

Universidade Federal da Paraíba

Centro de Energias Alternativas e Renováveis

Departamento de Engenharia Elétrica

MARIANA RODRIGUES VILLARIM

**ESTUDO DE UM SISTEMA DE CARREGAMENTO SEM FIO DE
BATERIAS VISANDO APLICAÇÃO EM VEÍCULOS ELÉTRICOS**

João Pessoa, Paraíba
Junho de 2018

MARIANA RODRIGUES VILLARIM

ESTUDO DE UM SISTEMA DE CARREGAMENTO SEM FIO DE
BATERIAS VISANDO APLICAÇÃO EM VEÍCULOS ELÉTRICOS

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao
Departamento de Engenharia Elétrica da
Universidade Federal da Paraíba como parte
dos requisitos necessários para a obtenção do
título de Engenheiro Eletricista.*

Área de Concentração: Controle e Automação

Orientador:

Professor Alexsandro José Virgínio dos Santos

João Pessoa, Paraíba
Junho de 2018

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

V722e Villarim, Mariana Rodrigues.

Estudo de um Sistema de Carregamento Sem Fio de Bateria Visando Aplicação em Veículos Elétricos / Mariana Rodrigues Villarim. - João Pessoa, 2018. 50 f. : il.

Orientação: Alexandro José dos Santos.
Monografia (Graduação) - UFPB/CEAR.

1. Veículos Elétricos. 2. Carregamento Sem Fio. 3. Eficiência. I. dos Santos, Alexandro José. II. Título.

UFPB/BC

MARIANA RODRIGUES VILLARIM

ESTUDO DE UM SISTEMA DE CARREGAMENTO SEM FIO DE BATERIAS VISANDO APLICAÇÃO EM VEÍCULOS ELÉTRICOS

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal da Paraíba como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Área de Concentração: Controle e Automação

Aprovado em ____ / ____ / _____

Professor Dr. Cícero da Rocha Souto
Universidade Federal da Paraíba
Avaliador

Professor Dr. Juan Moisés Mauricio Villanueva
Universidade Federal da Paraíba
Avaliador

Professor Me. Aleksandro José Virgínio dos Santos
Universidade Federal da Paraíba
Orientador, UFPB

Dedico este trabalho à minha família, aos que fazem parte do Departamento de Engenharia Elétrica da UFPB e a todos que lutaram ao meu lado durante a minha formação.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, meu tudo, que me ajuda a trilhar cada caminho, me concedendo alegrias e dificuldades que me fazem crescer e ser uma pessoa melhor a cada dia.

Agradeço a Maria Santíssima, de quem sou serva fiel e que está sempre intercedendo por mim e cuidando de cada passo meu.

Agradeço a minha família, pois é meu céu na terra. Agradeço todos os esforços dos meus pais que desde que nasci fazem tudo por mim. Nunca mediram esforços para que eu chegasse onde estou hoje e sei que são meus maiores torcedores. Agradeço a minha irmã Andréa, que é a maior companheira que tenho na vida e está comigo para tudo. Aos meus irmãos, André e Juliana, que mesmo à distância, estão sempre rezando pelo meu sucesso. A todos os familiares que contribuíram para que eu conseguisse realizar o meu sonho.

Aos amigos que sempre estiveram comigo dividindo as alegrias e ajudando a superar as tristezas.

A minha Paróquia Nossa Senhora de Fátima, que me proporcionou presentes que levo pra vida e que me acompanham em tudo que faço, onde conheci inúmeros amigos com os quais divido os meus dias.

Aos meus professores que me ajudaram a ser a profissional que estou me tornando, em especial ao meu orientador Alexsandro, que mostrou seu interesse e empenho por nós alunos e partilhou comigo seus conhecimentos e seu tempo.

“Onde houver trevas que eu leve a luz.”

São Francisco de Assis

RESUMO

Nos últimos anos, os veículos elétricos têm alcançado uma relevância maior no mercado, seja pelas políticas de incentivos a meios de transporte menos poluentes ou também pelo desenvolvimento de tecnologias que viabilizam a produção de veículos mais acessíveis ao consumidor final. Um dos maiores desafios tecnológicos associados aos carros elétricos são as baterias. Os modelos de baterias mais antigos proporcionavam uma baixa autonomia e consumiam um longo tempo para a recarga. Os modelos atuais ainda apresentam, mesmo que em menor escala, limitações referentes à autonomia e ao tempo de recarga, sendo recomendados para uso em ambientes urbanos e trajetos menores, se comparados aos carros comuns. A estratégia de carregamento das baterias dos veículos elétricos consiste em deixar o veículo parado enquanto as baterias são carregadas. Uma forma de aumentar a autonomia dos veículos seria carregar as baterias enquanto o veículo estiver em operação. Isso poderia ser feito por uma carga sem fio feita enquanto o veículo passa por um quebra-molas ou enquanto está parado em um semáforo. Sabe-se que a maioria dos modelos de baterias não admite cargas fracionadas no tempo; neste sentido, um banco de capacitores poderia ser usado para armazenar uma carga que possa ser usada de forma mais flexível. Carregadores sem fio são muito populares em equipamentos eletrônicos portáteis, como celulares. Estão sendo usados de forma experimental em sistemas de transporte público. Por ser um sistema de baixa eficiência na transferência de energia, não deve ser usado de forma corriqueira em um veículo elétrico, mas pode ser útil em casos específicos em que o aumento da autonomia seja mais relevante que o custo da energia, como em aplicações industriais, por exemplo. Este trabalho apresenta um breve estudo sobre carregamento de baterias sem fio visando sua aplicação em veículos elétricos. São apresentados métodos para monitorar e maximizar a eficiência no carregamento, incluindo simulações e análise de dados experimentais.

Palavras-chave: Veículos Elétricos, Carregamento sem Fio, Eficiência.

ABSTRACT

In recent years, electric vehicles have been reaching a bigger relevance in the market, due to the policies supporting the less polluting means of transport and also to the development of technologies that enable the production of vehicles more accessible to the final consumer. One of the biggest technological challenges associated with electric cars is batteries. The older battery models provided a low autonomy and took a long time to recharge. The current models still present limitations, in small scale, related to the autonomy and the time of charging, being recommended for use in urban environments and smaller routes, when compared to ordinary cars. The strategy of charging the batteries of electric vehicles is to leave the vehicle stopped while the batteries are being charged. One way to increase the autonomy of vehicles would be to charge the batteries while the vehicle is in movement. This could be done by a wireless charge made while the vehicle goes through a speed bump or while standing at a stoplight. It is known that most battery models do not admit loads that are fractionated in time; then, a bank of capacitors could be used to store a load that can be used more flexibly. Wireless chargers are very popular in portable electronic equipment such as cell phones. They are being used experimentally in public transport systems. Because it is a low-efficiency energy transfer system, it should not be used routinely in an electric vehicle, but it may be useful in specific cases where increasing autonomy is more relevant than the cost of energy, such as industrial applications, for example. This paper presents a brief study on the charging of wireless batteries for their application in electric vehicles. Methods are presented to monitor and maximize loading efficiency, including simulations and analysis of experimental data.

Keywords: Electric Vehicles, Wireless Charging, Efficiency.

ÍNDICE DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Estrutura básica de um sistema de transmissão de energia sem contato. | 17 |
| Figura 2 - Diagrama de blocos geral para um sistema de transmissão indutiva de potência. | 18 |
| Figura 3 - Estrutura básica do retificador monofásico de onda completa não controlado. | 19 |
| Figura 4 - Estrutura básica do conversor CC/CA. | 19 |
| Figura 5 - Exemplo de modulação PWM. | 20 |
| Figura 6 - Estrutura do conversor Boost. | 21 |
| Figura 7 - Circuito magnético simplificado de um transformador real. | 23 |
| Figura 8 - Circuito equivalente de um transformador real. | 24 |
| Figura 9 - Circuito equivalente de um transformador real. | 25 |
| Figura 10 - Transformador de núcleo separado em regime permanente. | 26 |
| Figura 11 - Transformador de núcleo separado em regime permanente com uma carga conectada. | 26 |
| Figura 12 - Sistema completo de transferência de potência com a adição das alternativas para aumento de eficiência. | 30 |
| Figura 13 - Configuração da topologia de compensação série-série. | 31 |
| Figura 14 - Configuração da topologia de compensação série-paralelo. | 32 |
| Figura 15 - Configuração da topologia de compensação paralelo-série. | 32 |
| Figura 16 - Configuração da topologia de compensação paralelo-paralelo. | 32 |
| Figura 17 - Fluxograma do algoritmo P&O. | 35 |
| Figura 18 - Implementação física do MPPT. | 35 |
| Figura 19 - Conversor boost com 3 segmentos. | 36 |
| Figura 20 - Núcleo de ferrite do tipo "EE". | 38 |
| Figura 21 - Curva característica BxH do material do núcleo. | 38 |
| Figura 22 - Esquemático da montagem em laboratório para análise da influência do aumento do entreferro sobre a eficiência do sistema. | 39 |
| Figura 23 - Gráfico entreferro x eficiência. | 40 |
| Figura 24 - Estruturas escolhidas para comparação em simulação. | 41 |
| Figura 25 - Resultados de simulação comparando o circuito com e sem compensação com a carga de 20 Ω | 42 |
| Figura 26 - Resultados de simulação comparando o circuito com e sem compensação com a carga de 1 Ω | 43 |
| Figura 27 - Resultados de simulação comparando o circuito com e sem compensação com a carga de 100 Ω | 43 |
| Figura 28 - Resultado de simulação do algoritmo MPPT com 10 pontos de medição. | 45 |
| Figura 29 - Resultado de simulação do algoritmo MPPT com 30 pontos de medição. | 46 |

LISTAS DE SÍMBOLOS

TIP - Transmissão Indutiva de Potência

k - Fator de acoplamento

MPPT - *Maximum Power Point Tracking*

η - Eficiência

P&O - *Perturb and Observe*

R_L - Resistência de carga

R_p - Resistência do enrolamento primário

R_s - Resistência do enrolamento secundário

TNS - Transformador de Núcleo Separado

VE - Veículo Elétrico

X_m - Reatância mútua do transformador

X_p - Reatância do enrolamento primário

X_s - Reatância do enrolamento secundário

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| Agradecimentos..... | vi |
| Resumo..... | viii |
| Abstract | ix |
| Índice de Ilustrações..... | x |
| Listas de Símbolos..... | xi |
| Sumário | xii |
| 1 Introdução..... | 13 |
| 1.1 Revisão Bibliográfica..... | 14 |
| 1.2 Objetivo | 16 |
| 1.2.1 Objetivo Geral | 16 |
| 1.2.2 Objetivos Específicos | 16 |
| 2 Embasamento Teórico..... | 17 |
| 2.1 Retificador Monofásico de Onda Completa..... | 18 |
| 2.1.1 Retificador Monofásico de Onda Completa Não Controlado..... | 18 |
| 2.2 Conversor CC/CA..... | 19 |
| 2.2.1 PWM e Controle das Chaves | 20 |
| 2.3 Conversor CC-CC - <i>Boost</i> | 21 |
| 2.4 Transformador de Núcleo Separado (TNS) | 23 |
| 2.5 Carga..... | 25 |
| 2.6 Cálculo da Eficiência do Sistema..... | 26 |
| 2.7 Sistema de Transmissão de Energia com o Veículo em Movimento | 27 |
| 3 Métodos para Aumento da Capacidade de Transferência de Energia | 30 |
| 3.1 Compensação Através de Capacitâncias..... | 30 |
| 3.2 Compensação Através da Escolha da Frequência | 33 |
| 3.3 Compensação Através do Algoritmo MPPT..... | 34 |
| 4 Resultados Experimentais e Simulações do Sistema Aplicando os Métodos para Aumento de Eficiência..... | 37 |
| 4.1 Projeto do Transformador de Núcleo Separado Análise da Influência da Variação do Entreferro Sobre a Eficiência | 37 |
| 4.2 Simulação da Compensação através de Capacitâncias..... | 40 |
| 4.3 Simulação do Algoritmo MPPT..... | 44 |
| 5 Conclusão | 47 |
| Referências Bibliográficas | 48 |
| Apêndice A..... | 50 |

1 INTRODUÇÃO

Os veículos elétricos (VE) são uma alternativa aos motores à diesel ou gasolina. Devido a tal fato, visando o seu crescimento, novas tecnologias de armazenamento de energia (baterias) estão recebendo cada vez mais investimentos.

Os governos britânico e francês, devido ao alto índice de poluição, planejam eliminar a venda de automóveis com motor à diesel ou gasolina a partir de 2040. A mesma proposta é feita pela Índia para motores à combustão, mas para o ano de 2030, e a Noruega em 2025. Porém, o mercado de veículos limpos (elétricos ou híbridos) segue com uma pequena demanda devido ao alto preço e poucos pontos de recarga.

