

Projeto de Graduação



07 de dezembro de 2021

Estações de carregamento sem fio para Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT's)

Gabriel de Sousa Galvão

Venâncio José Montenegro da Silva



www.ele.puc-rio.br

Estações de carregamento sem fio para Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT's)

Aluno(s): Gabriel de Sousa Galvão

**Venâncio José Montenegro
da Silva**

Orientador: Eduardo Costa da Silva

Trabalho apresentado com requisito parcial à conclusão do curso de Engenharia Elétrica na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.

Agradecimentos

Em primeiro lugar, agradeço à minha mãe, Sueli, por todo o amor e carinho durante toda a minha vida. Obrigado por todo o suporte e dedicação para que eu tivesse a melhor educação e apoio que poderia proporcionar, apesar de todas as dificuldades. Obrigado por sempre acreditar no meu potencial e nos meus sonhos, além de todo apoio emocional e incentivo para que nós pudéssemos conquistar esse objetivo. Ao meu pai, Antônio, e ao meu irmão, Gustavo, por sempre estarem comigo nos momentos bons e ruins. Obrigado pelo amor, apoio, parceria, companheirismo e por sempre confiarem em mim ao longo da minha vida. Essa vitória é nossa.

Agradeço aos meus familiares, em especial meus tios e primos que, para mim, considero como meus pais e irmãos. Obrigado por todos os cuidados, ensinamentos e conselhos, desde o meu primeiro dia de vida até os dias atuais.

Agradeço aos meus grandes amigos, em especial Felipe Almeida, Gabriel Torquato e Daniel Garbelote, por estarem comigo desde a infância/adolescência. Obrigado por todos os momentos de distração, resenhas, diversões e também conselhos. Tenho certeza que construiremos mais histórias para contarmos juntos para nossos filhos e netos.

Agradeço à minha companheira, Isabela, por todo amor e apoio em toda a nossa trajetória. Obrigado pela paciência, por me dar forças para continuar atrás dos meus objetivos e por me fazer sempre querer ser uma pessoa melhor.

Agradeço à meu fiel amigo, Venâncio, por trilhar esse caminho comigo desde o ensino fundamental. Obrigado pela amizade, companheirismo e por todo o suporte que prestamos um para o outro, superando as dificuldades juntos e nos tornando mais fortes.

Agradeço a todas as instituições de ensino básico as quais estudei, Pintando o Sete, Instituto Metodista, Jockey Club Brasileiro e CEL Intercultural School. Todos os professores e funcionários foram importantes para essa conquista e por formar a pessoa que sou hoje.

Agradeço à instituição PUC-Rio, pela oportunidade de conquistar um dos meus sonhos, através de uma bolsa de estudos. Obrigado pela oportunidade de estudar em uma instituição de ensino de excelência e de me dar esperanças de um futuro melhor para mim e para minhas futuras gerações.

Agradeço ao meu orientador, professor Eduardo, pelos ensinamentos e apoio. Obrigado por todas as dicas e pela oportunidade de desenvolver esse trabalho com todo o suporte técnico necessário.

E por último, mas não menos importante, agradeço a mim mesmo por toda a determinação e garra que tive durante toda minha vida. Não foi fácil chegar a esse objetivo com todas as dificuldades que a vida nos trás, porém minha resiliência e perseverança foram fundamentais para que esse sonho fosse realizado.

Gabriel de Sousa Galvão

Agradecimentos

Em primeiro lugar gostaria de agradecer às pessoas mais importantes da minha vida, minha mãe Sonia Maria, que mesmo em meio de todas as dificuldades e empecilhos, sempre deu o máximo por mim, nunca deixando faltar nada e sempre sendo minha fã. Ao meu pai, José Manoel que, para mim, é meu exemplo e meu espelho, um pai com muita garra e determinação, nunca mediu esforços para me ver bem e sempre buscando o melhor para mim e minha irmã. Pai, mãe eu amo vocês. Sem vocês não conseguiria chegar até aqui. Muito obrigado! Essa conquista é nossa.

Agradeço a minha namorada Ana Luiza Santiago, que jamais me negou apoio, carinho e incentivo. Obrigado, por aguentar tantas crises de estresse e ansiedade. Sem você do meu lado esse trabalho não seria possível. Obrigado por todos os momentos que tivemos e teremos juntos. Te amo.

Agradeço a minha irmã, Valéria Montenegro, por sempre me apoiar e me incentivar a ir em busca do meu sonho.

Agradeço aos meus grandes amigos Felipe Almeida, Gabriel Torquato, Daniel Garbelote, Matheus Lourenço e João Paulo Braz que mesmo em momentos que tive de abdicar de estar com vocês para estudar e fazer trabalhos, vocês entenderam meu ponto de vista. Vocês são amigos que todos gostariam de ter e eu tenho esse privilégio. Obrigado por todos os momentos de descontração, saídas e resenhas. Muito obrigado.

Em especial, gostaria de agradecer ao meu amigo Gabriel Galvão que, desde o ensino fundamental está comigo e aceitou o desafio em fazer esse TCC. Obrigado por compartilhar todos os momentos comigo, obrigado por todas as resenhas pré-provas, por todos os estudos até a biblioteca fechar, por todos os trabalhos, sem a sua ajuda esse curso seria mais difícil.

Agradeço à PUC-RIO, pela oportunidade da bolsa de estudo, fundamental para o meu processo de formação acadêmica e profissional, pela dedicação e por todo conhecimento adquirido ao longo do curso. O período que passei na instituição foi marcado por grandes lembranças e com muito carinho.

Agradeço aos profissionais e professores dos colégios nos quais tive o prazer de estudar: Escola Municipal Djalma Maranhão, Escola Municipal Henrique Dodsworth, CEL Intercultural School, muito obrigado pelos apoios que nunca faltaram. Em especial gostaria ao Eduardo Costa da Silva, responsável pela orientação ao nosso projeto. Obrigado por esclarecer tantas dúvidas e ser paciente.

Por fim, gostaria de agradecer a mim mesmo, por sempre estar buscando o melhor para mim e todos ao meu redor, por nunca desistir de mim, mesmo nos momentos mais difíceis da minha vida.

Venâncio José Montenegro da Silva

Resumo

No século XXI houve a crescente utilização de Veículos Aéreos Não Tripulados para diferentes áreas da indústria, como por exemplo análise de defeitos em linhas de transmissão de energia, análise de áreas agrícolas e etc. Entretanto, a autonomia de voo desses VANT's muitas vezes não supre a necessidade da sua utilização, sendo necessário o frequente carregamento de sua bateria. O presente trabalho objetiva contribuir para o desenvolvimento de estações de carregamento sem fio, utilizando a tecnologia Inductive Power Transfer (IPT), a fim de possibilitar a recarga automática da bateria de VANTs pousados na estação. O circuito da estação de carregamento será projetado, simulado utilizando os softwares MATLAB Simulink e TopSpice, além de experimentalmente implementado e avaliado.

Palavras-chave: Veículos Aéreos Não Tripulados, Transmissão de Energia Sem Fio, Indução Eletromagnética, Estações de Carregamento, Autonomia de Baterias

Wireless Charging Stations for Unmanned Aerial Vehicles (UAV's)

Abstract

In the 21st century there was an increasing use of Unmanned Aerial Vehicles for different areas of the industry, such as analysis of defects in power transmission lines, analysis of agricultural areas and etc. However, the flight autonomy of these UAV's often does not meet the need for their use, requiring frequent charging of their battery. The present work aims to contribute to the development of wireless charging stations, using the Inductive Power Transfer (IPT) technology, in order to enable the automatic recharge of the battery of UAVs landed on the station. The charging station circuit will be designed, simulated using MATLAB Simulink and TopSpice software, in addition to being experimentally implemented and evaluated.

Keywords: Unmanned Aerial Vehicles, Wireless Power Transfer, Electromagnetic Induction, Charging Stations, Battery Autonomy

Sumário

1	Introdução	1
a	História dos VANTs	1
b	Principais Aplicações do Século XXI	2
c	Objetivo e Motivações	2
2	Tecnologias para Transmissão de Energia	4
a	Tipos de Transmissão de Energia Sem Fio	4
1	Inductive Power Transfer	4
2	Capacitive Power Transfer	5
3	Ressonância Magnética	6
b	Conversor CA-CC - Retificador	7
1	Retificador de Meia Onda	8
2	Retificador de Onda Completa	9
c	Conversor CC-CA - Inversor	11
1	Inversor Fonte de Tensão (<i>Voltage Source Inverter - VSI</i>)	12
2	Inversor Fonte de Corrente (<i>Current Source Inverter - CSI</i>)	12
d	Estratégia de Modulação PWM	13
1	Bipolar	14
2	Unipolar	15
e	Indução Eletromagnética	16
1	Indutância Mútua	16
2	Fator de Acoplamento	17
f	Regulador de Tensão	17
3	Desenvolvimento das Estações	18
a	Módulo Transmissor	18
b	Módulo Receptor	20
4	Simulação Computacional	23
a	Simulink	23
b	TopSpice	27
5	Implementação Experimental	38
6	Conclusão e Trabalhos Futuros	51
7	Referências Bibliográficas	52
A	Apêndice - Código TopSpice	53
B	Apêndice - Código PWM Arduino	57

Lista de Figuras

1	História dos VANTs - Primeiros Drones.	1
2	Estação de Carregamento	3
3	Transmissão de Energia Sem Fio - Fluxograma.	4
4	IPT - Representação física.	5
5	CPT - Representação física.	6
6	Conversor CA-CC - Retificador.	7
7	Circuito - Retificador de Meia Onda.	8
8	Formas de onda - Retificador de Meia Onda.	8
9	Circuito - Retificador de Onda Completa.	9
10	Retificador de Onda Completa - Semiciclo positivo.	10
11	Retificador de Onda Completa - Semiciclo negativo.	10
12	Comparação formas de onda de entrada e saída - Retificador de Meia Onda.	11
13	Conversor CC-CA - Inversor.	12
14	Inversor Fonte de Tensão.	12
15	Inversor Fonte de Corrente.	13
16	Plano $v_o \times i_o$	13
17	Estratégia de modulação PWM.	14
18	Inversor em Ponte Completa com PWM Bipolar.	14
19	Reposta em Frequência - PWM Bipolar.	15
20	Inversor em Ponte Completa com PWM Unipolar.	15
21	Reposta em Frequência - PWM Bipolar.	16
22	Regulador de Tensão LM78XX	17
23	Diagrama de Blocos do Circuito	18
24	Esquemático - Fonte e Transformador de Potência.	18
25	Esquemático - Retificador do Módulo Transmissor.	19
26	Esquemático - Inversor.	19
27	Esquemático - Acoplamento entre Antenas Transmissora e Receptora.	20
28	Esquemático - Módulo Transmissor.	20
29	Esquemático - Acoplamento entre Antenas Transmissora e Receptora.	20
30	Esquemático - Retificador do Módulo Receptor.	21
31	Esquemático - Regulador de Tensão e conexão na Bateria.	21
32	Esquemático - Módulo Receptor.	22
33	Simulink - Tensões na Fonte e na Saída do Transformador de Potência.	23
34	Simulink - Tensão Retificada.	24
35	Simulink - Sinais de Controle PWM.	24
36	Simulink - Tensão na Antena Transmissora.	25
37	Simulink - Tensão na Antena Receptora.	25
38	Simulink - Tensão na Entrada da Bateria.	26
39	Simulink - Gráfico de Carregamento da Bateria - Carga (%) x Tempo (s).	26
40	Simulink - Esquemático do Circuito Implementado.	27
41	TopSpice - Tensões no Transformador.	27
42	TopSpice - Transformada de Fourier dos Sinais do Transformador.	28
43	TopSpice - Tensão Retificada.	29
44	TopSpice - Sinal PWM.	30
45	Esquemática - Topologia Amplificadora.	30
46	Esquemática - Topologia Divisor de Tensão.	31
47	TopSpice - Comparação entre a Tensão Retificada e o Divisor de Tensão.	31
48	TopSpice - Sinais PWMs Amplificados.	32
49	TopSpice - Inversor.	33
50	TopSpice - Transformada de Fourier do Inversor.	34
51	TopSpice - Sinal Recebido.	35
52	TopSpice - Retificador para Carregar a bateria.	36
53	TopSpice - Tensão e Corrente na carga (bateria).	37
54	Experimento - Vista Completa.	38
55	Experimento - Transformador de Potência (127 V : 24 V).	38
56	Experimento - Tensão na Saída do Transformador de Potência.	39
57	Experimento - Retificador do Módulo Transmissor.	40
58	Experimento - Tensão Retificada.	41
59	Experimento - Divisor de Tensão e Amplificador do PWM.	42

60	Experimento - Sinal no Divisor de Tensão.	43
61	Experimento - Sinal de Controle PWM.	43
62	Experimento - Sinal de Controle PWM Amplificado.	44
63	Experimento - Inversor.	44
64	Experimento - Tensão na Saída do Inversor.	45
65	Experimento - Transformador de Potência Simulando o Acoplamento Entre as Antenas.	45
66	Experimento - Módulo Transmissor.	46
67	Experimento - Tensão na Antena Receptora.	46
68	Experimento - Retificador do Módulo Receptor.	47
69	Experimento - Tensão Retificada.	47
70	Experimento - Bateria do tipo LiPo.	48
71	Experimento - Módulo Receptor com Regulador de Tensão Ajustável.	48
72	Experimento - Tensão de Saída do Regulador.	49
73	Experimento - Tensão da Bateria antes de ser alimentada.	49
74	Experimento - Módulo Receptor.	50
75	Experimento - Tensão da Bateria após ser alimentada.	50

1 Introdução

a História dos VANTs

Amplamente conhecidos como drones, os VANTs (Veículos Aéreos Não Tripulados) são aeronaves conhecidas por possuírem uma alta versatilidade e por serem controladas sem a necessidade de um piloto a bordo. Ainda que se apresente como uma ideia nova, os VANTs já estão presentes há algum tempo na história, principalmente em áreas militares.

A primeira produção de VANTs em larga escala ocorreu durante a Segunda Guerra Mundial, no qual eram utilizados para fins bélicos, e chegou a atingir cerca de quinze mil drones produzidos neste período. O primeiro drone a causar danos no conflito foi o chamado Vergeltungswaffe 1 (V-1), que foi apelidado de *Buzz-Bomb* pelo barulho que fazia ao voar, seu ataque ocorreu em 1944 contra Londres.

Considerada uma operação com sucesso, chegaram a lançar a bomba cerca de cem vezes por dia contra a Inglaterra. Em sua produção em larga escala, quase 9500 bombas foram lançadas contra o país, tendo interrompido o envio apenas um mês antes da guerra.



Figura 1: História dos VANTs - Primeiros Drones.

Embora tenha havido uma grande produção de VANTs nesse período, seu rendimento ao atingir o alvo foi muito pequeno, isso se deve por conta de ser uma nova tecnologia e ainda haviam falhas mecânicas e erros de orientação, no que resultava nos desvios frequentes do alvo. Outros fatores para o baixo rendimento devem ser levados em conta, como o sistema de defesa britânico que os destruiu muitas das vezes.

Passada a Segunda Guerra Mundial, houve um maior incentivo para o desenvolvimento da tecnologia VANT, tais incentivos vieram por conta da corrida armamentista e tecnológica oriundas da Guerra Fria. Os maiores avanços para os drones nessa época foram nas áreas de reconhecimento de território e testes nucleares.

No Brasil, em 1982 houve uma parceria entre o Centro Técnico Aeroespacial (CTA) e a Companhia Brasileira de Tratores (CBT), no qual foi documentado um projeto piloto para o desenvolvimento de VANTs em terras nacionais, no entanto foi arquivado. Por outro lado, esta ideia foi observada como uma boa influência para o investimento de outras empresas nessa tecnologia. O objetivo era desenvolver produtos que atendessem às necessidades de instituições militares brasileiras, como Marinha, Aeronáutica e Exército. Para eles, existem várias vantagens em usar drones. Porém, o principal é o treinamento propriamente dito das forças de defesa aérea, utilizando drones como alvos, não havendo risco para as equipes participantes do treinamento.

Todo esse interesse nos benefícios dos drones acabou criando um novo mercado para eles: drones civis. Mesmo com história militar e limitada ao uso militar, hoje os drones são quase considerados brinquedos

por algumas pessoas e tornam-se entretenimento e itens úteis para diversas atividades. Em suma, a história dos drones está se movendo na direção da acessibilidade e trouxe muitos benefícios para o mercado de drones e para os consumidores. Hoje, os drones têm uma enorme versatilidade de uso. Seus usos incluem monitoramento e vigilância, foto e filmagem, uso militar, resgate, entre outros.

b Principais Aplicações do Século XXI

Com o avanço da tecnologia, os drones vêm ganhando cada vez mais força e sendo requisitados ainda mais. Tais motivos para isso se deve por serem versáteis, possuírem diversos tamanhos, sendo possível acessos em lugares onde humanos não conseguem chegar e até mesmo em regiões de trabalho inóspito, que leva risco à vida. Atualmente, suas principais aplicações se encontram em:

- **Áreas Agrícolas:** O monitoramento por meio de drones pode controlar a plantação para garantir que sua escala esteja dentro do planejado e atinja a produtividade necessária. Os VANTs podem reduzir significativamente as perdas de safra causadas por pragas e incêndios. A aeronave é capaz de detectar pragas no início das mesmas, de modo que um combate rápido possa ser realizado e focos de incêndio possam ser facilmente detectados e eliminados.
- **Resgate:** Essa é uma das principais utilidades do drone, pois com ele é possível chegar em lugares de maneira mais rápida e segura. Para fins de primeiros socorros, como envio de medicamentos e até de localização. Em casos de afogamentos, os drones também podem transportar boias.
- **Segurança:** Os VANTs entregam qualidade de trabalho no quesito de segurança, sendo usado como monitoramento, através de sensor de calor. Dessa forma, é possível verificar, mesmo na escuridão, se existem invasores em alguma propriedade privada, ou até mesmo em bases militares.
- **Exploração:** Outra ação para começar a rodar o mundo é usar drones para exploração. Devido aos projetos das grandes empresas que utilizam a aeronave, muitas áreas têm acesso à Internet. Estes são os pontos mais distantes da terra. Além disso, o equipamento é muito adequado para levantamento topográfico e mapeamento.
- **Transporte:** O transporte de pequenas cargas é uma das outras utilidades dos drones em ascensão atualmente, podendo ser transportadas mercadorias, caixas de pequeno porte pelo ar. Entretanto, ainda é um serviço que está em teste pelas empresas.

