUAN; TAO; ZHANG, 2019).

$$(2\pi - \theta)G_p^s + \theta G_p^m = 2\pi \quad (15).$$

$$\theta = \frac{2\pi}{M} \quad (16).$$

Figura 42 - Modelo em 2D demonstrando área escolhida.



Fonte: DUAN; TAO; ZHANG (2019).

Um trabalho futuro importante para o projeto de WPT envolve a otimização do fator de qualidade e do coeficiente de acoplamento em sistemas de acoplamento ressonante. Como mencionado, o fator de qualidade (Q) é uma medida da eficiência da ressonância do circuito, enquanto o coeficiente de acoplamento (k) é um fator crucial que afeta a eficiência e a potência entregue no sistema WPT. Portanto, para melhorar a eficiência e a potência entregue, seria importante explorar maneiras de otimizar esses dois fatores por meio da manipulação das variáveis construtivas do link indutivo ressonante (DE CASTRO, 2021).

Além disso, é importante considerar a resistência da bobina e a indutância como parâmetros inversamente relacionados ao fator de qualidade. A resistência do condutor utilizado na bobina, definida pela resistividade e pelas dimensões do fio, influencia diretamente o fator de qualidade. No entanto, para frequências abaixo de

10 MHz, a resistência de excitação não é um fator de grande impacto na modelagem do circuito. No entanto, há um limite conceitual imposto pela resistência total das bobinas, que aumenta com o aumento da frequência de ressonância, afetando negativamente o fator de qualidade. Portanto, ao buscar aumentar a potência e a eficiência da transmissão, é necessário encontrar um equilíbrio entre a frequência de ressonância e a resistência total das bobinas (DE CASTRO, 2021).

Essas considerações futuras são cruciais para aprimorar o projeto de WPT, garantindo a eficiência e a potência adequadas na transferência de energia sem fio. Explorar técnicas de otimização do fator de qualidade e do coeficiente de acoplamento, juntamente com a consideração da resistência total das bobinas, permitirá melhorar a eficiência e a viabilidade dos sistemas de WPT em aplicações práticas.

A otimização da potência de saída e eficiência na transferência de energia em sistemas de acoplamento indutivo ressonante tem sido objeto de estudo em diversos métodos mencionados na literatura. Esses métodos têm como foco a manipulação de variáveis construtivas do link indutivo, como dimensões das bobinas, fator de qualidade e coeficiente de acoplamento, assim como parâmetros da rede de capacitores, como número e valores das capacitâncias, e até mesmo variáveis elétricas como a frequência do oscilador da fonte de alimentação.

Neste contexto, destaca-se um dos principais métodos de otimização utilizados atualmente nas pesquisas de WPT por acoplamento ressonante: a otimização por rede de capacitores de ordem superior. Esse método altera a topologia do circuito, em relação à configuração tradicional, e requer uma análise de circuito semelhante àquela já realizada anteriormente. No entanto, ele apresenta um nível mais elevado de complexidade matemática ao buscar otimizar a potência de saída por meio de equações analíticas fechadas, diferentemente dos métodos de compensação capacitiva de ordem menor. Na prática, essa abordagem analítica se mostra menos útil, uma vez que os componentes eletrônicos comerciais estão disponíveis em valores discretos, enquanto as otimizações analíticas fornecem valores contínuos. Dessa forma, como veremos a seguir, a otimização com base nesse método é mais eficaz e pode ser facilmente implementada por meio de algoritmos numéricos de busca.

Resumindo as topologias de otimização capacitiva, existem três configurações principais propostas na literatura para o acoplamento indutivo ressonante com capacitores de compensação em sistemas com bobinas acopladas.

Circuito com um capacitor de compensação: essa topologia é uma extensão da análise realizada para o circuito com um único capacitor de compensação, adicionado estrategicamente na saída ou na entrada do link, a fim de anular a reatância total equivalente vista da carga ou da fonte.

Circuito com dois capacitores de compensação: essa topologia consiste em dois capacitores em cada um dos lados primário e secundário. Ela se divide em quatro tipos diferentes, dependendo da posição dos capacitores em relação às indutâncias próprias do circuito.

Circuito com quatro capacitores de compensação: essa configuração é composta por quatro capacitores de compensação, dois para cada lado primário e secundário. Existem inúmeros modelos para essa topologia, e geralmente sua análise e projeto são realizados numericamente devido à complexidade dos parâmetros elétricos envolvidos.

Uma análise comparativa das diferentes topologias de redes de dois a quatro capacitores de compensação é apresentada na literatura, ilustrando algumas delas. O método de compensação por quatro capacitores é mais abrangente, permitindo a compensação de todas as reatâncias indutivas do link por meio da rede capacitiva, além de oferecer a possibilidade de otimizar o casamento

REFERÊNCIAS

ABELLA, Crispino S. et al. Autonomous energy-efficient wireless sensor network platform for home/office automation. *IEEE Sensors Journal*, v. 19, n. 9, p. 3501-3512, 2019.

ABREU, Reinaldo Lima de. Projeto e Implementação de um Dispositivo para Transferência de Energia Sem Fios por Modos Ressonantes Autossintonizáveis. 2017. 113 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2017.

AGUIAR, João Filipe Vieira. Transferência de Energia sem fios para carregamento de baterias. 2013. Tese de Doutorado. Universidade do Minho (Portugal).