As baterias necessitam ser frequentemente recarregadas pois possuem pequena autonomia, além do alto preço e reduzido tempo de vida útil. Como nova opção, surgiu o carregamento sem fio, a partir da transferência de energia por indução (AMIN, 2014). A transferência de energia entre os equipamentos apresentam mais defeitos ou riscos quando conectadas à rede. Sem o contato, é possível que a transferência entre a fonte e a carga seja mais segura.

A técnica de recarregamento a partir da transferência indutiva de potência (TIP), onde não há intervenção do usuário, vem sendo explorada e aplicada em algumas cidades devido às suas vantagens, tais como redução da emissão de gases poluentes e da poluição sonora, além da diminuição no tamanho das baterias utilizadas em veículos elétricos, buscando uma maior praticidade, visto que não é mais necessário ser carregada para a viagem inteira (TRIVINO-CABRERA, 2014).

Atualmente, um ponto que tem sido muito discutido é a duração do carregamento das baterias, que podem levar horas para ser concluído. Existem alternativas como a troca física do conjunto de baterias ou o uso de tecnologias ainda em desenvolvimento (baterias com comportamento de supercapacitores). Em todos os casos, é necessário que o veículo pare para que o procedimento seja realizado.

Algumas referências são encontradas quando trata-se de carregamento de veículos em movimento. Essa abordagem é válida em aplicações industriais e veículos públicos, onde o transporte percorre o mesmo caminho diversas vezes em um período curto de tempo. Em ônibus, trens e metrô, a recarga ocorreria em pontos de embarque

ou desembarque de passageiros. Com o devido planejamento, é possível garantir maior eficiência para cada trajeto, sem a necessidade de parar.

A instalação do sistema de recarregamento em estradas ou linhas de trem resolveria o maior problema dos veículos elétricos: o tempo de carregamento estacionado. Porém, a rotina de carregamento contínuo da bateria e de forma parcial ou completa poderia causar a redução na sua vida útil.

Diante do exposto, devido ao curto período de carregamento em movimento nos veículos elétricos, este trabalho tem como objetivo encontrar e testar métodos para aumentar a eficiência do sistema, como por exemplo através da escolha da frequência de operação.

1.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção, serão apresentados alguns trabalhos consultados para embasamento teórico e realização do estudo. Tesla definiu a transmissão de potência *wireless* como uma forma eficiente de conduzir potência elétrica de um ponto a outro, em um vácuo ou atmosfera, sem a necessidade de fios. Em 1893, ele apresentou o sistema sem contatos na *World Exposition of Chicago* e anos depois conseguiu patentear uma estrutura com indutores para a transferência em longas distâncias.

Ao utilizar indutores para tal sistema, Tesla identificou dois parâmetros importantes para a transmissão: o aumento da frequência para elevar a capacidade de transferência e o uso de capacitores conectados às bobinas para melhorar a eficiência.

Georgiy Babat, em 1943, propôs um sistema de transmissão indutiva de energia para um carro elétrico, o qual atingiu um rendimento de apenas 4%. Era composto por tubos de cobre no lado primário (transmissor) e o secundário estava a uma distância de 20 cm. Possuía um oscilador que fornecia centenas de Ampères de corrente a uma frequência de 50 kHz.

Na década de 80, na Califórnia, foi desenvolvido um projeto com o primeiro sistema de transmissão indutiva de potência com o automóvel em movimento. O sistema seria implementado em um pequeno ônibus com uma potência fornecida de 200 kW e frequência de 400 Hz. A eficiência obtida em tal experimento foi de aproximadamente 60%, mas possuía um estrutura grande e pesada.

Nishimura et al. (1994) propôs um sistema na área biomédica para o recarregamento de baterias de marca-passo a partir de transformadores de núcleo separado. O primário do transformador foi conectado à fonte de alimentação e o secundário alocado no interior do paciente, alimentando a bateria. No projeto, o núcleo era de ferrite com entreferro de 10 mm, operando na frequência de 20 kHz.

Em 2000, Stielau et. al apresentaram uma metodologia para transferência de energia sem contatos através de indutores acoplados. Os autores sugeriram a utilização de capacitores para a compensação da elevada indutância de dispersão, visando assim aumentar a capacidade de transferência. Também alertaram sobre a importância da escolha da frequência no projeto a ser desenvolvido.

Com o decorrer dos anos e o surgimento de novas tecnologias, buscando a maior eficiência da transferência de energia, Triviño-Cabrera et al. (2014) propôs um sistema de carregamento sem fio aplicado a veículos elétricos, com um controlador atuando para a medição da demanda de potência da bateria a partir da leitura de tensão e corrente. O sistema operava na frequência de 85 kHz e entreferro de 20 cm.

Cirimele et al. (2016) realizou um estudo baseado na transferência de potência através da indução para aplicações automotivas, citando o seu *status* de desenvolvimento e suas qualidades para ser introduzida cada vez mais no mercado de mobilidade elétrica. A transmissão de potência sem fio (WPT - *Wireless Power Transfer*) apresenta como vantagens a redução de custos e gerenciamento de baterias instaladas em veículos elétricos.

Echols et al. (2017) descreveu uma estrutura de comunicação para o recarregamento dinâmico de veículos elétricos, oferecendo uma solução para a limitação do armazenamento em baterias. A partir de estudos nos quais os veículos podem ser carregados enquanto se movimentam nas rodovias, considerando a limitação do tempo para a transferência de energia, expôs a importância de um sistema de comunicação rápido, preciso e confiável entre o controlador, a central de monitoramento e o meio de transporte. Sugeriu então duas formas de implementação da estrutura: a primeira baseada na tecnologia Wi-Fi e a segunda na tecnologia DSRC (*Dedicated Short Range Communication*), que se mostrou altamente precisa na transmissão de dados.

É possível observar que tal modelo de transmissão de energia pode ser utilizado em diversas áreas, como a biomédica, computacional (para recarregamento de baterias de *notebooks*) e automobilística.

1.2 OBJETIVO

Os objetivos deste trabalho de conclusão de curso estão divididos em objetivos gerais e específicos conforme os tópicos abaixo.

1.2.1 OBJETIVO GERAL

O principal objetivo do projeto é o estudo de um sistema que permita o carregamento de um veículo elétrico através da transferência indutiva de potência. Serão utilizados transformadores com núcleo de ferrite para representar as bobinas primária e secundária e propostos métodos para aumento de sua eficácia.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

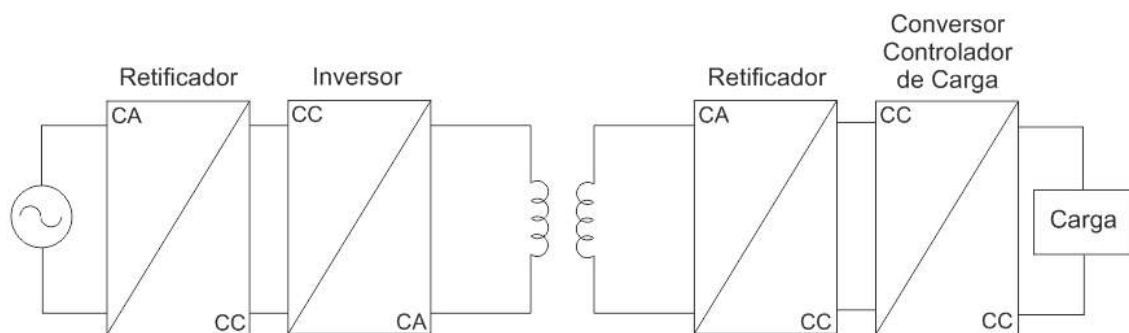
- Análise e estudo de estratégias de carregamento de baterias por indução magnética.
- Realização de ensaios para verificar a transferência de energia e estimar rendimento e eficiência do sistema proposto.
- Análise e simulação de métodos para monitoramento e maximização da eficiência no carregamento.

2 EMBASAMENTO TEÓRICO

Este capítulo apresentará a estrutura básica do sistema de transferência indutiva de potência, ou seja, sem fios, ilustrado na Figura 1. O primário do transformador é conectado à fonte de alimentação, representado por uma fonte de tensão alternada. Em seguida, passa por um retificador que tem como função converter em tensão contínua.

Após, por um inversor com estratégia de modulação por largura de pulso, responsável por alimentar o transformador com uma tensão alternada na frequência definida para a operação do projeto, visando uma maior eficiência.

Figura 1 - Estrutura básica de um sistema de transmissão de energia sem contato.

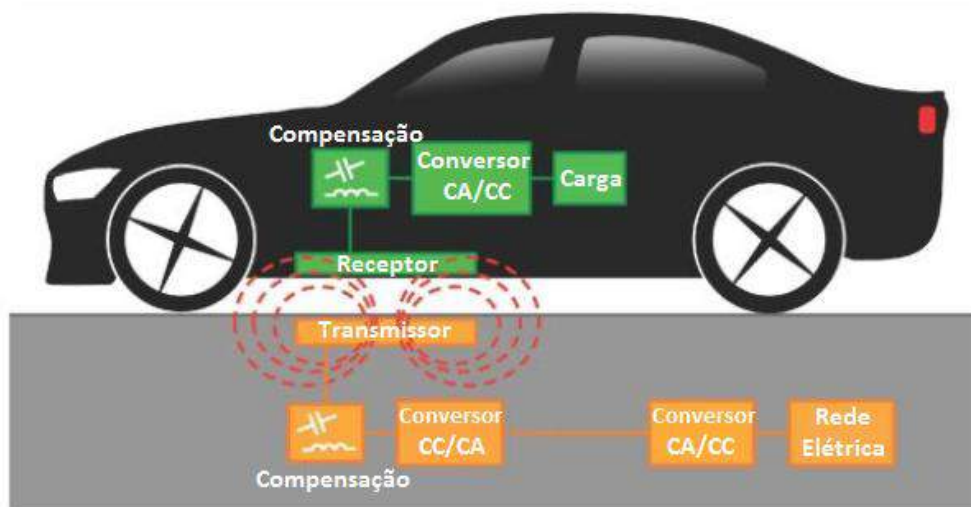


Fonte: Autor

O secundário do transformador é conectado a outro retificador de onda completa, devido à sua tensão de saída ser senoidal. Por fim, há o conversor CC-CC na topologia Boost, o qual deve elevar a tensão de acordo com a necessidade de alimentação da carga.

Na Figura 2 é ilustrado o sistema disposto como diagrama de blocos funcionais no veículo elétrico. Os capacitores são adicionados visando o aumento da eficiência. Podem ser conectados em série e/ou paralelo tanto no primário quanto no secundário.

Figura 2 - Diagrama de blocos geral para um sistema de transmissão indutiva de potência.



Fonte: Cirimele (2016)

Neste capítulo, será apresentada a base teórica das estruturas utilizadas para a construção do modelo de sistema de transferência de energia da fonte de tensão à carga, representada pelo banco de capacitores e bateria.

2.1 RETIFICADOR MONOFÁSICO DE ONDA COMPLETA

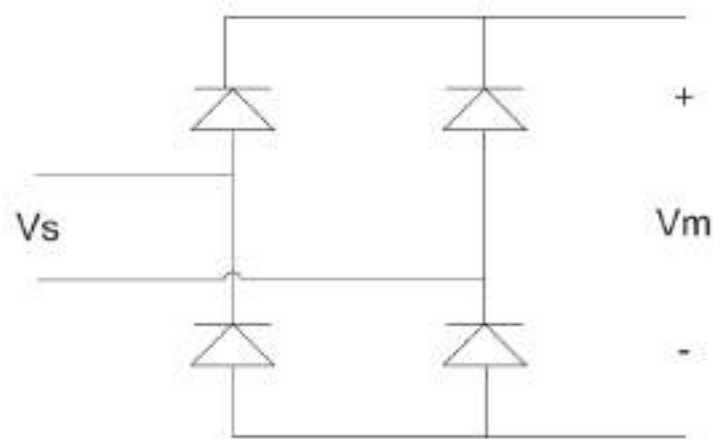
A retificação tem como objetivo converter uma tensão e corrente alternada na entrada por tensão e correntes contínuas na saída (AHMED, 2000). Pode ser classificada como não controlada, quando utiliza diodos em sua estrutura, e controlado, onde os diodos são substituídos por elementos chaveados, como por exemplo tiristores.

2.1.1 RETIFICADOR MONOFÁSICO DE ONDA COMPLETA NÃO CONTROLADO

Os retificadores de tais tipos podem ser divididos entre meia onda e onda completa. A estrutura básica do escolhido para o projeto pode ser observada na Figura 3, onde V_s representa a tensão de entrada do retificador, a qual é senoidal, e V_m a sua tensão média de saída.

Os semiciclos positivos e negativos de V_s irão encontrar um caminho disponível para o fluxo de corrente a partir dos diodos. A cada semiciclo, um par de diodos se polariza diretamente e entra em condução.

Figura 3 - Estrutura básica do retificador monofásico de onda completa não controlado.