Diversas são as aplicações com o drone, no Brasil, predominantemente, eles estão sendo utilizados em vias agrícolas e de monitoramento de áreas de incêndio. Com o avanço da tecnologia, principalmente do 5G e IoT, espera-se que o uso de drones ganhe uma versatilidade ainda maior, visto que as tecnologias vem com uma promessa de tempo de resposta muito baixa, enquanto os VANTs têm uma alta mobilidade e agilidade.

c Objetivo e Motivações

Diante da grande ascensão da utilização dos drones no século XXI, sendo usados como delivery, capturas de imagens, usos militares, entre outros meios de aplicação. Notou-se que a limitação de energia dos VANT's é um dos principais desafios para sua utilização em larga escala. A autonomia de voo dos VANT's é geralmente inferior a uma hora, o que apresenta desafios para as operações em larga escala e em grandes áreas, devido ao tempo de voo limitado. Cientistas e engenheiros de todo o mundo têm buscado alternativas e melhorias para aumentar a autonomia de voo dessas aeronaves. Dentre esses projetos, pode-se destacar os desenvolvimentos recentes em tecnologias de bateria, como baterias de íon de lítio aprimoradas e células de combustível de hidrogênio, projetos de VANT's mais eficientes em termos de energia e o uso de fontes de energia alternativas, como energia solar para estender as missões de voo, fazendo com que os VANT's possam voar a ordem de várias horas no futuro.

Esse trabalho visa elucidar e desenvolver uma outra solução para o tempo de voo dessas aeronaves, através do desenvolvimento de estações de carregamento sem fio. Essas estações ficariam localizadas em locais estratégicos, onde a aeronave, quando estivesse com pouca bateria, pousaria nela e começaria a carregar sua bateria automaticamente, através da tecnologia Inductive Power Transfer (IPT).



Fonte: <https://www.geekwire.com/2017/uw-spinout-wibotic-unveils-powerpad-wireless-charging-system-drones/>
Figura 2: Estação de Carregamento

Cada estação é dividida em dois módulos: o módulo transmissor e o módulo receptor. O módulo transmissor é a estação de pouso, propriamente dita. Ela é alimentada por uma fonte externa de energia, controlada por um microcontrolador e que transmite sua energia por meio de uma antena (bobina) transmissora. Por sua vez, o módulo receptor é o circuito que recebe a energia através de uma antena (bobina) receptora e alimenta a bateria do VANT. Por ser acoplada à aeronave, ela deve ser simples e leve, para que não prejudique a qualidade do voo.

Dessa maneira, o objetivo deste trabalho é projetar os circuitos de ambos os módulos, simular seu funcionamento utilizando os softwares MATLAB Simulink e TopSpice, além de implementá-los experimentalmente e avaliar seu funcionamento.

2 Tecnologias para Transmissão de Energia

a Tipos de Transmissão de Energia Sem Fio

Os sistemas de transferência de energia (WPT) sem fio são compostos por um transmissor que tem como objetivo converter energia elétrica em campos elétrico-magnético que funcionam como fonte de energia para um ou mais receptores. Esses sistemas podem ser construídos levando em consideração dois grandes blocos: campo próximo (região de Fresnel) e campo distante (Zona de Fraunhofer), como ilustrado na figura abaixo.

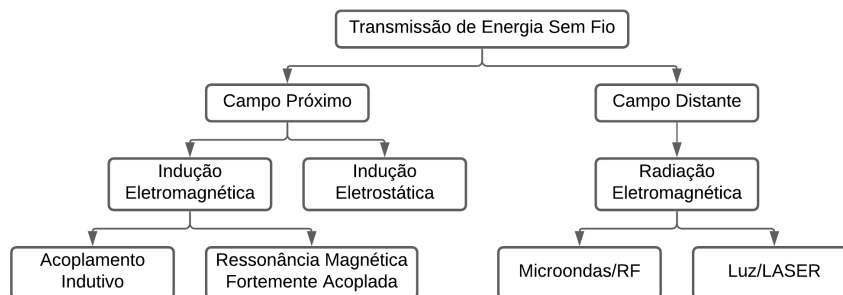


Figura 3: Transmissão de Energia Sem Fio - Fluxograma.

Na região de campo distante, a energia é transferida por meio de propagação de ondas eletromagnéticas. Radiação eletromagnética na forma de rádio ondas (RF), microondas e luz são as técnicas mais comuns de transferência de energia em fio através do campo distante. Em contrapartida, no WPT de campo próximo, os transmissores e seus receptores são compreendidos para serem antenas eletricamente pequenas, gerando um campo elétrico quase-estático no espaço interveniente, que transfere energia por meio de acoplamento indutivo ou capacitivo entre as antenas.

É possível determinar se uma onda eletromagnética está dentro da região de campo próximo, pois o raio do campo próximo é determinado por:

$$R_{NF} = \frac{\lambda}{2\pi} \quad (1)$$

1 Inductive Power Transfer

O WPT via acoplamento magnético ocorre através de um fluxo mútuo ligando as bobinas primárias e secundárias e é conhecido como transferência de potência indutiva (IPT). Geralmente, o IPT ocorre através de uma lacuna de ar substancial entre as bobinas primárias e secundárias. Principalmente, ele difere da operação de um transformador padrão construído com um núcleo de alta permeabilidade e dois enrolamentos, pelo grau de acoplamento. Para sistemas IPT, a separação entre as bobinas primárias e secundárias é alta, a relutância do comprimento do caminho magnético do fluxo mútuo é alta em relação ao fluxo de vazamento e, portanto, as bobinas são "fracamente acopladas". Como consequência, o campo magnético de vazamento dos sistemas IPT é alto e pode limitar significativamente os níveis de transferência de energia.

Para superar esse problema, uma solução possível é o uso de ressonância magnética fortemente acoplada, que usa uma bobina intermediária para produzir um forte acoplamento magnético entre as bobinas primária e secundária. Além disso, a operação na região de MHz pode ser realizada para obter um melhor desempenho. No entanto, as dificuldades associadas à operação em tais frequências altas, indisponibilidade de dispositivos de comutação de alta potência em tais frequências, bem como problemas de radiação eletromagnética, apresentam desafios significativos. Embora os campos magnéticos de vazamento de bobinas IPT fracamente acopladas sejam desvantajosos, os problemas que esses campos apresentam podem ser superados por meio de um projeto de circuito cuidadoso e apropriado. Isso permite a operação em frequências mais baixas do que os sistemas ressonantes magnéticos fortemente acoplados e significa que o IPT ganhou ampla aceitação.

Os sistemas IPT só podem ser utilizados em uma região de distância muito pequena, por dois motivos. O primeiro, como explicitado acima, o raio da região reativa (região de campo próximo) é limitado pelo comprimento de onda. Outro motivo é que o campo próximo eletromagnético é denominado por modos evanescentes, transferindo energia por meio de acoplamento de modo.

A figura abaixo mostra uma representação física de um sistema IPT.

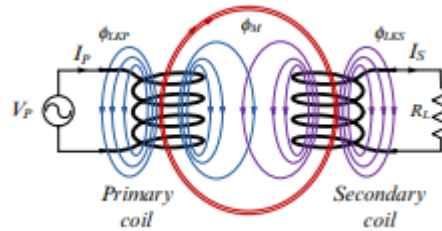


Figura 4: IPT - Representação física.

De acordo com a lei de Ampère, a corrente I_P flui através da bobina primária, que acaba gerando um campo magnético. Como consequência, um fluxo mútuo, Φ_M , é gerado entre os enrolamentos do primário e do secundário. Por sua vez, de acordo com a Lei de Faraday, o fluxo mútuo acaba induzindo uma tensão na bobina secundária, permitindo a transferência de energia para a carga RL da figura. Percebe-se também que existe um fluxo de fuga significativo nas duas bobinas, Φ_P e Φ_M , respectivamente. Tais fluxos são considerados como fluxos de perdas para o sistema, e podem ser modelados por resistências. Portanto, o sistema passa a ser composto de uma resistência e uma indutância. Com isso, usando o circuito teórico, a eficiência da energia transmitida (PTE) de sistemas IPT é dada pela relação da potência na carga (P_L) com a potência de entrada (P_{IN}).

$$PTE = \frac{P_L}{P_{IN}} = \frac{R_L(\omega M_{12})^2}{Z_2(Z_1 Z_2 + (\omega M_{12})^2)} \quad (2)$$

$$M_{12} = k_m \sqrt{L_1 L_2} \quad (3)$$

Onde R_L é a resistência da carga resistiva, Z_1 , Z_2 , L_1 e L_2 são, respectivamente, as impedâncias e indutâncias das bobinas primárias e secundárias, ω é a frequência angular, k_m é o fator de acoplamento magnético e M_{12} é a indutância mútua. Tais conceitos de k_m e M_{12} serão avaliados posteriormente e como ambos influenciam no funcionamento do sistema IPT.

Um outro desafio surge quando as bobinas primária e secundária estão horizontalmente desalinhadas, no sentido de que os centros das bobinas primário e secundário não são diretamente opostos um ao outro. O desalinhamento em um determinado grau resultará em uma transferência de energia nula, na qual nenhuma ligação de fluxo da bobina secundária ocorre, independentemente da distância entre as bobinas primária e secundária. Minimizar a intolerância ao desalinhamento horizontal forma uma parte crítica do projeto e vários arranjos de bobina e ferrite foram propostos para resolver esse problema. Embora o acoplamento magnético entre os circuitos primários e secundários para sistemas IPT fracamente acoplados seja baixo em relação aos enrolamentos ligados por um núcleo de alta permeabilidade (isto é, transformadores), ainda é superior ao acoplamento elétrico alcançável por sistemas CPT das mesmas dimensões de um determinado IPT sistema e a uma distância significativa. Isso é particularmente importante para uma distância WPT superior a 100 mm, necessária para o carregamento de veículos elétricos. Para compensar esta lacuna, os sistemas CPT devem operar em frequências na região de MHz, para aumentar os níveis de dV/dt para alcançar uma transferência de potência necessária, enquanto que para o nível de IPT kW, a transferência de potência é alcançável na faixa de frequência de dezenas de kHz.

2 Capacitive Power Transfer

Capacitive Power Transfer (CPT) aparece como uma alternativa à proliferação da tecnologia Inductive Wireless Power Transfer (IPT). No sistema CPT, o acoplamento capacitivo é usado para transmitir energia entre as unidades transmissora e receptora, nas quais uma fonte de energia CA, ressonante, eficiente,

de alta frequência é muito necessária para garantir as melhores taxas de transmissão e baixas perdas de energia. O WPT no campo próximo e através de um campo elétrico ocorre quando a capacitância mútua acopla uma rede à outra e é comumente referido como transferência capacitiva de potência (CPT). Como o nível de transferência de energia depende da taxa de variação da tensão com o tempo nas placas do capacitor, a operação é normalmente na região de MHz. Isso limita a gama de dispositivos de chaveamento adequados para CPT e impacta negativamente na eficiência. Dado que o WPT geralmente ocorre através de um entreferro, a baixa permissividade do ar é outro fator limitante e isso, junto com restrições de componentes significa que o CPT foi considerado o mais adequado para níveis de baixa potência e entre pequenos espaços de ar da ordem de milímetros. No entanto, pesquisas indicam que o CPT é possível para aplicações de carregamento de veículos elétricos.

Foi relatado que a eficiência do sistema CPT diminui com o aumento das distâncias de gap de acoplamento. Além disso, a alta eficiência só pode ser obtida quando a lacuna de acoplamento é fixada. Além disso, as placas de acoplamento devem ser fixadas umas às outras para minimizar a variação da capacitância atribuída à imperfeição de planicidade. A imperfeição de planura é conhecida por gerar uma distribuição desigual do entreferro e alteração na posição ou distância das placas de acoplamento, resultando em baixa capacitância de acoplamento que leva a uma queda significativa na potência de saída.

O IPT é atualmente o método predominante de implementação de sistemas WPT. No entanto, em casos de alimentação de pequenos dispositivos com baixo nível de energia, especialmente em locais físicos compactos, os sistemas IPT não são práticos. Isso se deve ao fato de os sistemas IPT serem mais eficientes em frequências mais baixas, que requerem grandes componentes de circuito. À medida que o valor da frequência aumenta, o método CPT pode competir com o IPT, pois o primeiro é capaz de oferecer um isolamento galvânico igualmente bom a um custo menor e não requer um núcleo magnético caro e de alta frequência. Foi relatado que o CPT pode ser aplicado em aplicações em veículos, enquanto a atualização da capacidade de acoplamento entre duas a seis placas pode reduzir significativamente as emissões do campo elétrico.

3 Ressonância Magnética

O método de ressonância magnética de transferência de energia sem fio é um método que surgiu para superar o problema de queda na eficiência devido à distância entre a bobina de transmissão de energia e a bobina de recepção de energia. A ressonância magnética é um caso especial de indutância magnética.

A extensão do acoplamento magnético entre o lado da transmissão de energia e o lado da recepção de energia é expressa por um valor conhecido como coeficiente de acoplamento. Se a indutância da bobina de transmissão de energia e da bobina de recepção de energia forem L_1 e L_2 respectivamente, e a indutância mútua for M , o coeficiente de acoplamento k é expresso pela seguinte fórmula.

$$k_m = \frac{M_{12}}{\sqrt{L_1 L_2}} \quad (4)$$

O coeficiente de acoplamento é um valor na faixa de $0 \leq k \leq 1$, e é idealmente igual a 1 (acoplamento perfeito com 100% de eficiência de transmissão) na ausência de fluxo de vazamento. Entretanto, à medida que a distância entre as bobinas aumenta e à medida que a distância entre o centro das bobinas se torna maior, o fluxo de vazamento aumenta e, como resultado, o coeficiente de acoplamento cai.

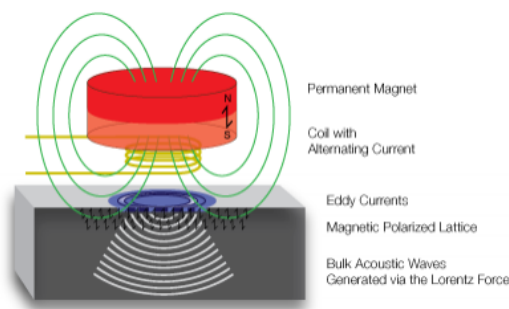


Figura 5: CPT - Representação física.

No método de ressonância magnética, um capacitor é inserido no lado da transmissão de energia, bem como no lado da recepção de energia para formar um circuito de ressonância LC (indutor e capacitor), e a energia é transferida combinando a frequência de ressonância em ambos os lados. Seu mérito é que uma alta eficiência de transmissão pode ser obtida mesmo quando o coeficiente de acoplamento é baixo, normalmente $< 0,5$.

A eficiência máxima de transmissão no método de ressonância magnética é expressa em função do produto do coeficiente de acoplamento (k) e do fator de qualidade (Q) da bobina (produto kQ). Mesmo que o coeficiente de acoplamento seja baixo, uma alta eficiência de transmissão pode ser obtida aumentando o Q das bobinas. Esta é sua maior diferença em relação ao método de indução magnética. Porém, vários problemas precisam ser superados para implementar o método de ressonância magnética de transferência de energia sem fio.

O valor fator de qualidade da bobina é expresso como:

$$Q = \frac{2\pi fL}{R} \quad (5)$$

No qual f é a frequência de ressonância, L é a indutância da bobina e R é o componente de resistência AC da bobina. A partir disto, se a indutância é aumentada pelo aumento do diâmetro da bobina, ou pelo aumento do número de voltas da bobina, teoricamente, o fator de qualidade será aumentado. No entanto, uma vez que o componente de resistência também aumenta neste caso, é necessário otimizar a forma e o tamanho das bobinas durante o projeto da bobina, a fim de equilibrar ambos.

Mais um requisito é que ele deve suportar mudanças na frequência de ressonância. No método de ressonância magnética, a eficiência máxima de transmissão pode ser obtida quando a bobina de transmissão de energia e a bobina de recepção de energia são colocadas a uma distância ideal uma da outra. Ao contrário do método de indução eletromagnética, reduzir esta distância pode fazer com que a eficiência da transmissão caia em vez de aumentar. Isso ocorre porque quando há um desvio da distância ótima, a indutância mútua M muda, fazendo com que o coeficiente de acoplamento e a frequência de ressonância mudem. Além disso, a capacitância parasita dos objetos ao redor das bobinas também afeta a frequência de ressonância, resultando em um sistema desafinado e não otimizado.

Portanto, no método de ressonância magnética, um circuito especial é normalmente necessário para rastrear e ajustar automaticamente o circuito para a eficiência máxima, o que torna o sistema mais complicado do que o método de indução eletromagnética.

b Conversor CA-CC - Retificador

Os Conversores CA-CC, também conhecidos como Retificadores a Diodos, são dispositivos capazes de transformar tensão/corrente alternada em tensão/corrente contínua, porém sem a possibilidade de variar o valor médio da tensão de saída CC. Como o próprio nome diz, são empregados utilizando diodos, material semicondutor que tem como característica a passagem de corrente apenas quando está polarizado. Algumas de suas aplicações são conversão de energia dentro de fontes de alimentação de eletrônicos, demoduladores de sinais de rádio AM, acionamento de motores elétricos CA ou CC etc.

Retificador (CA-CC)

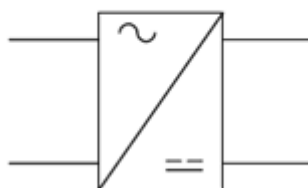


Figura 6: Conversor CA-CC - Retificador.

O Conversor CA-CC pode ser encontrado em duas topologias distintas, a Retificador de Meia Onda e Retificador de Onda Completa.

1 Retificador de Meia Onda

O Retificador de Meia Onda é a forma mais simples de converter um sinal CA para CC, é necessário apenas um diodo em série com a carga. Quando uma forma de onda CA padrão é passada por um Retificador de Meia Onda, apenas metade da forma de onda CA permanece, pois ele permite apenas um meio-ciclo (meio-ciclo positivo ou negativo) da tensão CA e irão bloquear o outro meio-ciclo no lado CC, como visto abaixo para uma carga resistiva.

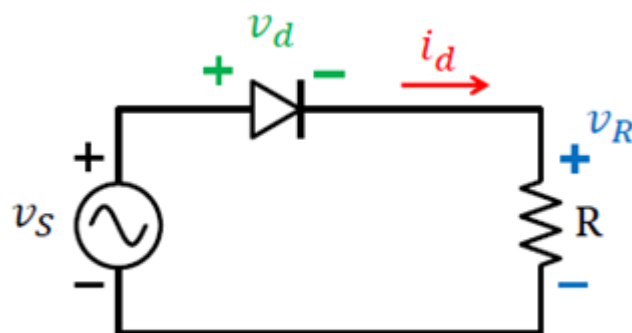


Figura 7: Circuito - Retificador de Meia Onda.

