

**FACULDADE DE TECNOLOGIA DE SÃO PAULO**  
**DEPARTAMENTO DE SISTEMAS ELETRÔNICOS**  
**Microeletrônica**

**Dennys Ramos Paez**

**Estudo e Desenvolvimento de um Sistema de Transferência de  
Energia Sem Fio pelo Método Indutivo**

**São Paulo**  
**2020**

**Dennys Ramos Paez**

**Estudo e Desenvolvimento de um Sistema de Transferência de  
Energia Sem Fio pelo Método Indutivo**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
Faculdade de Tecnologia de São Paulo como re-  
quisito para a obtenção do título de Tecnólogo  
em Microeletrônica.

Orientador: Prof. Dr. Ettore Apolônio de Barros  
Coorientador: Me. Humberto Trindade da Silva

**São Paulo**

**2020**

**Dennys Ramos Paez**

**Estudo e Desenvolvimento de um Sistema de Transferência de  
Energia Sem Fio pelo Método Indutivo**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de Tecnólogo e aprovado pelo Curso de Microeletrônica.

São Paulo 16/12/2020.

Victor Sonnenberg  
Professor (Coordenador do curso)

Banca Examinadora:

Ettore Apolônio de Barros  
(Orientador)

Roberto Katsuhiko Yamamoto  
(Avaliador)

Humberto Trindade da Silva  
(Coorientador)

Leonardo Frois Hernandez  
(Avaliador)

Este trabalho é dedicado aos meus queridos pais.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a minha mãe e a Thais, pelo amor e apoio ao longo de toda a vida, principalmente em relação ao suporte para continuar estudando mesmo frente a qualquer adversidade.

Ao Prof. Dr. Ettore Apolônio de Barros pela oportunidade de trabalhar no laboratório de Veículos não Tripulados – LVNT e expandir meus conhecimentos acerca da eletrônica embarcada.

Ao Me. Humberto Trindade da Silva que mesmo em situação de isolamento social prosseguiu me orientando com reuniões constantes, fator fundamental para o bom andamento do projeto. Sem esquecer das diversas revisões e dúvidas sanadas.

À equipe do LVNT pela paciência e suporte com os ensaios e os diversos problemas no início da minha jornada com os kits de desenvolvimento.

Aos meus colegas de trabalho na Karimex pelos conselhos, equipamentos e componentes emprestados para o desenvolvimento do projeto

Ao CNPq pela bolsa de iniciação científica para o estudo da eletrônica nas atividades correlatas ao LVNT, incentivo chave para a manutenção das atividades em paralelo as atribuições da faculdade.

"A tecnologia ensinou uma lição à humanidade: nada é impossível."  
(Lewis Mumford, 1895 – 1990).

## RESUMO

Este trabalho tem o objetivo de estudar e desenvolver um circuito para transferência de energia sem fio pelo método indutivo – IPT, que funciona como um transformador de núcleo separado empregando baixo coeficiente de acoplamento magnético. Na introdução, há uma visão geral da tecnologia com aplicações em objetos do cotidiano, como eletrodomésticos e veículos elétricos. No capítulo seguinte, revisão bibliográfica, são explicadas algumas das aplicações da tecnologia, assim como o contexto histórico, a comercialização e como está sendo feita a padronização, além dos fundamentos teóricos que regem o funcionamento do sistema. Em materiais e métodos, explica-se quais foram os componentes e placas para desenvolvimento que foram utilizados, e o esquema de ligação entre eles. O sistema IPT construído inclui um microcontrolador que gera um sinal de PWM para chavear uma placa inversora. O sinal de potência é enviado para bobinas de modelo 760308201 com 28mm de diâmetro e 10uH de indutância. Este sinal gera um campo magnético que é percebido por outra bobina que está a 20mm de distância. O circuito foi testado com uma fonte de 12V/2A e outra de 15V/0,7A na entrada e carga resistiva de valor nominal de 10Ω. Nesta condição, obteve-se cerca de 4W na saída e eficiência próxima de 40%. Sabe-se que, para aumentar o rendimento elétrico, seria preciso aumentar a frequência de chaveamento de 100kHz para 800kHz, valor no qual o fator de qualidade estaria acima de 100. Entretanto, a placa inversora STSPIN suporta no máximo 100kHz.

**Palavras-chave:** Transferência de energia sem fio 1. Método indutivo 2. Transformador de núcleo separado 3.

## ABSTRACT

This work aims to study and develop a circuit for wireless power transfer through the inductive method - IPT, which works similarly to a separate core transformer employing a low magnetic coupling coefficient. In the introduction, there is an overview of the technology with applications in everyday objects, such as home appliances and electric vehicles. In the next chapter, bibliographic review, some of the applications of the technology are explained, as well as the historical context, commercialization and how standardization is being carried out, in addition to the theoretical foundations that govern the functioning of the system. In materials and methods, it is explained which components and development boards were used, and the connection scheme between them. The built IPT system consists of a microcontroller generating a PWM signal to switch an inverter board, the power signal is sent to coils of model 760308201 with 28mm of diameter and 10uH of inductance. This signal generates a magnetic field that is perceived by another coil that is 20mm away. The circuit was tested with a 12V/2A source and a 15V/0.7A source at the input and resistive load of 10 $\Omega$  (nominal value). In this condition, about 4W was obtained at the output and efficiency close to 40%. It is known that to increase electrical efficiency, it would be necessary to increase the switching frequency from 100kHz to 800kHz, a value in which the quality factor would be above 100. However, the inverter board only supports 100kHz.

**Keywords:** Wireless power transfer 1. Inductive power transfer 2. Coreless transformer with an airgap 3.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Estacionamento para carros elétricos .....	13
Figura 2 Exemplos de aplicações militares .....	16
Figura 3 AUV Pirajuba .....	18
Figura 4 Técnicas de WPT .....	19
Figura 5 Princípio de funcionamento .....	20
Figura 6 a) Helicóptero / b) Sistema de MPT .....	21
Figura 7 Níveis de potência.....	24
Figura 8 Tipos de desalinhamentos .....	28
Figura 9 Coeficiente de acoplamento em função dos desalinhamentos .....	29
Figura 10 Fluxo magnético.....	30
Figura 11 Simulação da distribuição do campo magnético.....	31
Figura 12 Efeito Pelicular .....	34
Figura 13 Eficiência x figura de mérito .....	36
Figura 14 Esquemático: a) resumido, b) expandido .....	37
Figura 15 Conversor DC/AC com CI L298 .....	39
Figura 16 Modulo <i>Motor Driver</i> - L298N .....	40
Figura 17 Módulo STSPIN L6230(Placa X-NUCLEO-IHM07M1) encaixado sobre placa Núcleo.....	41
Figura 18 Placa núcleo com microcontrolador STM32 .....	43
Figura 19 Bobina 760308201. Dimensões em mm.....	44
Figura 20 Esquemático de simulação .....	45
Figura 21 a) Sinais de entrada: triangular em 80Hz e senoidal em 10Hz. b) Sinal de saída: SPWM.....	46
Figura 22 Trecho do código fonte para geração do SPWM.....	47
Figura 23 Sinais de porta dos transistores utilizando a modulação SPWM .....	48
Figura 24 Sequência de ligação .....	49
Figura 25 Fator Q x Frequência para a bobina 760308201 .....	50
Figura 26 Circuito transmissor e receptor.....	51

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AC/CA	Corrente Alternada
AUV	Veículo Autônomo Subaquático
AW4P	Alliance for Wireless Power
BMS	Sistema de gerenciamento de bateria ( <i>Battery Management System</i> )
DC/CC	Corrente Contínua
CPT	Capacitive Power Transfer
EMF	Campo eletromagnético
EMI	Interferência eletromagnética
EV	Veículo elétrico
FOD	Detecção de objeto estranho
FP	Fator de Potência
GaN	Nitreto de Gálio
GPIO	Pinos de entrada e saída para propósitos gerais
IPT	Transferência indutiva de potência ( <i>Inductive Power Transfer</i> )
MIT	Massachusetts Institute of Technology
MPT	Transferência de potência por micro-ondas ( <i>Microwave Power Transfer</i> )
MOSFET	<i>Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor</i>
NASA	National Aeronautics and Space Administration
PCI	Placa de Circuito Impresso
PMA	<i>Power Matters Alliance</i>
PWM	Modulação por largura de pulso ( <i>Pulse Width Modulation</i> )
Rx	Dispositivo de Recepção
TBJ	Transistor Bipolar de Junção
Tx	Dispositivo de Transmissão
WE	Würth Elektronik
WPC	Wireless Power Consortium
WPT	Wireless Power Transfer

## SUMÁRIO

1	Introdução .....	12
1.1	Justificativa.....	13
1.2	Objetivos .....	14
1.3	Estrutura do trabalho .....	14
2	Revisão bibliográfica .....	16
2.1	Aplicações em veículos elétricos - EV .....	16
2.2	Técnicas de transferência de energia sem fio .....	18
2.2.1	Transferência Indutiva IPT .....	19
2.3	Contexto histórico.....	20
2.4	Comercialização e padronização.....	23
2.4.1	Wireless Power Consortium e o Padrão Qi.....	25
2.4.2	Padrão AirFuel Alliance .....	26
3	Fundamentos teóricos .....	27
3.1	Coeficiente de acoplamento .....	27
3.2	Ressonância .....	31
3.3	Fator de qualidade .....	32
3.4	Perdas em alta frequência.....	34
3.5	Eficiência.....	35
4	Desenvolvimento do sistema IPT: Materiais e métodos.....	37
4.1	Conversor DC/AC.....	38
4.2	Microcontrolador STM32 .....	41
4.3	Bobinas .....	43
5	Resultados e discussão.....	45
5.1	Sinal de acionamento .....	45
5.2	Testes do sistema IPT.....	48
5.3	Resultados .....	51
6	Conclusões .....	55
6.1	Sugestões de trabalhos futuros .....	56
7	REFERÊNCIAS.....	58
	ANEXO A – Módulo inversor L298N e circuito integrado L298.....	61
	ANEXO B – Circuito integrado e módulo inversor L6230 .....	65
	ANEXO C – Placa de desenvolvimento NUCLEO-F410RB.....	67
	ANEXO D – Bobina de transmissão e recepção .....	68

## 1 INTRODUÇÃO

Imagine que ao acordar de manhã cedo, você pega o celular, e como de costume, checa as notificações, logo percebe que a bateria está com o nível de carga completa, mesmo sem ter ligado o aparelho à tomada na noite passada. Então, segue sua rotina para a cozinha, utilizando diversos eletrodomésticos comuns ao café da manhã, como a sanduicheira e o liquidificador. Posiciona-os sobre o balcão onde há algumas marcações circulares, que lembram as das bocas de um fogão de indução (aquele que funciona sem gás). Assim, os eletrodomésticos já estão energizados e prontos para o uso.

Para ir ao trabalho decide dirigir, o carro também é elétrico e assim como o celular, está com a carga completa. Embora esteja dirigindo por vários quilômetros, o veículo tem boa autonomia e mesmo que precise viajar para fora da cidade não será preciso parar para recarregar, pois a nova estrada possui uma tecnologia de recarregamento dinâmico, ou seja, a bateria se carrega com o automóvel em movimento.

O trabalho na indústria é tomado por máquinas elétricas. Drones, esteiras, e robôs móveis, grande parte autônoma e integrada aos servidores da fábrica por meio da internet das coisas. Tudo é atualizado e sincronizado conforme as coisas vão acontecendo. Sem fio, conector, adaptador, filtro de linha e outros. O trabalho humano é voltado para as atividades de criatividade e decisões mais críticas e as máquinas assumem a responsabilidade por ações repetitivas, enfadonhas, porém indispensáveis.

Mais tarde, em uma consulta médica cardiológica, o doutor afirma a necessidade de atualizar o sistema do marca passo, mesmo assustado, sabe que não há risco nenhum, pois o procedimento não é invasivo e está livre de fazer qualquer tipo de cirurgia ou plugar algum tubo no corpo, e novamente, tudo é feito sem fio, a energia e a comunicação com o implante seguem protocolos e padrões seguros.

Ao sair da consulta, o carro que havia sido liberado para serviço de taxi autônomo, já havia retornado e o aguardava no estacionamento, que inclui um carregador de energia como o mostrado na Figura 1. As células fotovoltaicas trabalhando em conjunto com o sistema de transferência de energia sem fio garante conveniência e independência da rede elétrica, podendo até acontecer um carregamento bidirecional de acordo com a demanda de energia.

Figura 1 Estacionamento para carros elétricos



Fonte: witricity [1].

Muito do que foi descrito anteriormente já é factível em laboratório, e apresentado em feiras de tecnologia. A década de 2010 se encerrou com a existência de eletrodomésticos, estações de recarga, carros autônomos e celulares que são produzidos em larga escala contento a tecnologia de potência sem fio com muita pesquisa sobre o setor aplicada. Portanto, é questão de poucos anos para estarmos vivendo como a narrativa apontou.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

Sistemas de transferência de energia elétrica sem fio (*Wireless Power Transfer* - WPT) vêm sendo estudados com frequência cada vez maior [2], pois o alto potencial desta tecnologia oferece aos pesquisadores, indústrias e a população em geral uma saída para diversos problemas envolvendo uma rede cabeada de energia elétrica. Embora ofereça alto grau de confiabilidade com uma tecnologia há muito tempo consolidada, o contato metálico entre os equipamentos é mecanicamente gasto com o passar do tempo e pode sofrer com oxidação, mal contato ou até rompimento por conta de agentes físico-químicos, como em ambientes adversos que exista a presença de água ou outros líquidos inflamáveis ou tóxicos, ou simplesmente a ação mecânica repetitiva do dia a dia que pode culminar em diversos defeitos nos equipamentos eletrônicos do cotidiano e comprometer o funcionamento da interface de alimentação de celulares, tablets e notebooks [3].

## 1.2 OBJETIVOS

Este trabalho tem o intuito de realizar um estudo sobre a tecnologia de transferência de energia sem fio com enfoque no método indutivo – IPT (*Inductive Power Transfer*), por meio de um transformador de núcleo separado. Portanto, no que tange à tecnologia, é de suma importância o detalhamento dos princípios teóricos, estado da arte e disponibilização comercial. Ao fim, procura-se desenvolver um circuito para comprovação dos pontos levantados e explanar os diferentes caminhos que culminam nos resultados obtidos.

Dentro deste contexto, sumariza-se as metas principais deste trabalho como segue:

- Investigação do estado da arte dos métodos de transmissão de energia sem fio e da teoria subjacente da transmissão indutiva de potência.
- Desenvolvimento de um protótipo para transferência indutiva de energia.
- Prova de conceito com o protótipo e avaliação dos resultados.

## 1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

No capítulo dois, são apresentadas as principais aplicações dos sistemas de transferência de energia sem fio, como veículos elétricos, eletrodomésticos e celulares. Após isto, é exposto os diferentes métodos para transmissão de energia sem fio, detalhando o método indutivo. Por fim, é feita uma revisão histórica da tecnologia, começando com experimentos de Tesla e finalizando com a padronização comercial feita pelos órgãos: *Wireless Power Consortium* e *AirFuel*.

No capítulo três, são explanados os principais fundamentos teóricos que regem o funcionamento do sistema, como coeficiente de acoplamento magnético, fator de qualidade das bobinas, ressonância e efeitos da alta frequência da corrente alternada, além de métodos para calcular o rendimento do sistema.

No capítulo quatro, são expostos os materiais utilizados para construção do sistema IPT, como microcontrolador para gerar sinal de acionamento dos transistores, módulos inversores e bobinas, além do esquema de ligação entre os componentes.

No capítulo cinco, é avaliado o funcionamento do sistema montado conforme descrito no capítulo anterior. Os resultados foram obtidos medindo-se tensão e corrente para diferentes condições de operação, e calculando-se a potência e o rendimento do circuito. Após a exposição dos resultados, há uma discussão dos dados.

O capítulo seis encerra o trabalho com as considerações finais sobre a tecnologia e o sistema IPT que foi desenvolvido, acrescentando-se sugestões para trabalhos futuros.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 APLICAÇÕES EM VEÍCULOS ELÉTRICOS - EV

Conforme apontado no item 1.1, justificativa, não é só para resolver problemas dos contatos metálicos que a pesquisa em sistemas WPT tem se desenvolvido. Existem muitas ocasiões em que o sistema se torna essencial e as aplicações vão muito além de simples carregadores de celulares. Atualmente, já é possível transferir energia para aplicações industriais, militares, automotivas, médicas e eletrodomésticas.

Jeff Muhs, autor de um artigo no site *Military Embedded System* em 2013 [4], sobre sistemas sem fio de potência, descreve que o sistema WPT pode alimentar veículos aéreos, marítimos e de superfície não tripulados, em inglês UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*), AUV (*Autonomous Underwater Vehicle*) e UGV (*Unmanned Ground Vehicle*), além de todo o vestuário eletrônico do soldado, conforme ilustrado na Figura 2. Em seu artigo, o autor foca na importância de sistemas sem fio (potência e comunicação) para reduzir a carga de transporte que um soldado precisa carregar, uma vez que isso substituirá múltiplos conectores, cabos e baterias que chegam a somar mais de 30 kg. Muhs também argumenta que o soldado do futuro contará com a conveniência de recarregar os acessórios do corpo por meio do colete que fará a transferência de energia para os equipamentos próximos desejados.

Figura 2 Exemplos de aplicações militares



Fonte: [militaryembedded.com](http://militaryembedded.com)

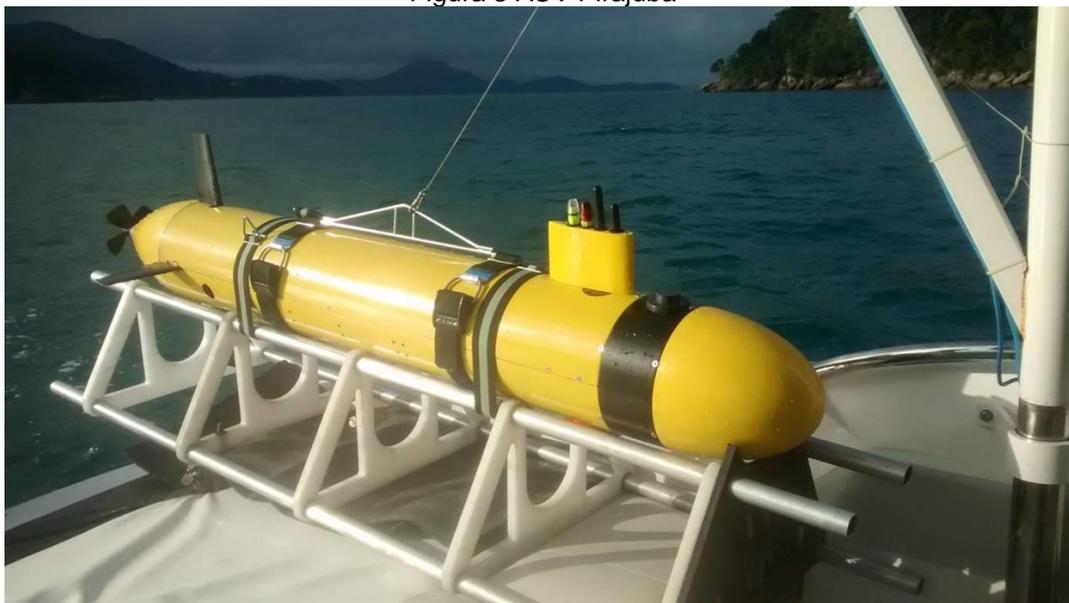
Com a consolidação da tecnologia e a padronização dos sistemas WPT em um protocolo único, será possível criar um ecossistema bidirecional [1] de transferência

de energia em que o colete recarrega as baterias dos óculos, o banco do veículo recarrega o colete, a garagem de estacionamento recarrega o veículo, e assim por diante.

O Veículo Aéreo Não Tripulado - VANT, ou genericamente chamado de drone [5], não contém tripulação humana, e o seu controle de navegação é feito por um operador à distância ou através de um algoritmo de aprendizado de máquina. Entre as diversas aplicações, pode-se mencionar: hobby e lazer, filmagens, entregas, espionagem e pesquisa científica. Já os AUVs - veículos autônomos submarinos, assim como os USV - veículos aquáticos de superfície não tripulados (*Unmanned Surface Vehicle*), são veículos elétricos aquáticos que também possuem algumas das aplicações listadas anteriormente.