Fonte: Autor

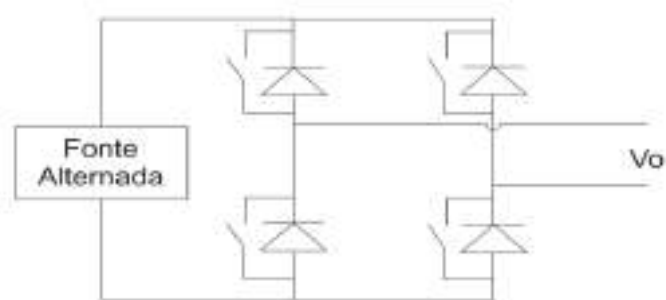
Após o retificador pode ser conectado um capacitor para exercer a função de filtro. Esse circuito é conectado após a fonte primária de tensão, que irá alimentar todo o circuito, e também após a saída do secundário do transformador.

2.2 CONVERSOR CC/CA

Os conversores CC/CA, também chamados de inversores, são utilizados para obter uma fonte alternada de valor médio nulo, de frequência constante, a partir de uma fonte contínua. Há diversos tipos de inversores, classificados de acordo com o número de fases (AHMED, 2000).

Um conversor CC/CA de tensão foi conectado ao circuito devido a necessidade do transformador ser alimentado com uma tensão alternada na frequência de operação definida para o projeto. A sua estrutura básica pode ser observada na Figura 4.

Figura 4 - Estrutura básica do conversor CC/CA.



Fonte: Autor

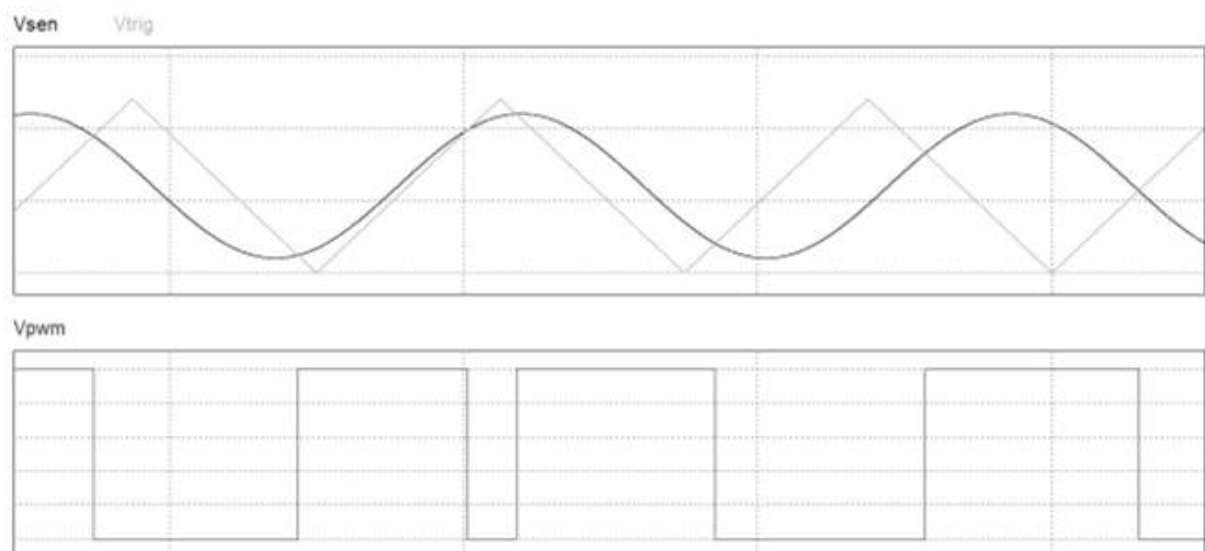
Possui quatro tiristores, sendo assim, é um conversor de ponte completa. A cada semiciclo, duas chaves passam para o estado de condução, enquanto as outras duas permanecem bloqueadas.

Nesse projeto foi escolhido uma modulação por largura de pulso de dois níveis, ou seja, a modulação é feita pela comparação entre uma onda portadora triangular de alta frequência, com um sinal senoidal de baixa frequência para gerar os sinais de controle das chaves do inversor.

2.2.1 PWM E CONTROLE DAS CHAVES

A modulação por largura de pulso (PWM) é feita para gerar os sinais de controle das chaves. Esse sinal é gerado pela comparação entre dois sinais, uma senóide modulante que deve possuir a mesma frequência da tensão CA desejada na carga e uma triangular portadora cuja frequência determina a frequência de comutação das chaves do inversor. A Figura 5 exemplifica a geração de um sinal PWM.

Figura 5 - Exemplo de modulação PWM.



Fonte: Autor

Quando o sinal da triangular é maior do que a modulante, o sinal PWM gerado é zero, quando a triangular é menor que a modulante, o sinal PWM é unitário.

2.3 CONVERSOR CC-CC - *BOOST*

Os conversores CC-CC não dependem do comportamento da carga alimentada e devem manter a tensão de saída dentro de um nível esperado e o seu chaveamento pode ser controlado por sinal modulado por largura de pulso (PWM) (RASHID, 2001).

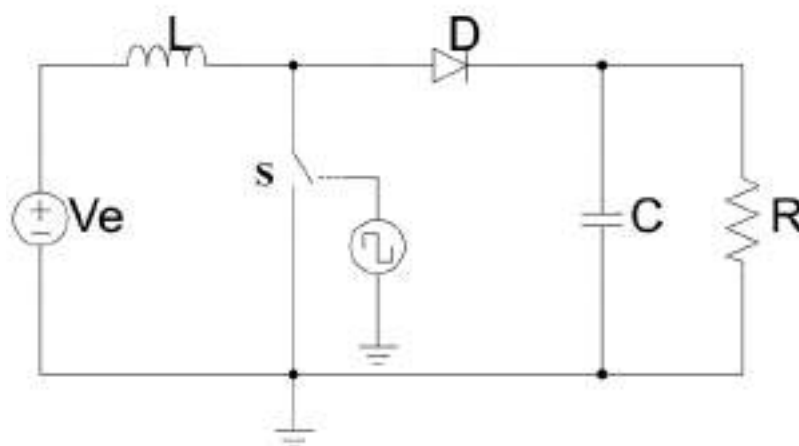
Os conversores de energia podem ser classificados como diretos (*Buck* e *Boost*), os quais não possuem elementos acumuladores de energia, ou à acumulação de energia (*Buck-Boost* e *Cûk*), onde a transferência é então feita indiretamente, através de elementos passivos, como capacitores ou indutores.

O conversor CC-CC controlado por PWM possui uma variável de controle como entrada conhecida como razão cíclica (MARTINS; BARBI, 2011), apresentada na Equação (1), que representa a razão entre o período de condução da chave e o período de funcionamento total.

$$D = \frac{t_c}{T} \quad (1)$$

Para o projeto, utilizou-se o conversor Boost e a sua estrutura básica pode ser observada na Figura 6. O conversor Boost é um conversor CC-CC utilizado para elevar a tensão média de saída, representada pela saída do retificador de ponte completa conectada ao secundário do transformador, e uma carga com característica de fonte de tensão - o banco de capacitores e bateria (MARTINS; BARBI, 2011).

Figura 6 - Estrutura do conversor Boost.



Fonte: Autor

Possui duas etapas de funcionamento. Na primeira a chave S está fechada e o indutor é magnetizado pela fonte de tensão contínua. Na segunda, a chave S permanece aberta e então a energia acumulada anteriormente é transferida à carga.

No conversor Boost, a corrente no indutor se classifica em três modos de condução: contínua, descontínua ou crítica (MARTINS; BARBI, 2011). A razão cíclica, a qual varia de zero à unidade, pode ser calculada como mostrada a seguir. O ganho estático (a) é obtido a partir da razão entre as tensões de saída (V_o) na carga e entrada do conversor (V_e), apresentado na Equação (2).

$$a = \frac{V_o}{V_e} \quad (2)$$

A energia recebida pela fonte de tensão V_o , representando a carga, é calculada pela Equação (3).

$$W_o = V_o I_L t_a \quad (3)$$

Onde I_L representa a corrente que percorre o indutor e t_a a etapa de funcionamento do conversor com a chave aberta, a qual pode ser encontrada através da diferença entre o tempo total e o tempo em que a mesma permaneceu fechada (t_c). A equação anterior pode ser determinada a partir da Equação (4).

$$W_o = V_o I_L (T - t_c) \quad (4)$$

A energia que a fonte V_e gera é calculada a partir da Equação (5).

$$W_e = V_e I_L T \quad (5)$$

Assumindo o sistema sem perdas, ao igualar as Equações (4) e (5), tem-se

$$\frac{V_o}{V_e} = \frac{T}{(T - t_c)} \quad (6)$$

Portanto, para obter o ganho do conversor em função da razão cíclica, divide-se o numerador e denominador por T e obtém-se a Equação (7).

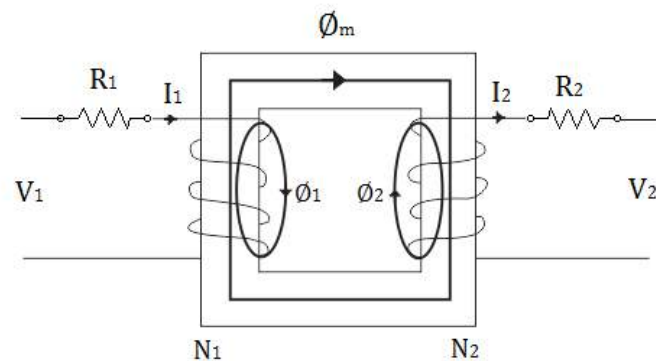
$$\frac{V_0}{V_e} = \frac{1}{(1 - D)} \quad (7)$$

2.4 TRANSFORMADOR DE NÚCLEO SEPARADO (TNS)

O transformador real monofásico é apresentado na Figura 7. Quando uma corrente percorre o enrolamento primário, a maior parte do fluxo gerado permanece no núcleo, outra parte enlaça a bobina no secundário e uma pequena parcela se dispersa, sendo assim, o rendimento não é unitário devido às perdas. O lado secundário se comporta de modo semelhante. Ambos os enrolamentos possuem resistência, representadas por R_1 e R_2 .

É necessário obter o modelo matemático em regime permanente do transformador para análise e simulação do sistema.

Figura 7 - Circuito magnético simplificado de um transformador real.



Fonte: Autor

A interação entre os fluxos magnéticos produzidos ao ser conectada uma carga gera o fluxo mútuo (Φ_m), confinado no núcleo. Para as perdas serem baixas, ou seja, um pequeno valor de fluxo de dispersão, e a eficiência alta, é necessário um bom acoplamento magnético. O fator de acoplamento magnético é determinado pela razão entre a quantidade de fluxo primário que atravessa o secundário e o fluxo total produzido pelo primário (CASSEL, 1964), como mostra a Equação (8).

$$k_1 = \frac{\Phi_{ps}}{\Phi_{ps} + \Phi_{dp}} \quad (8)$$

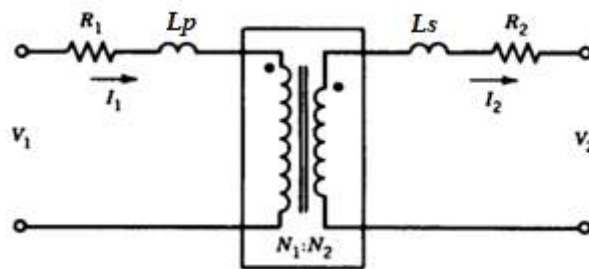
Onde k_1 representa o fator de acoplamento do lado primário, Φ_{ps} o fluxo devido a bobina primária e Φ_{dp} o fluxo de dispersão no primário. A equação para o fator de acoplamento no enrolamento secundário é obtida de modo análogo.

O fator de acoplamento total do transformador (k) é dado pela raiz quadrada do produto entre os fatores dos lados primário e secundário, observado na Equação (9).

$$k = \sqrt{k_p k_s} \quad (9)$$

O efeito do fluxo de dispersão, que varia linearmente com a corrente, pode ser representado pelas indutâncias L_p e L_s , chamadas indutâncias de dispersão. Tais componentes podem ser observados na Figura 8.

Figura 8 - Circuito equivalente de um transformador real.



Fonte: Sen (2013) - Modificada pelo autor

O cálculo das indutâncias é realizado a partir das Equações (10) e (11).