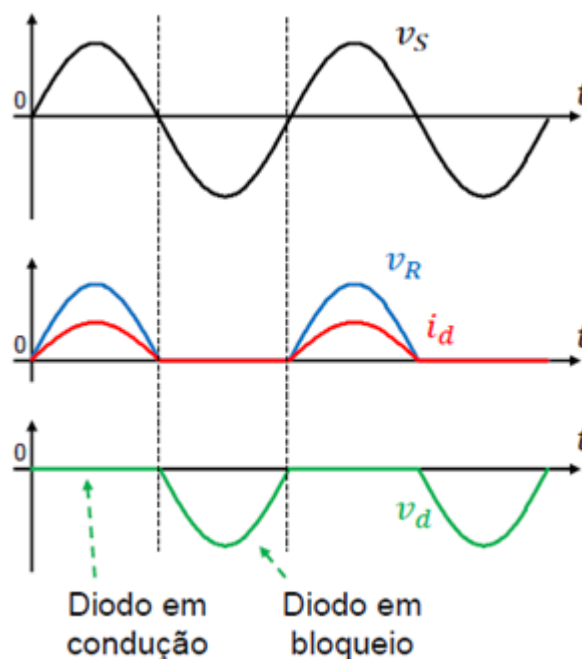


Figura 8: Formas de onda - Retificador de Meia Onda.

$$V_R = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi \sqrt{2}V_s \sin(\omega t) d\omega t \quad (6)$$

$$V_R = \frac{\sqrt{2}V_s}{2\pi} [-\cos(\pi) + \cos(0)] = \frac{\sqrt{2}V_s}{\pi} = 0,45V_s \quad (7)$$

Como pode-se observar, o valor médio da tensão na carga é pequeno $0,45V_s$ (V_s valor rms de tensão), seu *ripple* é alto e a frequência de saída é a mesma da entrada.

Para minimizar esses problemas, adiciona-se um capacitor em paralelo com a carga para filtrar as componentes CA do sinal (*ripple*), aumentando a componente CC. Se o resistor de carga for pequeno para um determinado valor de capacitor, uma alta corrente fluirá através da carga, o que descarregará o capacitor mais rapidamente (por causa da constante de tempo RC) e resultará em ondulações aumentadas. Desde que a constante de tempo RC seja muito maior do que o período, o capacitor permanece quase totalmente carregado e obtemos uma tensão de saída CC perfeita. Para ter uma constante de tempo RC maior, precisamos de um capacitor de valor maior. Isso não é prático porque há limites para o custo e o tamanho do capacitor.

Além disso, não há saída durante semiciclo negativo, portanto, metade da energia é desperdiçada, o que resulta em amplitude de saída mais baixa. Por conta dessas desvantagens, os Retificadores de Meia Onda raramente são usados, sendo mais prático utilizar um Retificador de Onda Completa.

2 Retificador de Onda Completa

Apesar do Retificador de Meia Onda ser usado em circuitos de baixa potência, o Retificador de Onda Completa é a topologia de conversão CA-CC mais usada no ramo da eletrônica de potência. Ele usa ambos os semiciclos do sinal CA, resultando em um valor médio de saída CC maior do que o do Retificador de Meia Onda.

O Retificador de Onda Completa utiliza 4 diodos na topologia Monofásico em Ponte Completa, conforme ilustrado abaixo.

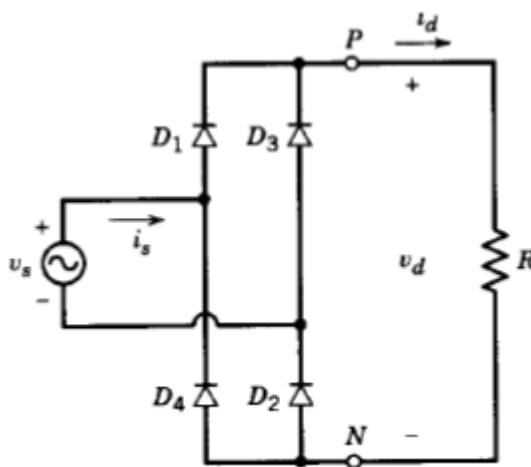


Figura 9: Circuito - Retificador de Onda Completa.

A retificação do sinal CA é feito em duas etapas:

Na primeira etapa, quando o sinal CA está no seu semiciclo positivo, os diodos D1 e D2 conduzem, enquanto os diodos D3 e D4 estão cortados.

$$v_a > v_b \quad (8)$$

$$v_{PN} = v_{ab} = v_s \quad (9)$$

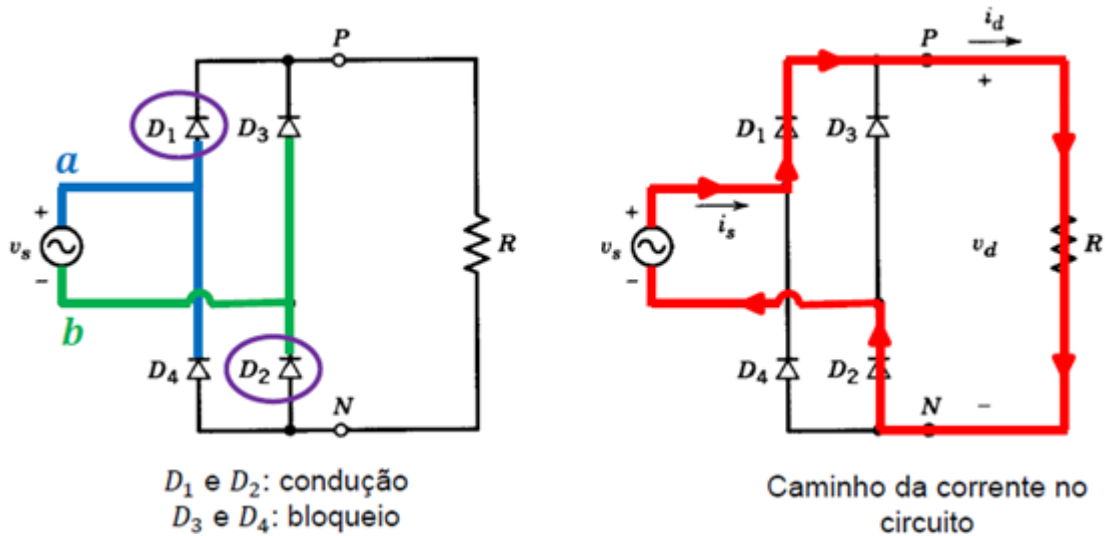


Figura 10: Retificador de Onda Completa - Semiciclo positivo.

Por outro lado, no semiciclo negativo do sinal CA, os diodos D_1 e D_2 em corte, enquanto os diodos D_3 e D_4 estão conduzindo.

$$v_b > v_a \quad (10)$$

$$v_{PN} = v_{ba} = -v_s \quad (11)$$

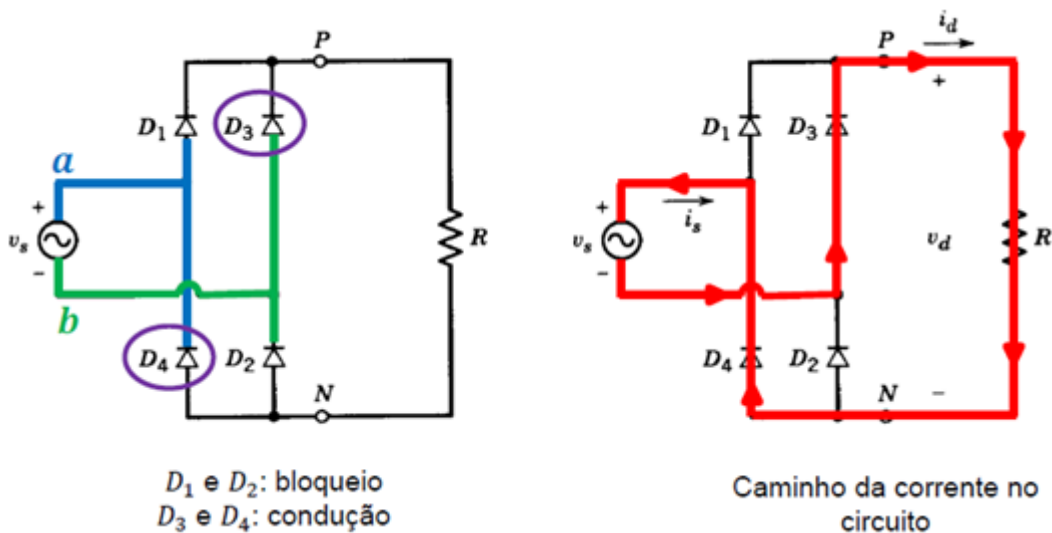


Figura 11: Retificador de Onda Completa - Semiciclo negativo.

Analisando os gráficos de tensão e corrente na carga, percebe-se que o sinal de saída no semiciclo positivo do sinal CA se mantém o mesmo (a menos de uma queda de tensão nos diodos), enquanto o sinal no semiciclo negativo é refletido, tornando-se positivo (também a menos de uma queda de tensão nos diodos).

Dessa maneira, obtém-se a comparação entre os sinais de tensão e corrente na entrada e na saída do Retificador Monofásico de Onda Completa.

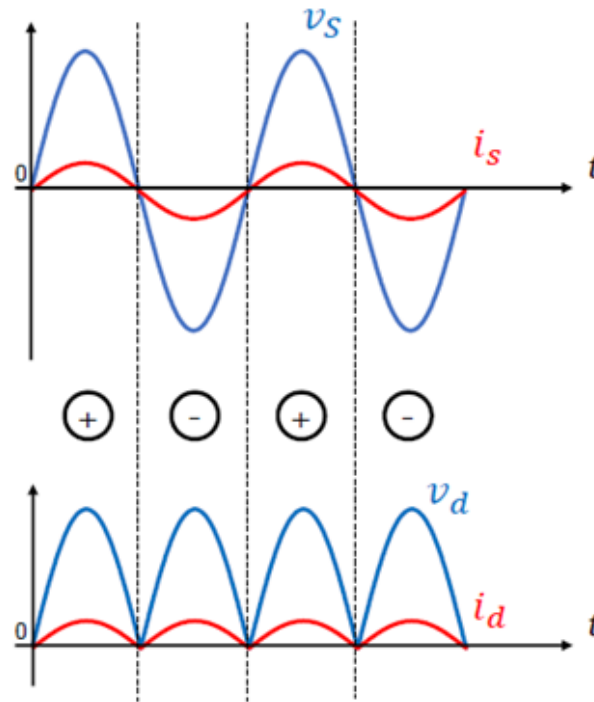


Figura 12: Comparação formas de onda de entrada e saída - Retificador de Meia Onda.

$$V_d = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \sqrt{2} V_s \sin(\omega t) d\omega t \quad (12)$$

$$V_d = \frac{\sqrt{2} V_s}{\pi} [-\cos(\pi) + \cos(0)] = \frac{2\sqrt{2} V_s}{\pi} = 0,9 V_s \quad (13)$$

Como pode-se observar, o valor médio da tensão na carga é cerca de $0,9V_s$ (V_s valor rms de tensão), ainda há a presença considerável de uma parcela oscilante (*ripple*) e a frequência de saída é o dobro da frequência de entrada. Portanto, em comparação com o Retificador de Meia Onda, o Retificador de Onda Completa tem uma eficiência de retificação maior e um *ripple* menor.

Assim como no Retificador de Meia Onda, para minimizar a magnitude das componentes harmônicas de frequências maiores que zero, adiciona-se um capacitor em paralelo com a carga. Dessa maneira, essas componentes são filtradas e o sinal de saída fica com um *ripple* quase zero e o mais contínuo possível.

c Conversor CC-CA - Inversor

Como o próprio nome diz, o conversor CC/CA é um circuito eletrônico que converte energia em CC para CA, ou seja, ele é capaz de converter uma entrada constante em uma saída senoidal com amplitude, frequência e fase controláveis. Os conversores CC/CA, também chamados de Inversores, são conversores a chaves controladas, os quais podem funcionar no modo inversor (fluxo de potência do lado CC para CA) e no modo retificador (fluxo de potência do lado CA para CC). Nesse último caso, temporariamente, quando utilizado em frenagem regenerativa, ou no controle da tensão do capacitor no elo CC.

Inversor (CC-CA)

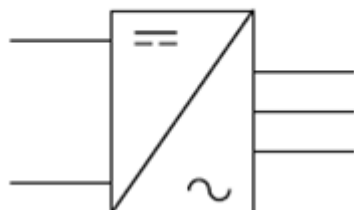


Figura 13: Conversor CC-CA - Inversor.

Os inversores estão presentes em diversos segmentos da indústria, como a área automotiva, energias renováveis, entre outras. Na área de energias renováveis os inversores são amplamente utilizados para converter os níveis CC dos módulos fotovoltaicos para CA, com níveis de tensão e frequência iguais aos da rede da concessionária de energia, no caso dos sistemas *On-Grid*. Tendo isso em vista, com o advento da geração distribuída, a Energia Solar ficou cada vez mais presente na casa dos consumidores comuns, trazendo consigo o inversor para dentro de suas residências e economia para seus usuários. Por sua vez, na indústria automotiva, esses circuitos são utilizados para o carregamento de baterias, utilizando o sistema de frenagem regenerativa, principalmente com o avanço da tecnologia de automóveis elétricos. Além desses exemplos expostos anteriormente, os conversores CC/CA são utilizados na indústria de máquinas elétricas para acionamento de motores CA de velocidade variável e diversas outras aplicações.

Os conversores CC/CA são dispositivos do ramo da Eletrônica de Potência, que utilizam diversos componentes elementares, ligando uma entrada a uma saída. Tendo isso em vista, para esses dispositivos, caso a entrada seja do tipo fonte de tensão, a saída deve ser do tipo fonte de corrente e vice-versa. Dessa maneira, os inversores possuem dois tipos distintos de configurações:

1 Inversor Fonte de Tensão (*Voltage Source Inverter - VSI*)

No Inversor do tipo Fonte de Tensão (*Voltage Source Inverter - VSI*), a entrada CC trabalha como uma fonte de tensão contínua, resultando em uma carga trabalhando como fonte de corrente. São unidirecionais em tensão e bidirecionais em corrente, além de possuírem capacitância em paralelo na entrada, impedindo que a tensão varie instantaneamente.

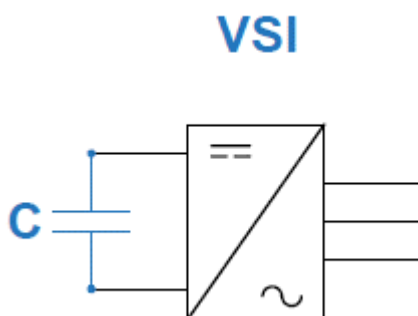


Figura 14: Inversor Fonte de Tensão.

2 Inversor Fonte de Corrente (*Current Source Inverter - CSI*)

No Inversor do tipo Fonte de Corrente (*Current Source Inverter - CSI*) – A entrada CC trabalha como uma fonte de corrente, resultando em uma carga trabalhando como fonte de tensão. São unidirecionais em corrente e bidirecionais em tensão, além de possuírem indutância em série na entrada, impedindo que a corrente varie instantaneamente.

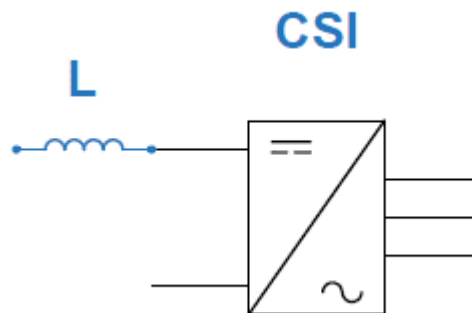


Figura 15: Inversor Fonte de Corrente.

Como explicitado anteriormente, os conversores CC/CA podem trabalhar em dois modos de operação distintos, o modo inversor ($p_o = v_o * i_o > 0$) e o modo retificador ($p_o = v_o * i_o < 0$). Dessa maneira, para pleno funcionamento em ambos os modos, o conversor deve ser capaz de trabalhar nos quatro quadrantes do plano $v_o \times i_o$.

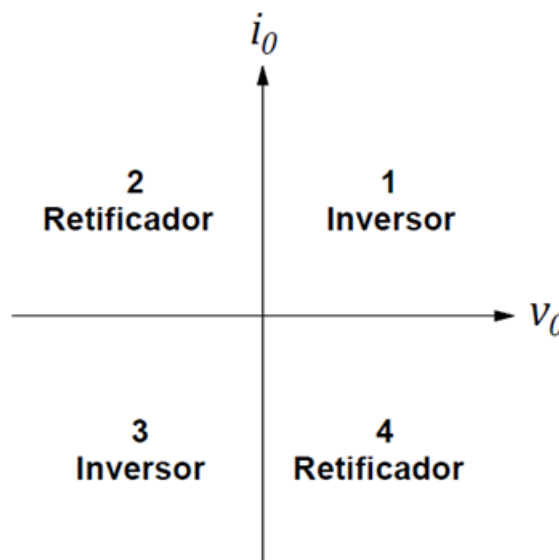


Figura 16: Plano $v_o \times i_o$.

d Estratégia de Modulação PWM

A estratégia de Modulação por Largura de Pulso (PWM) consiste em utilizar a comparação entre uma ou mais moduladoras e uma portadora para gerar pulsos de chaveamento. Ela gera uma série de pulsos "ON-OFF" (alto e baixo), variando o ciclo de trabalho (*Duty Cycle*), a fração do tempo em que a tensão de saída está "ON" em comparação com quando está "OFF", dos pulsos, mantendo a frequência de chaveamento constante.

Pensando nisso, é possível aplicar o PWM para controlar e regular o valor médio do sinal de saída dos conversores chaveados, apenas regulando esse *Duty Cycle*, utilizando sinais de circuitos de controle. Portanto, esse tipo de estratégia de modulação é amplamente utilizada no controle de inversores chaveados, controlando a amplitude e frequência do sinal de saída, tanto em inversores monofásicos quanto trifásicos.

O controle das características do sinal de saída são modelados por meio dos índices de modulação. Esses índices dizem respeito à relação entre a tensão de entrada e o sinal de saída desejado, tanto em amplitude quanto em frequência.

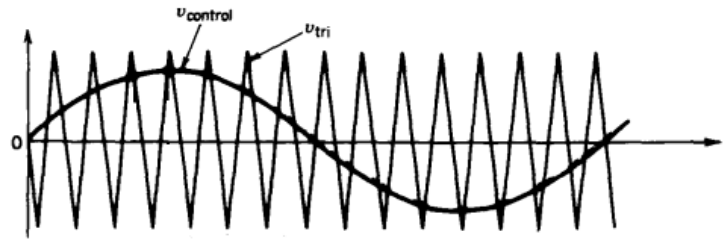


Figura 17: Estratégia de modulação PWM.

I. Índice de modulação em amplitude

$$m_a = \frac{V_{control}}{V_{tri}} \quad (14)$$

$V_{control}$ se refere à amplitude do sinal de controle (Moduladora), enquanto V_{tri} se refere à amplitude da onda triangular (Portadora).

II. Índice de modulação em frequência

$$m_f = \frac{f_s}{f_1} \quad (15)$$

f_s se refere à frequência da onda triangular (Portadora), enquanto f_1 se refere à frequência do sinal de controle e de referência (Moduladora).

Existem duas estratégias de PWM que são amplamente utilizadas na eletrônica, são eles o Bipolar e o Unipolar.