É importante salientar que estes veículos, como o da Figura 3, são ideais para contextos adversos, em que há grande risco de vida ou em cenários que não permitem a intervenção humana direta. Por conta disso, pensando em uma aplicação real, os veículos aquáticos não tripulados estão completamente vedados e muitas vezes bem distantes de uma estação de recarga. Interromper a missão de um AUV, para emergi-lo e então recarregá-lo pode ser um processo oneroso. Portanto, é justificável a necessidade do desenvolvimento de projetos em WPT, como afirma Owens em [6], uma vez que com a idealização dos mesmos, o veículo poderá automaticamente se dirigir a uma estação de recarga submersa, quando detectado por meio de um gerenciador de controle de bateria - BMS (*Battery Management System*) baixo nível de carga e com auxílio de algoritmos de alinhamento se ajustar para que possa ser provida maior eficiência energética durante a transferência.

Figura 3 AUV Pirajuba

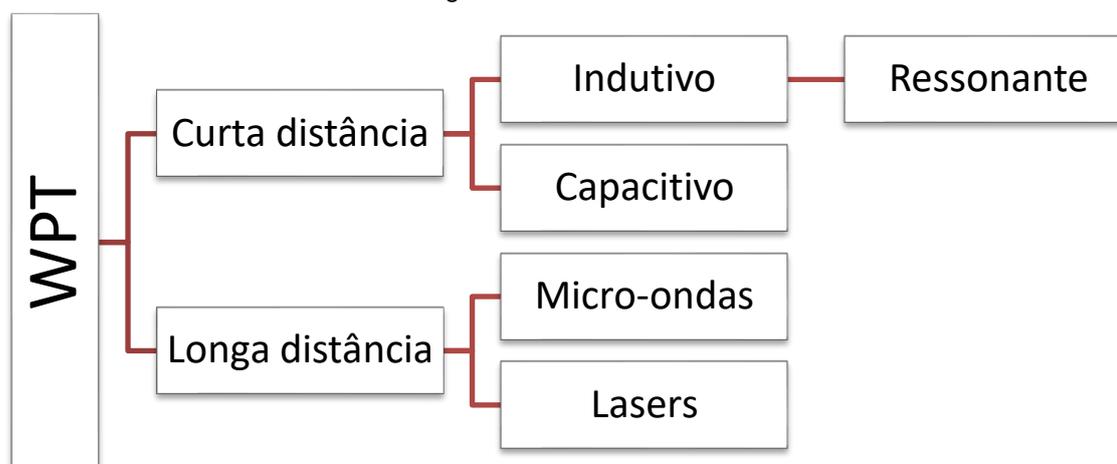


Fonte: Laboratório de Veículos Não Tripulados da Escola Politécnica da USP

## 2.2 TÉCNICAS DE TRANSFERÊNCIA DE ENERGIA SEM FIO

Por conta do sucesso dos padrões comerciais presentes no mercado, como o Qi (pronuncia-se “Chi”) do *Wireless Power Consortium* – WPC, costuma-se relacionar transferência de energia apenas aos métodos empregados pelo WPC, ou seja, transferência indutiva de baixa potência para celulares. Entretanto, existem diversas outras maneiras de se transmitir energia sem fio. Os diferentes métodos são classificados como *near field* e *far field*, que em uma tradução livre seriam: curta distância e longa distância, como observado na Figura 4. Alguns autores também os classificam como métodos não radioativos (curta distância) e radioativos (longa distância) [7] e [8]. Os métodos de WPT de curta distância envolvem a transferência capacitiva, indutiva e a indutiva operando no modo de ressonância. Já os métodos de WPT de longa distância cobrem as micro-ondas e lasers. Cada método tem suas peculiaridades, prós e contras que serão brevemente discutidos nas seções seguintes.

Figura 4 Técnicas de WPT



Fonte: Próprio autor

Em transferências de energia ditas não radioativas, não há risco algum para a vida humana, de acordo com os argumentos do palestrante Eric Giler no *TED Talk* publicado em 2014 [9]. O sistema de transferência apresentado nessa ocasião seria 100 vezes mais seguro do que fazer uma ligação de celular, e 1 milhão de vezes mais seguro do que obter uma imagem por ressonância magnética. A Tabela 1 reúne as principais características de sistemas de transmissão de energia sem fio.

Tabela 1 Técnicas WPT visão geral

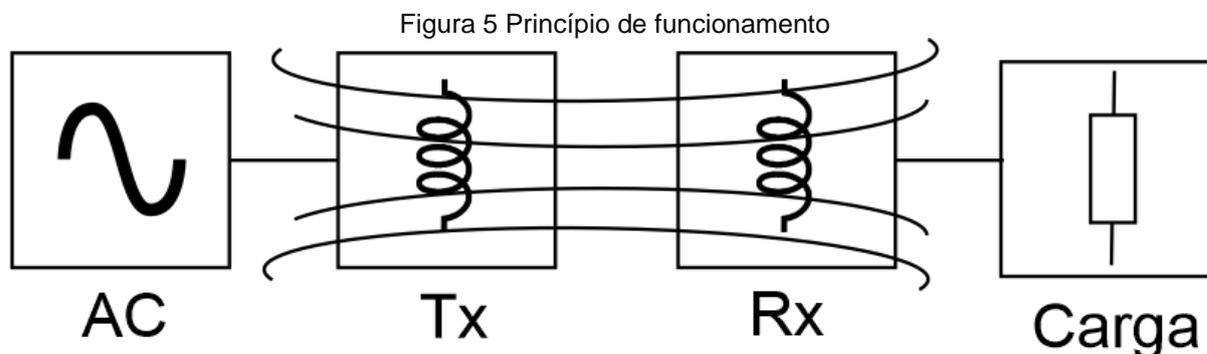
MÉTODO	DISTÂNCIA	FREQUÊNCIA	TRANSFERÊNCIA	APLICAÇÕES
INDUTIVO	Curta	KHz - MHz	Bobinas	Eletrodomésticos, carros e celulares
CAPACITIVO	Curta	KHz - MHz	Placas metálicas	Eletrodomésticos, carros e celulares
MICRO-ONDAS	Longa	GHz	Placas parabólicas	Espaciais e militares
LASER	Longa	Maior que GHz	Lasers e Focóculas	Pesquisa e militares

Fonte: Próprio autor

### 2.2.1 Transferência Indutiva IPT

Na transferência indutiva – *Inductive Power Transfer* - IPT, a energia alternada é convertida em campo magnético através de um indutor transmissor. Outro indutor próximo (receptor) capta este campo e transforma-o novamente em energia elétrica. Na Figura 5, apresenta-se um diagrama de blocos simplificado do sistema, onde o bloco AC representa uma fonte de energia em corrente alternada alimentando o

indutor de transmissão Tx. Ao indutor de recepção Rx é conectada uma carga que irá consumir a energia transmitida (bloco Carga). As linhas que cortam Tx e Rx representam as linhas do campo magnético gerado pelo indutor Tx.



Este é o princípio de funcionamento do sistema IPT e todo o mercado que surgiu consolidou-se sob esse sistema. Atualmente, existem diversas pesquisas relacionando eficiência com tolerância de desalinhamento, distância, construção das bobinas e topologias de compensação capacitivas.

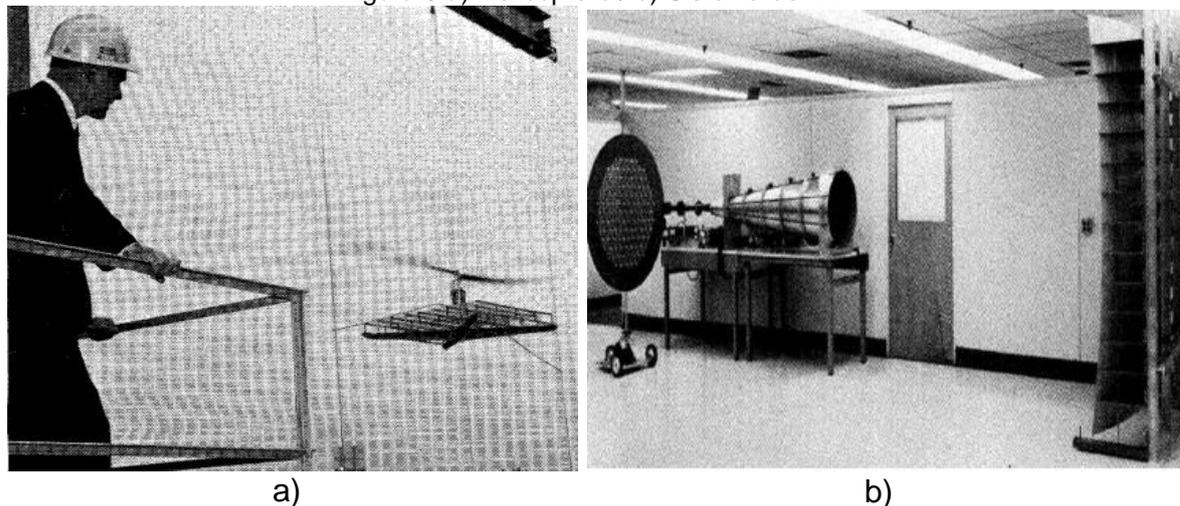
## 2.3 CONTEXTO HISTÓRICO

As tecnologias, tanto de curta quanto de longa distância vem sendo gradativamente desenvolvidas por mais de 100 anos [2] e [7]. Nikola Tesla, no final do século XIX, em seu laboratório no Colorado, Estados Unidos, foi o pioneiro na pesquisa por WPT. Há registros de que foi o primeiro a sonhar com uma cidade totalmente sem fio, trabalhando no que veio a ser conhecido por bobina de Tesla e em outros projetos para WPT. Um de seus mais ambiciosos projetos era a torre de *Wardenclyffe*, pelo qual pretendia distribuir energia sem fio e de graça para cidade inteira. Tesla não conseguiu materializar seu sonho de cidade sem cabo, mas, com sucesso, alimentou eletricamente uma lâmpada incandescente usando um circuito indutivo.

Mais tarde, em 1964, um cientista chamado William Brown também contribuiu para a pesquisa, inventando uma antena retificadora (conhecida por *rectenna*) que recebia micro-ondas e as transformava em corrente contínua - CC (em inglês, *Direct Current* - DC). Tal método passou a ser chamado de MPT (*Microwave Power Transfer*). O sistema desenvolvido foi capaz de fornecer energia a um helicóptero não tripulado a 18m de distância do solo [10], Figura 6. Apesar de ter tido sucesso em seus

experimentos, a pesquisa de Brown nunca saiu dos laboratórios, pois segundo *Anuradha* [8], autor do artigo *Wireless Power Transmission: Applications and Components*, os protótipos nunca vieram a ser comercialmente viáveis, devido ao tamanho e preço.

Figura 6 a) Helicóptero / b) Sistema de MPT



Fonte: A história da transmissão de energia por ondas de Rádio, por W.C. Brown [10]

Fazendo uso do método indutivo - IPT, na década de 60, foi criada a primeira escova de dentes elétrica sem fio, pela *General Electric* – GE, chamada de *automatic toothbrush*. Ao ser colocada no suporte, sua bateria era carregada, porém não havia nenhum tipo de controle de carga. Devido ao fato de a bateria ser de níquel-cádmio, e por ficar recebendo energia constantemente, ela se deteriorava rapidamente, por conta do efeito memória característico dessa bateria. Como o aparelho era selado, não era possível trocá-la, o que levou ao fracasso comercial do produto[11].

No ano de 1978, foi investigado pela NASA [12] e pelo departamento de energia americano a viabilidade de criar um satélite baseado em energia solar. A proposta era posicionar o satélite em órbita geoestacionária e coletar a energia solar, com o intuito de transferi-la diretamente para a Terra por meio de micro-ondas, mesma técnica usada por William Brown. Em outras palavras, o satélite capta a energia do sol com células fotovoltaicas, então converte essa energia em micro-ondas, para transmitir de uma antena, para uma *rectenna*, produzindo energia elétrica. O projeto que foi patenteado por Peter Glaser anos antes, foi descontinuado em 1986 por conta de grandes inviabilidades técnicas como problemas com custo, pouco avanço científico sobre células solares, inexperiência dos responsáveis (terceiros contratados pela agência

espacial) em projetos de tal magnitude, e apresentar antenas com dimensões impraticáveis, sendo que a transmissora, que ficaria no espaço, chegaria ter raio de mais de 1Km, e a receptora, na terra, 10 vezes maior.

De acordo com o site *SingularityHub* [13], o que antes era tecnologicamente inviável, hoje já desperta interesse, pois promete uma grande revolução energética para toda a humanidade. Sabemos que a energia solar não é poluente, ao contrário das termoelétricas e usinas nucleares, e além das vantagens da energia solar comum, o método de coletá-la no espaço faz com que sempre haja geração de eletricidade na terra. Onde houver uma *rectenna* será possível captar energia, independentemente de ser dia ou noite, haver chuva, vento ou falta de água em algum reservatório.

Em 2007, outro marco importante surgiu para o desenvolvimento da tecnologia. Um grupo do MIT liderado pelo professor Marin Soljacic criou um circuito ressonante em 10MHz. O circuito foi capaz de transmitir 60W com bobinas de 25 cm de diâmetro por uma distância de 2 metros, obtendo eficiência de 40% ao energizar uma lâmpada. O feito é um marco para os sistemas IPT por conta da distância de transmissão e a consolidação de alguns modelos físicos teóricos, como por exemplo, a influência da geometria na transferência de energia. Por conta disso, este experimento foi publicado na revista *Science* do mesmo ano, e mais tarde essas pesquisas vieram a dar origem a Witricity, companhia focada em WPT [1].

No congresso mundial de celulares em 2009, a Qualcomm apresentou o aparelho denominado de *eZone*, uma estação de recarga sem cabo que funcionava pelo método indutivo com frequência de acoplamento de 13,56 MHz. Em 2011, houve a padronização do que viria a ser embarcado nos celulares atuais, o padrão Qi, criado pelo WPC.

Atualmente, as vendas de produtos com tecnologia IPT apresentam sucesso comercial sem precedentes, e a projeção é que este fenômeno continue aumentando exponencialmente, visto que ainda não há aparelhos de custo popular para serem vendidos, como celulares, notebooks e carros.

## 2.4 COMERCIALIZAÇÃO E PADRONIZAÇÃO

Com o propósito de padronizar comercialmente os métodos WPT, assim como houve padronização da interface USB para diversos equipamentos, surgiram entidades reguladoras, consórcios entre diversas empresas que miram esse mesmo bem comum, o que proporciona a intercambialidade entre aparelhos. As certificações Qi e *AirFuel*, por exemplo, especificam para os fabricantes: frequência de operação, níveis de potência e interfaces de comunicação. Todas as empresas parceiras que desenvolvem e almejam o certificado de qualidade devem seguir tais recomendações.

Abaixo, estão os principais consórcios atuantes na área:

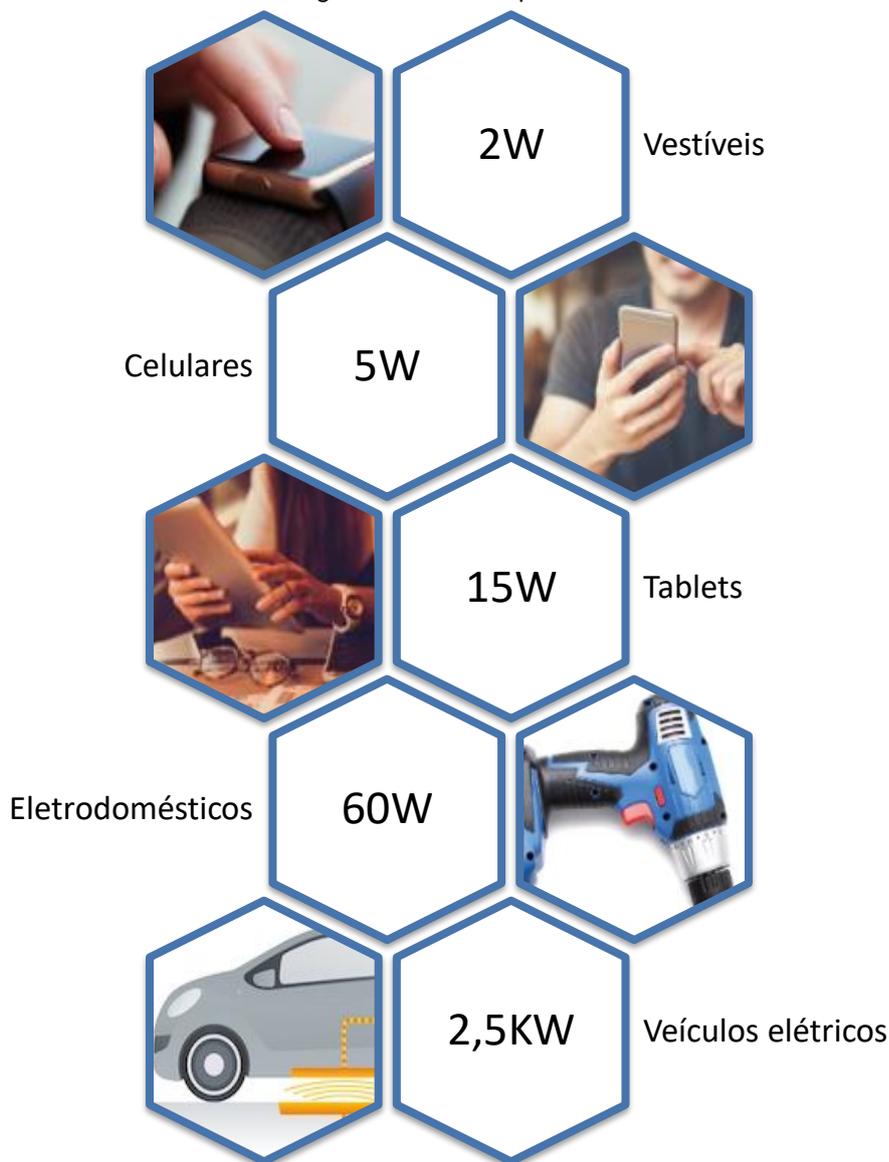
- ***Alliance for Wireless Power Technology*** - A4WP, 2008.
- ***Wireless Power Consortium*** – WPC, 2012.
- ***Power Matters Alliance*** – PMA, 2012.

Recentemente, o A4WP fundiu-se com o PMA para conseguir competir com o padrão Qi do WPC. A partir dessa fusão criou-se a ***AirFuel Alliance*** em 2015 [14].

O que é visto em desenvolvimento no mercado é fruto da grande demanda por celulares e eletrodomésticos com alta tecnologia embarcada. Para agregar valor, os fabricantes estão suprindo esta demanda com aparelhos que embarcam tecnologia WPT. Por exemplo, a linha de produtos *Ki Cordless Kitchen* [15], cozinha sem cabos, do WPC, apresenta produtos da cozinha que funcionam sem bateria, por meio da transferência indutiva. Esse tipo de atitude de abolir o uso de bateria para equipamentos como relógios, rádios, controle remotos, entre outros, beneficia ambientalmente e economicamente a todos. De acordo com o artigo *A Review on Contactless Energy Transfer System* [16], essa abolição poderia acarretar uma diminuição significativa no total de 6 bilhões de baterias descartadas por ano, o que é uma grande parcela do lixo eletrônico que contamina o meio ambiente.

Muitos fabricantes de semicondutores já são parceiros desses principais consórcios de WPT, e disponibilizam kits de desenvolvimento de acordo com o nível de potência, como exposto na Figura 7.

Figura 7 Níveis de potência



Fonte: Próprio autor

A STMicroelectronics, por exemplo, dispõe de um amplo portfólio de produtos voltados para WPT. São kits de desenvolvimento que acompanham o microcontrolador, com GPIOs (*General Purpose Input/Output*), UARTs (*Universal Asynchronous Receiver/Transmitter*) e outros periféricos programáveis pelo usuário. O mesmo acontece com a IDT (Renesas) e a Texas Instruments. Em seus sites há toda a documentação da linha de produtos para satisfazer qualquer desenvolvedor. A Würth Elektronik por outro lado, atua no mercado como fornecedor das bobinas que estão em quase todos os kits licenciados, além de atender seus clientes com projetos de indutores específicos controlando as principais características elétricas do componente, como fator Q, resistência equivalente série, indutância e outros.