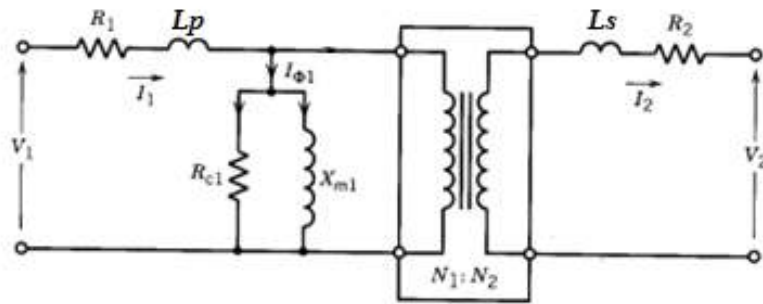
$$L_p = \frac{N_1 \Phi_{11}}{i_1} \quad (10)$$

$$L_s = \frac{N_2 \Phi_{12}}{i_2} \quad (11)$$

Onde L_p e L_s representam as bobinas no primário e secundário, respectivamente, N representa o número de espiras, Φ o fluxo gerado pela corrente que percorre a indutância e i a corrente no enrolamento.

No transformador ideal, o núcleo magnético possui permeabilidade infinita. Por outro lado, o transformador real, representado na Figura 9, apresenta permeabilidade finita e uma corrente é necessária para a geração do fluxo no núcleo, efeito representado pela indutância L_m . Além disso, existem perdas no material magnético definidas por R_c .

Figura 9 - Circuito equivalente de um transformador real.



Fonte: Sen (2013) - Modificada pelo autor

Portanto, para encontrar o circuito equivalente, o modelo matemático do sistema, é necessário calcular os parâmetros R_1 , R_2 , R_c , L_1 , L_2 e L_m , que podem ser obtidos através de ensaios em vazio ou curto circuito nos terminais do transformador.

O valor de k pode também ser encontrado pelas indutâncias presentes nos enrolamentos, a partir da Equação (12), adotando a relação de espiras unitária.

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_p L_s}} = \frac{L_m}{\sqrt{(L_p + L_m)(L_s + L_m)}} \quad (12)$$

2.5 CARGA

A carga do sistema equivale à bateria, a qual deve ser carregada e descarregada de acordo com o movimento do veículo. O veículo passa segundos, no máximo poucos minutos (no caso do embarque e desembarque de passageiros), situado na área de transferência de potência. Portanto, essa pequena quantidade de potência que seria entregue constantemente à bateria repetidas vezes pode causar a diminuição da sua vida útil.

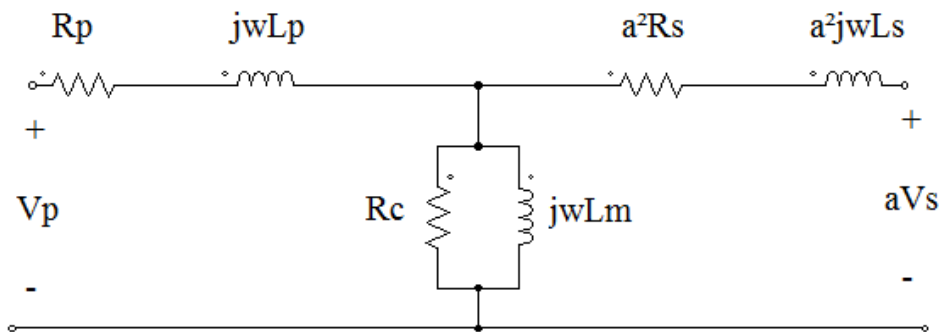
A bateria mais utilizada nas aplicações em veículos elétricos é a de íons de Litium (Li-Ion) devido a sua capacidade de armazenamento. Uma proposta é a conexão em paralelo a bateria de um banco de capacitores ou supercapacitores, os quais apresentam um ótimo desempenho na capacidade de armazenamento. Os supercapacitores apresentam a desvantagem de armazenar uma menor quantidade de energia quando comparados às baterias eletroquímicas, porém possuem uma alta eficiência e pequeno tamanho (RODRIGUES, 2012).

Sendo assim, a bateria deve ser carregada, a partir dos componentes armazenadores de energia conectados, apenas ao ser completamente descarregada, evitando assim o ciclo repetitivo de carregamento.

2.6 CÁLCULO DA EFICIÊNCIA DO SISTEMA

Após a modelagem do transformador de núcleo separado em regime permanente, nota-se que as impedâncias são afetadas de acordo com a frequência de operação escolhida. O circuito equivalente, com o secundário referido ao primário, é ilustrado na Figura 10.

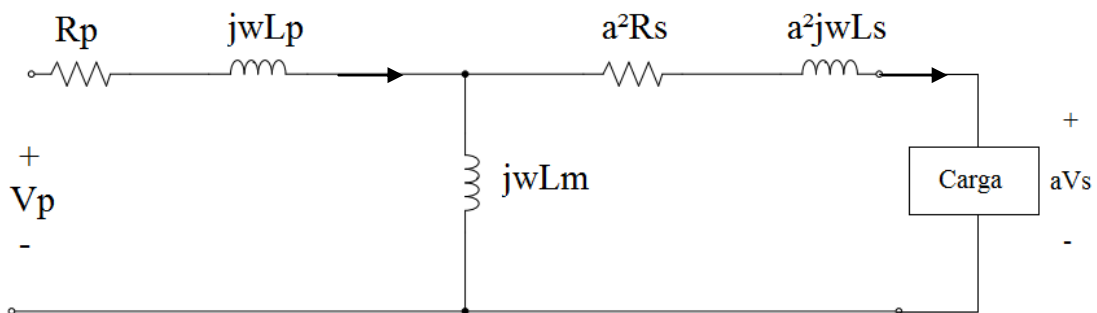
Figura 10 - Transformador de núcleo separado em regime permanente.



Fonte: Autor

A partir da figura anterior, desprezando as perdas no núcleo, representadas pela resistência R_c , pois seu valor geralmente é muito maior que a indutância mútua, e assumindo uma carga resistiva representando a bateria conectada aos terminais do secundário, obtém-se estrutura mostrada na Figura 11.

Figura 11 - Transformador de núcleo separado em regime permanente com uma carga conectada.



Fonte: Autor

Assumindo a relação de espiras unitária, ao analisar a malha do lado primário, obtém-se a Equação ((13)).

$$V_p = I_p R_p + I_p j\omega L_p + I_p j\omega L_m - I_s j\omega L_m \quad (13)$$

E analisando a malha secundária, tem-se a Equação ((14)).

$$V_s = I_s a^2 R_s + I_s j\omega L_s + I_s j\omega L_m - I_p j\omega L_m \quad (14)$$

Além disso, a tensão de saída pode também ser escrita de acordo com a Equação ((15)).

$$V_s = I_s R_{eq} \quad (15)$$

A partir da Figura 11, é possível obter a impedância equivalente vista pela fonte de tensão alternada conectada no lado primário, responsável por alimentar o circuito. A Equação ((16)) representa tal impedância.

$$Z_{eq} = R_p + jX_p + \frac{jX_m R_s + jX_m R_L - X_m X_s}{jX_m + jX_s + R_s + R_L} \quad (16)$$

Onde R_p , R_s e R_L representam as resistências dos enrolamentos primário, secundário e a carga e X_p , X_s e X_m representam as impedâncias dos enrolamentos primário, secundário e mútua, respectivamente.

A indutância mútua é dada pela Equação ((17)).

$$X_m = 2\pi f M \quad (17)$$

Onde f é a frequência de operação do sistema e $M = k\sqrt{L_p L_s}$, encontrado a partir da equação do fator de acoplamento. Em seguida, aplicando a regra do divisor de corrente no circuito, é possível encontrar:

$$\frac{I_s}{I_p} = \frac{jX_m}{R_s + R_L + j(X_s + X_m)} \quad (18)$$

Portanto, a eficiência de energia é obtida através da Equação ((19)).

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{total}} = \frac{R_L I_s^2}{R_L I_s^2 + R_s I_s^2 + R_p I_p^2} = \frac{R_L}{(R_L + R_s) + R_p \left(\frac{(R_L + R_s) + j(X_s + X_m)}{jX_m} \right)^2} \quad (19)$$

2.7 SISTEMA DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA COM O VEÍCULO EM MOVIMENTO

A indutância mútua entre um par de bobinas varia em função da geometria e da distância entre elas (SENJUTI, 2013), ou seja, conseqüentemente, os valores de eficiência e potência variam de acordo com a mudança no posicionamento dos enrolamentos do transformador.

Ao analisar a Equação (12), referente ao fator de acoplamento, observa-se que ao variar o valor do *gap*, de acordo com o movimento do veículo, existirão valores específicos para as indutâncias do circuito, as quais modificarão o valor do fator de acoplamento e da eficiência.

Lopes (2013) estudou a influência da variação do entreferro em relação ao fator de acoplamento e a alguns componentes do circuito, tais como indutâncias e resistências do transformador. Através de ensaios, o resultado obtido para a variação do fator de acoplamento em relação à distância dos enrolamentos é apresentado na Tabela 1 a seguir.

Tabela 1 - Comportamento do fator de acoplamento função do entreferro.

| Entreferro (mm) | Fator de Acoplamento (k) |
|-----------------|--------------------------|
| 2 | 0,673 |
| 3 | 0,612 |
| 4 | 0,545 |
| 5 | 0,494 |
| 6 | 0,456 |
| 7 | 0,412 |
| 8 | 0,383 |
| 9 | 0,349 |
| 10 | 0,322 |

Fonte: Lopes (2013).

Após essa análise, Lopes (2013) analisou o comportamento do TNS em função da distância entre os núcleos. A indutância de magnetização (L_m) decresceu o seu valor de acordo com o aumento do entreferro. As indutâncias de dispersão (L_p e L_s) se comportaram de forma contrária: com o aumento da distância entre os núcleos, houve também o aumento nos seus valores. As resistências no primário e secundário não sofreram alterações com o aumento do *gap*.

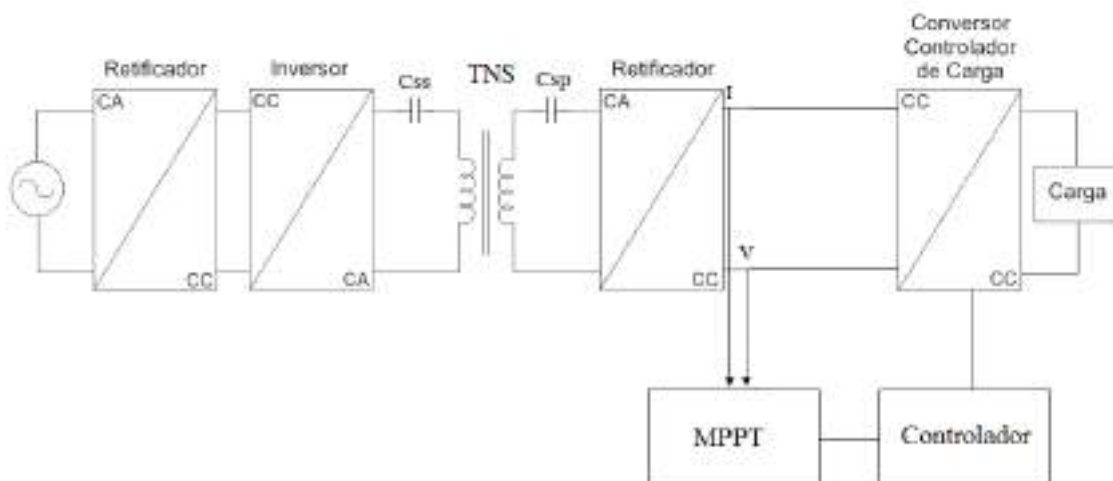
No trabalho, para representar o movimento do veículo, o modelo "dinâmico", será utilizado o equacionamento feito para o transformador "estático", e então analisado em determinados pontos, afastados entre si, durante o trajeto do automóvel, devido à simplicidade na análise.

Um dos principais fatores que afeta a transmissão *wireless* é o posicionamento das bobinas transmissora e receptora. Porém, segundo Zhixin et al. (2010), quando o deslocamento nos eixos possuem a mesma ordem de grandeza do entreferro, não há alteração significativa no equacionamento do transformador. Uma aplicação interessante para o projeto e que varia apenas um eixo é o sistema instalado em linhas de trem.

3 MÉTODOS PARA AUMENTO DA CAPACIDADE DE TRANSFERÊNCIA DE ENERGIA

Neste capítulo, após o estudo da estrutura básica do sistema de transferência de potência, será demonstrado o desenvolvimento do projeto de um transformador de núcleo separado e serão propostos métodos para o aumento da eficiência do carregamento de baterias em veículos elétricos. O sistema completo, com a adição das alternativas propostas, é ilustrado na Figura 12. Os módulos serão descritos em seguida.

Figura 12 - Sistema completo de transferência de potência com a adição das alternativas para aumento de eficiência.



Fonte: Autor

3.1 COMPENSAÇÃO ATRAVÉS DE CAPACITÂNCIAS

Os transformadores de núcleo separado apresentam a desvantagem de possuir uma alta reatância de dispersão, resultando em um fator de acoplamento fraco e em uma baixa eficiência. Com o modelo matemático em regime permanente, existem alternativas para a compensação de alguns efeitos causados pelas impedâncias.