1 Bipolar

A estratégia de modulação PWM Bipolar utiliza apenas um sinal de saída e é de fácil implementação por requerer apenas dois sinais de entrada, uma moduladora e uma portadora. Entretanto sua performance harmônica não é tão boa, quando comparado com o PWM Unipolar.

No caso da topologia monofásica, um único sinal é responsável por controlar os dois braços do circuito. Quando T_{A+} e T_{B-} estão abertos, T_{A-} e T_{B+} estão fechados, enquanto que quando T_{A+} e T_{B-} estão fechados, T_{A-} e T_{B+} estão abertos.

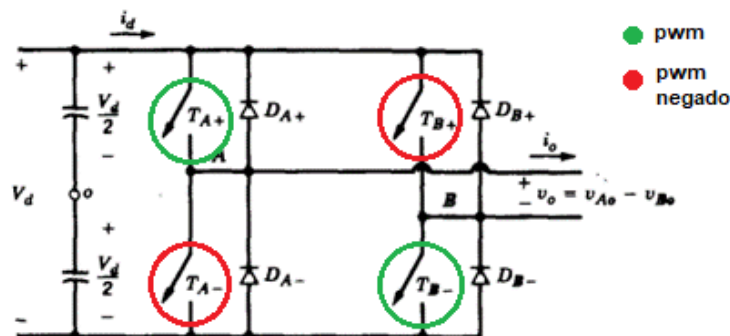


Figura 18: Inversor em Ponte Completa com PWM Bipolar.

No que tange o conteúdo harmônico, os harmônicos de ordem $2m_f$ são cancelados e haverá apenas harmônicos de ordem ('ao redor' das múltiplas de $2m_f$), além da presença dos harmônicos da ordem de m_f e seus adjacentes.

Abaixo observa-se a análise em frequência de um PWM Bipolar, com m_a igual a 0,8 e m_f igual a 17.

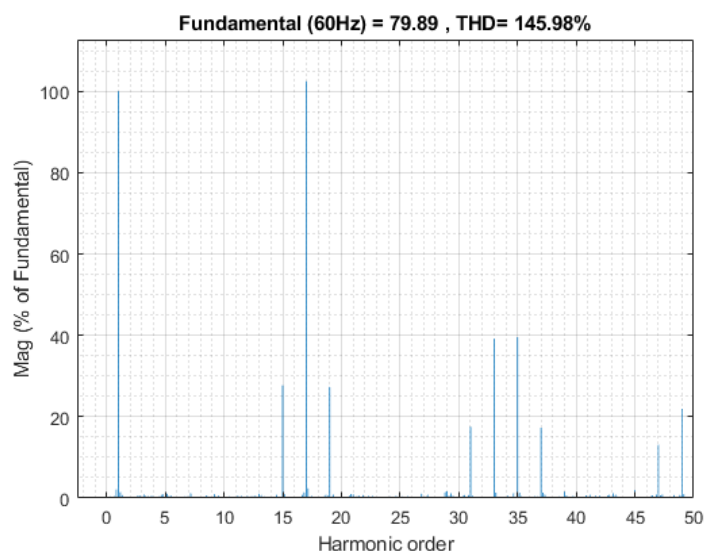


Figura 19: Reposta em Frequência - PWM Bipolar.

2 Unipolar

O PWM Unipolar utiliza três níveis de tensão na saída, sua performance harmônica é melhor em comparação com o PWM Bipolar, o *ripple* da tensão de saída é menor, mas como a frequência efetiva de chaveamento é maior, tem mais perdas de chaveamento. Entretanto, o PWM Unipolar é mais complicado de ser implementado por serem necessários dois sinais idênticos, defasados entre si de 180° , como moduladoras, além de uma portadora.

Dessa forma, são gerados dois sinais de saída, onde cada um controla um braço do circuito individualmente e de forma complementar. Um sinal de saída (pwm 1) controla as chaves T_{A+} e T_{A-} , enquanto o segundo sinal de saída (pwm 2) controla as chaves T_{B+} e T_{B-} .

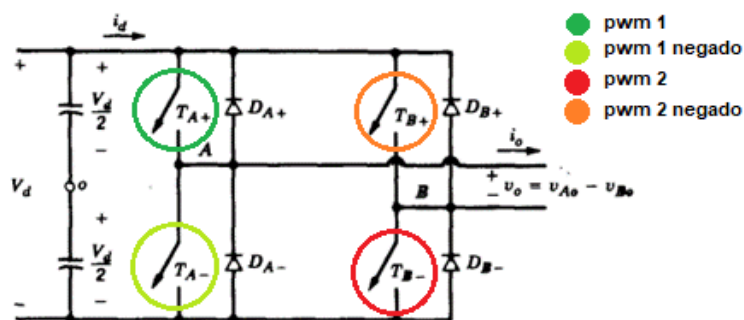


Figura 20: Inversor em Ponte Completa com PWM Unipolar.

No que diz respeito aos harmônicos do sinal de saída, caso seja escolhido um valor de m_f par, os harmônicos de ordem m_f são nulos e os harmônicos de ordem $2m_f$ também são cancelados e haverá apenas harmônicos de ordem ('ao redor' das múltiplas de $2m_f$), ocasionando em um menor conteúdo harmônico quando comparado com a estratégia do PWM Bipolar.

Abaixo observa-se a análise em frequência de um PWM Bipolar, com m_a igual a 0,8 e m_f igual a 18.

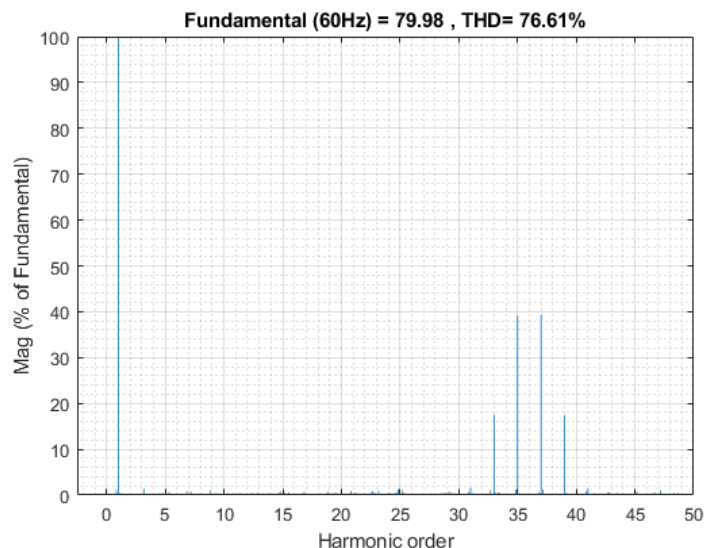


Figura 21: Reposta em Frequência - PWM Bipolar.

e Indução Eletromagnética

A indução eletromagnética foi descoberta pela primeira vez por Michael Faraday em 1830. Faraday notou que quando ele movia o ímã permanente para dentro e para fora da bobina ou fio de uma volta, ele induzia uma força eletromotriz (fem), uma tensão. Desta forma, Michael Faraday descobriu uma maneira de gerar corrente em um circuito usando apenas a força de um campo magnético em vez de uma bateria. Isso leva a uma lei muito importante que conecta eletricidade e magnetismo, ou seja, a Lei de Faraday para o Eletromagnetismo.

Quando o ímã mostrado abaixo é movido "em direção" à bobina, o ponteiro ou a agulha do Galvanômetro, que nada mais é do que um amperímetro de bobina móvel com centro zerado muito sensível, desviará de sua posição central em apenas uma direção. Por sua vez, quando o ímã para de se mover e é mantido estacionário em relação à bobina, a agulha do galvanômetro retorna a zero, pois não há movimento físico do campo magnético.

Dessa maneira, quando o ímã está se movendo para "longe" da bobina na outra direção, o ponteiro do galvanômetro se move da primeira direção para a direção oposta, indicando uma mudança na polaridade. Em seguida, movendo o mesmo ímã para frente e para trás em direção à bobina, o ponteiro do galvanômetro se moverá para a esquerda ou direita, positivo ou negativo, de acordo com a direção do ímã.

1 Indutância Mútua

Quando uma corrente constante flui em uma bobina, um campo magnético é produzido na outra bobina. Mas como esse campo magnético não está mudando, a lei de Faraday diz que não haverá tensão induzida na bobina secundária. Mas se a chave for aberta para interromper a corrente, haverá uma mudança no campo magnético na bobina do lado direito e uma tensão será induzida. A tensão induzida fará com que uma corrente flua na bobina secundária que tenta manter o campo magnético que estava lá. O fato de que o campo induzido sempre se opõe à mudança é um exemplo da lei de Lenz. Uma vez que a corrente é interrompida e a chave é fechada para fazer com que a corrente flua novamente como no exemplo da direita, uma corrente induzida na direção oposta se oporá ao acúmulo de campo magnético. Esta geração persistente de tensões que se opõem à mudança no campo magnético é o princípio de operação de um transformador. O fato de que uma mudança na corrente de uma bobina afeta a corrente e a tensão na segunda bobina é quantificado na propriedade chamada indutância mútua.

Quando uma fem é produzida em uma bobina por causa da mudança na corrente em uma bobina acoplada, o efeito é chamado de indutância mútua. A fem é descrita pela lei de Faraday e sua direção é sempre oposta à mudança do campo magnético nela produzida pela bobina acoplada (lei de Lenz).

2 Fator de Acoplamento

O coeficiente de acoplamento é a razão entre a tensão real de circuito aberto e a tensão que seria obtida se todo o fluxo fosse acoplado de um circuito ao outro. O coeficiente de acoplamento está relacionado à indutância mútua e indutâncias próprias da seguinte maneira.

Dependendo da distância entre as bobinas de transmissão e recepção, apenas uma fração do fluxo magnético gerado pela bobina transmissora penetra na bobina receptora e contribui para a transmissão de energia. Quanto mais fluxo chega ao receptor, melhor as bobinas são acopladas e menor é a perda na transmissão. O grau de acoplamento é expresso pelo fator de acoplamento.

O fator de acoplamento é representado pela letra k que é um número real entre 0 e 1. O valor mais alto expressa o acoplamento perfeito, ou seja, todo o fluxo gerado penetra na bobina receptora, enquanto o menor valor expressa um sistema onde as bobinas transmissora e receptora são independentes uma da outra.

Diversos fatores são determinantes para a variação desse coeficiente de acoplamento. A distância entre os indutores e seu tamanho relativo, bem como a forma das bobinas e o ângulo entre elas, são alguns desses fatores. Dessa maneira, se as bobinas estiverem alinhadas axialmente, um deslocamento causa uma diminuição de k e, conseqüentemente, um aumento na perda de energia por transmissão.

f Regulador de Tensão

O Regulador de Tensão é um circuito eletrônico que converte energia de um nível CC para outro nível CC específico, ou seja, ele é capaz de diminuir o valor de entrada para uma tensão específica na saída. Essa tensão de saída já vem especificada de fábrica e cada modelo de regulador de tensão possui as suas tensões de entrada e saída especificadas no datasheet do componente fornecido pelo fabricante.

Os reguladores da linha LM78XX são os mais usados na indústria por serem simples e terem modelos para 5 V, 6 V, 8 V, 12 V, 15 V, 18V e 24 V, os quais os dois algarismos finais do modelo são determinados pela sua tensão de saída. Os reguladores dessa família possuem três terminais, a entrada, a tensão de referência (terra) e a saída, conforme especificado abaixo.

Regulador de Tensão

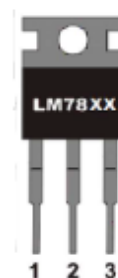
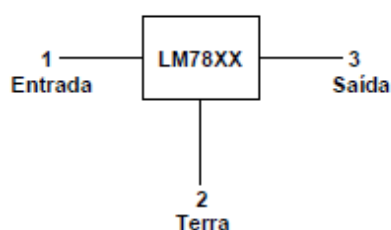


Figura 22: Regulador de Tensão LM78XX

3 Desenvolvimento das Estações

O circuito desenvolvido para a implementação do projeto foi dividido em dois grandes módulos: transmissor e receptor.

O módulo transmissor é a estação de pouso do VANT, localizado em pontos estratégicos para cada finalidade. Ele é responsável por obter a energia da rede e transferi-la para o segundo módulo usando a tecnologia IPT de indução eletromagnética. É composto pelo retificador de onda completa, inversor, PWM e antena transmissora. Este módulo cuida de todo tratamento do sinal e conversão da energia para a sua transmissão com a menor perda possível.

Por sua vez, o módulo receptor é o circuito que será integrado ao VANT, então ele deve ser simples e leve para manter a qualidade de voo da aeronave. Esse módulo é responsável por receber a energia do primeiro módulo e carregar a bateria do VANT. É composto pela antena receptora, retificador de onda completa e regulador de tensão, realizando a recepção da energia e conversão para alimentação da bateria.

Ambos módulos serão detalhados nesta seção com base no diagrama em blocos abaixo.

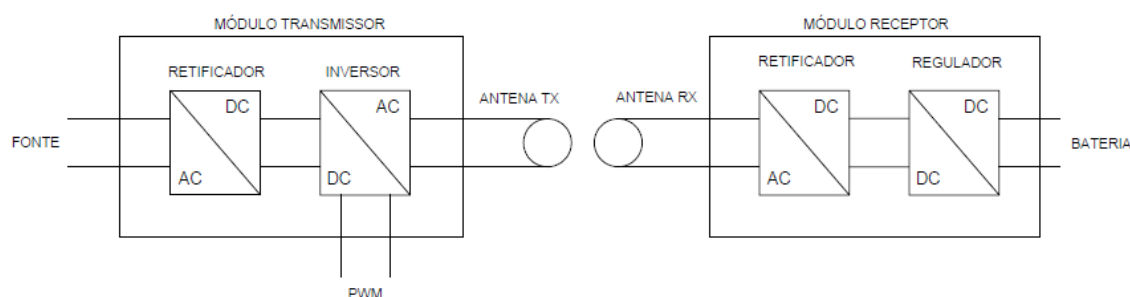


Figura 23: Diagrama de Blocos do Circuito

a Módulo Transmissor

Como dito anteriormente, a principal função da estação de pouso (módulo transmissor) é transferir a energia da rede para o módulo receptor.

Essa transmissão é feita da seguinte forma:

1 - Na primeira etapa, é feita a diminuição da tensão de entrada da rede de 127 V para 24 V, através da utilização de um transformador de potência.

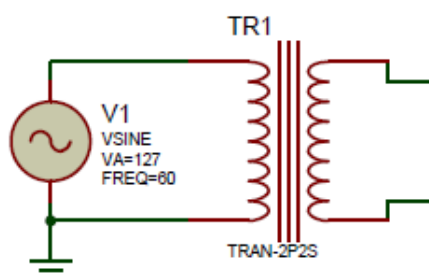


Figura 24: Esquemático - Fonte e Transformador de Potência.

2 - Na segunda etapa, é feita a conversão da tensão senoidal de 24 V em um sinal contínuo de 22 V usando a topologia Retificador de Onda Completa, com a adição de um capacitor como filtro para a diminuição do

ripple. Os diodos utilizados para a essa conversão são do modelo 1N4007 e o capacitor utilizado é de 22 mF.

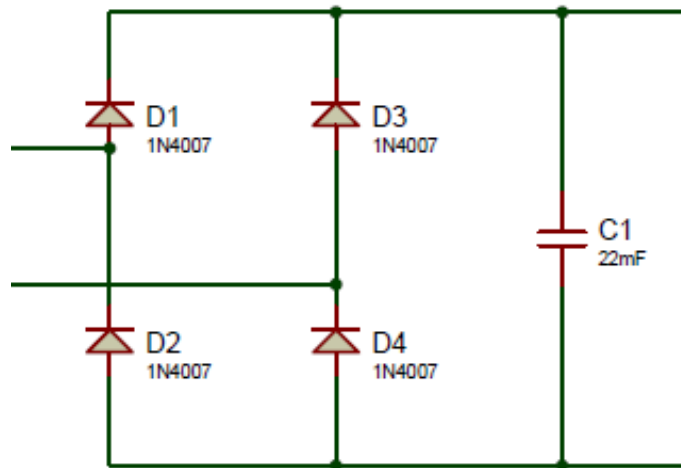


Figura 25: Esquemático - Retificador do Módulo Transmissor.

3 - Após a retificação, na terceira etapa é feita a conversão do sinal contínuo para um sinal alternado de alta frequência. Essa etapa é feita utilizando um Inversor do tipo Fonte de Tensão, controlado utilizando a estratégia de modulação PWM. Esse PWM é modulado a partir da estratégia Bipolar e é gerado através de um Arduino, utilizando sua saída PWM com a frequência de 62,5 kHz. Dessa forma, a tensão contínua da entrada é convertida em uma onda quadrada de 28 V de pico a pico e 62,5 kHz.

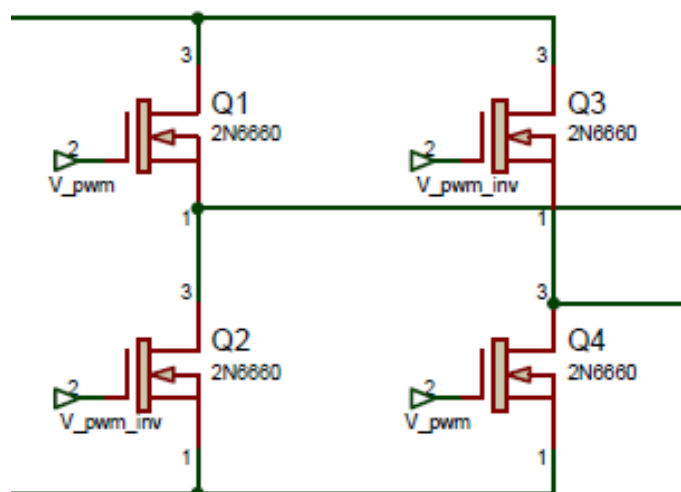


Figura 26: Esquemático - Inversor.

4 - Por sua vez, na última etapa do módulo transmissor é feita a conexão da saída do inversor à antena (bobina) transmissora. Dessa maneira, a energia é capaz de ser transmitida por indução eletromagnética, utilizando a tecnologia IPT.

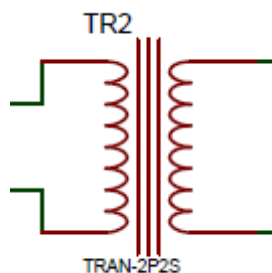


Figura 27: Esquemático - Acoplamento entre Antenas Transmissora e Receptora.