### 2.4.1 Wireless Power Consortium e o Padrão Qi

A seguir, são apresentadas as principais características dos sistemas de transferência de energia sem fio baseados no padrão Qi.

Este padrão pressupõe a transmissão indutiva de energia em distância típica de poucos milímetros, da ordem de 10 a 50 mm. O campo magnético fica concentrado em uma pequena região que existe entre o transmissor e o receptor. Um transmissor é capaz de fornecer energia para um único receptor por vez. Os produtos são categorizados pelas escalas de potência, tendo os de 5, 15 e 20W, operando em frequências típicas de 100 a 205 kHz.

Uma característica notável desse padrão é a capacidade de detecção de objetos estranhos (do inglês *Foreign Object Detection* – FOD) próximos ao transmissor. Esta característica é importante para evitar desperdício de energia e o superaquecimento do circuito. Normalmente, o transmissor gera um campo magnético com intervalos regulares e verifica se há uma carga válida consumindo energia. Além disso, as bobinas dos produtos que trabalham segundo este padrão geralmente são arredondadas, com proteção eletromagnética no núcleo e compactas, o que facilita a implementação em carregadores de celulares.

Além do Qi, padrão de transferência de energia sem fio voltado para celulares e aparelhos de baixa potência, o WPC também tem uma linha de produtos com potência superiores, como é o caso da linha de produtos *Ki Cordless Kitchen*, operando na faixa de 2,2kW, e o mais recente padrão de média potência, que veio para cobrir a faixa entre o Qi e o Ki, com valores de 30 até 65W, interessante para aparelhos como notebooks e furadeiras.

Naturalmente, os produtos enquadrados pelos padrões comerciais têm como principal foco a transferência de energia sem fio que não prejudique a saúde humana ou a integridade dos demais aparelhos, como celulares e cartões de crédito. Ou seja, deve-se atentar ao campo magnético gerado pelas bobinas e o aquecimento causado pela circulação de corrente no circuito. Tais fatores devem ser levados em conta por companhias que desejam licenciar essa tecnologia para seus aparelhos.

### 2.4.2 Padrão AirFuel Alliance

Muitas das características do Qi são também implementadas neste protocolo, como distância de poucos centímetros e escalas de potência, com dispositivos capazes de entregar até centenas de Watts em faixas de frequência mais elevadas, da ordem de 6,78MHz. Com um mesmo transmissor é possível recarregar diversos aparelhos. O AirFuel conta com as seguintes especificações:

- Distância no eixo z, entre bobinas, máxima típica de 50 milímetros;
- Não é preciso alinhamento tão preciso quanto o Qi;
- Carregamento de múltiplos dispositivos, até 8 por transmissor;
- Frequência típica para transferência de energia de 6,78MHz (banda ISM);
- Frequência típica para transferência de dados de 2.4GHz (banda ISM);

Além do método de transferência de energia por ressonância, fundamentado sobre as mesmas bases do método indutivo utilizado pelo Qi, o AirFuel também trabalha com produtos na transferência em Radio Frequência. Trata-se de um novo protocolo que opera na faixa dos GHz, sendo capaz de fornecer baixas potências a fim de alcançar maiores distância.

### 3 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

De um modo geral, o sistema de transferência de energia sem fio pelo método indutivo e ressonante funciona com base nos princípios do eletromagnetismo. Ao fazer percorrer uma corrente elétrica por um fio condutor, nota-se o surgimento de um campo magnético ao seu redor, de acordo com a **lei de Ampère** e descoberto pelos **experimentos de Oersted**. Se houver variação do fluxo magnético no tempo, é verificada a indução de corrente em sentido contrário em outro condutor próximo, segundo a lei de **Faraday-Lenz** [17]. De acordo com a lei de Ampère, o sentido do campo magnético é determinado pelo sentido da corrente e o campo ao redor de uma bobina é diretamente proporcional à corrente que passa por essa bobina [18], sendo que o campo é definido pela densidade de fluxo, por isso, para se intensificar o campo magnético, os fios são enrolados a fim de formar solenoides ou bobinas.

Em suma, um sinal elétrico que varia no tempo quando introduzido em uma bobina induz o movimento de cargas em outra bobina próxima. O sistema é equivalente ao funcionamento de um transformador de núcleo separado, e a relação de espiras entre primário e secundário (bobina transmissora e receptora, ou as vezes chamado de antenas) determina se esse transformador será elevador, abaixador ou até mesmo isolador [19]. Por conta da ausência de núcleo ferromagnético entre primário e o secundário, o IPT é limitado a transferências de curtas distâncias, pois a maior eficiência do sistema ocorre na menor distância entre transmissor e receptor [20]. Isso acontece devido ao baixo coeficiente de acoplamento e indutância mútua do transformador de núcleo separado. Como apontado por Moret, H. A, em 2018 [21], em transformadores convencionais, com núcleo ferromagnético, obtem-se um coeficiente de acoplamento superior a 95%. Por outro lado, sistemas IPT em sua maioria empregam apenas 30% de acoplamento magnético.

#### 3.1 COEFICIENTE DE ACOPLAMENTO

O coeficiente de acoplamento é uma medida de acoplamento magnético entre duas bobinas, sendo um valor adimensional dado por:

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_{Tx} * L_{Rx}}} \quad (1)$$

Em que:

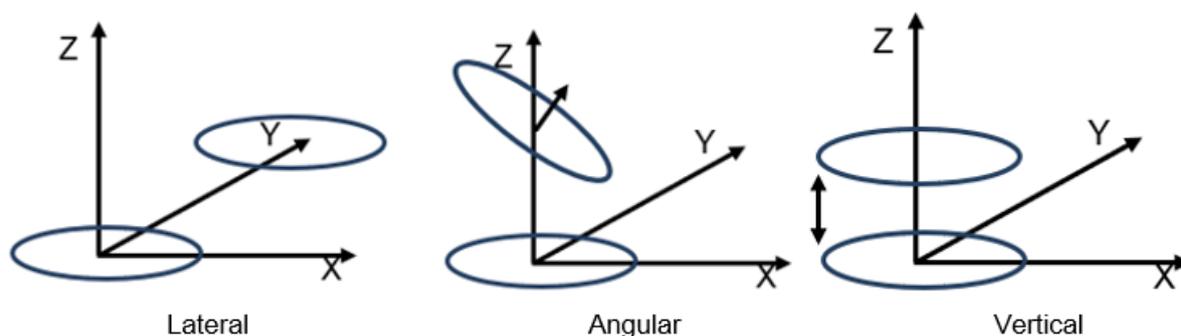
$L_{Tx}$  – Indutância da bobina transmissora [H];

$L_{Rx}$  – Indutância da bobina Receptora [H];

$M$  – Indutância mútua [H]

Além desses parâmetros, sabe-se que a frequência de operação e a geometria do sistema podem influenciar na transferência de energia. [21]. Bobinas próximas que compartilham o mesmo fluxo magnético estão mutuamente acopladas e, nessa condição, podem induzir energia entre si sem contato galvânico. Quando  $k=1$ , tem-se o acoplamento magnético perfeito, ou seja, não existem desalinhamentos ou qualquer distanciamento entre as bobinas nos 3 eixos X, Y e Z, como mostra a Figura 8.

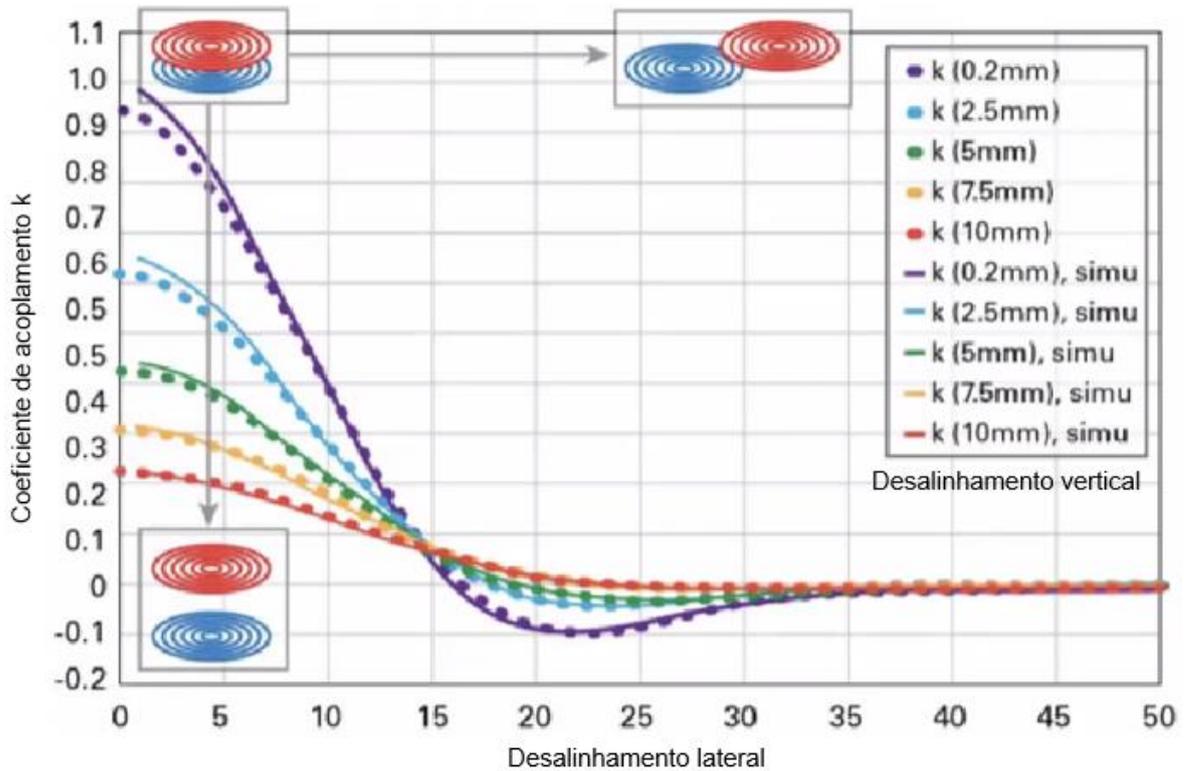
Figura 8 Tipos de desalinhamentos



Fonte: Adaptado de WE [22]

Os diferentes tipos de desalinhamentos têm impacto direto no coeficiente de acoplamento e, conseqüentemente, no rendimento do sistema, como é visto no gráfico da Figura 9, retirada de uma série expositiva de webinars da Airfuel [14], na qual foi testada e simulada as variáveis para duas bobinas planares de 30 mm de diâmetro.

Figura 9 Coeficiente de acoplamento em função dos desalinhamentos



Fonte: Airfuel [14].

O coeficiente de acoplamento está diretamente relacionado ao fluxo magnético. Logo, faz-se necessário a definição e explicação da grandeza no que tange sistemas WPT. O fluxo magnético, representado por  $\Phi$  (phi), é uma grandeza física que mede o número de linhas de indução que atravessam uma área. No caso do sistema de transferência de energia sem fio pelo método indutivo, a área de interesse é delimitada pelo perímetro das bobinas. O fluxo é equacionado pelo produto escalar entre o vetor do campo magnético  $\vec{B}$  e o vetor normal a superfície  $\vec{n}$  da bobina, como na equação 2.

$$\Phi = \vec{B} \cdot \vec{n} = BA\cos\theta \quad (2)$$

Sendo:

$\Phi$  – Fluxo magnético em T.m<sup>2</sup> ou Wb (Weber)

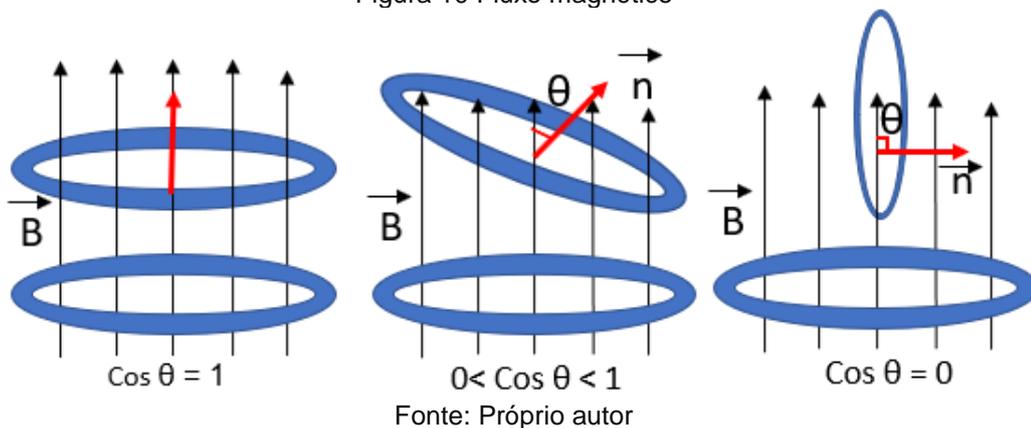
B – Módulo do vetor do campo magnético em T (Tesla)

A – Área da bobina em m<sup>2</sup>

$\theta$  – Ângulo entre o vetor do campo magnético e o vetor normal à bobina em graus ou radianos.

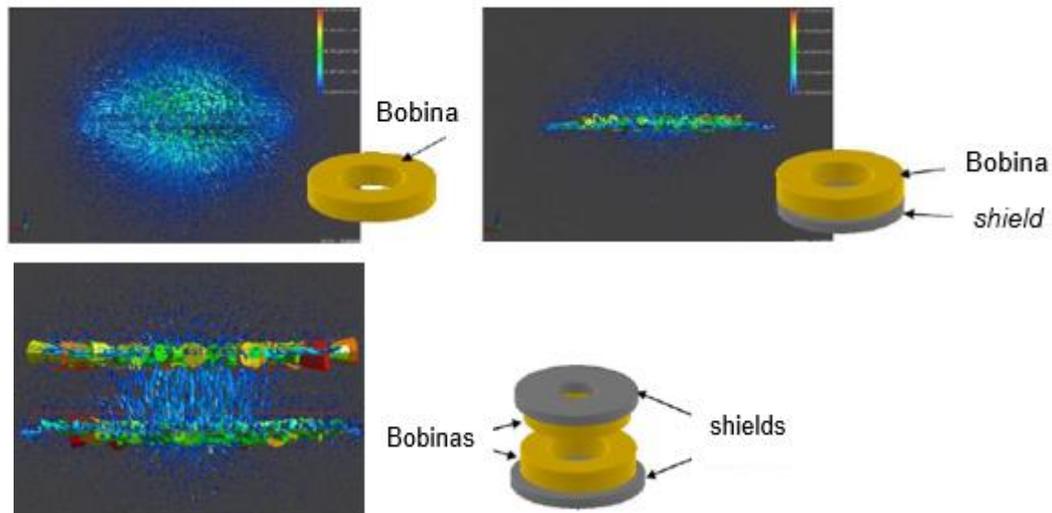
Sendo assim, quando a bobina receptora está paralela e alinhada à bobina transmissora ( $\cos\theta=1$ , para  $\theta=0$ ), o fluxo que atravessa se torna máximo. Por outro lado, quando as bobinas estão perpendiculares ( $\cos\theta=0$ , para  $\theta=\pi/2$ ), o fluxo magnético se torna nulo, cessando a transmissão de energia, como visto na Figura 10.

Figura 10 Fluxo magnético



Os sistemas de transmissão indutiva de potência sem fio - IPT, como dito anteriormente, não fazem uso de núcleo ferromagnético, assim como ocorre em transformadores convencionais. Logo, o fluxo magnético entre as bobinas é baixo, assim como o acoplamento magnético. Com o propósito de mitigar esse efeito, os fabricantes de bobinas para WPT fazem uso de *shields* eletromagnéticos, que filtram interferências e concentram o campo magnético entre transmissor e receptor (Figura 11). É importante manter o campo somente entre as bobinas, pois assim a placa de circuito impresso e os componentes ao redor ficam protegidos da radiação.

Figura 11 Simulação da distribuição do campo magnético



Fonte: Würth Elektronik [22].

### 3.2 RESSONÂNCIA

A ressonância é o fenômeno que ocorre na natureza de muitas formas diferentes. Em geral, envolve uma energia em oscilação entre dois modos. Um exemplo clássico de ressonância é de um pêndulo mecânico, na qual a energia oscila entre potencial, quando o pêndulo atinge o ponto mais alto, e cinética quando o pêndulo está em movimento. Além dos pêndulos, há ressonância também em sistemas de massa-mola, rádios, televisões e até em estruturas como prédios e pontes. Estes, ao receberem energia de maneira periódica, similar à sua frequência natural, passam a vibrar com amplitudes cada vez maiores.

Quando se trata de circuitos elétricos em corrente alternada a ressonância ocorre quando a impedância é puramente resistiva. Portanto, nesta condição as reatâncias indutiva e capacitiva se anulam fazendo com que tensão e corrente estejam em fase, ou seja:

$$X_c = X_L \quad (3)$$

Logo:

$$\frac{1}{\omega C} = \omega L \rightarrow \omega^2 = \frac{1}{LC} \rightarrow \omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} \text{ [rad/s]} \quad (4)$$

Sendo  $\omega = 2\pi f$ , obtêm-se:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \text{ [Hz]} \quad (5)$$

Através da Equação 5, é possível obter o valor da frequência de ressonância para um dado valor de indutância L e capacitância C. Esta frequência é importante, pois a eficiência é máxima quando o sistema opera na região de ressonância com alto fator de qualidade Q, dado que as perdas nos elementos capacitivos e indutores é reduzida ou completamente anulada. Como a reatância indutiva e a capacitiva se igualam e, conseqüentemente, se anulam, permanece apenas o fator resistivo, que é proveniente dos enrolamentos das bobinas. Este valor é obtido de acordo com a Segunda Lei de Ohm (Equação 6), que relaciona a resistência (R) do condutor com seu comprimento (L), seção transversal (A) e resistividade ( $\rho$ ) do material utilizado. Esta última, por sua vez, é influenciada pela temperatura do condutor durante a operação.

$$R = \frac{\rho L}{A} \text{ [\Omega]} \quad (6)$$

### 3.3 FATOR DE QUALIDADE

Toda bobina é constituída por um condutor. Além da indutância L, esta bobina apresenta uma resistência R devido ao condutor não ser ideal. Quanto maior o valor da resistência, maior será a perda de energia através do efeito Joule.