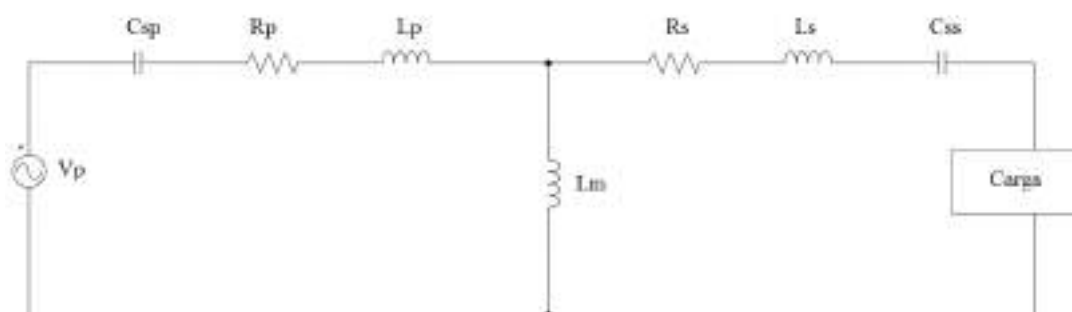
Capacitâncias podem ser adicionadas em ambos os lados do transformador e conectadas em série ou paralelo, de acordo com a sua devida funcionalidade. Existem quatro topologias básicas de compensação, ilustradas na Figura 13, Figura 14, Figura 15 e Figura 16: série-série, série-paralelo, paralelo-série e paralelo-paralelo, respectivamente. Neste tópico serão explicados os locais e motivos da adição de cada capacitância.

As capacitâncias conectadas em série e paralelo no primário possuem a função de corrigir o fator de potência. No secundário, as capacitâncias série e paralelo proporcionam um aumento na tensão de saída e na eficiência do sistema (LOPES, 2013).

Nos terminais do enrolamento primário, para aplicações envolvendo longos caminhos, como por exemplo trens e ônibus, é recomendado a compensação série. Quando a fonte de alimentação alternada necessita ser reduzida, é recomendado a compensação paralela. Em seguida, é definido que para o enrolamento secundário as compensações série e paralela são indicadas para o carregamento de cargas DC (STIELAU, 2000).

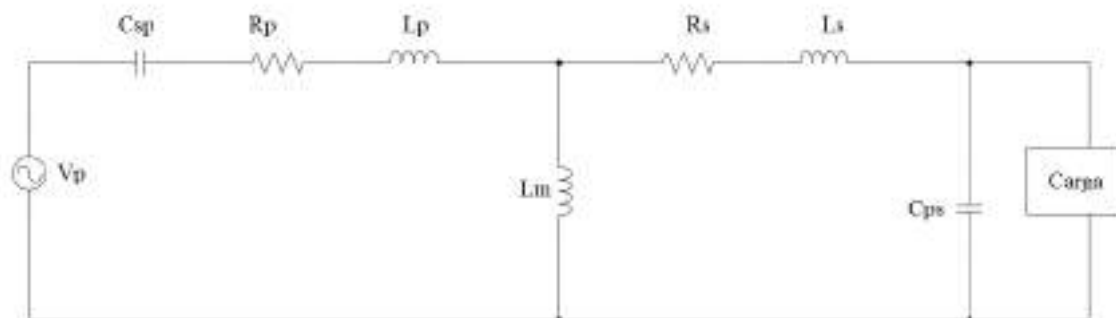
A eficiência máxima do sistema é possível ser obtida quando há ressonância. A ressonância ocorre quando as impedâncias nas bobinas transmissora e receptora estão na mesma frequência de operação. Portanto, os capacitores e indutores irão cancelar os seus efeitos, resultando no circuito apenas com característica resistiva. Sendo assim, é necessário compensar as indutâncias dos enrolamentos através de capacitores.

Figura 13 - Configuração da topologia de compensação série-série.



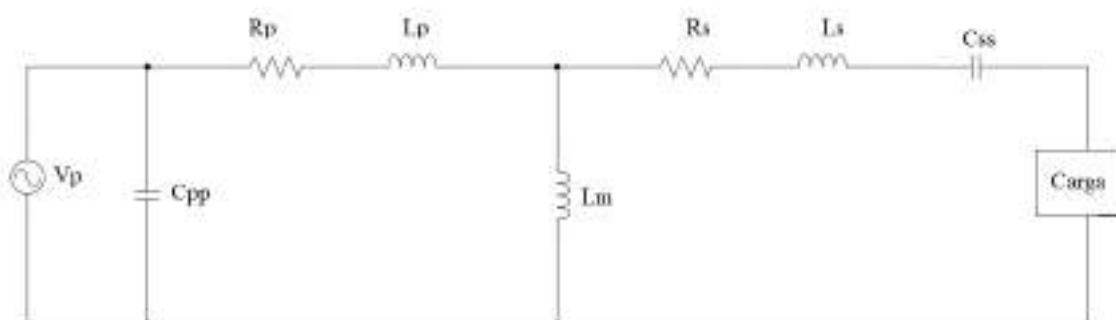
Fonte: Autor

Figura 14 - Configuração da topologia de compensação série-paralelo.



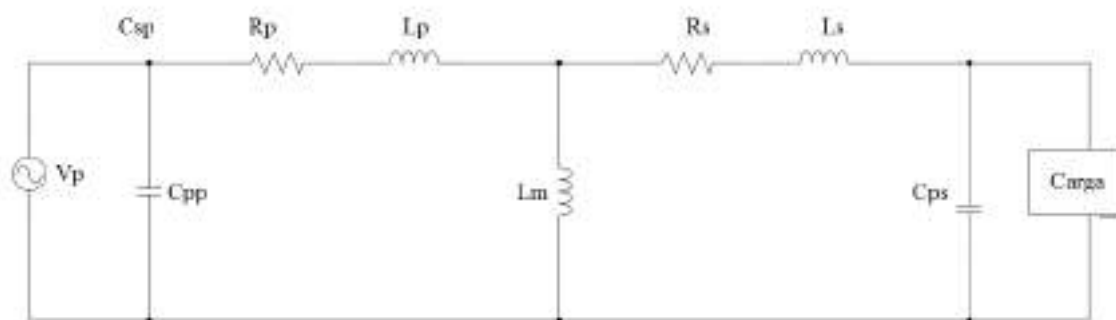
Fonte: Autor

Figura 15 - Configuração da topologia de compensação paralelo-série.



Fonte: Autor

Figura 16 - Configuração da topologia de compensação paralelo-paralelo.



Fonte: Autor

Os valores dos capacitores são calculados de acordo com as Equações ((20) e (21).

$$C_{sp} = \frac{1}{L_p \omega_0^2} \quad (20)$$

$$C_{ss} = \frac{1}{L_s \omega_o^2} \quad (21)$$

Onde ω_o representa a frequência angular de operação. Adotando a compensação série-série para o projeto, e com os capacitores e indutores cancelando os seus efeitos para estarem em ressonância, tem-se as Equações ((22) e ((23).

$$X_{Csp} + X_p + X_m = 0 \quad (22)$$

$$X_{Css} + X_s + X_m = 0 \quad (23)$$

Portanto, ao aplicar um divisor de corrente para em seguida encontrar a eficiência:

$$\frac{I_s}{I_p} = \frac{jX_m}{R_s + R_L + j(X_s + X_m + X_{Css})} = \frac{jX_m}{R_s + R_L} \quad (24)$$

Sendo assim, a partir da Equação ((25), calcula-se a eficiência do circuito com as capacitâncias de compensação.

$$\eta_{compensada} = \frac{P_{out}}{P_{total}} = \frac{R_L I_s^2}{R_L I_s^2 + R_s I_s^2 + R_p I_p^2} = \frac{R_L}{(R_L + R_s) + R_p \left(\frac{(R_L + R_s)}{jX_m} \right)^2} \quad (25)$$

3.2 COMPENSAÇÃO ATRAVÉS DA ESCOLHA DA FREQUÊNCIA

A partir das equações do transformador em regime permanente, nota-se que a tensão de saída e rendimento são alterados de acordo com a variação da frequência.

A frequência de operação é um importante fator para o principal objetivo do projeto. Sua escolha baseia-se em alguns trabalhos encontrados na literatura, os quais utilizam frequências que variam de 2 kHz a 200 kHz. Será definido um intervalo de operação e, então, avaliada a transferência de energia para ser encontrado o ponto de maior eficiência.

Em baixas frequências, o sistema opera com menos perdas por comutação e no núcleo, porém necessita de núcleos maiores. Por outro lado, em altas frequências, o transformador aumenta a resistência dos condutores, mas reduz o tamanho do núcleo e aumenta a reatância de magnetização, que diminui as perdas na resistência de dispersão do primário. Sendo assim, a faixa de frequência escolhida para aplicação no projeto é de

5 kHz a 15 kHz. É um fator que deve ser escolhido com atenção às especificações de tensão mínima para suprir a carga.

3.3 COMPENSAÇÃO ATRAVÉS DO ALGORITMO MPPT

O algoritmo MPPT - *Maximum Power Point Tracking* - é um tipo de controlador de carga amplamente utilizado em diversos projetos, principalmente em sistemas fotovoltaicos para garantir a máxima geração de energia e possui diversas maneiras de implementação. Sendo assim, mesmo com o movimento do sol, o algoritmo se ajusta buscando sempre a posição de maior incidência de radiação solar.

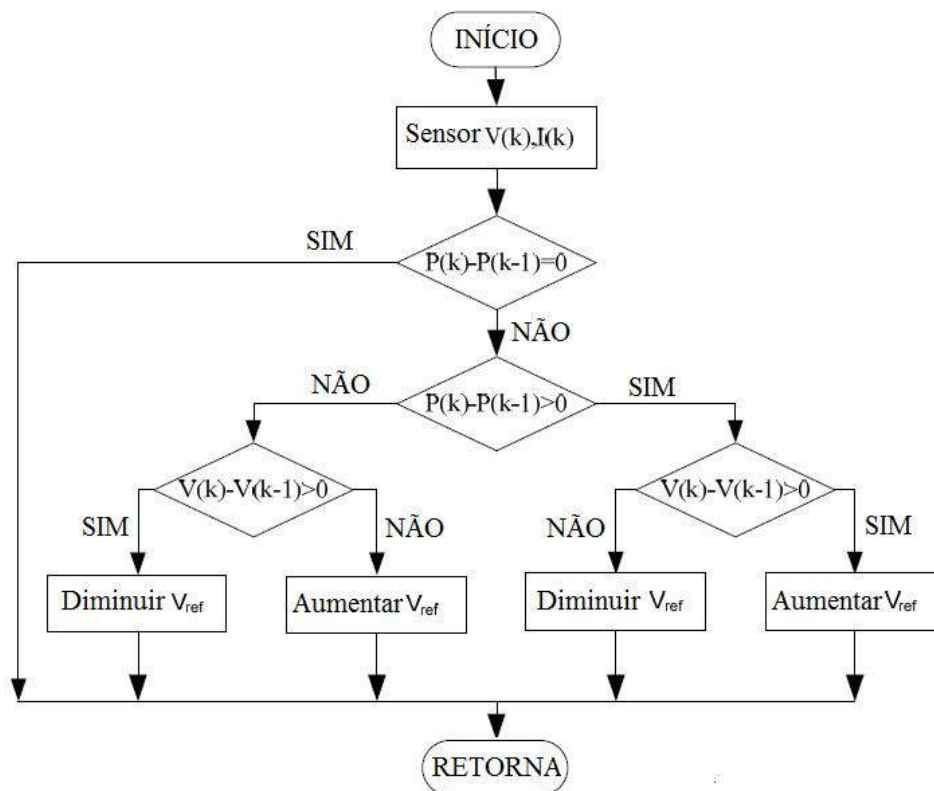
Trazendo para a realidade do projeto, o sistema seria implementado com o algoritmo aplicado à carga para, mesmo com o movimento do veículo, encontrar o ponto de máxima transferência de energia e aplicar essa transferência à bateria conectada na saída. O programa deve analisar a situação e encontrar a melhor solução, ou seja, o "ponto ótimo".

O MPPT possui diversos possíveis métodos de implementação, como o da tensão constante, o qual possui um sensor de tensão e mantém o mesmo valor de tensão na carga, o da condutância incremental (IC), que necessita sensores de tensão e corrente, porém não calcula a potência, entre outros. O método escolhido para o projeto foi o *Perturb & Observe* - P&O, exposto na Figura 17.

Pelo fluxograma mostrado, observa-se o funcionamento do algoritmo proposto. O programa lê a tensão e corrente do sistema através de sensores e então calcula a potência. O valor de potência é calculado para determinado ponto e comparado com o anterior, se diferente de zero, compara-se as tensões lida e anterior, para então incrementar ou decrementar o valor de referência.