Portanto, a topologia transmissora ficou da seguinte forma:

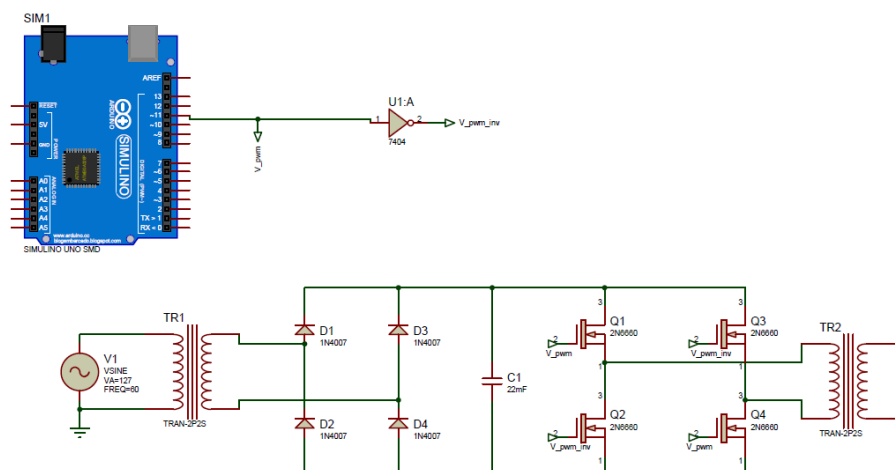


Figura 28: Esquemático - Módulo Transmissor.

b Módulo Receptor

O módulo receptor é um circuito eletrônico simples, que tem como principal função converter a energia recebida pela antena receptora, para um sinal capaz de carregar a bateria do VANT.

Essa conversão é feita da seguinte forma:

1 - A primeira etapa de recepção é constituída pela antena receptora, que, como o próprio nome diz, é responsável por receber o sinal de energia alternado de 62,5 kHz da antena transmissora por meio da indução eletromagnética.

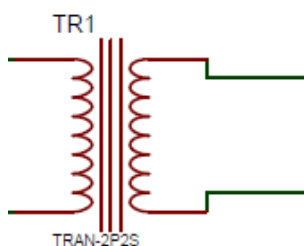


Figura 29: Esquemático - Acoplamento entre Antenas Transmissora e Receptora.

2 - Na segunda etapa, após o recebimento do sinal de energia de alta frequência, como a intenção é alimentar uma bateria de íon-lítio fósforo, cuja tensão é constante, fez-se necessário o uso de um conversor CA-CC do tipo Retificador de Onda Completa para converter a tensão alternada existente, oriunda da transmissão do sinal e transformá-la em um sinal CC. Para a construção desse retificador, foram utilizados diodos do modelo 1N4007 que atendem os requisitos propostos, bem como um bom limiar de corrente para que não queime o próprio. Além disso, um capacitor de 100 μ F funcionando como um filtro passa-baixas foi utilizado para minimizar o *ripple* do sinal contínuo.

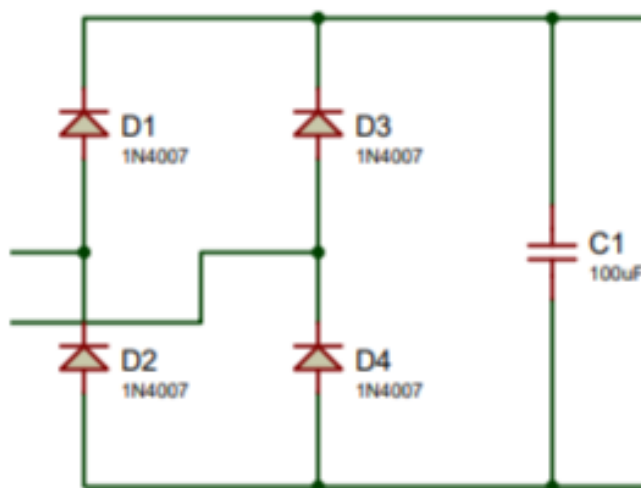


Figura 30: Esquemático - Retificador do Módulo Receptor.

3 - A terceira e última etapa é a fase de conversão da tensão retificada para a tensão necessária para que seja realizada a carga da bateria. Dessa forma, é utilizado um regulador de tensão do modelo LM7805, que tem em sua saída um sinal contínuo e constante em 5 V e carregando a bateria da aeronave.

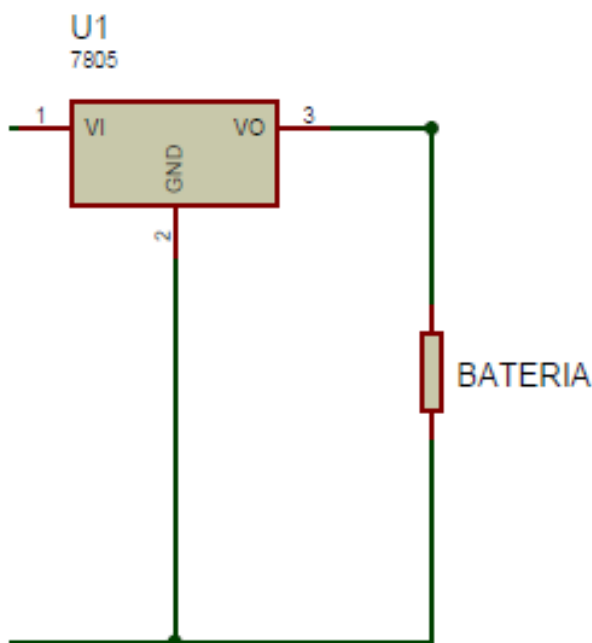


Figura 31: Esquemático - Regulador de Tensão e conexão na Bateria.

Portanto, a topologia receptora ficou da seguinte forma:

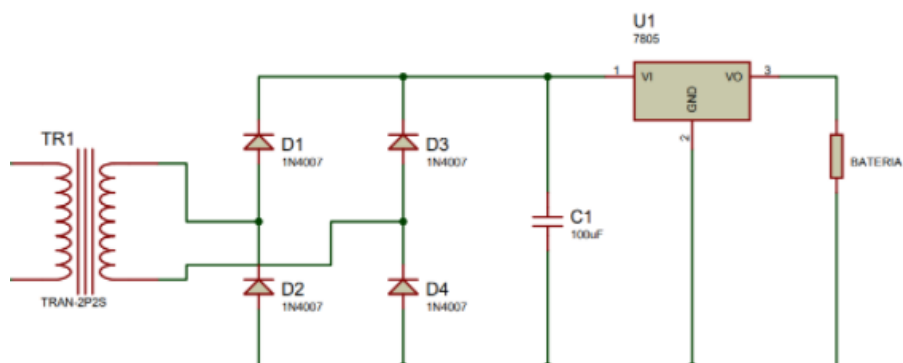


Figura 32: Esquemático - Módulo Receptor.

4 Simulação Computacional

As simulações teóricas se concentram em dois softwares de simulação de circuitos: MATLAB Simulink e TopSpice.

O Matlab Simulink é um software de modelagem, simulação e análise de sistemas dinâmicos. Utiliza-se uma interface gráfica por blocos e bibliotecas customizáveis de blocos. No caso desse projeto, foi utilizado para simular o comportamento ideal do circuito de transmissão e recepção do sinal até o carregamento da bateria.

Por outro lado, o TopSpice é um simulador de circuitos eletrônicos, que emula o comportamento de um circuito real, considerando todas as perdas e quedas de tensões. Com isso, para o projeto foi possível fazer testes do circuito a ser implementado, certificando que o próprio está funcionando de maneira correta e possa ser implementado na prática. A simulação deste circuito foi realizada em forma de script, cujo os componentes são definidos e determinados por linhas de códigos.

a Simulink

A ideia inicial é que o módulo transmissor seja alimentado pela rede convencional de 127 V e 60 Hz. Entretanto, como essa é uma tensão muito alta para os componentes que compõem o circuito, foi utilizado um transformador de potência de 127 V para 24 V, como foi descrito anteriormente.

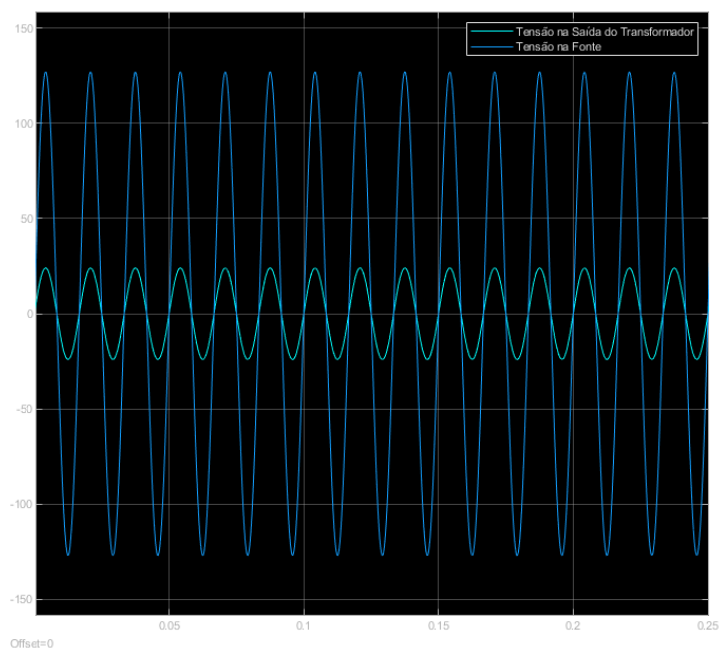


Figura 33: Simulink - Tensões na Fonte e na Saída do Transformador de Potência.

Na segunda etapa, foi construído o conversor CA-CC na topologia Retificador de Onda Completa, utilizando quatro diodos ideais e um capacitor de 20 mF. Dessa maneira, o sinal de tensão CA de 24 V e 60 Hz foi convertido para um sinal CC de aproximadamente 22 V e um *ripple* de cerca de 1,4 V.

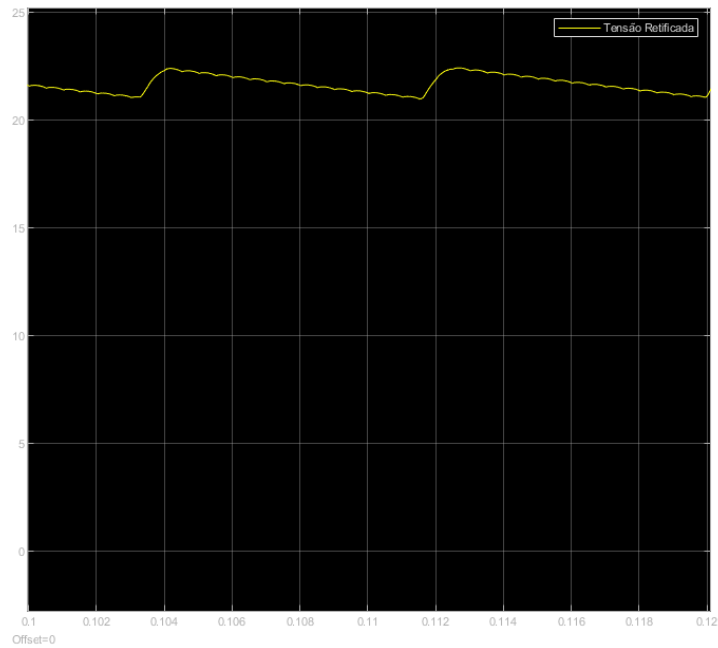


Figura 34: Simulink - Tensão Retificada.

Após o retificador, é necessário realizar a conversão do sinal de CC para CA com uma frequência ideal para ser transmitido pelas antenas. Para controlar essa frequência, é utilizado a estratégia de modulação PWM Bipolar, que por sua vez é composta de dois sinais de controle idênticos, porém defasados de 180 graus. Dessa maneira, a frequência desses sinais nessa simulação é de 1 kHz e são conectados nos gates dos mosfets que constituem o Conversor CC-CA Inversor.

Observação: No software Simulink, como este é um simulador ideal, não é necessária a amplificação dos sinais de controle do PWM para manter os mosfets na região de condução. Sendo assim, a amplitude dos sinais foi definida para 1 V quando o mosfet está conduzindo e 0 V quando está em corte.

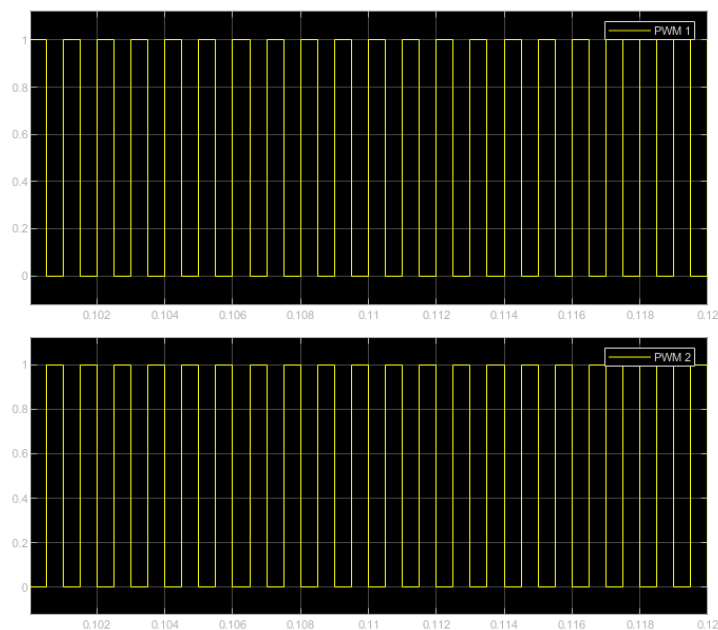


Figura 35: Simulink - Sinais de Controle PWM.

Com o controle do PWM, a saída do Inversor é uma onda quadrada com aproximadamente 44 V pico a pico que será conectado à antena transmissora, onde a energia é capaz de ser transmitida por indução eletromagnética, utilizando a tecnologia IPT. Nessa etapa, o acoplamento magnético das antenas transmissora e receptora é simulado utilizando um transformador de potência.

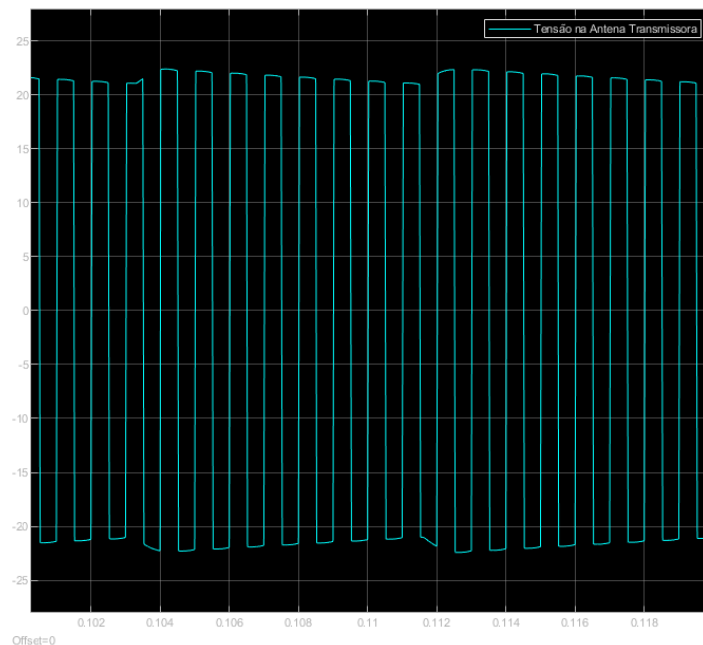


Figura 36: Simulink - Tensão na Antena Transmissora.

Após a transmissão, a antena receptora recebe o sinal mantendo sua frequência, porém com a tensão menor devido a perdas inerentes à eficiência do acoplamento. Dessa maneira, o sinal recebido é uma onda quadrada com amplitude de aproximadamente 30 V pico a pico.

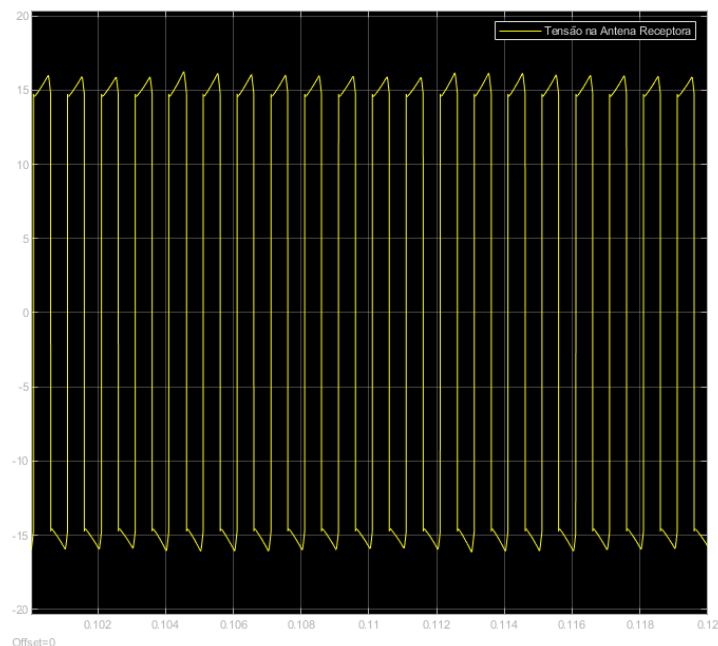


Figura 37: Simulink - Tensão na Antena Receptora.

Como a bateria deve ser alimentada com uma tensão contínua, é necessário a conversão do sinal recebido

pela antena, através de um Retificador de Onda Completa, utilizando quatro diodos ideais e um capacitor de 100 μF . Com isso, a tensão contínua gerada é de aproximadamente 14 V com um *ripple* de 1,5 V.

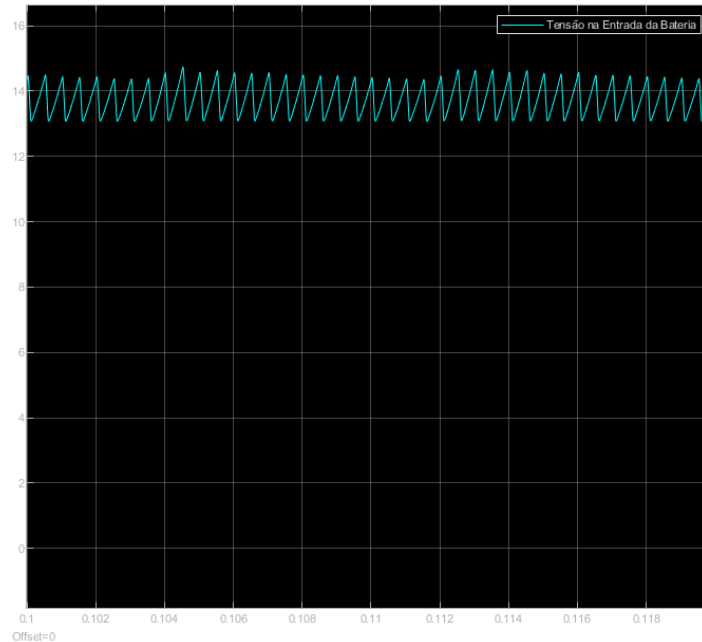


Figura 38: Simulink - Tensão na Entrada da Bateria.

Considerando uma bateria ideal com 12 V de tensão nominal e capacidade de 100 Ah, esse valor de tensão após o retificador é o suficiente para alimentá-la.