Outra característica de uma bobina é a reatância indutiva  $X_L$ , que se comporta como uma oposição à passagem da corrente alternada, sendo determinada através da Equação 7.

$$X_L = \omega L = 2\pi f L \quad (7)$$

Onde:

$X_L$  - Reatância indutiva [ $\Omega$ ]

f – Frequência [Hz]

L - Indutância da bobina [H]

$\omega$  – Frequência angular [rad/s]

A relação matemática entre a resistência R e a reatância indutiva  $X_L$  é denominada fator de perda ou  $\text{tg } \delta$ , e é expressa através da Equação 8.

$$tg \delta = \frac{R}{X_L} = \frac{R}{\omega L} = \frac{R}{2\pi f L} \quad (8)$$

O inverso dessa equação é denominado fator de qualidade Q (Equação 9), também conhecido como índice de mérito, sendo uma grandeza adimensional que indica a qualidade de um indutor. Na Equação 9, é utilizada como frequência de operação a frequência natural de oscilação do sistema, explicada no subcapítulo anterior como frequência de ressonância.

$$Q = \frac{1}{tg \delta} = \frac{\omega L}{R} = \frac{2\pi f_r L}{R} \quad (9)$$

Em que:

$f_r$  – Frequência de ressonância [Hz]

O fator Q também pode ser definido por:

$$Q = \frac{2\pi L f_r}{R} = \frac{2\pi L}{R} \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

$$Q = \frac{1}{R} \frac{L}{\sqrt{LC}} = \frac{1}{R} \frac{L}{\sqrt{L}\sqrt{C}} \left(\frac{\sqrt{L}}{\sqrt{L}}\right)$$

$$Q = \frac{1}{R} \frac{L\sqrt{L}}{L\sqrt{C}} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (10)$$

Quanto maior o valor de Q, menor será a perda de potência na bobina. Além das perdas por efeito joule nas resistências calculadas pela Lei de Ohm nos indutores, todo circuito elétrico também apresenta resistências, capacitâncias e indutâncias parasitárias. As resistências parasitárias estão presentes inclusive nos capacitores e geralmente é resumida pela sigla em inglês – ESR (*Equivalent Series Resistance*) que engloba resistência presente nos dielétricos, armaduras e terminais. Alguns capacitores são formados por placas metálicas enroladas, por isso surgem indutâncias indesejadas que são inerentes ao processo de fabricação. Já os indutores são formados por material externo isolante, fio que é condutor e novamente o material externo. Esta é a composição básica de um capacitor, a partir disso surgem capacitâncias parasitárias

### 3.4 PERDAS EM ALTA FREQUÊNCIA

Além das perdas por efeito joule descritas no parágrafo anterior, em corrente alternada há também perdas pelo efeito pelicular (do inglês - *Skin Effect*) que, de acordo com o campo magnético variável, induz no próprio condutor correntes que se opõem a corrente da fonte geradora, fazendo com que a corrente do circuito se desloque para as regiões mais periféricas do condutor. Isto provoca uma redução da área útil para a circulação da corrente, resultando no aumento aparente da resistência do condutor. O efeito pelicular é calculado por:

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}} \text{ [m]} \quad (11)$$

Em que:

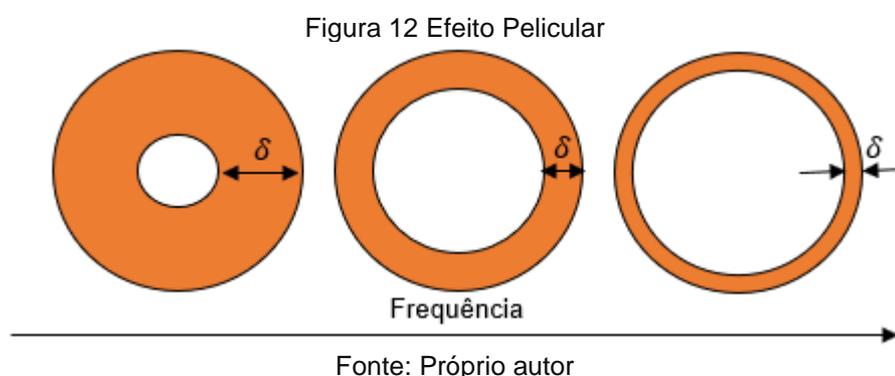
$\delta$  – Profundidade de penetração (espessura pelicular) [m]

$\omega$  – Frequência angular [rad/s]

$\rho$  – Resistência específica (resistividade) do material condutor [ $\Omega \cdot m$ ]

$\mu$  – Permeabilidade magnética do material [H/m]

Com a finalidade de simular, para o cobre obtêm-se em frequências de 60Hz a profundidade de penetração da corrente elétrica de aproximadamente 8,5mm. Em 10kHz o valor é de 0,65mm e, para 100kHz  $\delta$  equivale a 0,21mm. Esses cálculos evidenciam que o efeito reduz a área útil de circulação da corrente, já que a profundidade de penetração é menor. O efeito é ilustrado na Figura 12.



A diminuição da área útil para circulação da energia elétrica em corrente alternada aumenta a resistência aparente do circuito que conseqüentemente, aumenta também as perdas de potência em alta frequência.

Pensando em minimizar o efeito pelicular, existe no mercado o cabo Litz que é formado por diversos pequenos fios isolados. Desta maneira, a corrente é espalhada entre os fios que o compõem. Além de sistemas WPT, o cabo também aparece em aplicações de rádio frequência, áudio, conversores do tipo *Buck/Boost* entre outros.

Portanto, para sistemas de transferência de energia sem fio, seja em 100kHz ou 6,78MHz, deve se considerar as perdas ôhmicas e as perdas em regime de corrente alternada, além dos valores de indutância e capacitância parasitas do circuito. Esses efeitos são relevantes para explicar as perdas de potência entre a entrada e a saída do sistema.

### 3.5 EFICIÊNCIA

Com os principais fundamentos já explicados, é possível entender como as variáveis afetam o rendimento do sistema. Portanto, o rendimento  $\eta$ , para circuitos elétricos é definido de acordo com a Equação 12:

$$\eta = \frac{P_{Rx}}{P_{Tx}} \cdot 100 [\%] \quad (12)$$

Sendo:

$P_{Rx}$  – Potência no sistema receptor

$P_{Tx}$  – Potência no sistema transmissor.

Em um artigo publicado pela Witricity [1], há o desenvolvimento de uma equação de eficiência (Equação 14), na qual chega-se a uma relação chamada de figura de mérito (Equação 13) para sistemas WPT. A figura de mérito é o produto entre o fator de qualidade (Q) e o coeficiente de acoplamento magnético (k), portanto é um bom indicador quantitativo para o rendimento do sistema, expresso em:

$$U = kQ \quad (13)$$

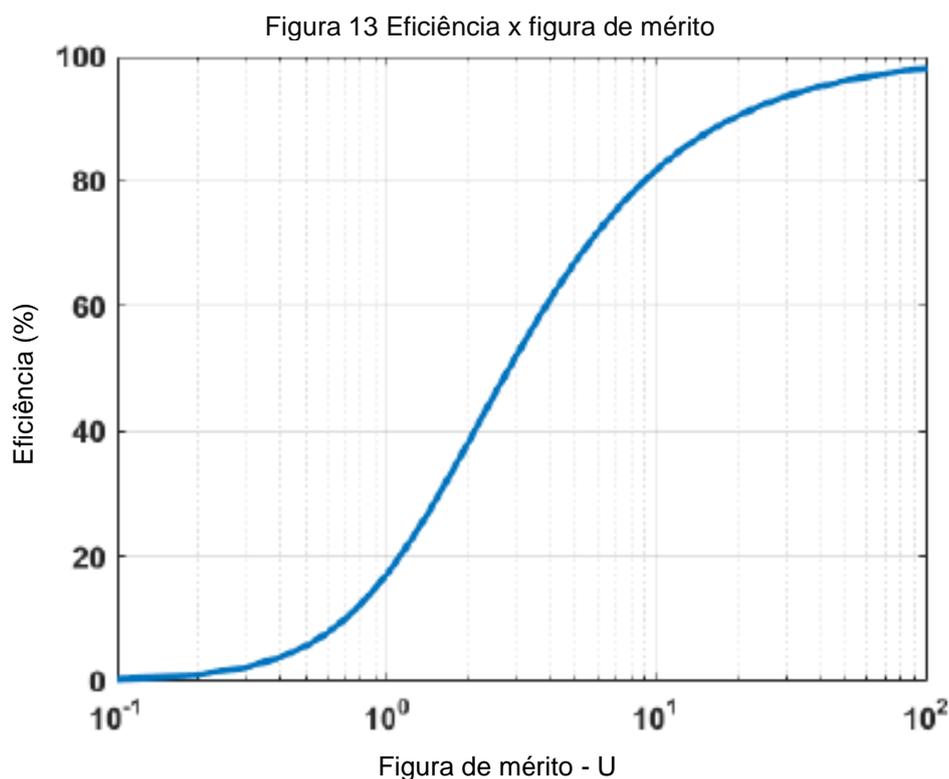
k - Coeficiente de acoplamento [adimensional]

Q - Fator de qualidade [adimensional]

Com isso, o rendimento pode ser calculado como:

$$\eta = \frac{U^2}{(1+\sqrt{1+U^2})^2} \quad (14)$$

A partir da Equação 14 foi elaborado o gráfico mostrado na Figura 13, onde pode ser observado que para uma figura de mérito maior que 40, obtêm-se eficiências superiores a 95%.



Fonte: Witricity [1]

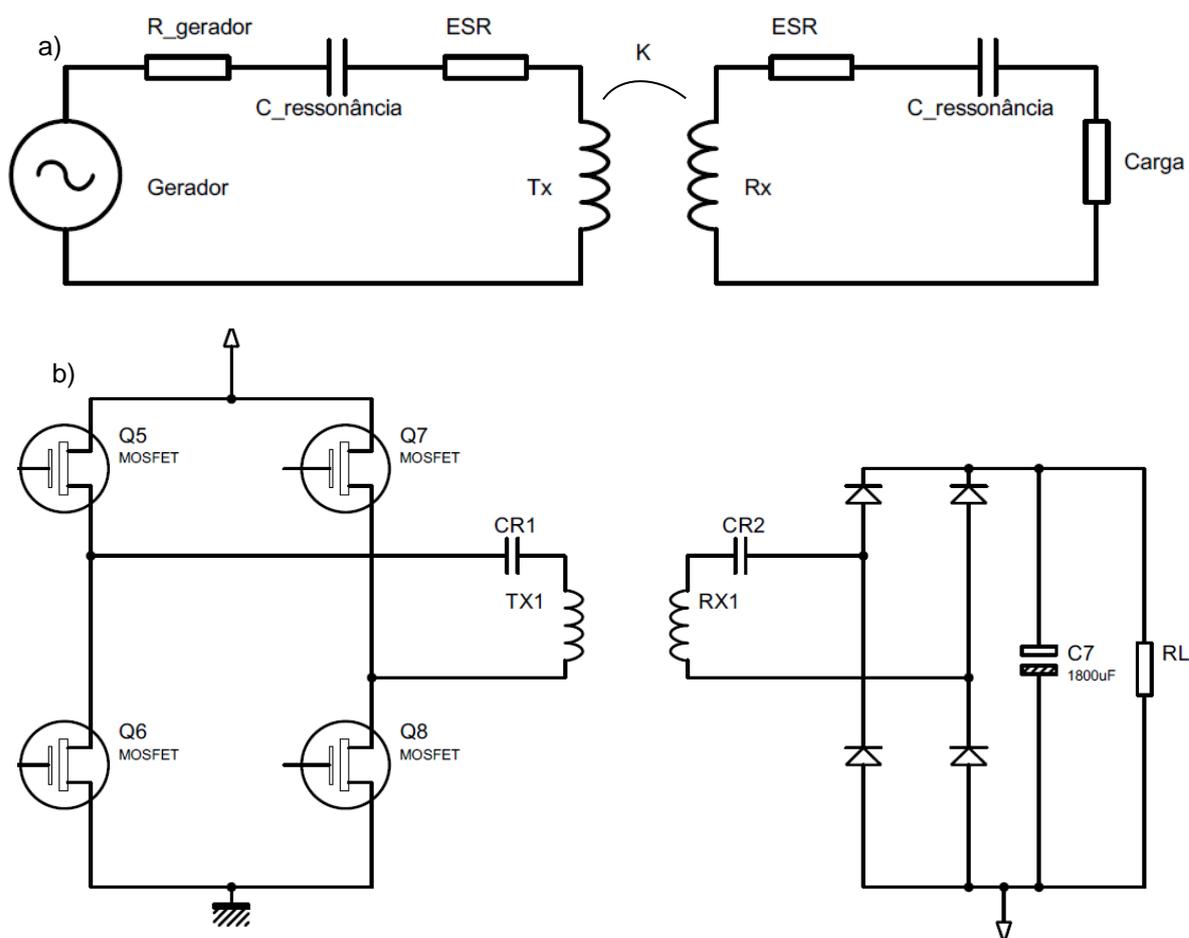
Sendo assim, a melhor eficiência do sistema depende principalmente de Q e k. Portanto, como k aumenta em função do alinhamento e das indutâncias entre as bobinas a melhor maneira de aumentar a eficiência do sistema é trabalhar com frequências mais elevadas e o menor desalinhamento possível. Como o acoplamento magnético para sistemas IPT é fraco, ainda sim obtêm-se bom rendimento melhorando o valor do fator de qualidade.

Para ter um bom acoplamento magnético, o sistema perde liberdade de distância nos eixos X, Y e Z (Figura 8), já que um bom alinhamento é crucial. Por outro lado, aumentar a frequência faz com que as perdas em AC, como o efeito pelicular, sejam relevantes. Além disso, sistemas em alta frequência e potência demandam bobinas e eletrônica mais sofisticada, que resulta em custo elevado e maior complexidade de projeto.

#### 4 DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA IPT: MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção, são descritos os materiais e métodos utilizados para o desenvolvimento do sistema IPT para transferência de energia sem fio. A Figura 14 mostra o circuito da montagem experimental: 14a diagrama de blocos simplificado; 14b diagrama detalhado do circuito.

Figura 14 Esquemático: a) resumido, b) expandido



Fonte: Próprio autor

Uma fonte de tensão em corrente alternada com um valor de resistência intrínseco, faz fluir uma corrente elétrica por um circuito RLC. Esta energia induz outra de sentido contrário na bobina receptora, como visto no capítulo anterior. Existem diversas fontes de resistências para passagem de corrente em altas frequências, por isso, neste esquemático da Figura 14a, essas fontes foram simplificadas como resistência série equivalente ESR – (*Equivalent Series Resistance*). Na Figura 14b, a fonte de tensão é sintetizada por um conversor DC/AC, cuja estrutura é formada por uma associação de transistores conhecida como ponte H. No lado do receptor, é adicionada

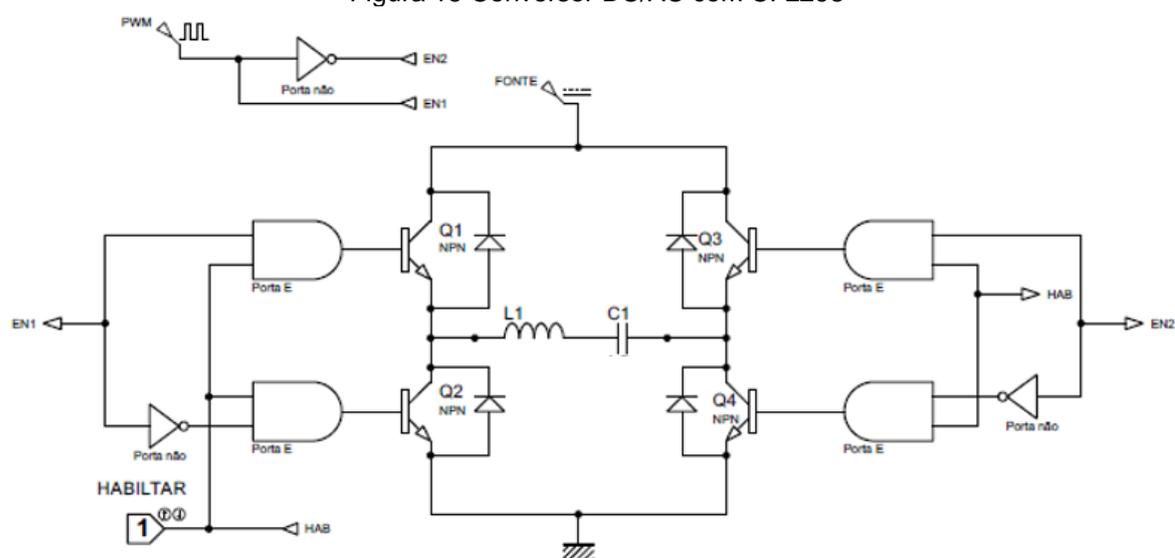
uma ponte retificadora associada a um filtro capacitivo, cuja função é converter a tensão alternada em tensão contínua.

Para a etapa de conversão DC/AC foram utilizados dois módulos, sendo um deles constituído por ponte H completa com TBJs (Transistor Bipolar de Junção ou de Junção Bipolar) para baixas frequências (até 40kHz), e outro constituído por uma ponte trifásica com MOSFETs (*Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*) para altas frequências (até 100kHz). Ainda que o último seja com topologia trifásica, foram utilizados apenas duas meia pontes do mesmo, formando uma ponte H. Nas próximas seções eles serão descritos em detalhes.

#### **4.1 CONVERSOR DC/AC**

A etapa de conversão DC/AC é entendida melhor por meio da Figura 15, na qual apresenta-se uma ponte H com 4 transistores NPN e três sinais digitais de entrada. O sinal “habilitar” quando em nível alto em conjunto com uma das entradas EN1 ou EN2, permite o fluxo de corrente. Quando Q1 e Q4 estão ativos (EN1 e habilitar em nível alto), há circulação de energia da esquerda para a direita. Por outro lado, quando Q2 e Q3 estão ativos (EN2 e habilitar em nível alto) há circulação de energia da direita para a esquerda no indutor. Essa variação de fluxo de corrente gera o sinal AC.

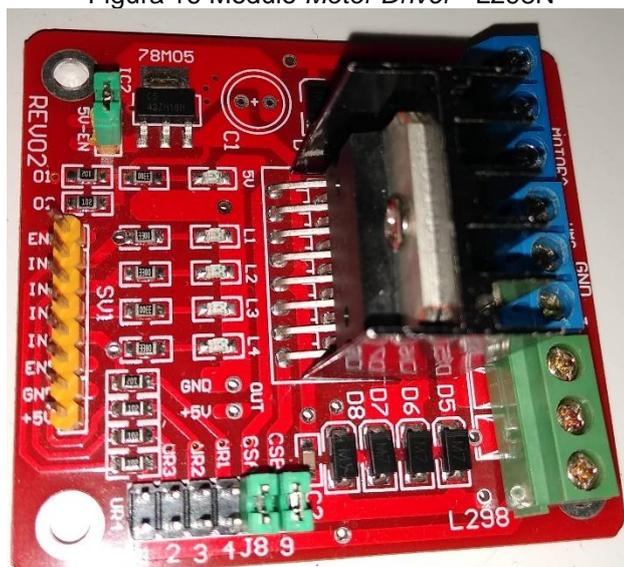
Figura 15 Conversor DC/AC com CI L298



Fonte: Próprio autor

O circuito integrado (CI) L298 é constituído por uma ponte H completa, incluindo os circuitos de acionamento dos transistores (*gate driver*), sendo muito utilizado para acionamento de motores, dentre outras aplicações. Através do controle adequado dos seus transistores é possível acionar ou parar um motor, inverter o sentido de rotação, além de controlar a velocidade por meio de técnicas de modulação. Apesar do controle de motores não ser o tema do projeto, este CI atende aos requisitos de *hardware* necessários para conversão DC/AC. Além disso, é disponível no mercado por meio de módulos prontos (Figura 16), fator que dispensa a necessidade de fabricar uma placa de circuito impresso para conexão com os demais componentes. O esquemático do módulo e folha de dados do CI estão, respectivamente, no apêndice A e anexo A.

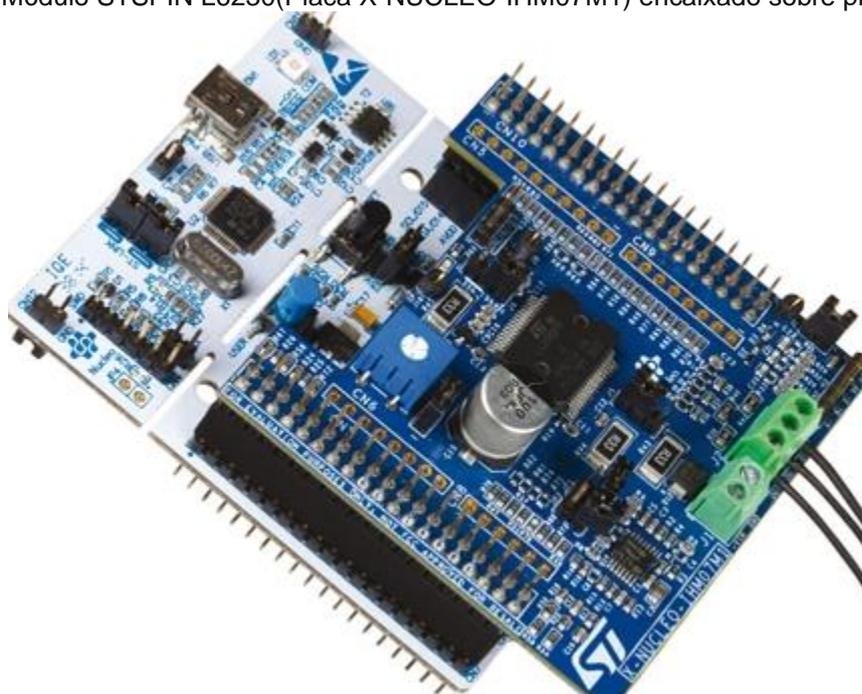
Figura 16 Modulo Motor Driver - L298N



Fonte: Próprio autor

Por conta da limitação da frequência de chaveamento (máximo de 40kHz) dos transistores bipolares integrados no CI L298, foi usado também um módulo da STMicroelectronics da família STSPIN (Figura 17) contendo o circuito integrado L6230, indicado para controle de motores sem escovas. A placa STSPIN foi construída de modo a ser encaixada sobre uma placa núcleo que contém algum microcontrolador de 32bits da STM (família de microcontroladores STM32), seguindo o padrão de conexão *Morpho*. Sendo assim, a escolha deste módulo para o projeto se deve por causa da facilidade de integração com a placa de desenvolvimento.