O método P&O foi escolhido devido a sua simplicidade de implementação. Em veículos elétricos, a tensão e corrente podem ser lidas e monitoradas a partir de um dispositivo específico conectado à bateria, como por exemplo o bq76PL455A-Q1.

Figura 17 - Fluxograma do algoritmo P&O.

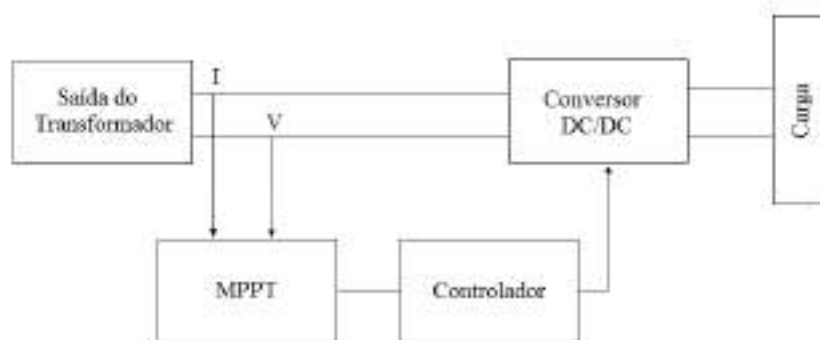


Fonte: Matlab® - Modificado pelo Autor

Portanto, ao aplicar o algoritmo no sistema de recarregamento de baterias, tendo as grandezas conhecidas a partir de dispositivos de monitoramento, o cálculo da potência pode ser realizado a partir de um *software* e encontra-se o ponto de máxima transferência de potência. Ao encontrar tal ponto, o sistema deve se ajustar controlando a tensão para manter-se sempre na máxima transferência.

O MPPT é implementado no sistema de transmissão de potência acordo com a Figura 18.

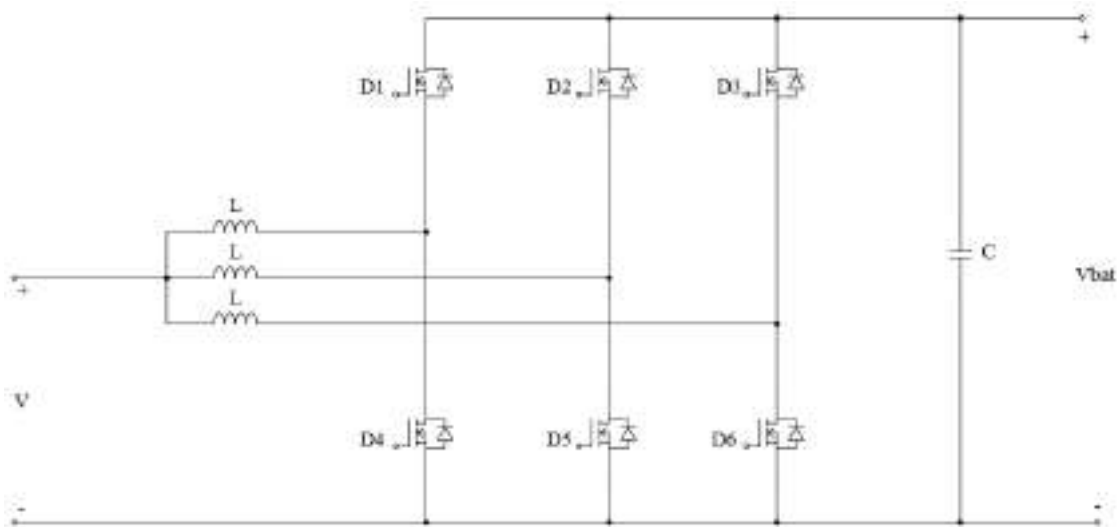
Figura 18 - Implementação física do MPPT.



Fonte: Autor

O conversor DC/DC, responsável por entregar a tensão necessária para carregar a bateria, pode ser projetado com mais segmentos de chaveamento, como ilustra a Figura 19.

Figura 19 - Conversor boost com 3 segmentos.



Fonte: Autor

Sendo assim, as chaves D4, D5 e D6 devem chavear com razão cíclica (D) e D1, D2 e D3 devem permanecer em estado de bloqueio para evitar uma corrente muito alta aplicada à carga, como medida de segurança. O comando dos MOSFETS é através de um sinal PWM, feito de maneira que as chaves sejam ativas em momentos distintos.

A razão cíclica é encontrada a partir da Equação ((26)).

$$D = \frac{V_{\text{bat}} - V_{\text{ref}}}{V_{\text{bat}}} \quad (26)$$

4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS E SIMULAÇÕES

DO SISTEMA APLICANDO OS MÉTODOS PARA

AUMENTO DE EFICIÊNCIA

Os métodos citados anteriormente foram simulados para observação dos seus comportamentos e verificação da viabilidade de aplicação. Em experimento físico, realizado em laboratório, foi analisada a influência do aumento do *gap* no comportamento da eficiência.

4.1 PROJETO DO TRANSFORMADOR DE NÚCLEO SEPARADO

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DO ENTREFERRO

SOBRE A EFICIÊNCIA

Os transformadores transportam energia elétrica de um circuito elétrico para outro através de acoplamento magnético, sendo assim, isolados eletricamente. O seu funcionamento baseia-se na indução eletromagnética, onde a corrente é induzida no secundário a partir da variação do fluxo no primário.

O transformador de núcleo separado se difere do comum em alguns pontos. Entre eles, o primeiro apresenta um baixo fator de acoplamento devido aos valores próximos das indutâncias de magnetização e dispersão.

A classe de material escolhida foi a de óxido de ferro com outros materiais metálicos, também conhecida como ferrite, as quais saturam com baixa densidade, porém operam em altas frequências e possuem alta resistividade, reduzindo a perda por correntes parasitas e por histerese (GARCIA, 2010). O tipo de núcleo, devido à disponibilidade em laboratório, foi o "EE", como mostra a Figura 20.

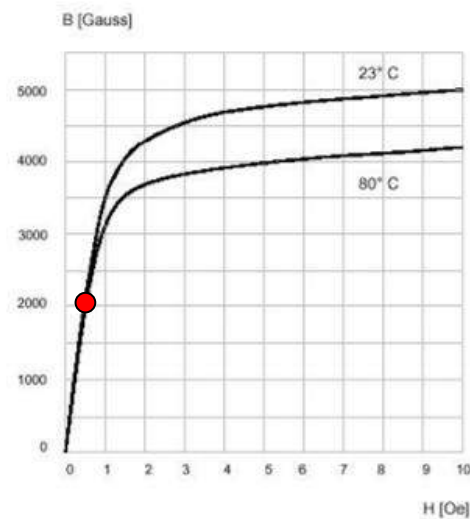
Figura 20 - Núcleo de ferrite do tipo "EE".



Fonte: Direct Industry

Cada material magnético possui um limite máximo de quanto fluxo pode ser gerado antes de atingir a saturação. Com as dimensões do núcleo, a curva de magnetização que o representa é ilustrada na Figura 21. Sendo assim, o valor escolhido para a densidade máxima (B_{\max}) corresponde ao ponto vermelho, equivalente a 0,2 T.

Figura 21 - Curva característica BxH do material do núcleo.



Fonte: Thornton (2015) - Modificada pelo autor

A Tabela 2 apresenta os dados obtidos através de ensaios do transformador com núcleo de ferrite do tipo "EE".

Tabela 2 - Dados do transformador utilizado nos experimentos.

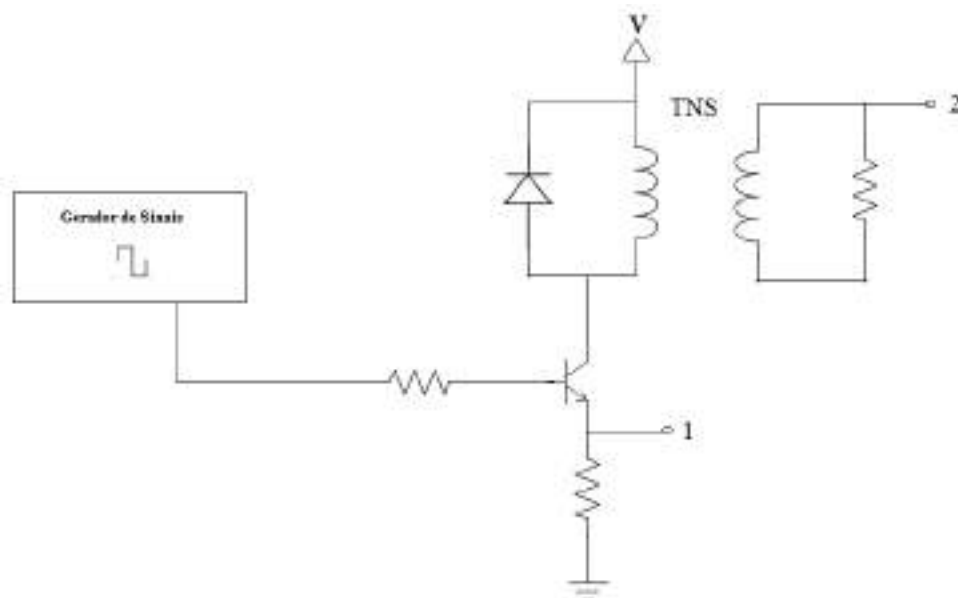
| | |
|----------------|------|
| Tensão Nominal | 30 V |
|----------------|------|

| | |
|---------------------------------------|----------------|
| Corrente Nominal | 1,67 A |
| Potência Nominal | 50 W |
| Tipo de núcleo | NEE-42-21-20 |
| Frequência | 15 kHz |
| Relação de espiras | 1:1 |
| Resistência do enrolamento primário | 0,153 Ω |
| Resistência do enrolamento secundário | 0,06 Ω |

Então, pode-se observar que para cada decisão relacionada ao projeto do transformador, há uma série de compromissos a serem analisados, como preço e eficiência.

Em seguida, foi realizado um experimento para verificar o comportamento do modelo do transformador em diversas posições, representando o veículo elétrico em movimento e analisar a influência da variação do *gap* sobre a eficiência. O esquemático da montagem em laboratório pode ser vista na Figura 22.

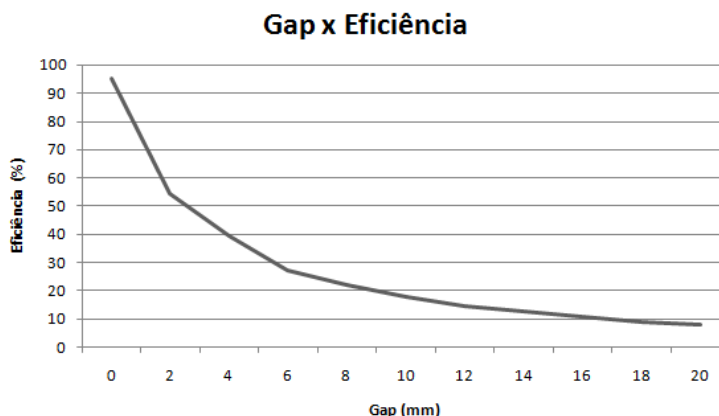
Figura 22 - Esquemático da montagem em laboratório para análise da influência do aumento do entreferro sobre a eficiência do sistema.



Fonte: Autor

O gerador de sinais fornecia uma onda na frequência desejada de operação, e então eram comparadas as tensões de entrada e saída no TNS, representadas pelos pontos 1 e 2, respectivamente. A Figura 23 ilustra o resultado do ensaio.

Figura 23 - Gráfico entreferro x eficiência.