Simulando o circuito completo por 5 segundos para alimentar essa bateria com 20% de carga inicial, pode-se observar um aumento de 0,01% após 5 segundos de simulação. Isso reflete que o circuito está funcionando como o esperado e a bateria está sendo carregada.

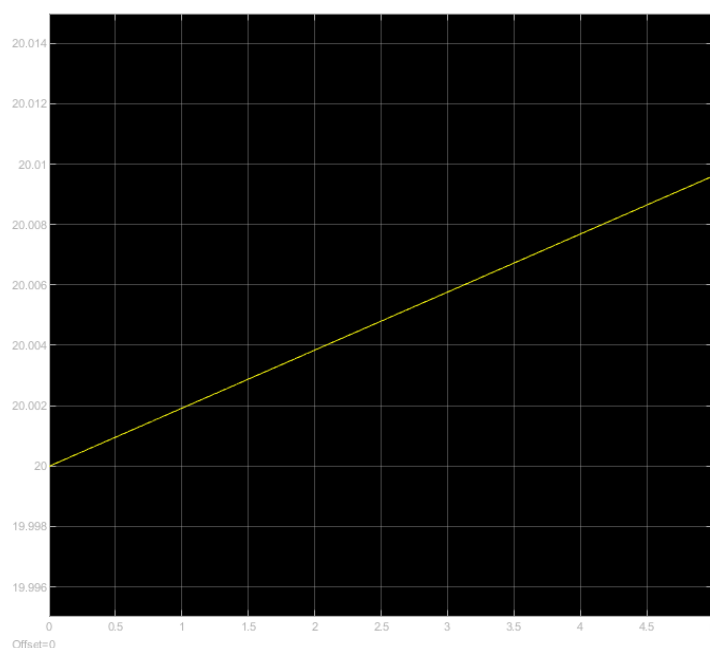


Figura 39: Simulink - Gráfico de Carregamento da Bateria - Carga (%) x Tempo (s).

O circuito completo utilizado na simulação no software MATLAB/Simulink encontra-se abaixo.

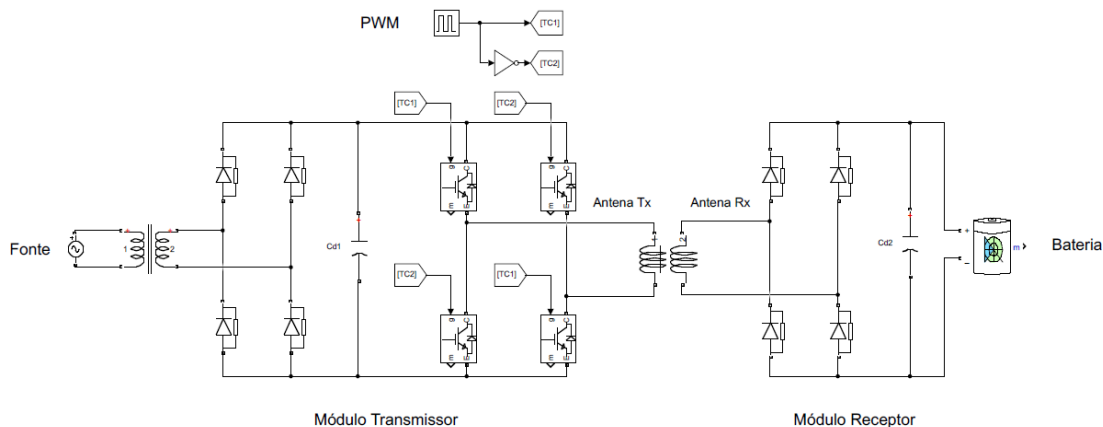


Figura 40: Simulink - Esquemático do Circuito Implementado.

b TopSpice

Inicialmente, como alimentação do circuito transmissor, foi simulado uma fonte de tensão de 127 V de amplitude e frequência de 60 Hz, com a intenção de emular a tomada CA. A fim de garantir que a tensão de alimentação não danifique os diodos que formam a ponte retificadora, foi colocado um transformador com fator de acoplamento entre 0,98 e 1 de 127 V:24 V, isto é, as tensões que irão para o retificador de onda completa será de 24 V ao invés de 127 V, e garantindo que estes operem corretamente. Verificando os sinais de entrada do transformador e de saída simulados:

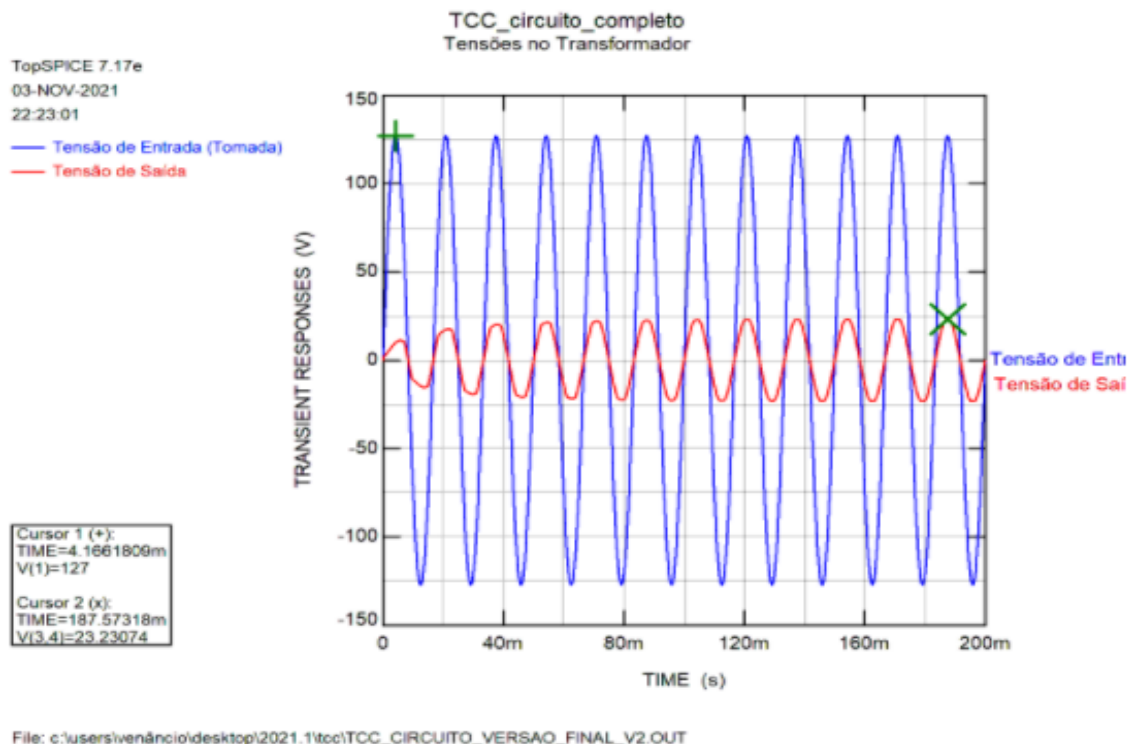


Figura 41: TopSpice - Tensões no Transformador.

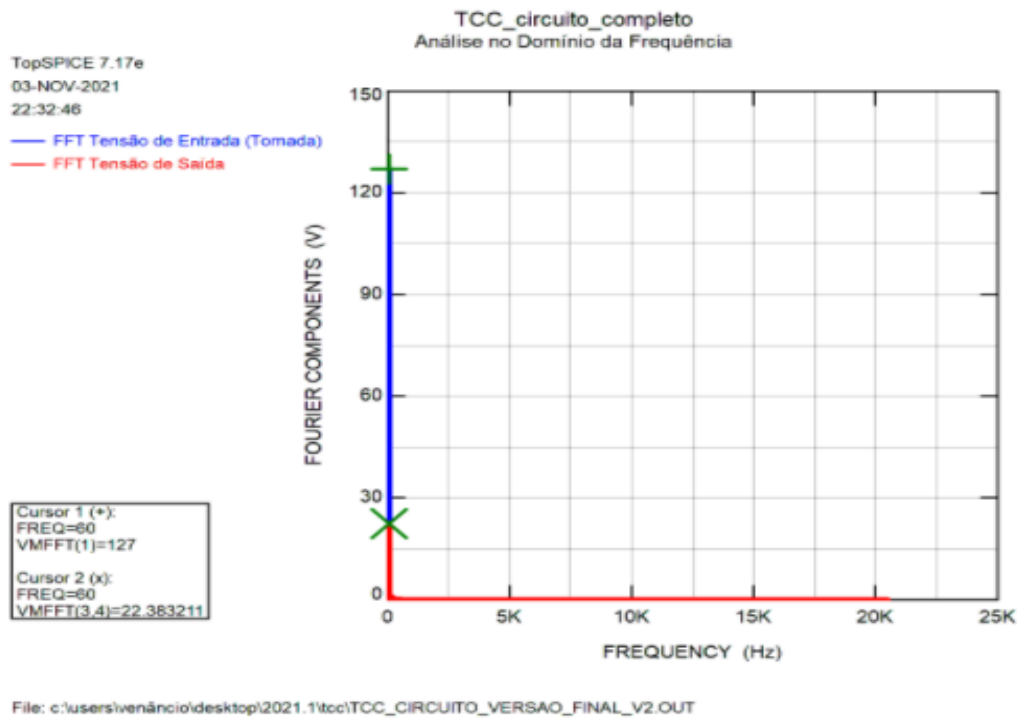


Figura 42: TopSpice - Transformada de Fourier dos Sinais do Transformador.

Pelo gráfico da figura 41, percebe-se que os sinais estão correspondendo ao esperado, isto é, 127 V no primário do transformador e, aproximadamente, de 23,23 V no secundário do transformador, no qual tais perdas se devem à resistência interna do próprio. Pela análise no domínio da frequência, é possível perceber que ambas tensões estão operando em 60 Hz, como mostra o gráfico da figura 42.

Em seguida, conectado ao secundário do transformador, foi conectado um retificador de onda completa composto por diodos do tipo 1N4007 em ponte e um capacitor de 22mF em paralelo para eliminar o ripple remanescente. Com isso, obteve-se um sinal de saída constante em cima do capacitor, como mostrado abaixo.

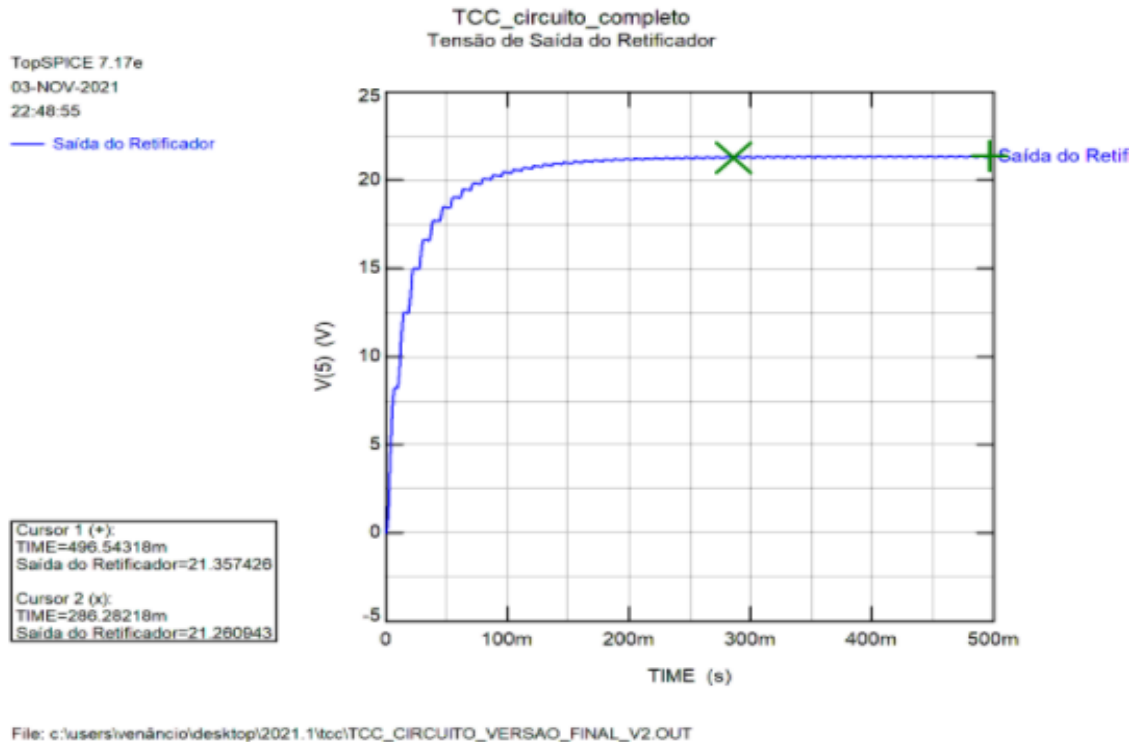


Figura 43: TopSpice - Tensão Retificada.

Analisando o gráfico da figura 43, percebe-se que o circuito atinge o regime permanente em, aproximadamente, 200 ms com uma tensão DC equivalente a 21,32 V (obtido pelo valor médio do gráfico 43 no regime permanente). Um ponto importante a analisar é o *ripple* do sinal, que é o resultado da variação de sinal em uma tensão contínua. O fator de *ripple* é possível calcular da seguinte forma:

$$ripple(\%) = \frac{(V_{mx} - V_{mn})}{V} \cdot 100 \quad (16)$$

Portanto, o ripple simulado foi:

$$ripple(\%) = \frac{(21,36 - 21,26)}{21,32} \cdot 100 \quad (17)$$

$$ripple(\%) = 0,47 \quad (18)$$

Com isso, obteve-se um *ripple* de 0,47%, o que pode ser considerado um sinal constante.

O principal objetivo de tornar o sinal constante na parte de transmissão, é poder utilizar o inversor de frequência para poder selecionar uma frequência suficientemente grande, de acordo com a teoria WPT, para que seja possível transmitir o sinal.

Após o retificador, foi implementado o inversor de frequência com MOSFETS da família 2N6660 controlados em seu gate por um PWM.

O PWM seria simulado com um arduino utilizando a sua própria frequência máxima de PWM, 62,5 KHz. Contudo, no TopSpice não é possível simular o arduino, com isso para essa parte da simulação, foi utilizada uma onda quadrada de 3,5 V (utilizado por causa que no TopSpice, a saída máxima das portas lógicas são 3,5 V) de amplitude, 62,5 KHz e 50% de *duty cycle*, como mostra a figura abaixo.

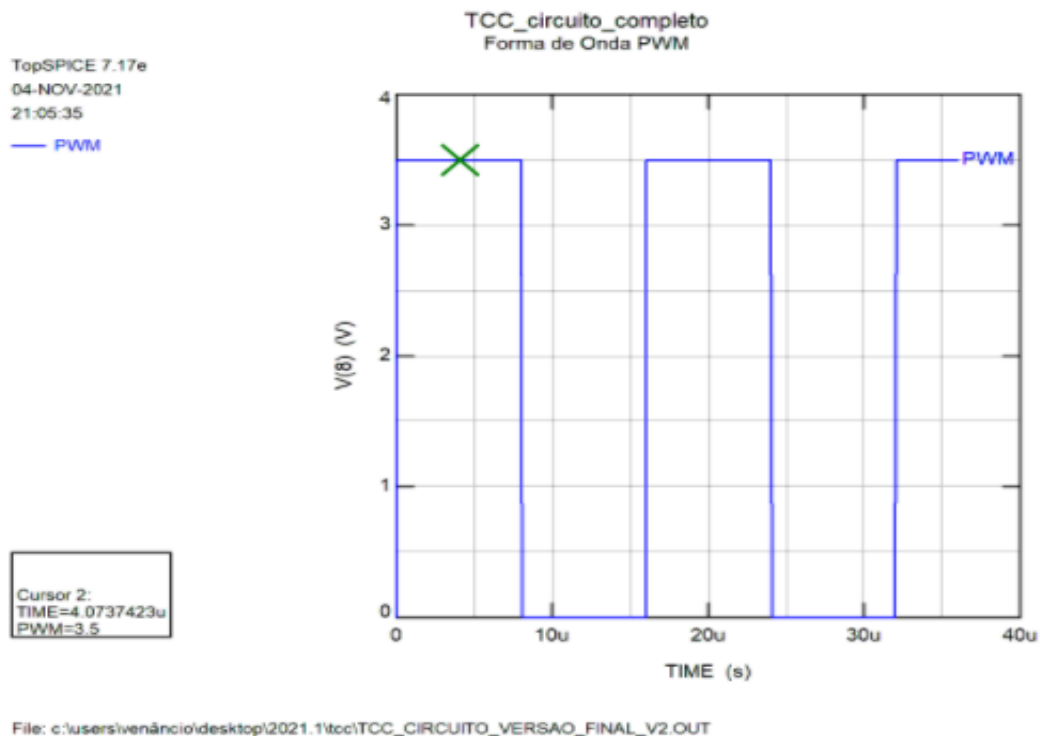


Figura 44: TopSpice - Sinal PWM.

Porém, o inversor funciona de modo pareado, isto é, enquanto dois MOSFETs estão atuando na região ativa, os outros dois estão em corte. Para isso, foi necessário implementar um inversor lógico (74LS04). Um problema encontrado, é que a tensão máxima de saída do inversor lógico, no TopSpice, é 3,5 V, o que fazia com que os MOSFETs nunca entrassem em condução (na região ativa). A fim de contornar esse problema, foi implementado um amplificador simples de sinal PWM com transistores bipolares de junção. Com isso, a nova amplitude do PWM seria de, aproximadamente, 18 V. O TBJ escolhido foi o BC368 por trabalhar em altas frequências, que é o caso demonstrado. Assim, a topologia do PWM acoplada ao amplificador ficou:

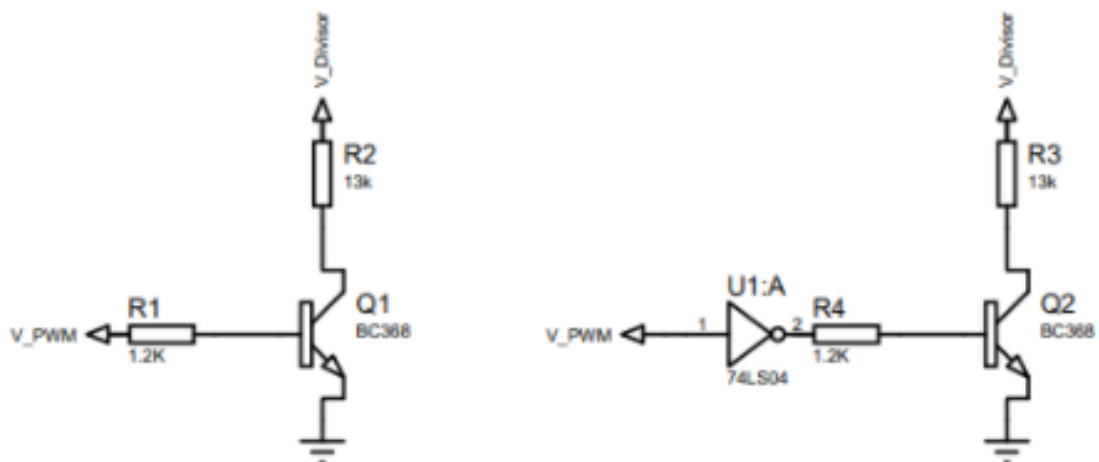


Figura 45: Esquemática - Topologia Amplificadora.