Figura 17 Módulo STSPIN L6230(Placa X-NUCLEO-IHM07M1) encaixado sobre placa Núcleo



Fonte: STMicroelectronics.

Como visto nas Figuras 15, 16 e 17 usa-se transistores MOSFETs e TBJs para tratar um sinal de alta potência, através do chaveamento da porta ou base destes componentes. Esse chaveamento provém de um sinal oscilatório de baixa potência modulado por largura de pulso PWM – *Pulse Width Modulation*. Considerando a flexibilidade dos microcontroladores, o STM32 gera esse sinal PWM, mas não haveria problemas em gerar este PWM com outros circuitos oscilatórios, a fim de acionar os transistores.

O microcontrolador gera o PWM com uma tensão de 3,3V e, através dos *gate drivers*, faz o acionamento dos transistores. Estes, por sua vez, comandam um sinal de potência maior, que é aplicado ao indutor (bobina) de transmissão através de um capacitor em série. O valor do indutor e do capacitor são calculados para que a frequência de ressonância seja a mesma da frequência de chaveamento, de modo a se obter a máxima transferência de energia, conforme descrito no capítulo 3.

## 4.2 MICROCONTROLADOR STM32

O STM32F4 é uma família de dispositivos baseados na arquitetura ARM de núcleo CORTEX-M4 de 32 bits. A extensão do código do produto STM32F401RE, especifica a frequência, quantidade de memória Flash, pinos GPIO (*General Purpose*

*Input / Output*) e memória RAM (Random Access Memory). Logo, de acordo com a folha de dados (*datasheet*) [24] e o manual de referência (*reference manual*) [25] para esse microcontrolador obtêm-se:

- Memória Flash de 512 KBytes;
- Memória RAM de 96 KBytes;
- Pinos de GPIO totais a 50;
- Frequência máxima de 84MHz;
- Temporizadores para propósitos gerais;
- Encapsulamento SMD no LQFP64.

Diferentemente de sistemas modelados com o Arduino ou PIC, o STM32, através da arquitetura ARM, oferece confiabilidade, robustez e segurança, sendo um microcontrolador já consolidado no mercado, utilizado em aplicações aquáticas, terrestres e até em sistemas embarcados aéreos. O STM32 oferece mais pinos, periféricos e memória, quando comparado aos outros microcontroladores da mesma escala de preço.

- **Arquitetura ARM**

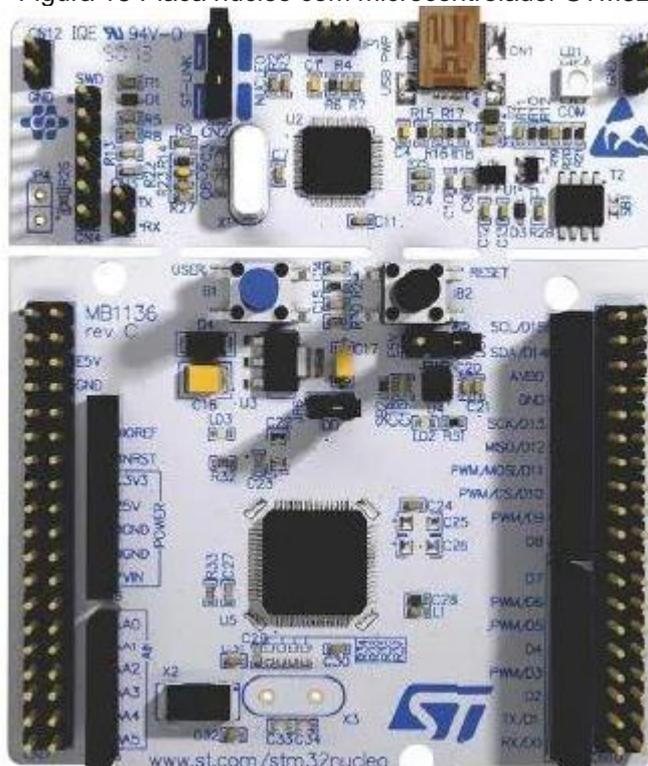
O acrônimo ARM significa *Advanced RISC Machine* (máquina RISC avançada), ou seja, em oposição ao CISC (filosofia de arquitetura de processador com conjunto complexo de instruções, característico dos processadores x86 embarcados em computadores de empresas famosas como a Intel ou AMD), a máquina RISC tem um conjunto reduzido de instruções para o processamento de dados, o que os torna uma opção interessante para eletroportáteis como celulares, vídeo games e sistemas de automação. Para estes equipamentos não é necessário um poder de processamento de dados semelhante ao computador de alto desempenho moderno, além de oferecerem uma economia de energia bem significativa.

- **Placa de desenvolvimento**

O STM32F4 - núcleo é uma placa de desenvolvimento (Figura 18), análoga ao *Arduino*, usada para projetos em eletrônica, automação e IoT. Possui os conectores

padrões do *Arduino*, bem como os *Morphos*, que estão mais externos na placa. Nesta placa é gerado um código em C, cujo algoritmo desenvolve o SPWM que controla o acionamento do conversor DC/AC.

Figura 18 Placa núcleo com microcontrolador STM32

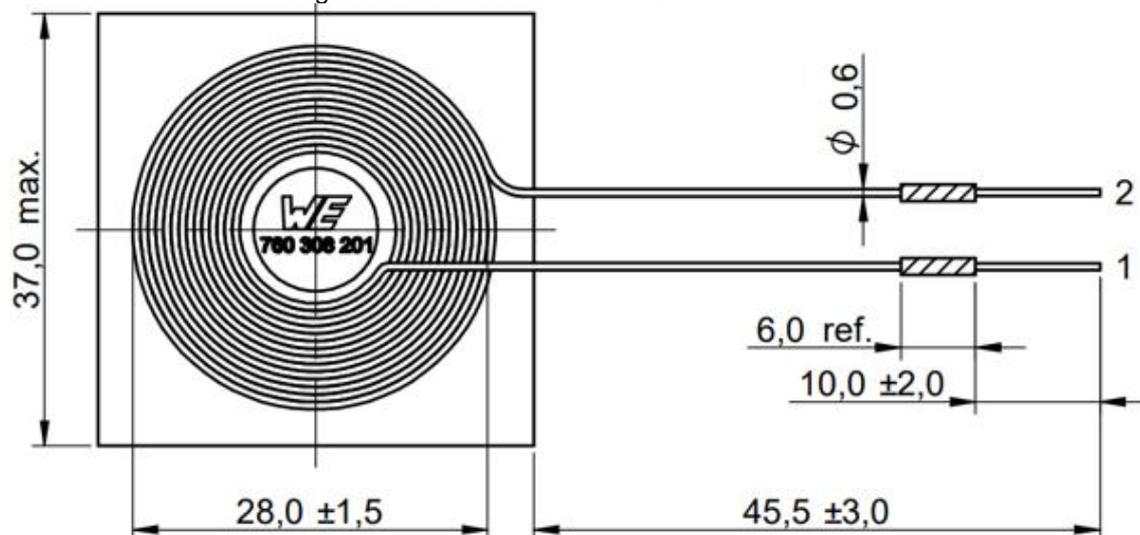


Fonte: STMicroelectronics [23]

### 4.3 BOBINAS

Primeiramente, foi utilizada uma bobina em espiral enrolada a mão, constituída de cobre esmaltado AWG24 com diâmetro de 30mm. Posteriormente, migrou-se para bobinas em espirais planas com cabos *Litz* e *shield* eletromagnético com indutância de 10uH, produzidas pela Wurth Elektronik, de código 760308201, como mostra a Figura 19. Outros detalhes de dimensão, bem como características elétricas do componente, podem ser encontrados no anexo C deste trabalho.

Figura 19 Bobina 760308201. Dimensões em mm



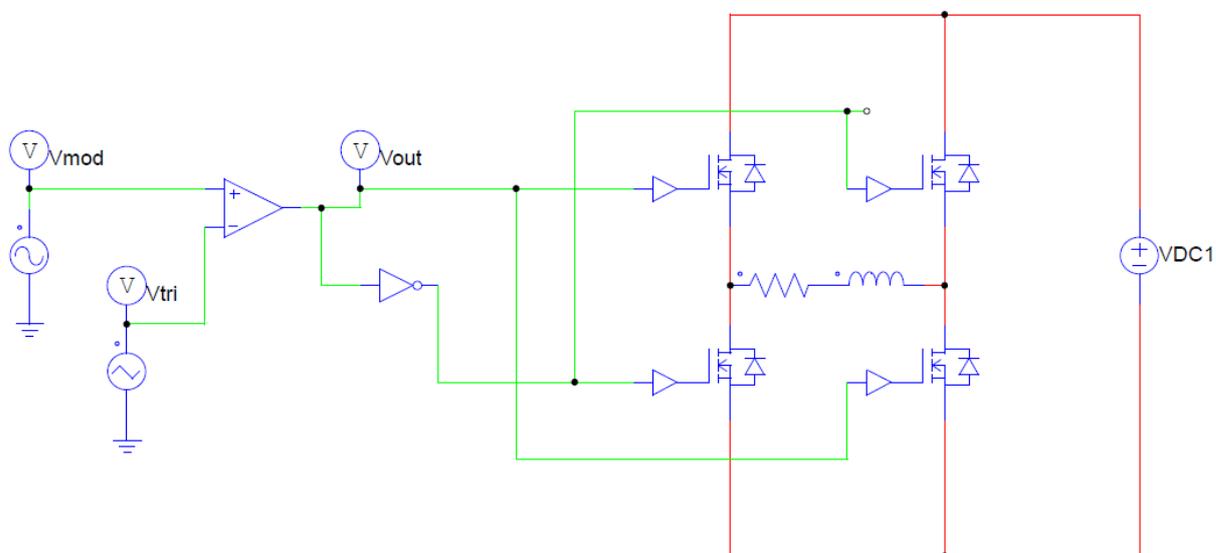
Fonte: Wurth Elektronik

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 SINAL DE ACIONAMENTO

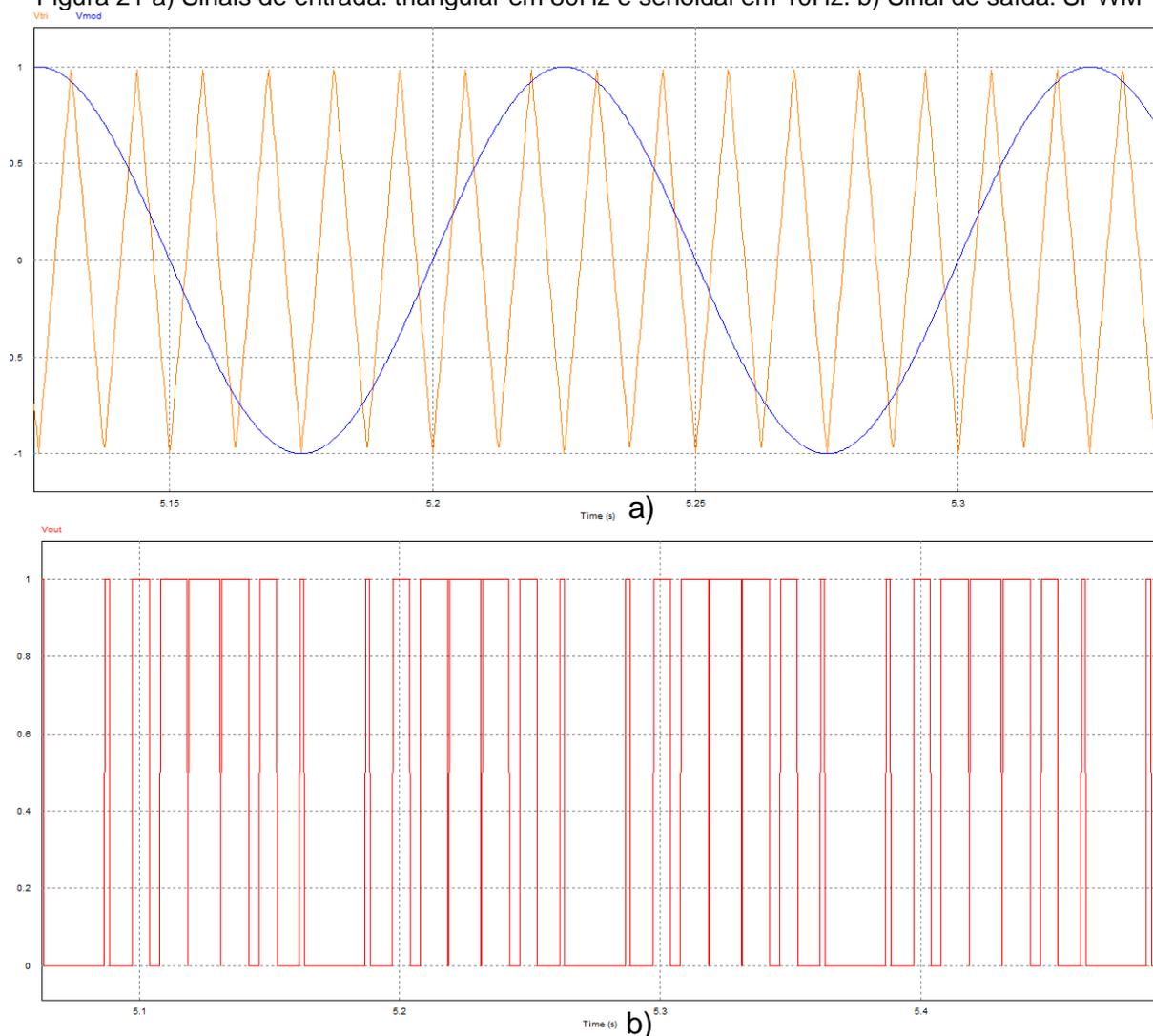
O sinal de acionamento dos transistores foi simulado no software PSIM 9.0, de acordo com o esquemático da Figura 20. O PSIM é um software de simulação de eletrônica de potência da empresa PowerSim. A versão utilizada neste trabalho foi a versão Demo, que não tem custo de utilização. Nesta fase do desenvolvimento, foi simulado um PWM senoidal (SPWM). Neste tipo de modulação um sinal senoidal é comparado com uma portadora triangular, resultando em um PWM conforme mostra a Figura 21.

Figura 20 Esquemático de simulação



Fonte: Próprio autor

Figura 21 a) Sinais de entrada: triangular em 80Hz e senoidal em 10Hz. b) Sinal de saída: SPWM



Fonte: Próprio autor

Na Figura 21a, o sinal senoidal (em azul) é comparado ao sinal triangular (em laranja). A Figura 21b mostra o resultado da modulação, onde a curva em vermelho é o sinal PWM que é aplicado para acionamento dos transistores.

Para se conseguir um sinal semelhante fora da simulação é usado o microcontrolador STM32. Configurando seus temporizadores (*timers*) para gerar um PWM de 10kHz e que, a cada 1 milissegundo, chame uma rotina de interrupção para calcular o ciclo de trabalho (*duty cycle*). Assim, através de uma função trigonométrica, é alterado o ciclo de trabalho do PWM, fazendo-se com que a largura de pulso seja modulada por uma senoide, de acordo com a Figura 22. O STM32 é programado em um *software* aberto chamado CubeIDE, desenvolvido pela empresa STMicroelectronics.

Figura 22 Trecho do código fonte para geração do SPWM

```

320 void HAL_TIM_PeriodElapsedCallback(TIM_HandleTypeDef *htim)
321 {
322     if(htim -> Instance == TIM1){ //10kHz
323         HAL_GPIO_TogglePin(GPIOA, LED2_GREEN_Pin);
324         // TIM1->CCR1 = 80;
325
326         if (counter==200) ////leva 200 ciclos de PWM de 10kHz
327             counter=0;
328         counter++;
329
330         cosseno = ( 100*cos(2*PI*0.005*counter) + 100)/2 ;
331         TIM1->CCR1 = cosseno;
332     }
333     if(htim -> Instance == TIM2){ //50 hz
334     }
335 }

```

Fonte: Próprio autor

A linha de código de número 330, da Figura 22, trata de uma função de onda trigonométrica do tipo:

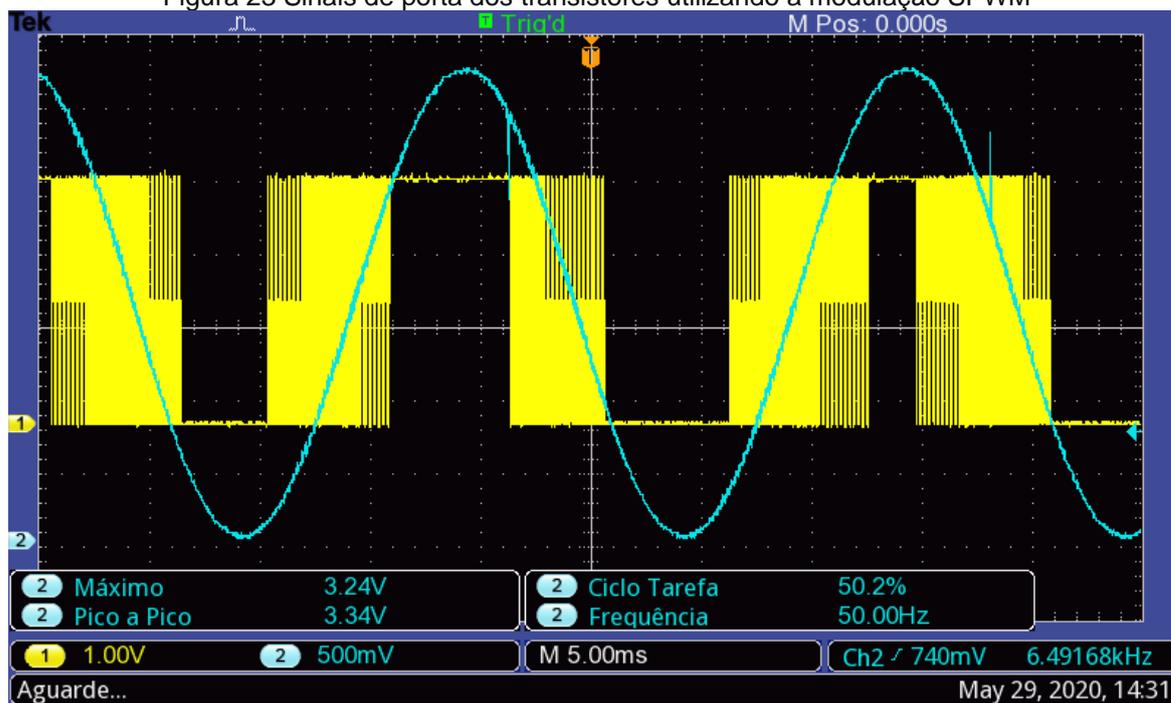
$$CCR1 = A \cos(\omega t) + offset \quad (15)$$

Em que:

- CCR (*Capture Compare Register*), é o registrador que controla a largura de pulso, de acordo com as configurações previamente feitas em linguagem C, se este valor for 0 significa um PWM de *duty cycle* de 0%, caso for 100, implica em 100% de ciclo de trabalho.
- A é a constante de amplitude da função de onda
- *Offset* é um valor fixo que será somado à função de onda, no exemplo é 100.
- $\omega$  equivale a  $2\pi$ \*frequência
- t é o tempo, contado a cada milissegundo pela variável *counter*.

Logo, com o registrador CCR alternando de valor em função da equação de onda, tem-se os gráficos capturados no osciloscópio apresentados na Figura 23.