Ariffin and M. Inamori, "Influence of Mutual Inductance Measurement for High Efficiency Wireless Power Transmission," 2018 7th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), Paris, France, 2018, pp. 949-953, doi: 10.1109/ICRERA.2018.8566942.

BAIKOVA, Elena Nikolaevna. Transferência de energia sem contacto: estudo das emissões do campo elétrico. 2018. Tese de Doutorado. Universidade NOVA de Lisboa (Portugal).

BUENO, Marcelo; ASSIS, Andre K. Torres. " Cálculo de Indutância e de Força em Circuitos Elétricos". Editora Apeiron Montreal, 2ª Ed., 2015.

C. Perfecto, J. Del Ser, and M. Bennis, "Millimeter-wave V2V communications: Distributed association and beam alignment," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vo.67, no.3, pp. 2686-2697, Mar. 2018.

CARDOSO, J. R. Engenharia Eletromagnética. São Paulo: Elsevier Editora Ltda, 2011. ISBN 978-85-352-3525-8.

CHAGAS, Natalia Braun. “Modelagem da capacitância de elementos magnéticos para elevadas frequências e classes de isolamento”. Tese Doutorado em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul – Santa Maria, 2018.

D. F. Borges, J. M. Silva, A. M. de Jesus, and A. D. Silva, “Análise da eficiência da transmissão de energia elétrica sem fio / Analysis of the efficiency of wireless electric energy transmission”, BJDV, vol. 7, no. 5, pp. 53377–53399, Jun. 2021.

DE CASTRO, Wendel Riguete et al. TECNOLOGIA DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA SEM FIO (WIRELESS POWER TRANSFER). Revista Mythos, v. 15, n. 1, p. 105-117, 2021.

DIAS, Francisco Almeida Nunes Brito. Desenvolvimento de ferramenta para interligação de dispositivos utilizando protocolos industriais. 2015. Tese de Doutorado.

FERTIG, KATHARINE SCHAEFFER. Redes Industriais: Wi-Fi X IEEE 802.15.4. 2018.

FERREIRA, Filipe Guterres. Sistemas compactos de transferência de energia sem fio em campo próximo usando estruturas com abertura no plano de terra. 2021.

FLORÊNCIO, Heitor Medeiros. Modelo analítico para avaliação da estabilidade de links em redes industriais sem fio. 2019.

GARCIA, Lucas Ricken. “Determinação do desempenho de sistemas de transferência de energia sem fio sem medição direta no lado da carga”. 2022. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica e Informática Industrial) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2022.

J. C. Warren, “Industrial Networking,” IEEE Industry Applications Magazine, vol. 17, pp. 20 - 24, 2011.

M. Irwanto, Y. T. Nugraha, N. Hussin, I. Nisza, D. Perangin-Angin and H. Alam, "Modelling of Wireless Power Transfer System Using MATLAB SIMULINK," 2022 IEEE

13th Control and System Graduate Research Colloquium (ICSGRC), Shah Alam, Malaysia, 2022, pp. 21-24, doi: 10.1109/ICSGRC55096.2022.9845181.

MOTTA, Tiago da Silva. Transmissão de energia sem-fio: método de acoplamento indutivo ressonante. 2016.

NEVES, Cleonor et al. Os dez maiores desafios da automação industrial: As perspectivas para o futuro. In: II Congresso de Pesquisa e Inovação da Rede Norte Nordeste de Educação Tecnológica. 2007.

R. Zurawski, Industrial Communication Technology Handbook, Boca Raton: CRC Press, 2015.

Raza S, Faheem M, Guenes M. Industrial wireless sensor and actuator networks in industry 4.0: Exploring requirements, protocols, and challenges—A MAC survey. *Int J Commun Syst.* 2019;32:e4074.

ROGGIA, Leandro; FUENTES, Rodrigo Cardozo. Automação industrial. Santa Maria: E-tec Brasil, 2016.

ROSA, António Machuco. As origens históricas da Internet: uma comparação com a origem dos meios clássicos de comunicação ponto a ponto. 2012.

Sick - Sensor Intelligence. TBS-1DSG11506NE, 2017. Disponível em: <<https://www.sick.com/in/en/temperature-sensors/tbs/tbs-1dsg11506ne/p/p294558>>. Acesso em: 10 de junho de 2023.

SOUZA, Wanberton Gabriel de et al. Análise experimental da transmissão de energia sem fios por modos ressonantes. 2016.

T. Sauter, "The Three Generations of Field-Level Networks - Evolution and Compability Issues," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 57, pp. 3585 - 3595, 2010.

X. Zou and X. He, "Mutual Inductance of Coils for Wireless Power Transfer," 2020 Cross Strait Radio Science & Wireless Technology Conference (CSRSWTC), Fuzhou, China, 2020, pp. 1-3, doi: 10.1109/CSRSWTC50769.2020.9372471.

WANG, Yi et al. UAV-based mobile wireless power transfer systems with joint optimization of user scheduling and trajectory. *Mobile Networks and Applications*, p. 1-15, 2019.

Z. Duan, L. Tao and X. Zhang, "Energy Efficient Data Collection and Directional Wireless Power Transfer in Rechargeable Sensor Networks," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 178466-178475, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2959060.

Z. Wang, L. Duan and R. Zhang, "Adaptively Directional Wireless Power Transfer for Large-Scale Sensor Networks," in *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 34, no. 5, pp. 1785-1800, May 2016, doi: 10.1109/JSAC.2016.2551619.