Nesta topologia, o sinal PWM foi aplicado na entrada de um resistor que conecta a base do TBJ, polarizando o transistor BC368 na saturação, o coletor acionou uma carga de 13 K Ω (tal valor é para que a tensão do coletor não queime o TBJ), que será conectada a tensão V_{CC} , este por sua vez está relacionado ao ganho

que será dado ao sinal PWM e o emissor foi conectado diretamente ao terra. Esta topologia faz com que o circuito funcione como uma chave, invertendo a saída e para isso foi necessário aplicar um inversor lógico (já explicado anteriormente), para que o sinal de saída do amplificador fosse o sinal PWM com ganho e não defasado. Porém, como a saída de interesse é 18 V e quem determina esse valor é a tensão na carga que liga ao coletor, foi necessário realizar um divisor de tensão com a tensão retificadora, pois é a única fonte de tensão disponível no sistema. Sabendo que a tensão retificada é de, aproximadamente, 21,35 V e que a saída desejada é 18 V. Portanto,

$$V_{divisor} = \frac{R_6}{R_5 + R_6} \cdot V_{Retificador} \quad (19)$$

Assumindo que o valor de R_6 seja 1.2 K Ω , então o valor de R_5 foi de, aproximadamente, 263,35 Ω (valor comercial mais próximo encontrado foi de 270 Ω). Com isso, a topologia do divisor de tensão ficou:

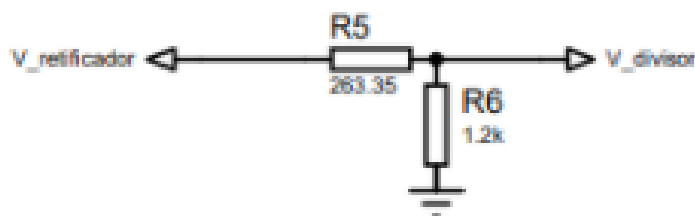


Figura 46: Esquemática - Topologia Divisor de Tensão.

Verificando o sinal de saída do divisor de tensão no TopSpice, obteve-se o seguinte gráfico:

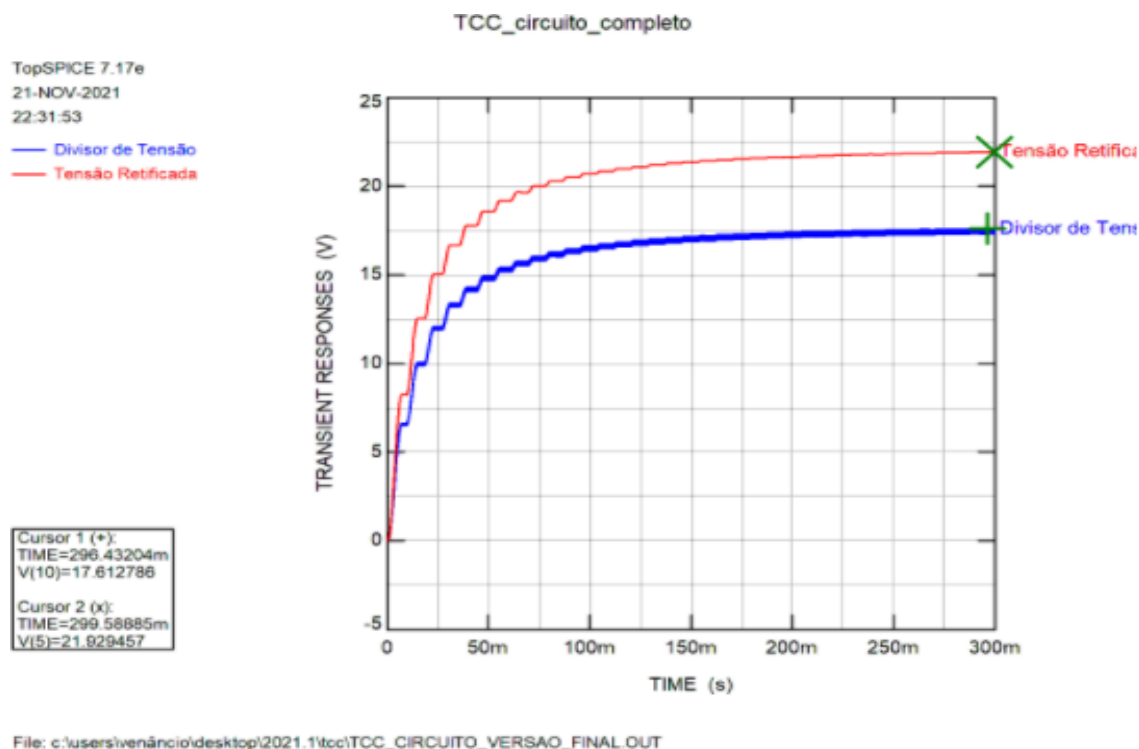


Figura 47: TopSpice - Comparação entre a Tensão Retificada e o Divisor de Tensão.

Fazendo análise gráfica, percebe-se que os valores estão próximos ao indicado e tais erros se devem a escolha do resistor, uma vez que o valor de 263,35 Ω não existe comercialmente.

Finalmente, tem-se o sinal de saída dos amplificadores do sinal PWM e o PWM, como está assinalado abaixo.

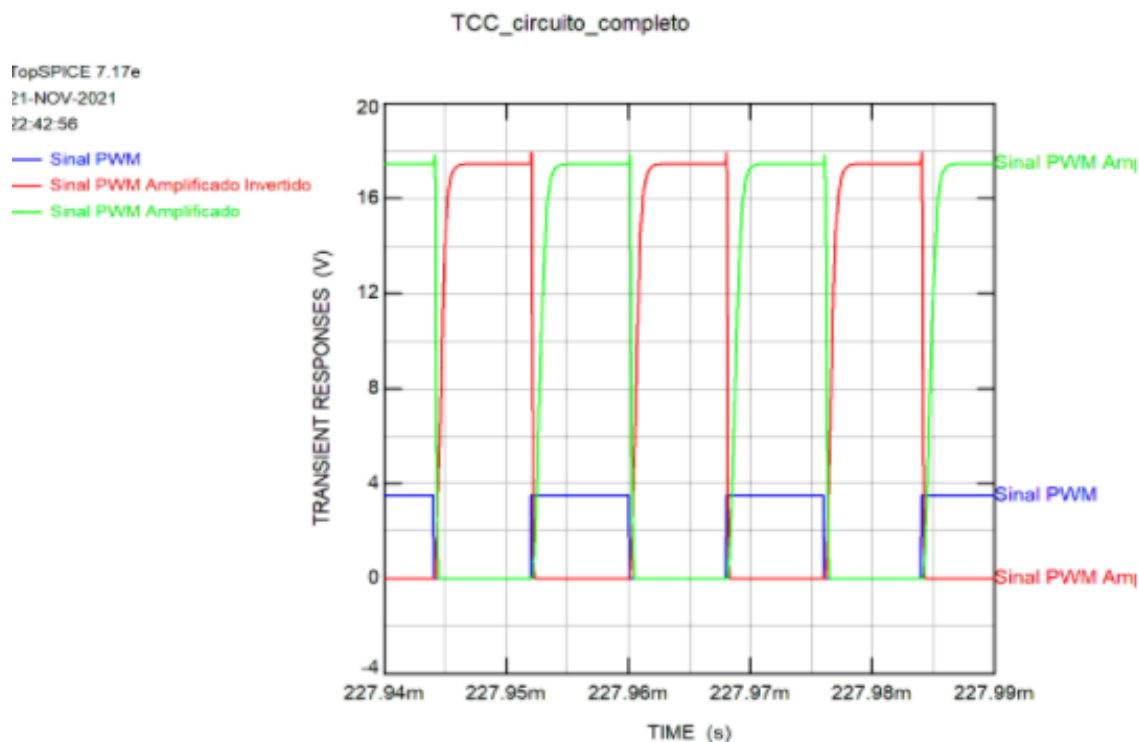


Figura 48: TopSpice - Sinais PWMs Amplificados.

Portanto, percebe-se que a amplitude dos sinais invertidos e não invertidos, foram para, aproximadamente, 18 V, como era esperado.

Com o PWM já configurado para que os MOSFETs funcionem de forma pareada, foi possível simular o inversor através de uma onda quadrada que leva a informação da portadora e possui uma frequência de 62,5 KHz, como esperado.

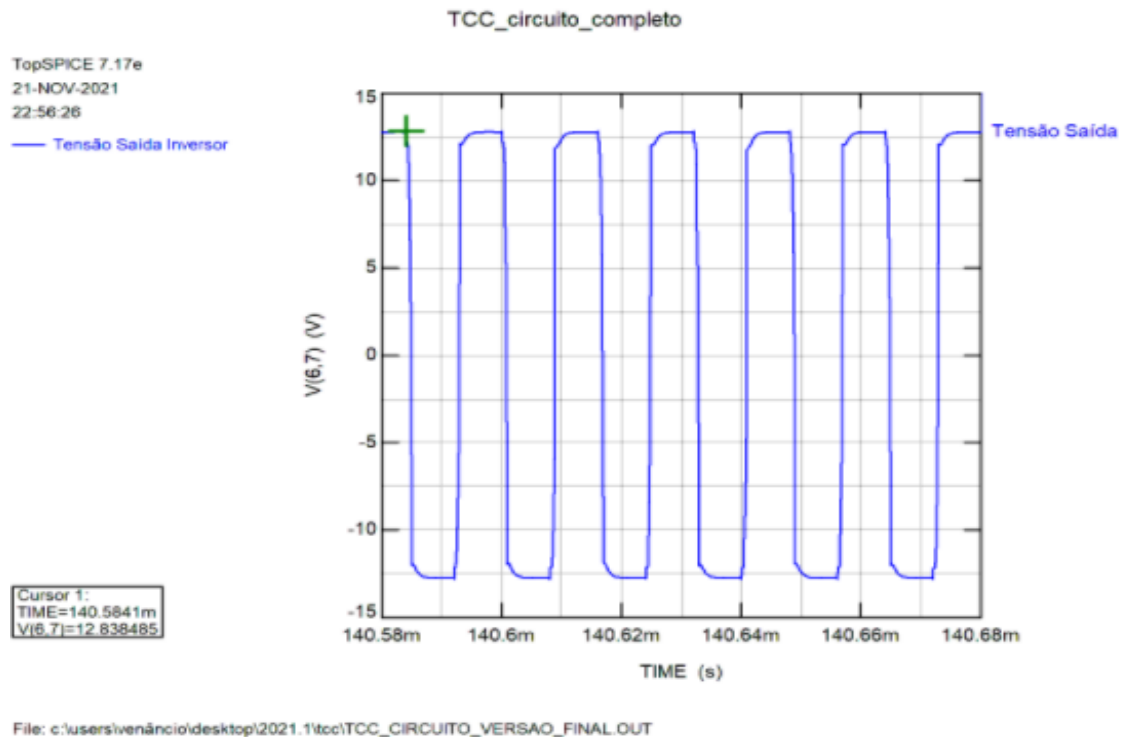


Figura 49: TopSpice - Inversor.

Pelo gráfico da figura 49, é possível perceber que o inversor manteve a frequência do PWM, no entanto deu uma reduzida na amplitude do sinal, tal motivo se dá pelo fato de quando os MOSFETs estão em condução, há uma queda de então referente ao gate e ao source de ambos dispositivos. Pelo datasheet, estima-se que o MOSFET tem uma queda de tensão, V_{gs} , entre 0,8 V e 2,5 V, porém como atuam de maneira conjunta dois a dois, tem-se que a queda de tensão no circuito pode variar de 1,6 V e 5 V. Com isso, pelo gráfico, percebe-se que a amplitude caiu de, aproximadamente 17,61 V para 12,84 V, sendo uma queda de 4,77 V, com cada MOSFET influenciando com 2,4 V, aproximadamente, para tal, funcionando dentro da faixa permissível da queda. Fazendo análise da Transformada de Fourier do sinal do inversor, tem-se:

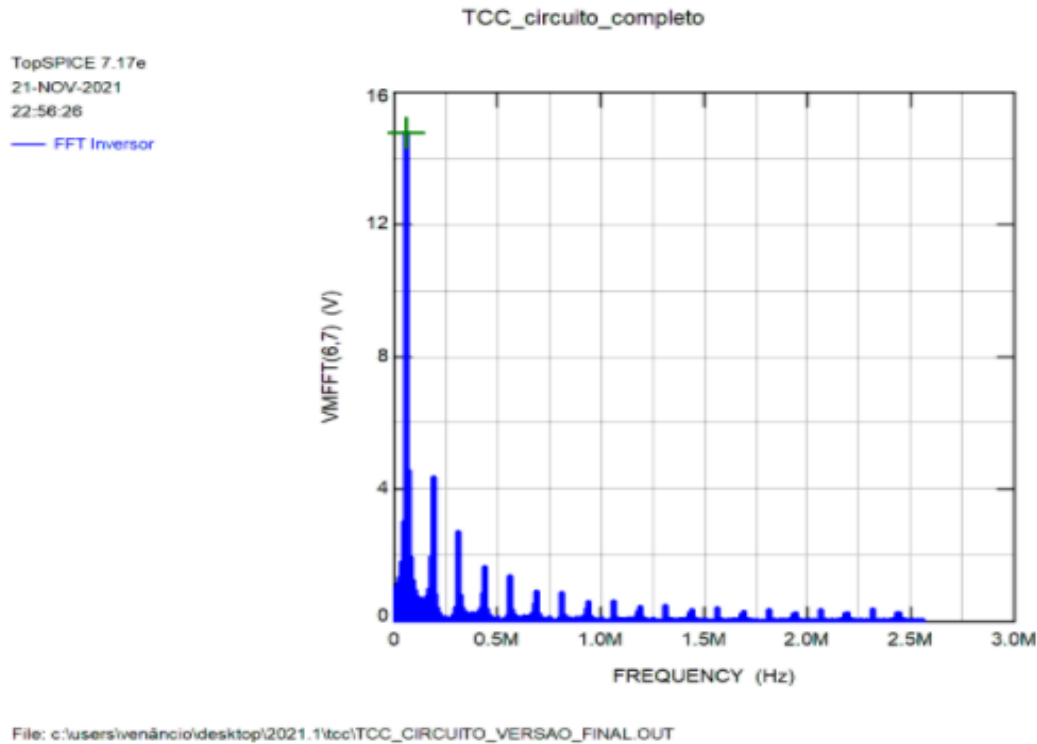


Figura 50: TopSpice - Transformada de Fourier do Inversor.

Portanto, observa-se que a frequência em que o inversor irá transmitir o sinal, é bem próxima da teórica do PWM do arduino.

O objetivo principal de fazer toda essa montagem é conseguir um sinal de frequência e amplitude suficientemente alto para que seja possível transmitir o sinal para o receptor, de acordo com as especificações do WPT. Com a saída do inversor já previamente configurada de maneira coerente, o sinal vai para a bobina de transmissão para transmitir o sinal.

Na transmissão e recepção do sinal, o TopSpice não possui uma ferramenta própria que simule uma antena, então o mais plausível nesse caso seria usar a teoria de transformadores, no qual se aproxima da teoria de antenas para simular a transmissão. Com isso, foi implementado um transformador de 1:1, isto é, apenas foi transmitido o sinal, sem algum tipo de ganho. Sendo assim, o primário ficou simulando a antena transmissora e o secundário a antena receptora. Na recepção do sinal, foi possível perceber o seguinte sinal:

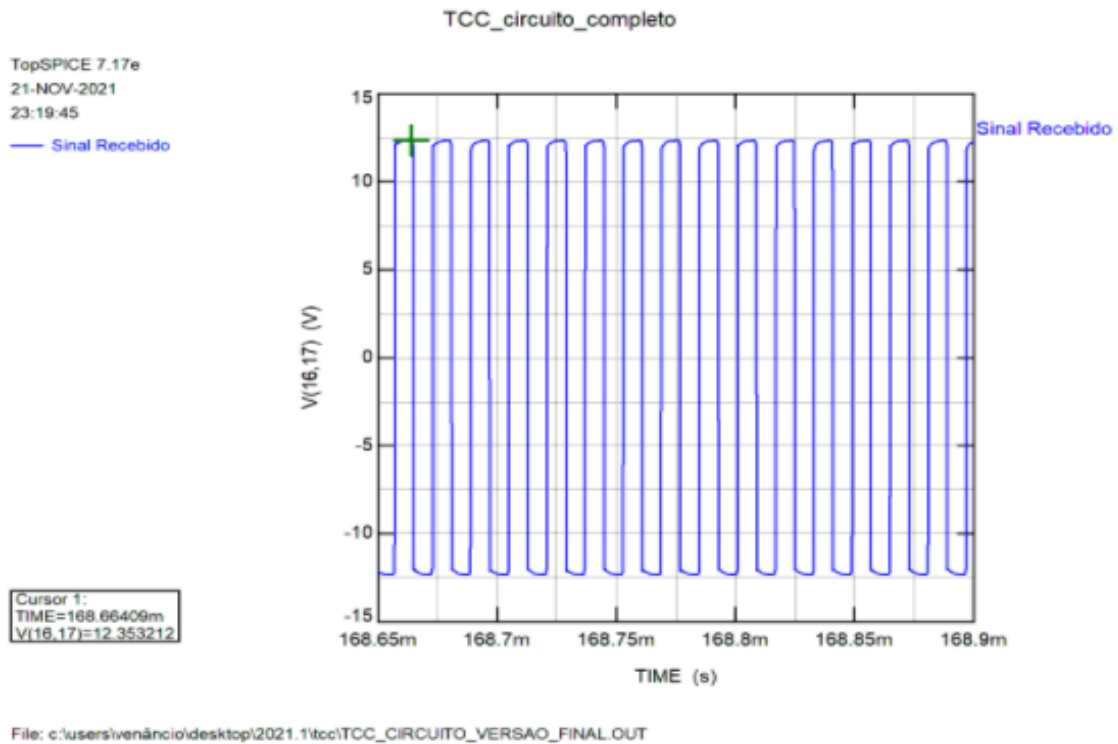


Figura 51: TopSpice - Sinal Recebido.

É possível perceber, pela análise dos gráficos das figuras 49 e 51, que o sinal foi transmitido com uma amplitude de 12,84 V e recebido com 12,35 V e uma frequência equivalente a de transmissão, aproximadamente, havendo uma perda desprezível nos enrolamentos das antenas. Tais fatores se devem às perdas que podem ocorrer no transformador, como acoplamento não perfeito ($k < 1$), bem como a presença de correntes parasitas.