Figura 23 Sinais de porta dos transistores utilizando a modulação SPWM



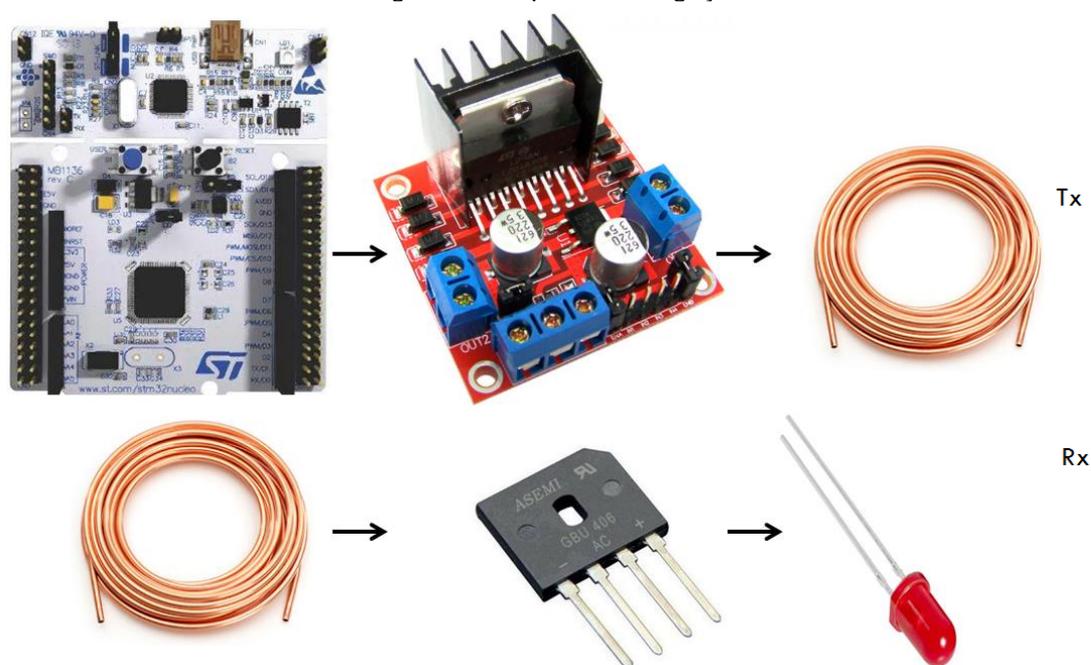
Fonte: Próprio autor

Observa-se que o sinal de tensão senoidal modulado pela largura de pulso – SPWM é semelhante ao capturado pelo instrumento. Para fins didáticos foi ajustado o filtro RLC para obter a senoide demodulada com frequência de 50Hz. Esta técnica é bem difundida no campo de controle de motores e fontes chaveadas.

## 5.2 TESTES DO SISTEMA IPT

Os primeiros testes de funcionamento foram realizados com as bobinas enroladas a mão e os componentes da Figura 24. Nesta condição foi utilizado o módulo L298N como conversor DC/AC, operando com modulação SPWM com portadora de 10kHz e com frequência fundamental de 50Hz, conforme a simulação realizada. Percebeu-se que houve dificuldade na medição do valor da indutância mesmo certificando que o diâmetro estava constante em 30mm. Logo, sem o valor de indutância não é possível calcular o capacitor série de ressonância. Por isso, com a distância de aproximadamente 1cm, observou-se que 9V na entrada era reduzida para a metade na saída. Várias são as possíveis causas, conforme discutido na seção 3.

Figura 24 Sequência de ligação

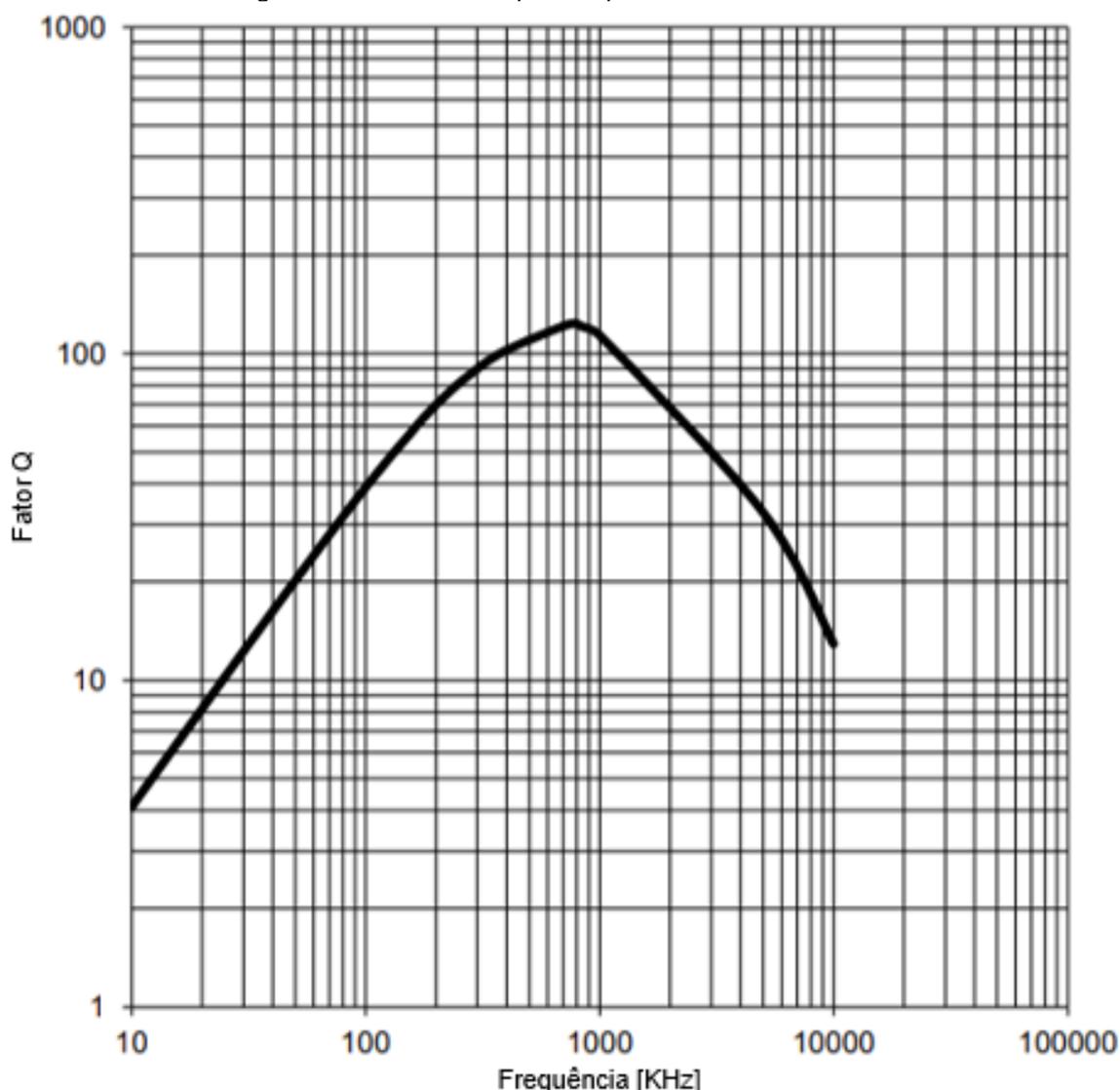


Fonte: Próprio autor

Quando as bobinas foram trocadas por aquelas apropriadas para transferência indutiva de potência da Wurth Elektronik com 10 $\mu$ H, notou-se que, de acordo com o gráfico da Figura 25, o sistema trabalharia com fator de qualidade maior em frequências mais elevadas. Para a frequência anterior de 10kHz, o fator de qualidade seria de 5, já em 400kHz, o valor saltaria para 100.

Quando o primeiro conversor DC/AC – L298N começou a operar em 100kHz, visando um Q igual a 40, o sistema apresentou aquecimento incomum, acima da temperatura ambiente de 25°C, após poucos minutos de funcionamento. Através do datasheet, verificou-se que o limite de frequência era de 40kHz. Portanto, em 100kHz os transistores bipolares não chaveavam, mas sim, comportavam-se como um curto-circuito, o que justifica o aquecimento excessivo.

Figura 25 Fator Q x Frequência para a bobina 760308201



Fonte: Würth Elektronik [22].

De acordo com a Figura 25, o ideal seria trabalhar com a frequência aproximada de 800kHz. Neste caso, porém, todos os componentes utilizados deveriam ser redimensionados. Portanto, escolheu-se o módulo STSPIN L6230 que estava disponível, respeitando seu limite de operação de 100kHz. Assim, para frequência de operação de 100 kHz e indutância das bobinas de 10uH, foi calculado o capacitor série de 220nF com dielétrico de poliéster, de acordo com a equação de ressonância (Equação 5).

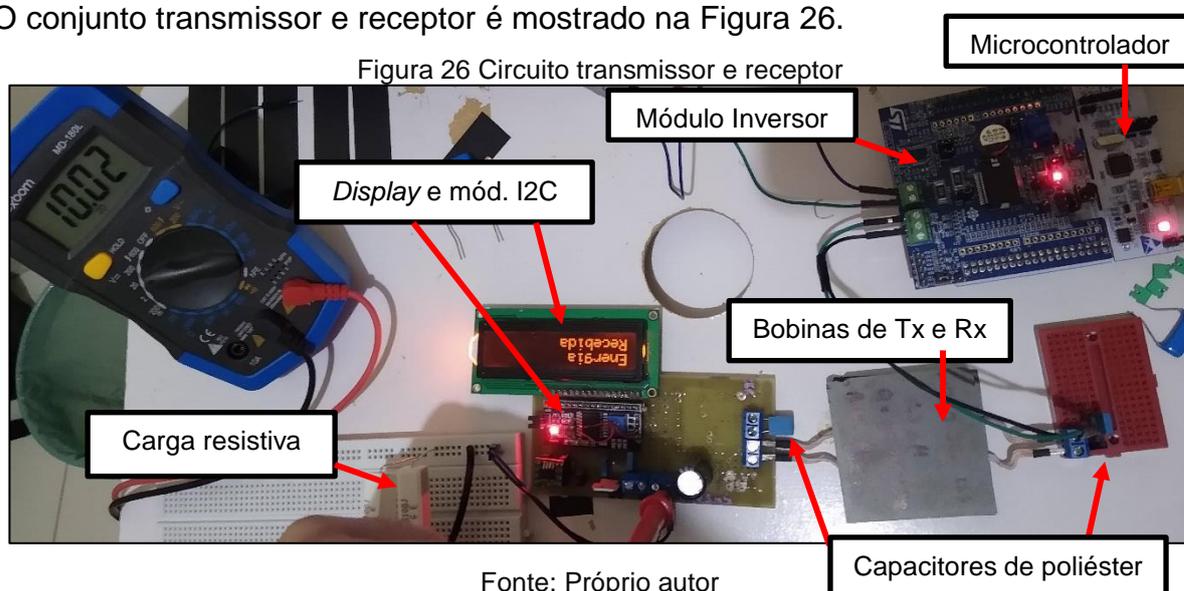
Finalmente, a implementação do sistema de transmissão de energia inclui os seguintes componentes:

- Microcontrolador STM32F4 (para a geração do sinal de acionamento dos transistores);
- Módulo STSPIN L6230;
- Capacitor série de 220nF de poliéster;
- Bobina 760308201 de 10uH.

O sistema receptor inclui os seguintes componentes:

- Bobina 760308201 de 10uH;
- Capacitor série de 220nF de poliéster;
- Diodos schottky smd (*surface mounted device*) em ponte retificadora – V8PA15-M3.
- Filtro capacitivo de 1800uF;
- Resistores de valor nominal de 10Ω/10W como carga
- *Display* LCD de caracteres com 16 linhas e 2 colunas, para indicar recepção de energia (controlado por módulo I2C e microcontrolador), apresentando a mensagem de “energia recebida”, quando a tensão ultrapassa os 5V.

O conjunto transmissor e receptor é mostrado na Figura 26.



### 5.3 RESULTADOS

Nas Tabelas 2 e 3, há uma série de medidas realizadas com o sistema montado de acordo com a Figura 26. Os testes foram feitos na melhor situação de acoplamento possível, ou seja, sem desalinhamento lateral, angular e distância no eixo Z de 20mm. O método de avaliação do sistema IPT que foi construído consiste em medir a tensão

e a corrente, tanto na transmissão quanto na recepção de energia. Após as medições, são calculadas as potências de entrada e saída, para determinar a eficiência do sistema (Equação 12) em diferentes condições de operação, alternando entre o valor ôhmico da carga, para verificar a relação entre a corrente e tensão, e a fonte de alimentação, para verificar se há diferença no rendimento quando utilizado uma fonte chaveada ou uma fonte ajustável de bancada.

Tabela 2 Medidas com fonte chaveada de 12V/2A

Transmissão			Recepção		
Condição	Tensão (V)	Corrente (mA)	Condição	Tensão (V)	Corrente (mA)
Mosfets desabilitados	12,23	0	-	-	-
Mosfets habilitados sem o secundário próximo	11,62	470	-	-	-
Mosfets habilitados com o secundário próximo	11,68	390	Sem carga	24,60	-
Mosfets habilitados com o secundário próximo	10,89	1060	Com carga de 5,5 $\Omega$	4,40	840
Mosfets habilitados com o secundário próximo	10,92	1070	Com carga de 10,4 $\Omega$	6,52	650
Mosfets habilitados com o secundário próximo	10,90	1080	Com carga de 20,5 $\Omega$	8,95	430
Mosfets habilitados com o secundário próximo	10,77	1150	Com carga de 38,6 $\Omega$	11,97	280
Mosfets habilitados com o secundário próximo	11,56	440	Com <i>diplay</i> , Módulo I2C e Micro.	17,50	-

Carga	Potência (W)		Eficiência
	Tx	Rx	
Com carga de 5,5 $\Omega$	11,54	3,70	32,1%
Com carga de 10,4 $\Omega$	11,68	4,24	36,3%
Com carga de 20,5 $\Omega$	11,77	3,85	32,7%

Com carga de 38,6 $\Omega$	12,39	3,35	27,0%
----------------------------	-------	------	-------

Fonte: Próprio autor

Tabela 3 Medidas com fonte de bancada ajustável de 15V/0,7A

Transmissão			Recepção		
Condição	Tensão (V)	Corrente (mA)	Condição	Tensão (V)	Corrente (mA)
Mosfets desabilitados	15,44	10	-	-	-
Mosfets habilitados sem o secundário próximo	14,95	890	-	-	-
Mosfets habilitados com o secundário próximo	15,33	180	Sem carga	20,00	-
Mosfets habilitados com o secundário próximo	15,02	760	Com carga de 5,5 $\Omega$	4,67	900
Mosfets habilitados com o secundário próximo	15,07	688	Com carga de 10,4 $\Omega$	6,89	668
Mosfets habilitados com o secundário próximo	15,15	521	Com carga de 20,5 $\Omega$	9,47	466
Mosfets habilitados com o secundário próximo	15,03	412	Com carga de 38,6 $\Omega$	11,75	284
Mosfets habilitados com o secundário próximo	15,33	206	Com <i>diplay</i> , Módulo I2C e Micro.	15,68	-

Carga	Potência (W)		Eficiência
	Tx	Rx	
Com carga de 5,5 $\Omega$	11,42	4,20	36,8%
Com carga de 10,4 $\Omega$	10,37	4,60	44,4%
Com carga de 20,5 $\Omega$	7,89	4,41	55,9%
Com carga de 38,6 $\Omega$	6,19	3,34	54,0%

: Próprio autor

Nas Tabelas 2 e 3, são apresentadas as medidas de tensão e corrente com um multímetro tanto na entrada do circuito transmissor - Tx, quanto na saída filtrada do

circuito receptor - Rx. Os parâmetros elétricos de entrada no Tx são provenientes da fonte de alimentação do circuito. Para a fonte chaveada 12V/2A (Tabela 2), a potência elétrica em Tx permanece com valor médio de 11,55W e em Rx de **3,78W**, variando apenas o valor da carga na saída do circuito no Rx. Sendo assim, há uma eficiência média de 32%. Ao passo que, para a fonte de bancada ajustável 15V/0,7A (Tabela 3), a potência elétrica no Tx diminui de 11,42W para 6,19W, conforme os valores de resistência de carga no Rx aumentam. Portanto, a potência média na saída do circuito alimentado pela fonte de 15/0,7A é de **4,13W** com uma eficiência média de 47,8%.

A tensão na condição em que não há carga no secundário aumenta exponencialmente extrapolando o valor anotado nas duas tabelas. Isso ocorre de acordo com a curva característica de carga e descarga do capacitor no filtro da recepção.

Observou-se que o circuito receptor funcionou de maneira mais satisfatória, entregando mais potência na saída, quando o diodo rápido 1N4148 foi trocado pelo diodo schottky V8PA15-M3, pois além de um tempo de recuperação menor, o schottky suporta corrente direta (IF) maior e possui tensão direta de condução de apenas 0,2V (totalizando 0,4V para o conjunto em ponte completa), diferente dos 1,4V de tensão direta no anterior. Em relação aos capacitores série de compensação, quando utilizado os de dielétrico de cerâmica notou-se diminuição na eficiência, quando comparado ao capacitor de poliéster. Além disso, houve aquecimento maior nessa condição. Ficou evidente também que o circuito ultrapassa os 70°C quando está transmitindo energia sem um receptor próximo. Nesta condição de temperatura elevada, o sistema transmissor altera suas características elétricas e perde muita energia por efeito joule.

## 6 CONCLUSÕES

Sistemas de transferência de energia elétrica sem fio representam a tendência de pesquisa e desenvolvimento de aparelhos com maior liberdade, independência e interoperatividade entre si. Assim como aconteceu com as redes de comunicação, os sistemas de WPT ainda precisam se consolidar e desenvolver, para conquistar mais mercado e se difundir nas aplicações residenciais e comerciais. Contudo, ainda é preciso superar os problemas de eficiência e desalinhamento sem renunciar aos protocolos de segurança, principalmente em relação a aquecimento de metais e a radiação do campo magnético. Outro ponto a ser considerado, é que há um crescente interesse em dispositivos chaveadores (transistores) constituídos de GaN (Nitreto de Gálio), que apresentam uma grande melhoria na eficiência em relação aos transistores de metal, óxido e silício para altas frequências. A tecnologia já está sendo usada em conversores *flyback* e tende a invadir o mercado de transmissão de energia no segmento que busca maior eficiência e liberdade em frequências mais elevadas.

Observa-se que o sistema de transferência de energia sem fio pelo método indutivo é extremamente influenciado pelo acoplamento magnético. Logo, se torna intolerante aos desalinhamentos nos eixos X e Y, tendo maior rendimento na menor distância em Z. Portanto, fica evidente que a teoria exposta anteriormente sobre fluxo magnético e fator de acoplamento está bem fundamentada.

Ao se tratar dos sistemas de curta distância, como o método indutivo e o capacitivo, os quais tem fundamentos semelhantes, grande parte do esforço de engenharia se concentra em três grandes áreas: o tratamento do sinal que vem da rede ou de uma fonte em conjunto com o acionamento dos elementos chaveadores de potência, a transmissão e a recepção da energia por elementos capacitivos e indutivos e o tratamento do sinal que alimentará a carga. Em casos de circuitos que venham a ser comercializados, ainda existem as preocupações com comunicação e com relação a proteção contra interferência eletromagnética e aquecimento.

Por fim, de acordo com os testes realizados usando uma carga resistiva de  $10\Omega$  (nominal), foi obtida uma eficiência média de aproximadamente 40%, entregando até 4,6W na saída do sistema de recepção de energia. Há muitos caminhos que poderiam ser seguidos para se obter um rendimento elétrico melhor, conforme sugerido a seguir:

- **Aumentar a frequência de operação:** para o circuito que foi desenvolvido não é possível aumentar a frequência já que os transistores chaveadores estão no limite máximo.
- **Aumentar o fator de qualidade:** como visto na Figura 25, a bobina utilizada não está trabalhando com o maior valor de Q possível, já que há limitação da frequência em 100kHz, sendo que o ideal seria 800kHz (para Q maior que 100).
- Utilizar capacitores e MOSFETs com baixo ESR e  $R_{ds_{on}}$  (Resistência entre dreno e fonte quando o canal está formado), respectivamente.
- Aplicar técnicas de ZVS (*zero voltage switching*) para comutação suave dos dispositivos chaveadores.

## 6.1 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se, a seguir, procedimentos para prosseguir a investigação e aprimorar os resultados obtidos nesta pesquisa.