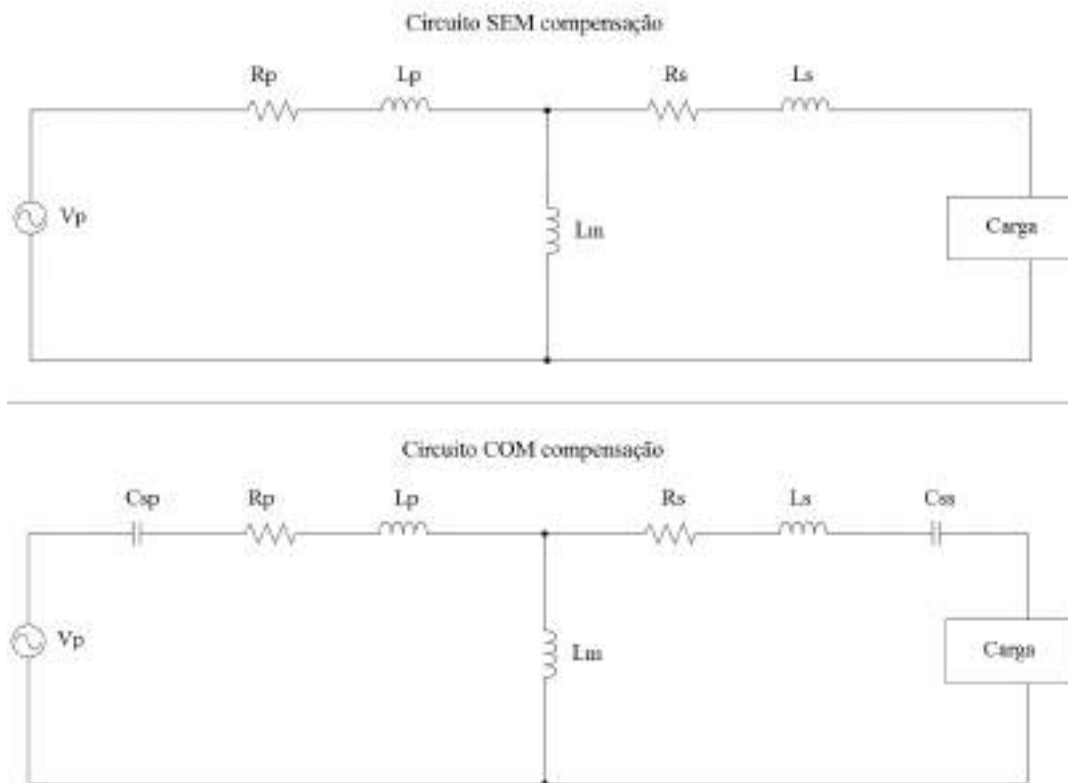
Fonte: Autor

Ao analisar o gráfico, é possível observar uma queda considerável na eficiência com o aumento da distância entre os enrolamentos do transformador.

4.2 SIMULAÇÃO DA COMPENSAÇÃO ATRAVÉS DE CAPACITÂNCIAS

Para a simulação, realizada no *software* numérico Matlab®, foram considerados os valores dos componentes obtidos através de ensaios em laboratórios. Para as indutâncias mútua e dos enrolamentos primário e secundário, as quais não foram encontradas com os ensaios, foram utilizados valores estimados na literatura. A configuração escolhida de compensação foi a série-série, vista na Figura 24, na qual as equações foram definidas no capítulo anterior.

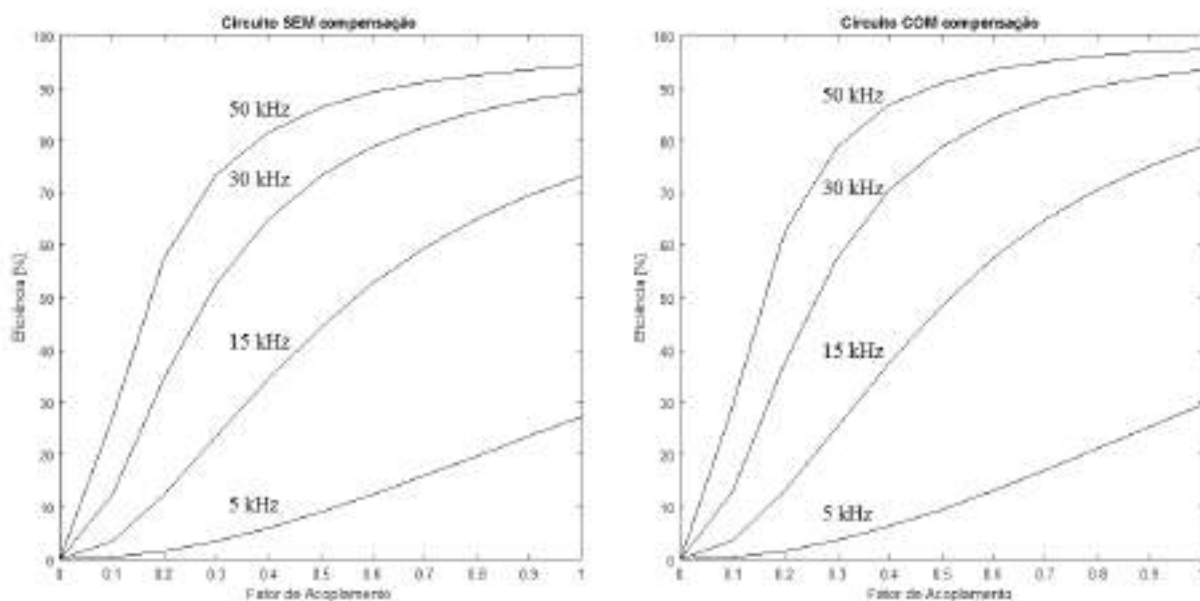
Figura 24 - Estruturas escolhidas para comparação em simulação.



Fonte: Autor

A Figura 25 ilustra o efeito da variação de eficiência com relação a frequência e fator de acoplamento (k). Na simulação foram adotados valores fixos de frequência em 5 kHz, 15 kHz, 30 kHz e 50 kHz, e a carga em 20 Ω .

Figura 25 - Resultados de simulação comparando o circuito com e sem compensação com a carga de 20Ω .



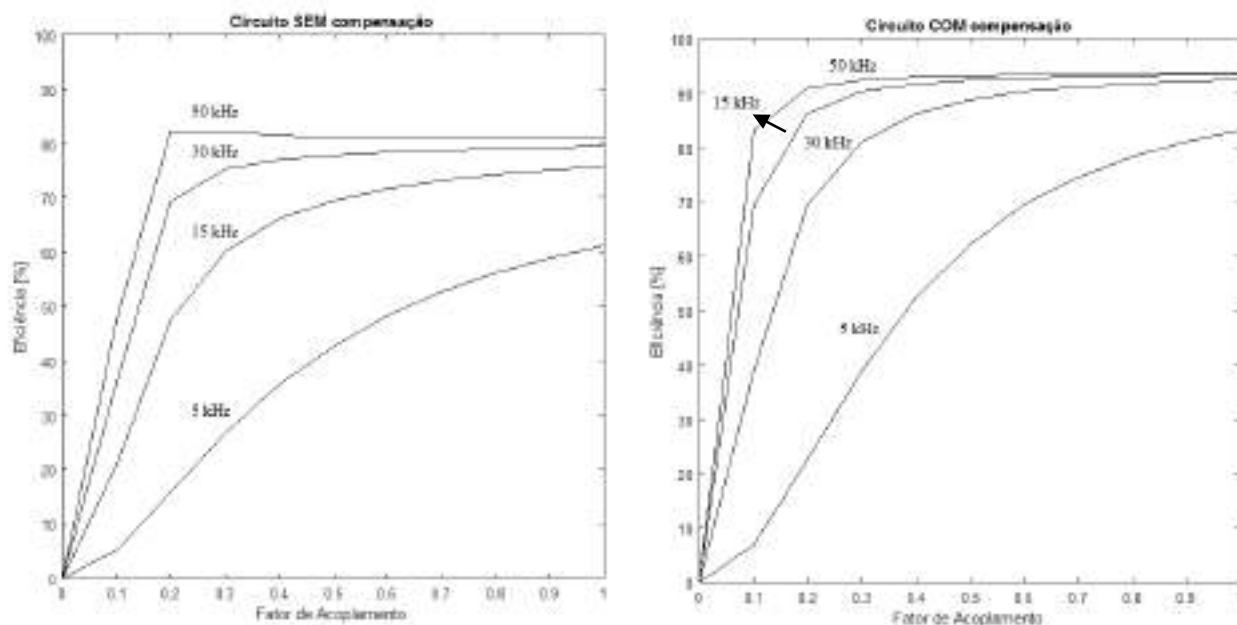
Fonte: Autor

É possível observar o aumento da eficiência com a implementação da estrutura de compensação e também da frequência. O código do Matlab® referente à simulação da dependência da eficiência com relação à frequência e fator de acoplamento encontra-se no Apêndice A.

Com a carga de 20Ω , a eficiência, na frequência de operação escolhida para o projeto de 15 kHz e com máximo fator de acoplamento, aumentou de 73,25% para 78,86%.

Ao modificar o valor da carga para 1Ω , obtém-se as curvas ilustradas na Figura 26. Para a frequência de 15 kHz e fator de acoplamento unitário, a eficiência acresce 16,11% quando compara-se o circuito sem compensação, que possui eficiência de 75,85%, com o circuito com capacitâncias conectadas em série, que alcança 92,51%.

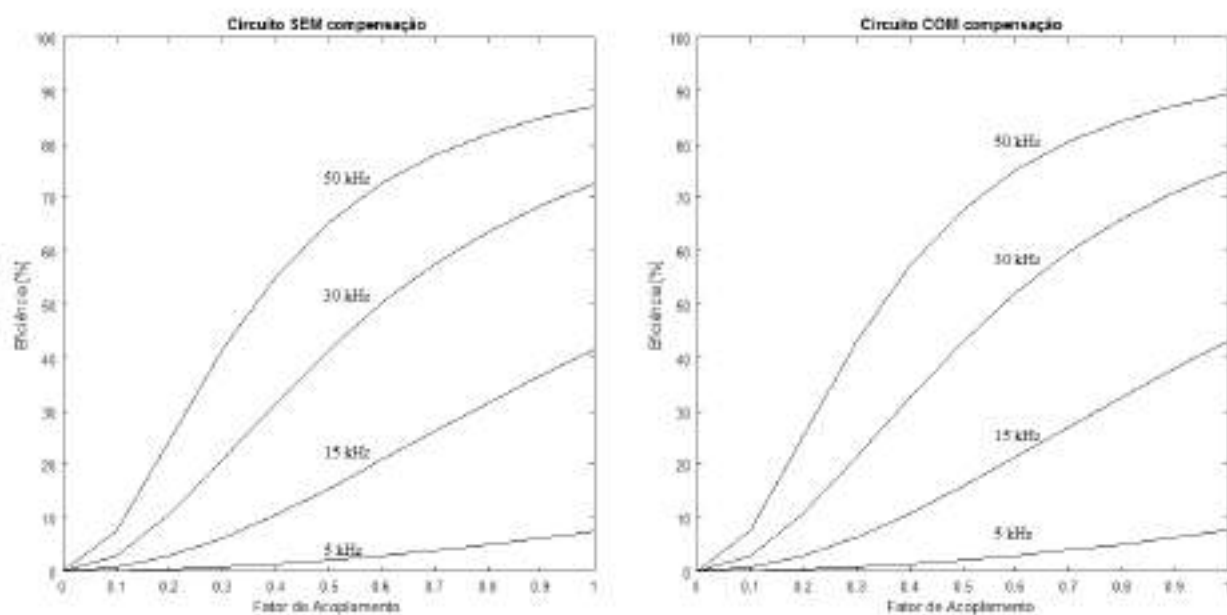
Figura 26 - Resultados de simulação comparando o circuito com e sem compensação com a carga de 1Ω .



Fonte: Autor

Por fim, aumentando a carga para 100Ω , tem-se as curvas representadas na Figura 27. Com a carga de 100Ω , em 15 kHz e k unitário, a eficiência aumenta de 41,52% para 43,16%.

Figura 27 - Resultados de simulação comparando o circuito com e sem compensação com a carga de 100Ω .



Fonte: Autor

Para demonstração, foram consideradas as condições ideais dos componentes, como o fator de acoplamento unitário. Foram adicionadas capacitâncias de compensação para otimização do transformador. A Tabela 3 compara os resultados obtidos entre as estruturas.

Tabela 3 - Resultados obtidos a partir da simulação dos efeitos das capacitâncias de compensação.

| Carga (Ω) | Frequência (kHz) | Eficiência - Circuito sem compensação (%) | Eficiência - Circuito com compensação (%) |
|--------------------|------------------|---|---|
| 1 | 5 | 59,83 | 81,26 |
| 1 | 15 | 74,34 | 90,45 |
| 1 | 30 | 77,94 | 91,42 |
| 1 | 50 | 79,34 | 91,62 |
| 20 | 5 | 27,24 | 29,48 |
| 20 | 15 | 73,25 | 78,86 |
| 20 | 30 | 89,03 | 93,39 |
| 20 | 50 | 94,14 | 97,24 |
| 100 | 5 | 7,62 | 7,78 |
| 100 | 15 | 41,52 | 43,16 |
| 100 | 30 | 72,65 | 75,18 |
| 100 | 50 | 87,13 | 89,33 |

Fonte: Autor

É possível observar que ocorreu o acréscimo da eficiência de acordo com a implementação do circuito de compensação através da adição de capacitâncias, mostrando-se uma possível e vantajosa alternativa. Logo, os resultados estão de acordo com o esperado.