- **Teste em bateria de veículos elétricos:** realizar testes de carregamento da bateria de veículos aquáticos para verificar o desempenho do sistema tanto em terra quanto em água salgada.
- **Implementação de um sistema FOD:** assim como há em muitos produtos comerciais seria desejável implementar um sistema de detecção de objeto estranho (FOD), que seja capaz de informar quando um objeto não compatível interage com o campo magnético, desligando o circuito. A técnica FOD pode seguir os modelos já descritos anteriormente, seja por cálculo de Q ou energia perdida, com algum protocolo de comunicação como bluetooth, NFC, entre outros.
- **Medidor de energia no secundário:** implementar a leitura da tensão com o microcontrolador na recepção a fim de mostrar o resultado no *display* de caracteres.
- **Melhoria na eficiência:** há diversas maneiras de melhorar o rendimento do sistema. Com um rendimento maior é possível a construção de circuitos que funcionem com distância mais alta no eixo Z.

- **Estudo do efeito de outras topologias no rendimento:** além da ponte H, existe também a meia ponte para conversão DC/AC. Também é possível alterar a configuração dos capacitores de ressonância para paralelo ou série/paralelo no Tx e Rx. Com a alteração na topologia, faz-se necessário estudar outras técnicas de modulação e chaveamento a fim de compará-las.
- **Transferência capacitiva de potência:** estudar e desenvolver um sistema CPT, com o propósito de comparar com o método indutivo.

## 7 REFERÊNCIAS

- [1] D. M. Kesler, "Highly Resonant Wireless Power Transfer," Witricity Corporation, 2017. Disponível em: <https://witricity.com/>. [Acesso em 12/06/2020].
- [2] Y. Wang, J. Qiao, J. Du, F. Wang e W. Zhang, "A view of research on wireless power transmission," Journal of Physics: Conference Series, 2018.
- [3] I. F. Lopes, "PROJETO E COMPENSAÇÃO DE PARÂMETROS DE TRANSFORMADOR DE NÚCLEO SEPARADO DESTINADO AO CARREGAMENTO DE BATERIAS DE VEÍCULOS SUBAQUÁTICOS AUTÔNOMOS," Universidade Federal Juiz de Fora, pp. 24-36, 2013.
- [4] J. Muhs, "Military Embedded," 07/12/2013. Disponível em: <https://militaryembedded.com/>. [Acesso em 12/06/2020].
- [5] F. Alencar, "TechTudo," 25/05/2015. Disponível em: <https://www.techtudo.com.br/noticias/noticia/2015/05/entenda-diferenca-entre-drone-e-vant-e-suas-aplicacoes-praticas.html>. [Acesso em 12/06/2020].
- [6] K. OWENS, "Wireless underwater charging tech will bring a new level of autonomy for UUVs," Defence systems, 01/08/2017. Disponível em: <https://defensesystems.com/articles/2017/09/01/navy-drone-uuv.aspx>. [Acesso em 12/06/2020].
- [7] M. M. E. Rayes, G. Nagib e W. G. A. Abdelaal, "A Review on Wireless Power Transfer," International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT), p. 10, 05/11/2016.
- [8] A. Tomar e S. Gupta, "Wireless Power Transmission: Applications and Components," International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), p. 08, 05/07/2012.
- [9] E. Giler, "WiTricity and the world: Eric Giler at TEDxPortland," Youtube, 15/05/2014. [Acesso em 21/06/2020].

Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=duFL3STguKw>.

[10] W. C. Brown, "The History of Power Transmission by Radio Waves," IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques, 1984.

[11] J. Love, "The History of The Electric Toothbrush," Electric Teeth, 14/11/2019. Disponível em: <https://www.electriceeth.co.uk/the-history-of-the-electric-toothbrush/>. [Acesso em 19/06/2020].

[12] H. P. Davis, "Nasa Technical Reports Server - NTRS," Nasa, 01/12/1978. Disponível em: <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=19790043362>. [Acesso em 20/06/2020].

[13] K. Nankivell, "Why the Future of Solar Powe is from space," Singularity Hub, 31/12/2018. Disponível em: <https://singularityhub.com/2018/12/31/why-the-future-of-solar-power-is-from-space/>. [Acesso em 20/06/2020].

[14] AirFuel Alliance. Disponível em: <https://airfuel.org/>. [Acesso em 23/06/2020].

[15] "WPC," Wireless Power Consortium, Disponível em: <https://www.wirelesspowerconsortium.com/>. [Acesso em 23/06/2020].

[16] R. Roy e K. Suresh, "A REVIEW ON CONTACTLESS ENERGY TRANSFER SYSTEM," International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), pp. 766 - 770, 04/2016.

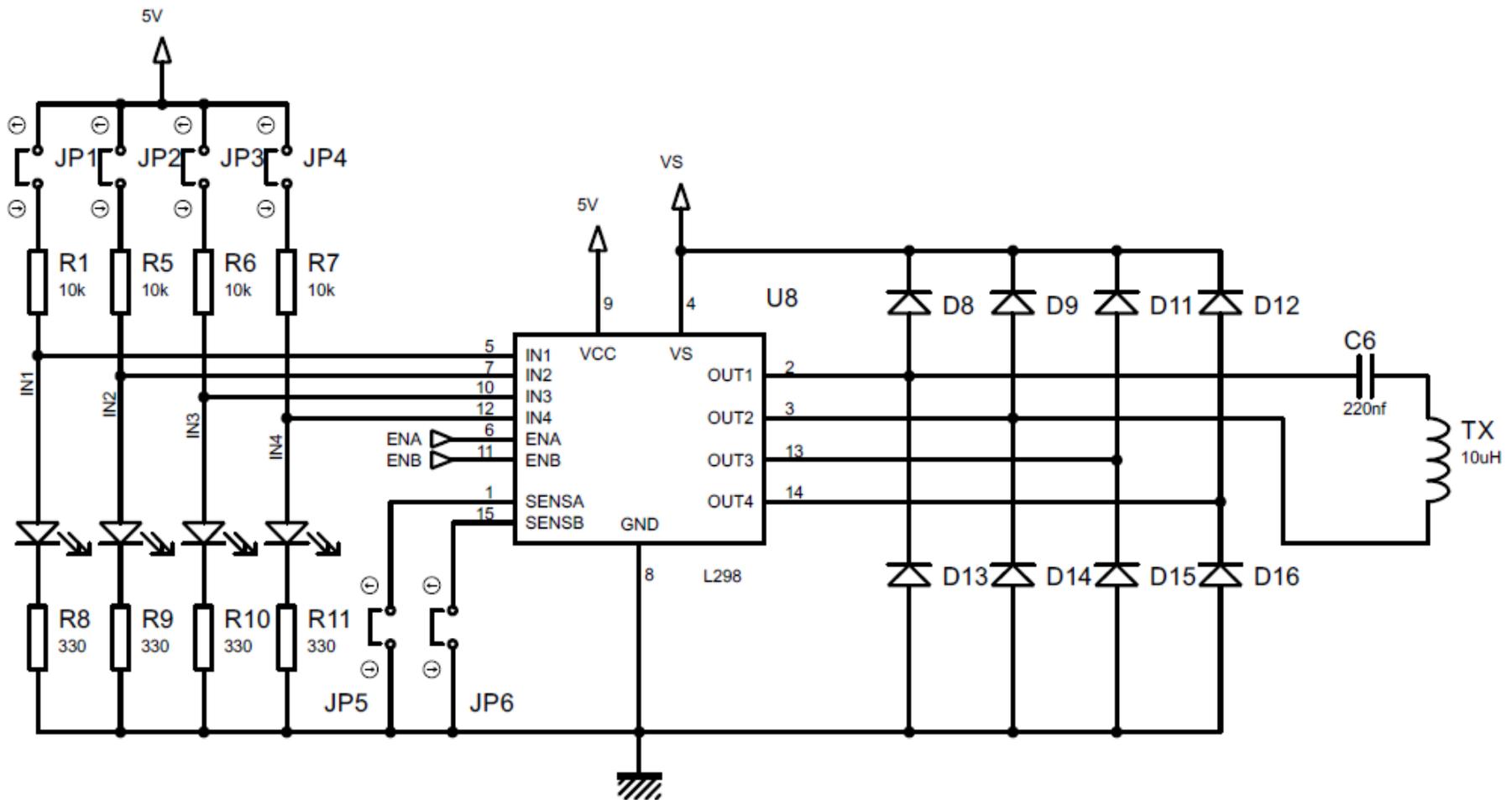
[17] R. HelerBrock, "O que é um transformador," Brasil Escola. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/o-que-e/fisica/o-que-e-um-transformador.htm>. [Acesso em 18/06/2020].

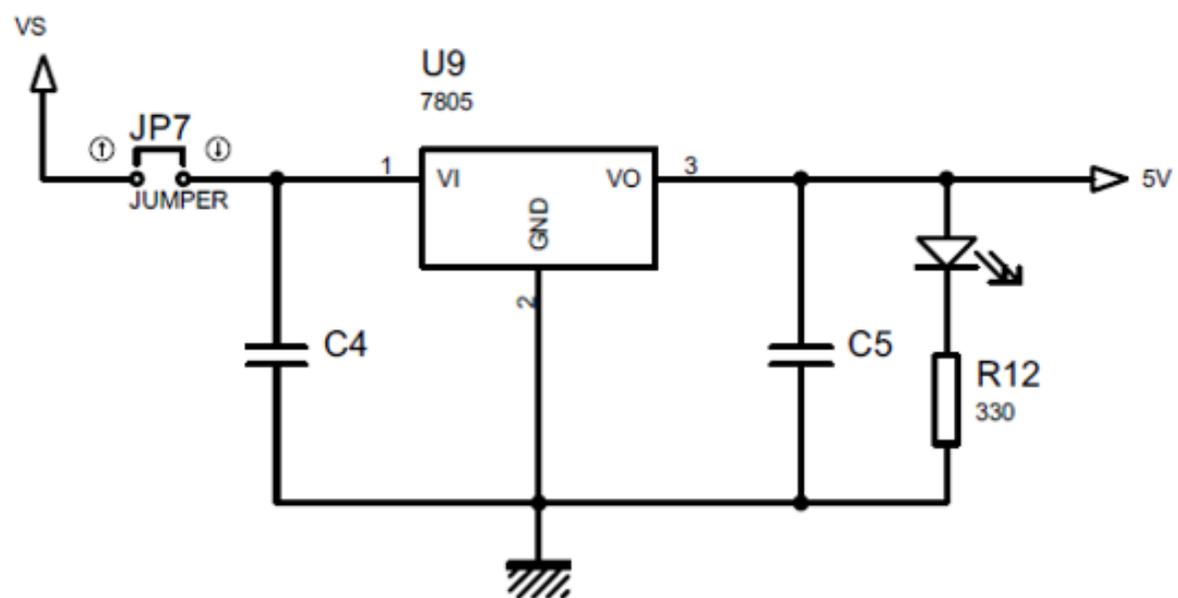
[18] J. F. d. Silva, "Campo magnético - Lei de Ampère - Regra da mão direita e formulação matemática," Uol Educação, 01/08/2013. Disponível em: <https://educacao.uol.com.br/disciplinas/fisica/campo-magnetico---condutor-retilineo-aplicacoes-da-lei-de-ampere.htm>. [Acesso em 05/10/2020].

- [19] B. Brum, "Transformadores," InfoEscola. Disponível em: <https://www.infoescola.com/eletricidade/transformadores/>. [Acesso em 18/06/2020].
- [20] R. Lakshmanan, K. H. Keat e R. Sinnadurai, "Wireless Power Transfer for Small Scale Application," IEEE Student Conference on Research and Development, pp. 1-6, 16/12/2013.
- [21] A. H. MORET, "Estudo e projeto de um sistema de transferência de energia elétrica sem fio com compensação capacitiva e baseado no transformador de bobinas em espirais planas fracamente acopladas," Tese de mestrado, pp. 20-53, 2018.
- [22] "Wireless Power Coils WE-WPCC," Würth Elektronik. Disponível em: [https://www.we-online.com/web/en/electronic\\_components/produkte\\_pb/demoboards/wireless\\_power/wireless\\_power\\_1.php](https://www.we-online.com/web/en/electronic_components/produkte_pb/demoboards/wireless_power/wireless_power_1.php). [Acesso em 05/09/2020].
- [23] STMicroelectronics. Disponível em: [https://www.st.com/content/st\\_com/en/products/evaluation-tools/product-evaluation-tools/mcu-mpu-eval-tools/stm32-mcu-mpu-eval-tools/stm32-nucleo-boards/nucleo-f401re.html](https://www.st.com/content/st_com/en/products/evaluation-tools/product-evaluation-tools/mcu-mpu-eval-tools/stm32-mcu-mpu-eval-tools/stm32-nucleo-boards/nucleo-f401re.html). [Acesso em 25/06/2020].
- [24] "STM32F401xD STM32F401xE Datasheet," STMicroelectronics, 12/01/2015. Disponível em: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32f401re.pdf>. [Acesso em 24/08/2020].
- [25] "Reference Manual," STMicroelectronics, 12/2018. Disponível em: [https://www.st.com/resource/en/reference\\_manual/dm00096844-stm32f401xbc-and-stm32f401xde-advanced-armbased-32bit-mcus-stmicroelectronics.pdf](https://www.st.com/resource/en/reference_manual/dm00096844-stm32f401xbc-and-stm32f401xde-advanced-armbased-32bit-mcus-stmicroelectronics.pdf). [Acesso em 24/08/2020].
- [26] F. D. Garcia, "Breve Histórico da ARM," Embarcados, 22/03/2017. Disponível em: <https://www.embarcados.com.br/breve-historico-da-arm/>. [Acesso em 24/08/ 2020].

## ANEXO A – MÓDULO INVERSOR L298N E CIRCUITO INTEGRADO L298

Apesar de ser um módulo comercializável, não existe um esquemático que atende perfeitamente o modelo usado, por isso foi construído esse anexo.





Informações relevantes da folha de dados do circuito integrado L298



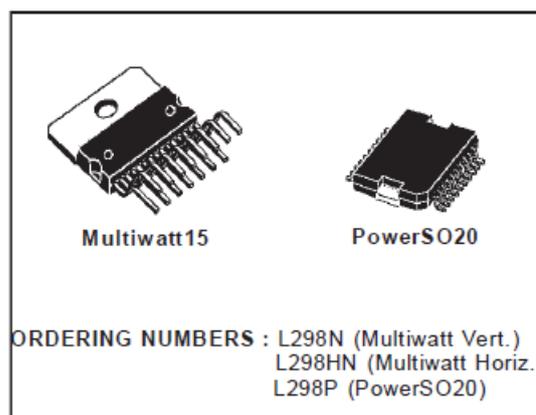
# L298

## DUAL FULL-BRIDGE DRIVER

- OPERATING SUPPLY VOLTAGE UP TO 46 V
- TOTAL DC CURRENT UP TO 4 A
- LOW SATURATION VOLTAGE
- OVERTEMPERATURE PROTECTION
- LOGICAL "0" INPUT VOLTAGE UP TO 1.5 V (HIGH NOISE IMMUNITY)

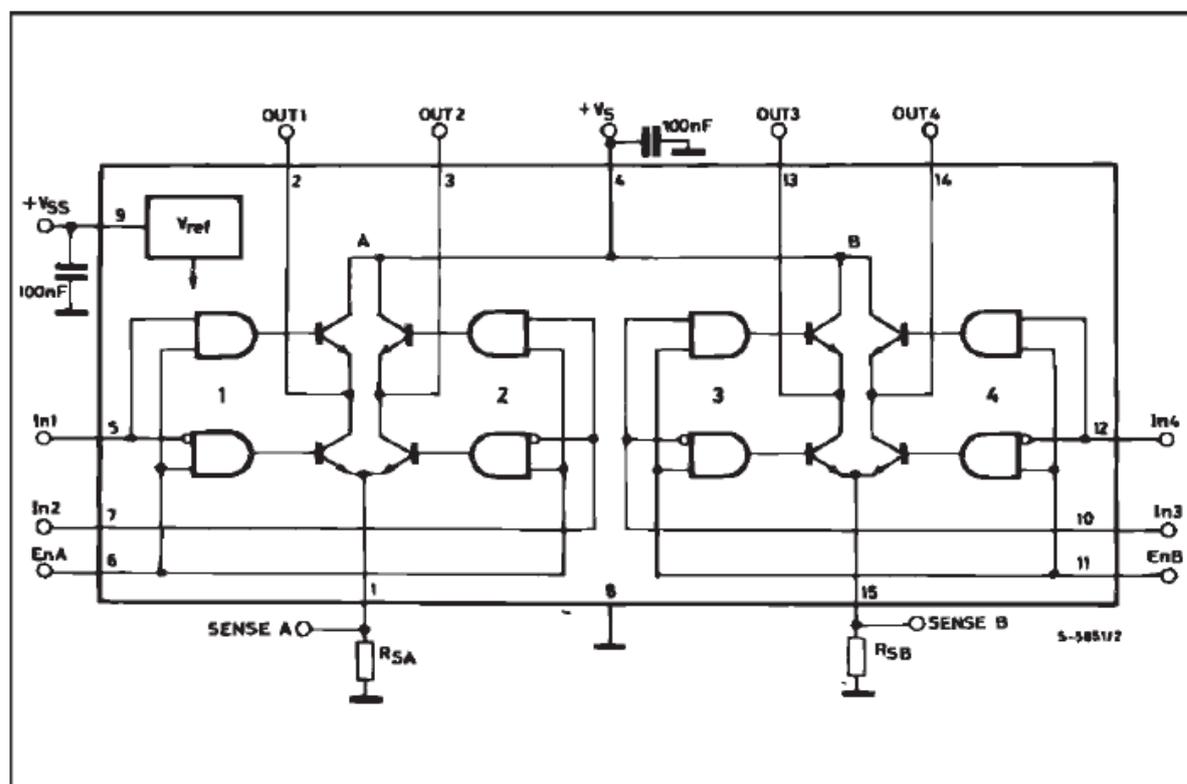
### DESCRIPTION

The L298 is an integrated monolithic circuit in a 15-lead Multiwatt and PowerSO20 packages. It is a high voltage, high current dual full-bridge driver designed to accept standard TTL logic levels and drive inductive loads such as relays, solenoids, DC and stepping motors. Two enable inputs are provided to enable or disable the device independently of the input signals. The emitters of the lower transistors of each bridge are connected together and the corresponding external terminal can be used for the con-



nection of an external sensing resistor. An additional supply input is provided so that the logic works at a lower voltage.