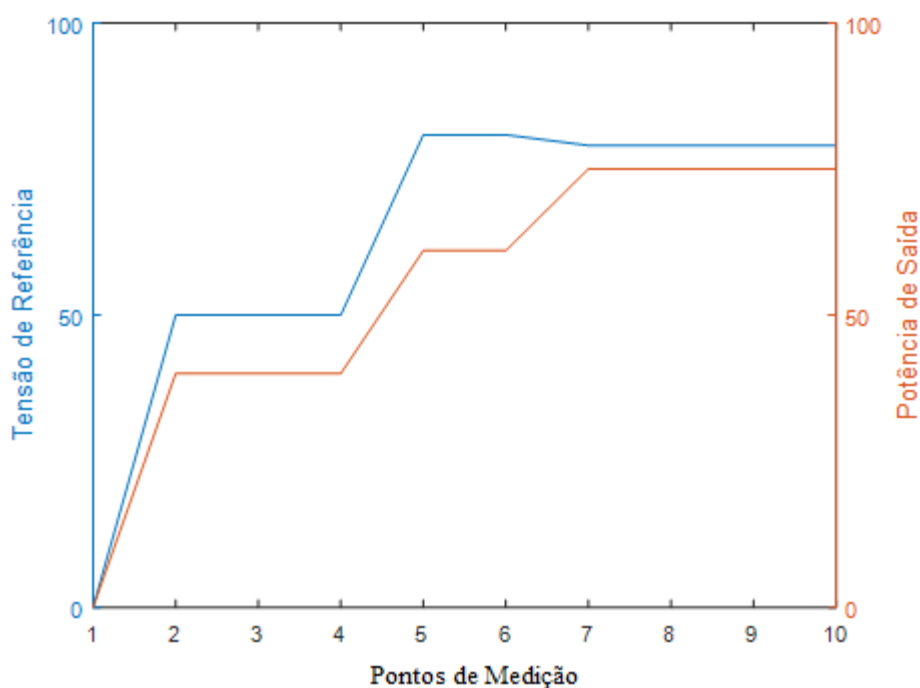
4.3 SIMULAÇÃO DO ALGORITMO MPPT

A simulação do algoritmo para encontrar o ponto de transferência máxima de potência foi realizada através do *software* numérico Matlab®. O código foi desenvolvido a partir do fluxograma visto anteriormente na seção 3.4.

Foi desenvolvido um controle de tensão para a mesma se manter onde a potência é maior, até que, a partir das leituras dos sensores, surja um novo "ponto ótimo". Nesse caso, o programa consiste em um monitoramento da potência e controle de referência e, conseqüentemente, da saída.

As tensões e correntes, para ser possível o cálculo da potência e análise do comportamento do programa computacional no sistema, foram geradas aleatoriamente. Definiu-se, para primeiro teste, dez pontos de medição, representando a função dos sensores. A Figura 28 ilustra o resultado obtido. Caso a potência atual seja maior que uma determinada de referência, a tensão na qual foi encontrado tal ponto se torna a nova tensão de referência.

Figura 28 - Resultado de simulação do algoritmo MPPT com 10 pontos de medição.



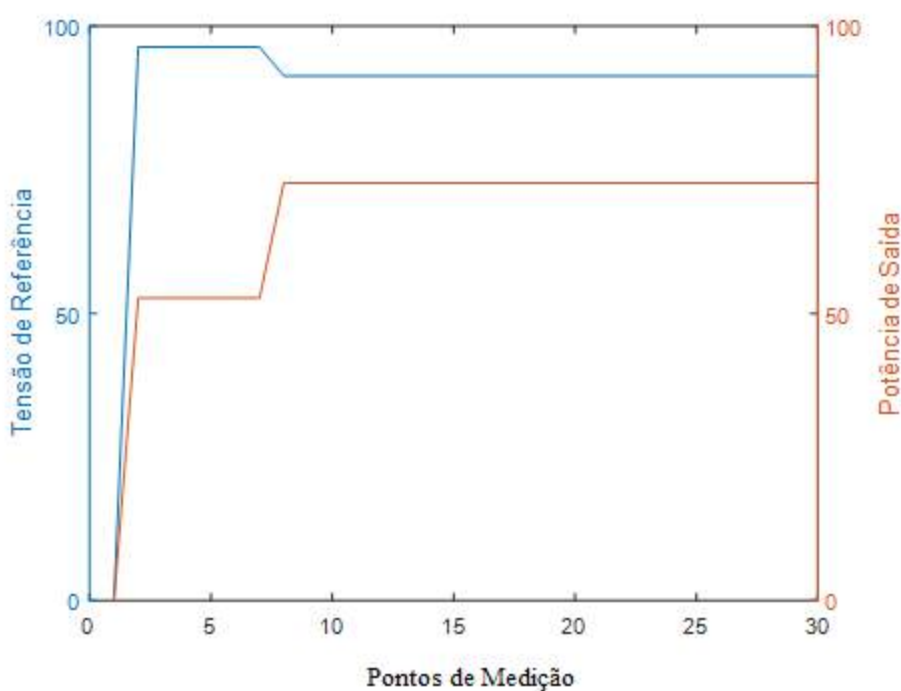
Fonte: Autor

Se a potência de entrada for menor que a referência atual, a tensão de saída é alterada para ter o valor da tensão de referência e então calcula-se a nova razão cíclica. Dessa forma, ocorre o monitoramento tanto da entrada quanto da saída. A partir do gráfico, percebe-se que a tensão no quinto ponto de medição elevou-se, porém, como foi

possível manter a potência mesmo com uma tensão menor, esta se tornou a nova tensão de referência.

Em seguida, simulou-se novamente com trinta pontos de medição, como observado na Figura 29. O sistema funciona do mesmo modo, sempre buscando a maior transferência de energia entre os enrolamentos do transformador e controlando a tensão de saída na carga. Após determinado ponto, percebe-se que ocorreu a estabilidade da transferência no "ponto ótimo".

Figura 29 - Resultado de simulação do algoritmo MPPT com 30 pontos de medição.



Fonte: Autor

A partir das simulações realizadas, foi possível observar a eficácia do sistema de monitoramento e controle dos valores de tensão e potência de referência e de saída para encontrar e se manter no ponto de maior transferência de potência.

5 CONCLUSÃO

Esse trabalho estudou a estrutura básica e implementação física do sistema de carregamento por indução magnética de baterias aplicado a veículos elétricos. Em seguida, testou a eficácia de métodos para o aumento da eficiência do sistema, interpretando os resultados para verificar a validade de suas implementações no sistema real.

O estudo apresentou duas possíveis implementações. Na primeira, utilizou-se o método de compensação através da adição das capacitâncias no circuito do transformador de núcleo separado. Como segunda opção sugeriu-se a utilização do MPPT através do método *Perturb&Observe*.

Em laboratório, observou-se através de ensaios a influência do aumento da distância entre os enrolamentos do transformador sobre a eficiência do sistema, o qual decresce bruscamente. Portanto, as estratégias buscando aumentar o rendimento do sistema são de extrema importância.

Com os resultados de simulação, foi possível verificar que a eficiência do sistema aumentou com a implementação dos métodos citados, além da atenção na escolha da frequência, mostrando-se métodos viáveis para tornar o sistema de carregamento cada vez mais prático e rápido.

Para trabalhos futuros, pretende-se aplicar técnicas de controle para otimização da velocidade do veículo. Além disso, está proposto desenvolver um protótipo do projeto para testes físicos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AHMED, A. **Eletrônica de Potência**, 1 ed. São Paulo: Prentice Hall, 2000.
- AMIN, M. R.; ROY, R. B.. **Design and simulation of wireless stationary charging system for hybrid electric vehicle using inductive power pad in parking garage**. In: Software, Knowledge, Information Management and Applications (SKIMA), 2014 8th International Conference on. IEEE, 2014.
- CASSEL, W. L. **Linear electric circuits**, Wiley International Edition, John Wiley & Sons Inc., 1964.
- CIRIMELE, V.; FRESCHI, F.; MITOLO, M.. **Inductive power transfer for automotive applications: State-of-the-art and future trends**. In: Industry Applications Society Annual Meeting, 2016 IEEE. IEEE, 2016.
- ECHOLS, Allon et al. **Communication Infrastructure for Dynamic Wireless Charging of Electric Vehicles**. In: Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2017 IEEE. IEEE, 2017.
- GARCIA, F. S. **Conversores CC-CC elevadores de tensão, não isolados, com ganhos estáticos elevados**. Dissertação (Mestrado) - UNICAMP, 2010.
- LOPES, I. F. et al. **Projeto e compensação de parâmetros de transformador de núcleo separado destinado ao carregamento de baterias de veículos subaquáticos autônomos**. Dissertação (Dissertação em Engenharia Elétrica) - UFJF. Juiz de Fora. 2013.
- MARTINS, D. C.; BARBI, I. **Conversores CC-CC Básicos Não Isolados**. 4. ed. Florianópolis: Ed. dos Autores, 2011.
- MCLYMAN, C. W. T. **Transformer and inductor design handbook**. 3 ed. Taylor & Francis Group, LLC, 2004.
- NISHIMURA, T. H. et al. **A large air gap flat transformer for a transcutaneous energy transmission system**. In: Power Electronics Specialists Conference, PESC'94 Record., 25th Annual IEEE. IEEE, 1994.
- RASHID, M. H. **Power Electronics Handbook**. Florida: Academic Press, 2001.
- RODRIGUES, J. B. et al. **Utilização de capacitores de grande porte para substituição das baterias convencionais em sistemas de iluminação**. Dissertação (Dissertação em Eletrônica) - IFSC. Florianópolis. 2012.
- SEN, P. C., **Principles of electric machines and power electronics**, 3 ed. John Wiley & Sons Inc, 2013.

SENJUTI, S. **Design and Optimization of Efficient Wireless Power Transfer Links for Implantable Biotelemetry Systems**, Dissertação (Dissertação em Engenharia Elétrica e Computacional) - University of Western Ontario, Ontario - Canadá. 2013.

STIELAU, O. H.; COVIC, G. A. **Design of loosely coupled inductive power transfer systems**. In: Power System Technology, 2000. Proceedings. PowerCon 2000. International Conference on. IEEE, 2000.

TRIVINO-CABRERA, A. et al. **Independent primary-side controller applied to wireless chargers for electric vehicles**. In: Electric Vehicle Conference (IEVC), 2014 IEEE International. IEEE, 2014.

ZHIXIN, M. et al. **Characteristics and design of transformer in loosely coupled inductive power transfer system**. Electrical and Control Engineering (ICECE), 2010.

APÊNDICE A

```

clc
clear all

%%Frequências escolhidas para análise
f=15e3;
f1=5e3;
f2=30e3;
f3=50e3;

w0=2.*pi.*f;
w01=2.*pi.*f1;
w02=2.*pi.*f2;
w03=2.*pi.*f3;

Cs = 4000e-12;
Lp = 103.4e-6;
Ls = 12.67e-6;
Rp = 0.1530;
Rs = 0.066;
Rl = 20;
k=[0:0.1:1];
M=k.*sqrt(Lp*Ls);

Xm = w0.*M;
Xm1 = w01.*M;
Xm2 = w02.*M;
Xm3 = w03.*M;

Xs = 1j.*(w0.*Ls);
Xs1 = 1j.*(w01.*Ls);
Xs2 = 1j.*(w02.*Ls);
Xs3 = 1j.*(w03.*Ls);

Xc2 = (-1j./(w0.*Cs));

%% Cálculo da eficiência SEM compensação
n=(Rl./((Rl+Rs)+Rp.*((Rl+Rs+(Xs+Xm))./Xm).^2)).*100;
n1=(Rl./((Rl+Rs)+Rp.*((Rl+Rs+(Xs1+Xm1))./Xm1).^2)).*100;
n2=(Rl./((Rl+Rs)+Rp.*((Rl+Rs+(Xs2+Xm2))./Xm2).^2)).*100;
n3=(Rl./((Rl+Rs)+Rp.*((Rl+Rs+(Xs3+Xm3))./Xm3).^2)).*100;

fprintf('\nthe value of eficiencia when Cl=0 is
=%f%+fiohms',real(n),imag(n));
%% Gráfico da Eficiência x Fator de Acoplamento
figure (1)
plot(k, abs(n), 'k')
hold on
plot(k, abs(n1), 'k')
hold on
plot(k, abs(n2), 'k')
hold on
plot(k, abs(n3), 'k')
axis ([0, 1, 0, 100])

```

```
xlabel('Fator de Acoplamento')
ylabel('Eficiência [%]')

%%% Cálculo da eficiência COM compensação

nc=Rl./((Rl+Rs)+Rp.*((Rs+Rl)./Xm).^2).*100;
nc1=Rl./((Rl+Rs)+Rp.*((Rs+Rl)./Xm1).^2).*100;
nc2=Rl./((Rl+Rs)+Rp.*((Rs+Rl)./Xm2).^2).*100;
nc3=Rl./((Rl+Rs)+Rp.*((Rs+Rl)./Xm3).^2).*100;

%%% Gráfico da Eficiência x Fator de Acoplamento
figure (2)
plot(k, abs(nc), 'k')
hold on
plot(k, abs(nc1), 'k')
hold on
plot(k, abs(nc2), 'k')
hold on
plot(k, abs(nc3), 'k')
axis ([0, 1, 0, 100])
xlabel('Fator de Acoplamento')
ylabel('Eficiência [%]')
```