### BLOCK DIAGRAM



## L298

## ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Symbol	Parameter	Value	Unit
$V_S$	Power Supply	50	V
$V_{SS}$	Logic Supply Voltage	7	V
$V_I, V_{en}$	Input and Enable Voltage	-0.3 to 7	V
$I_O$	Peak Output Current (each Channel) – Non Repetitive ( $t = 100\mu s$ ) – Repetitive (80% on -20% off; $t_{on} = 10ms$ ) – DC Operation	3 2.5 2	A A A
$V_{sens}$	Sensing Voltage	-1 to 2.3	V
$P_{tot}$	Total Power Dissipation ( $T_{case} = 75^\circ C$ )	25	W
$T_{op}$	Junction Operating Temperature	-25 to 130	$^\circ C$
$T_{stg}, T_j$	Storage and Junction Temperature	-40 to 150	$^\circ C$

## ELECTRICAL CHARACTERISTICS (continued)

Symbol	Parameter	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
$T_1 (V_i)$	Source Current Turn-off Delay	$0.5 V_i$ to $0.9 I_L$ (2); (4)		1.5		$\mu s$
$T_2 (V_i)$	Source Current Fall Time	$0.9 I_L$ to $0.1 I_L$ (2); (4)		0.2		$\mu s$
$T_3 (V_i)$	Source Current Turn-on Delay	$0.5 V_i$ to $0.1 I_L$ (2); (4)		2		$\mu s$
$T_4 (V_i)$	Source Current Rise Time	$0.1 I_L$ to $0.9 I_L$ (2); (4)		0.7		$\mu s$
$T_5 (V_i)$	Sink Current Turn-off Delay	$0.5 V_i$ to $0.9 I_L$ (3); (4)		0.7		$\mu s$
$T_6 (V_i)$	Sink Current Fall Time	$0.9 I_L$ to $0.1 I_L$ (3); (4)		0.25		$\mu s$
$T_7 (V_i)$	Sink Current Turn-on Delay	$0.5 V_i$ to $0.9 I_L$ (3); (4)		1.6		$\mu s$
$T_8 (V_i)$	Sink Current Rise Time	$0.1 I_L$ to $0.9 I_L$ (3); (4)		0.2		$\mu s$
$f_c (V_i)$	Commutation Frequency	$I_L = 2A$		25	40	KHz
$T_1 (V_{en})$	Source Current Turn-off Delay	$0.5 V_{en}$ to $0.9 I_L$ (2); (4)		3		$\mu s$
$T_2 (V_{en})$	Source Current Fall Time	$0.9 I_L$ to $0.1 I_L$ (2); (4)		1		$\mu s$
$T_3 (V_{en})$	Source Current Turn-on Delay	$0.5 V_{en}$ to $0.1 I_L$ (2); (4)		0.3		$\mu s$
$T_4 (V_{en})$	Source Current Rise Time	$0.1 I_L$ to $0.9 I_L$ (2); (4)		0.4		$\mu s$
$T_5 (V_{en})$	Sink Current Turn-off Delay	$0.5 V_{en}$ to $0.9 I_L$ (3); (4)		2.2		$\mu s$
$T_6 (V_{en})$	Sink Current Fall Time	$0.9 I_L$ to $0.1 I_L$ (3); (4)		0.35		$\mu s$
$T_7 (V_{en})$	Sink Current Turn-on Delay	$0.5 V_{en}$ to $0.9 I_L$ (3); (4)		0.25		$\mu s$
$T_8 (V_{en})$	Sink Current Rise Time	$0.1 I_L$ to $0.9 I_L$ (3); (4)		0.1		$\mu s$

## ANEXO B – CIRCUITO INTEGRADO E MÓDULO INVERSOR L6230

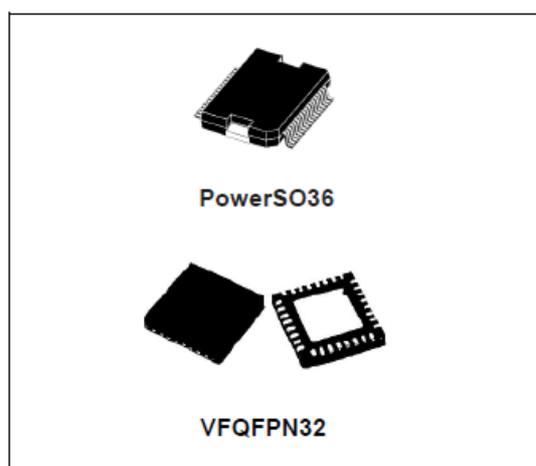
Informações relevantes da folha de dados do componente



# L6230

## DMOS driver for three-phase brushless DC motor

Datasheet - production data



### Description

The L6230 is a DMOS fully integrated three-phase motor driver with overcurrent protection, optimized for FOC application thanks to the independent current senses.

Realized in BCDmultipower technology, the device combines isolated DMOS power transistors with CMOS and bipolar circuits on the same chip.

An uncommitted comparator with open-drain output is available.

Available in PowerSO36 and VFQFPN32 5 x 5 packages the L6230 device features non-dissipative overcurrent protection on the high-side power MOSFETs and thermal shutdown.

### Features

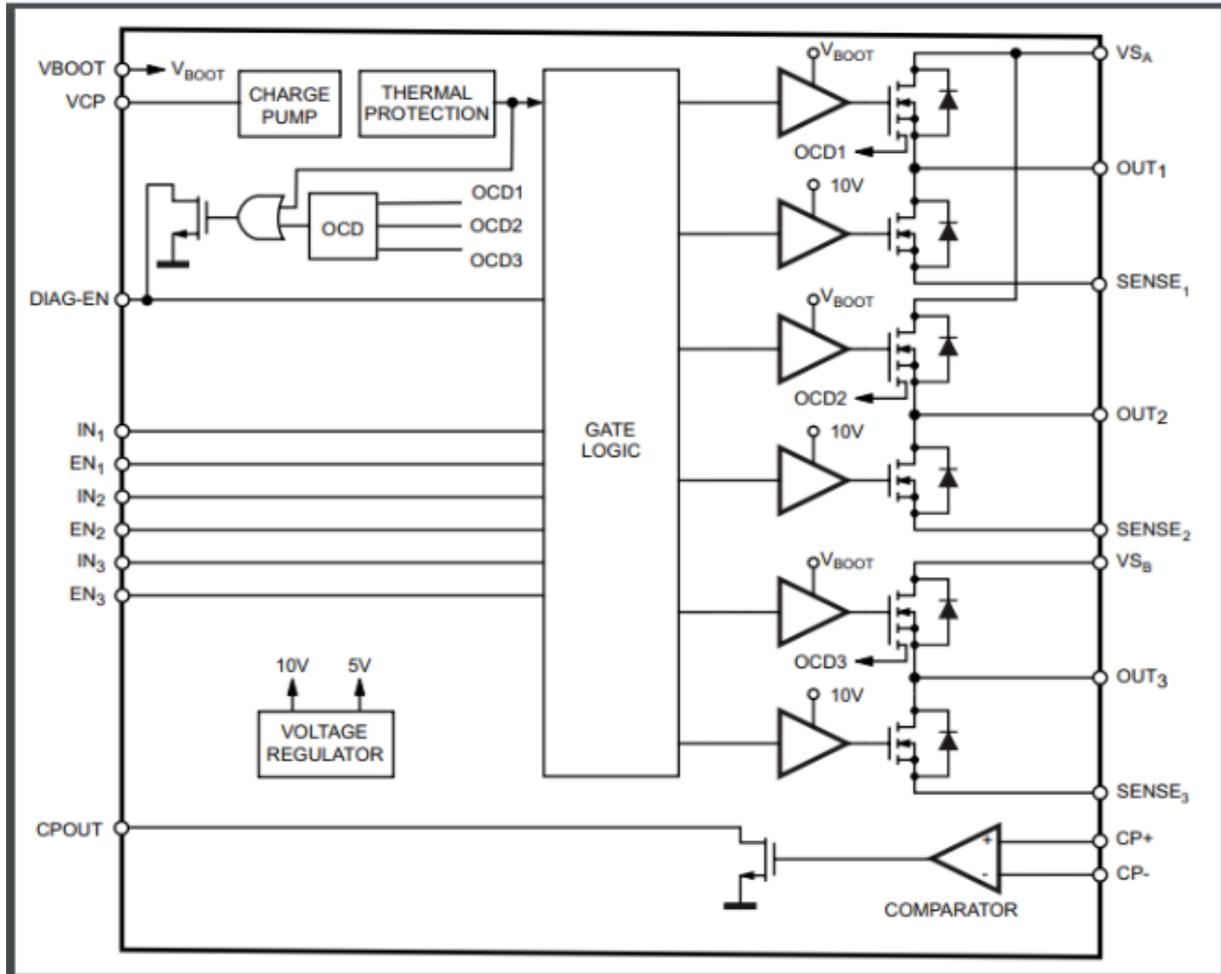
- Operating supply voltage from 8 to 52 V
- 2.8 A output peak current (1.4 A RMS)
- $R_{DS(on)}$  0.73  $\Omega$  typ. value at  $T_J = 25\text{ }^\circ\text{C}$
- Integrated fast freewheeling diodes
- Operating frequency up to 100 kHz
- Non-dissipative overcurrent detection and protection
- Cross conduction protection
- Diagnostic output
- Uncommitted comparator
- Thermal shutdown
- Undervoltage lockout

### Application

- BLDC motor driving
- Sinusoidal / six-step driving
- Field oriented control driving system

Table 1. Device summary

Order codes	Package	Packaging
L6230PD	PowerSO36	Tube
L6230PDTR		Tape and reel
L6230Q	VFQFPN32	Tube
L6230QTR		Tape and reel



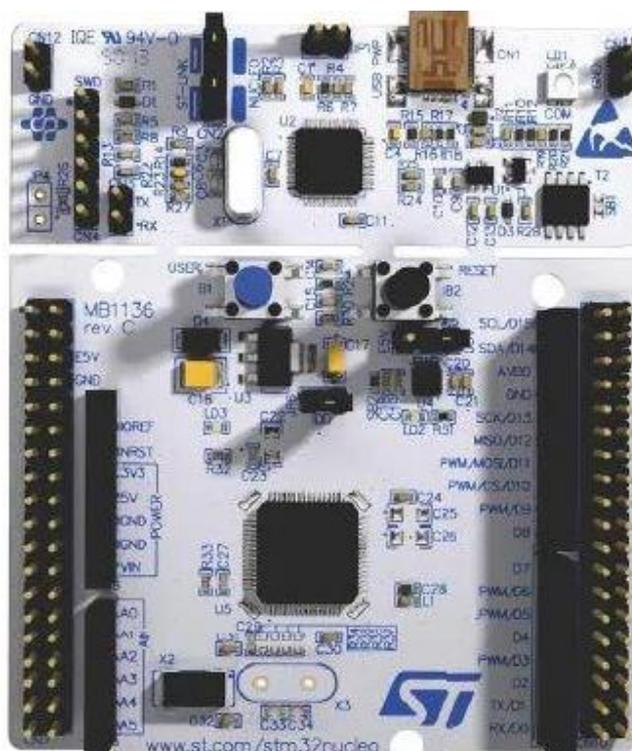
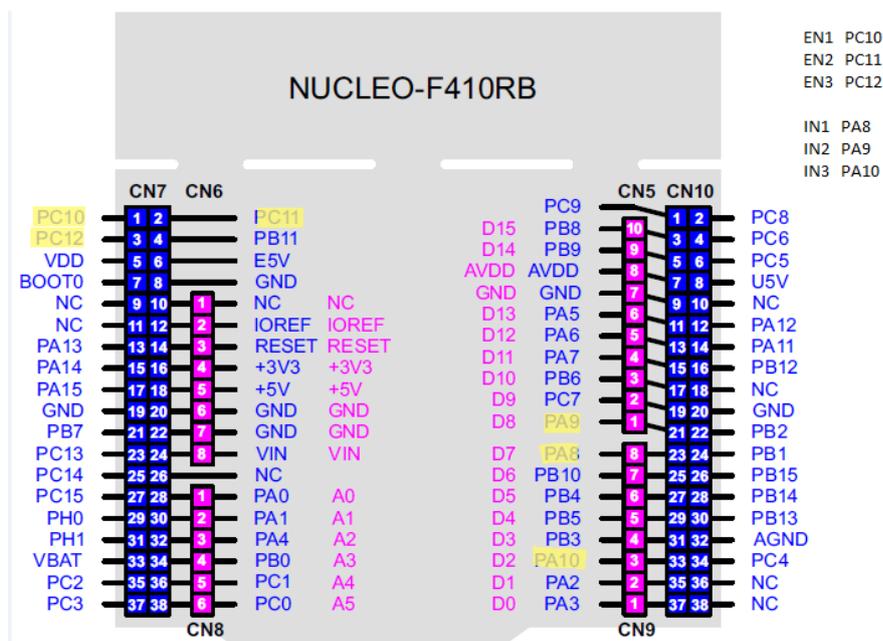
## 2.2 Recommended operating conditions

Table 3. Recommended operating conditions

Symbol	Parameter	Parameter	Min	Max	Unit
$V_S$	Supply voltage	$V_{SA} = V_{SB} = V_S$	8	52	V
$V_{OD}$	Differential voltage between $V_{SA}$ , $OUT_{1A}$ , $OUT_{2A}$ , $SENSE_{1}$ , $SENSE_{2}$ and $V_{SB}$ , $OUT_{1B}$ , $OUT_{2B}$ , $SENSE_{3}$	$V_{SA} = V_{SB} = V_S$ ; $V_{SENSE1} = V_{SENSE2} = V_{SENSE3}$		52	V
$V_{CP-}$ , $V_{CP+}$	Voltage range at CP- and CP+ pins		-0.1	5	V
$V_{CPCM}$	Common mode voltage at the comparator inputs		0	3	V
$V_{SENSE}$	Voltage range at pins SENSE <sub>x</sub>	pulsed $t_W < t_{rr}$	-6	6	V
		DC	-1	1	V
$I_{OUT}$	RMS output current			1.4	A
$T_J$	Operating junction temperature		-25	+125	°C
$f_{sw}$	Switching frequency			100	kHz

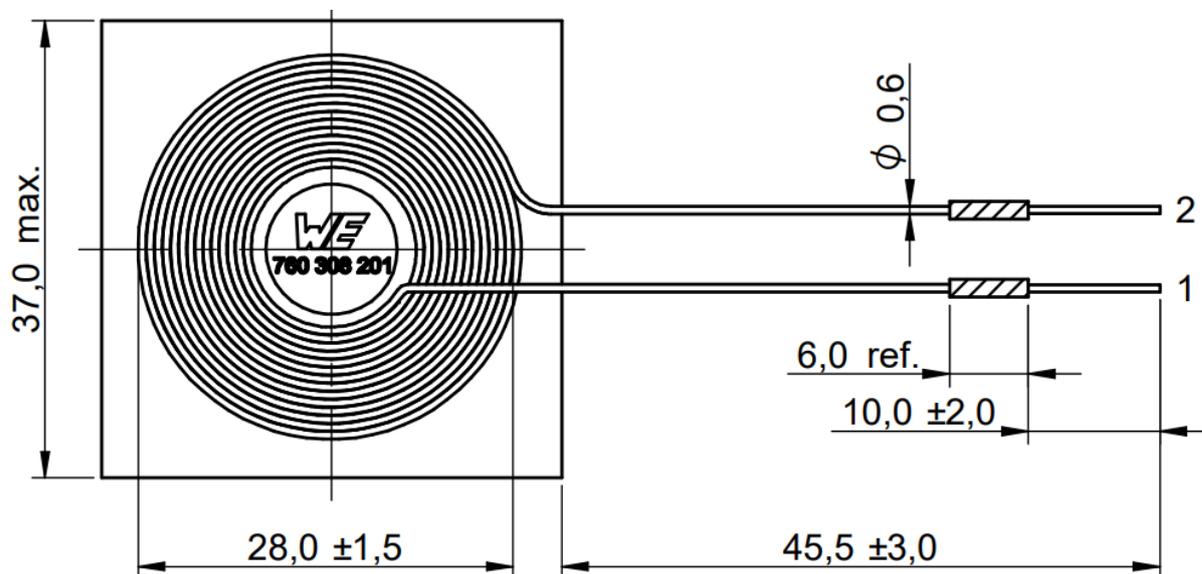
## ANEXO C – PLACA DE DESENVOLVIMENTO NUCLEO-F410RB

Pinos de ligação da placa de desenvolvimento que foram utilizados para acionar o módulo inversor. EN1, EN2, EN3 respectivamente PC10, PC11 e PC12 são sinais de habilitação (*enable*). Enquanto que IN1, IN2 e IN3 correspondem aos pinos PA8, PA9 e PA10 respectivamente (entrada – *Input*), são usados para sinais de PWM.



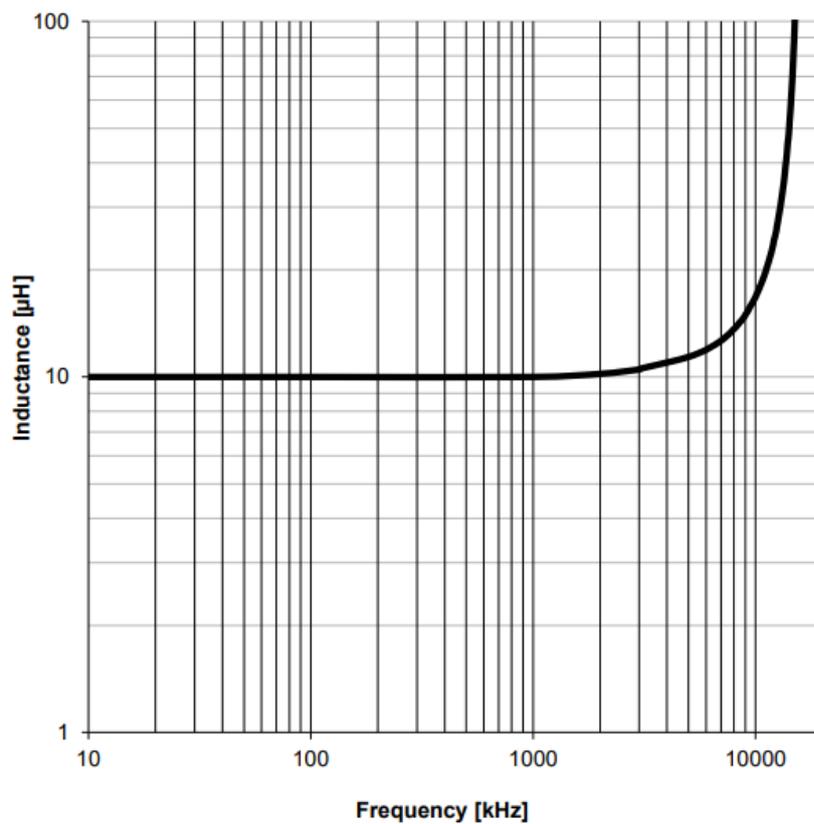
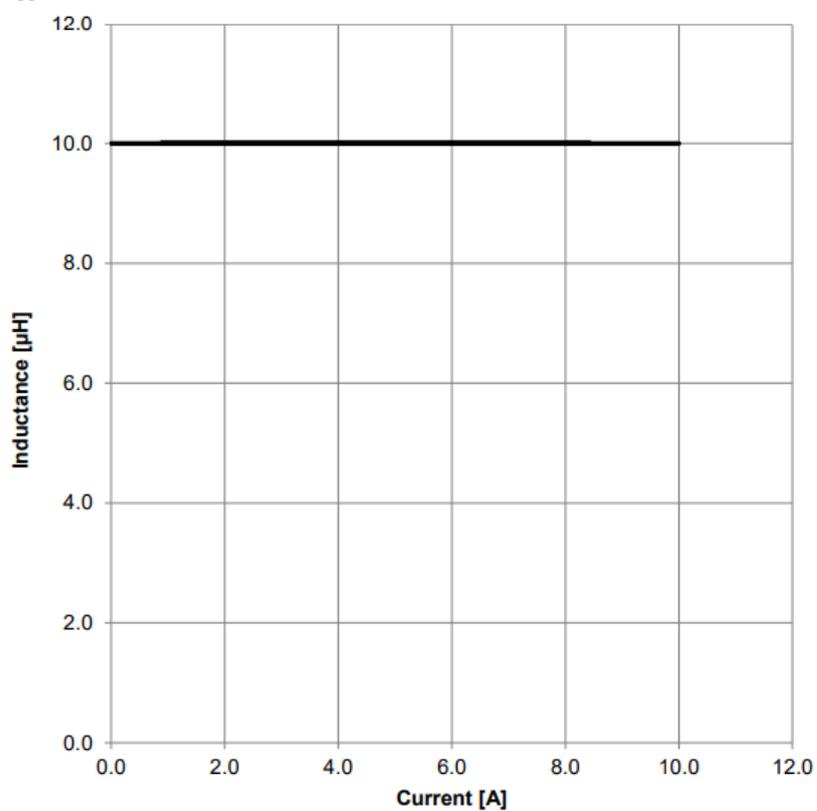
## ANEXO D – BOBINA DE TRANSMISSÃO E RECEPÇÃO

Para a bobina 760308201 da Wurth Elektronik



### Electrical Properties:

Properties	Test conditions		Value	Unit	Tol.
Inductance	125 kHz/ 10 mA	L	10	μH	±10%
Q-Factor	125 kHz/ 10 mA	Q	50		typ.
Rated Current	ΔT = 40 K	I <sub>R</sub>	3.5	A	max.
Saturation Current		I <sub>SAT</sub>	8	A	typ.
DC Resistance	@ 20 °C	R <sub>DC</sub>	160	mΩ	typ.
DC Resistance	@ 20 °C	R <sub>DC</sub>	200	mΩ	max.
Self Resonant Frequency		f <sub>res</sub>	15	MHz	

**Typical Inductance vs. Frequency Characteristics:****Typical Inductance vs. Current Characteristics:**

**Q-factor vs. Frequency:**