Após a transmissão do sinal, como a intenção é alimentar uma bateria de tensão constante de 5 V, ele irá passar, novamente, por um retificador de onda completa, no entanto, com objetivo diferente do anterior. O objetivo deste é fazer com que a tensão fique constante em torno de 5 V para que seja possível alimentar a bateria, como mostra a figura abaixo.

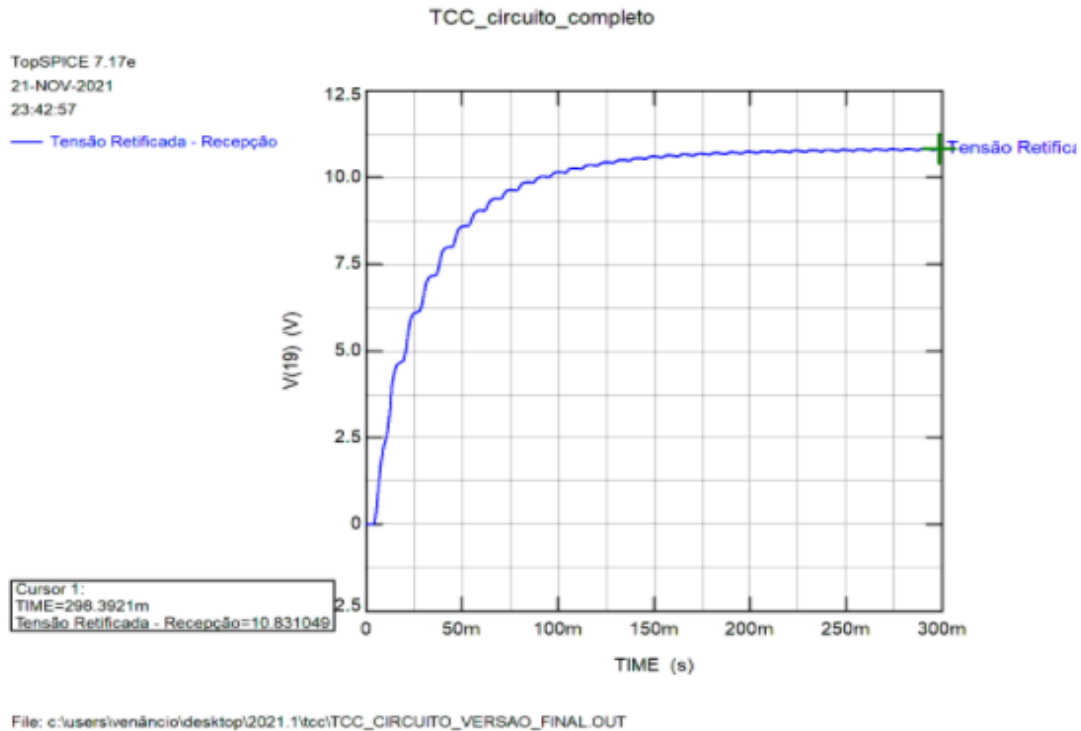


Figura 52: TopSpice - Retificador para Carregar a bateria.

Percebe-se que, pela análise no gráfico anterior, o sinal ficou significativamente acima de 5 V e em alguns momentos, pode ser que a estação de pouso não esteja totalmente alinhada com a estação transmissora, fazendo com que o sinal recebido seja diferente do que o estudado e planejado, tendo assim, um coeficiente de acoplamento diferente do esperado e afetando o recebimento do sinal, atenuando-o e, consequentemente, impactando no sinal retificado, podendo ter uma tensão menor ou maior do que o planejado. Como uma medida paliativa, colocou-se um regulador de tensão de saída de 5 V, para que, independente de qual seja a entrada constante, o sinal de saída será sempre 5 V, alimentando assim a bateria como especificado. Analisando o gráfico de tensão e corrente em cima da carga (bateria):

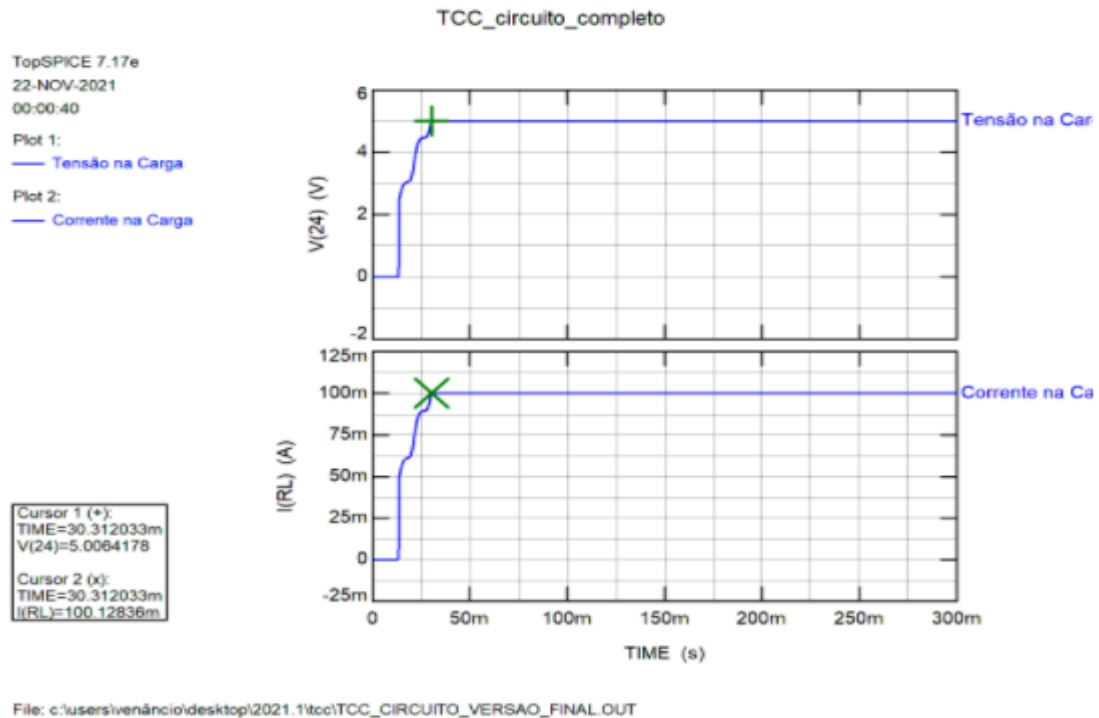


Figura 53: TopSpice - Tensão e Corrente na carga (bateria).

É possível perceber que a tensão está cravada em 5 V e que o sistema drena uma corrente de 100 mA para a carga, causando uma potência fornecida de 500mW. A bateria a ser carregada é uma de lítio polímero de 530 mAh. Portanto, percebe-se que para o sistema carregar a bateria, mantendo essa taxa de carregamento, seriam necessário aproximadamente 5,3 horas.

Dessa maneira, percebe-se que a tensão em cima da carga está em 5 V e que a transmissão do sinal funcionou de maneira muito eficiente. Portanto, conclui-se que a simulação realizada no TopSpice, está de acordo e que pode-se partir para a implementação prática, tendo em como base esta simulação.

O código da aplicação deste circuito encontra-se no apêndice A.

5 Implementação Experimental

Após a validação do circuito teórico, foi realizada a montagem do próprio com base nos resultados teóricos obtidos no MATLAB Simulink e TopSpice. Abaixo segue a divisão do circuito, bem como os resultados obtidos na análise laboratorial.

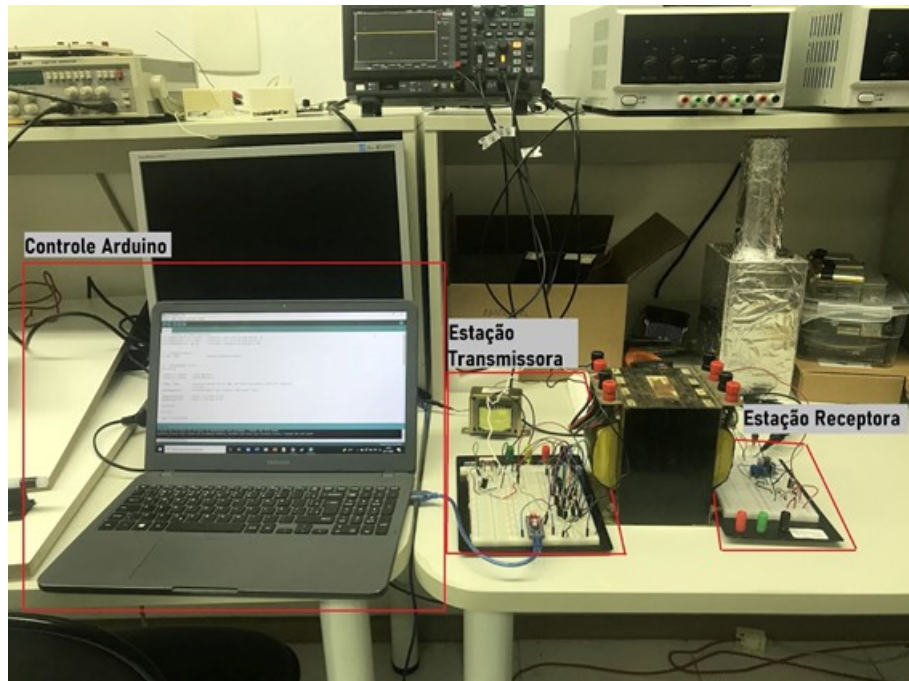


Figura 54: Experimento - Vista Completa.

Inicialmente, foi realizada a diminuição da tensão de entrada da rede de 127 V para 24 V, utilizando o transformador de potência abaixo:



Figura 55: Experimento - Transformador de Potência (127 V : 24 V).

Com isso, verificou-se o sinal medido na saída do transformador.

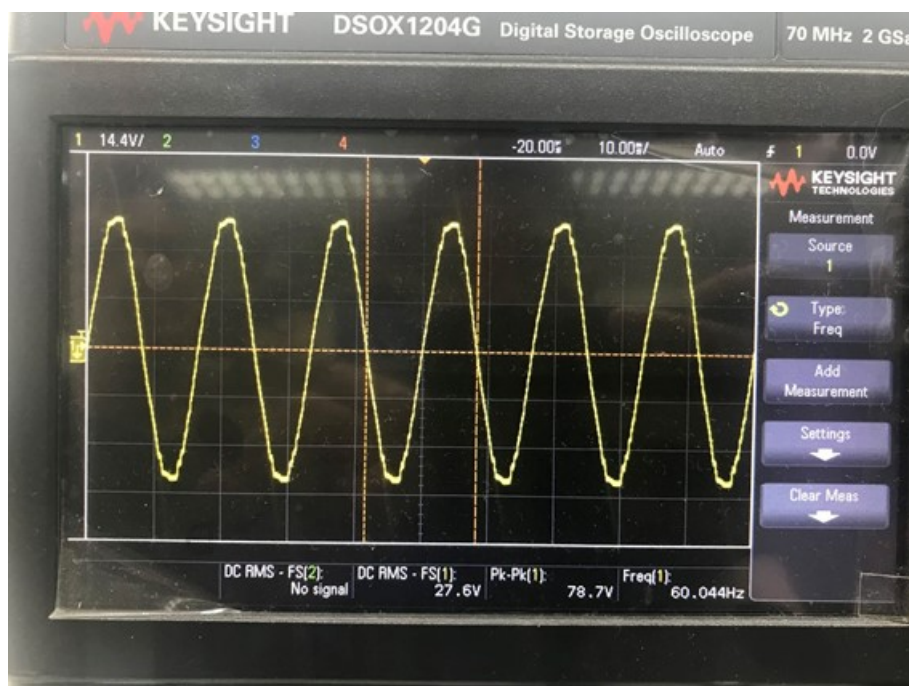


Figura 56: Experimento - Tensão na Saída do Transformador de Potência.

Percebe-se que o sinal pico a pico é de 78,7 V, portanto, o sinal RMS é:

$$V = \frac{78,7}{\sqrt{2}} \approx 55,65V \quad (20)$$

Logo, o sinal pico a pico é, de aproximadamente, 55,65 V, o que se compara com sinal teórico que foi medido de pico a pico de 48 V, tal diferença se deve a tensão da rede não manter seu pico constante em 127 V, havendo algumas oscilações, diferente do aplicado na teoria. É possível perceber pelo osciloscópio que a frequência após do a tensão ser diminuída se manteve a frequência da rede, que é em torno de 60 Hz, como esperado. Realizada a transformação do sinal para 27 V, aproximadamente, foi realizada a conversão do sinal senoidal para um sinal contínuo, utilizando a topologia Retificador de Onda completa, como especificado na seção teórica. Para tal, utilizou-se a seguinte topologia:

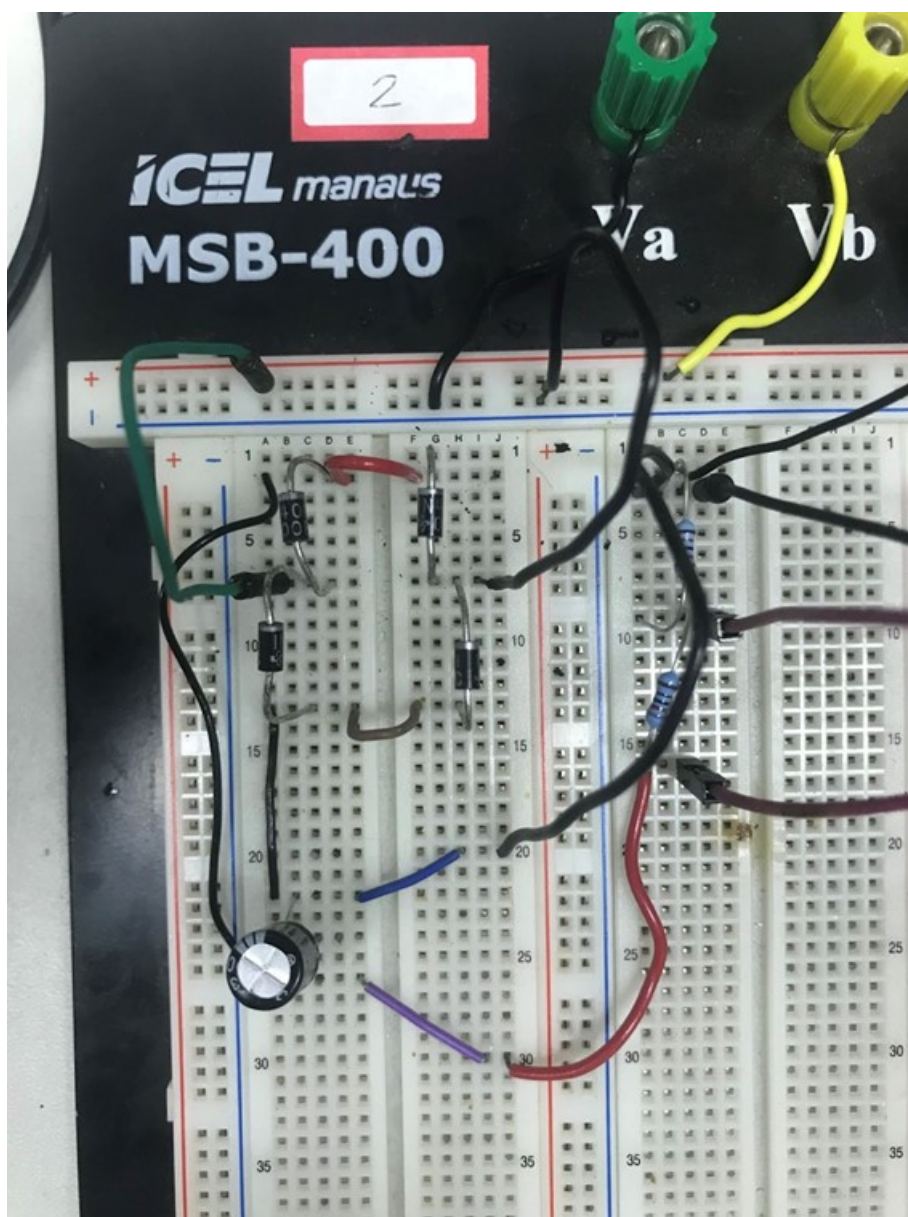


Figura 57: Experimento - Retificador do Módulo Transmissor.

Observação: Ao invés de utilizar o capacitor de 22 mF, como foi realizado nas simulações teóricas, percebeu-se que sinal retificado funcionou de maneira mais adequada e coerente com o capacitor de 100 uF.

Implementado o retificador, verificou-se a tensão do sinal de saída do próprio, como mostrado abaixo:

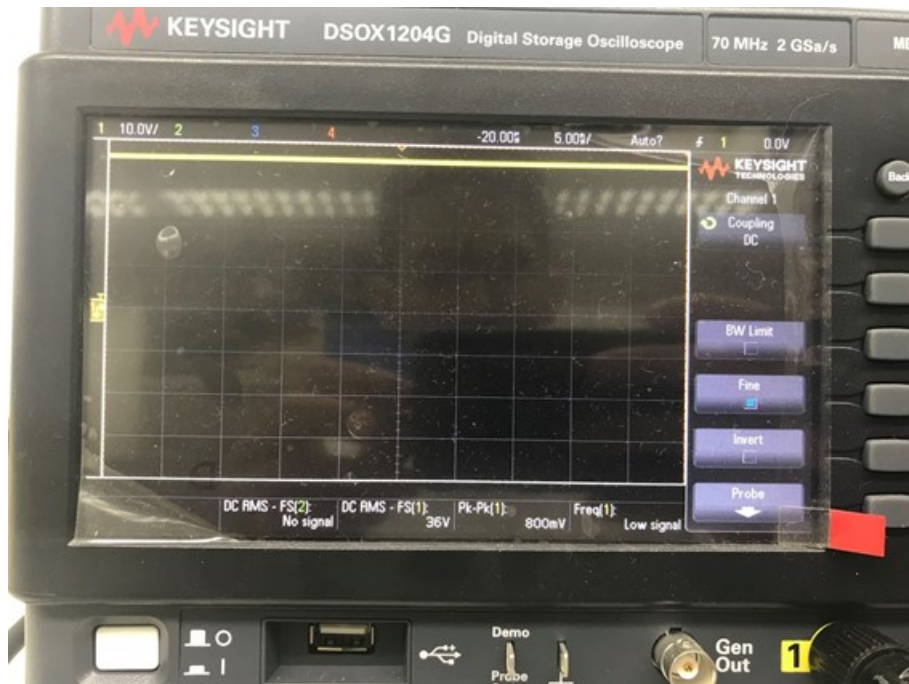


Figura 58: Experimento - Tensão Retificada.

O sinal de pico, como é possível ver no sinal de saída do transformador, está em 36 V e considerando que o retificador mantém a tensão em torno de 90% do pico do sinal, que seria cerca de 35,40 V, verificou-se que o sinal retificado está coerente com o esperado, uma vez o próprio está em 36 V e com um *ripple* de 800 mV, consideravelmente pequeno.

Utilizando a tensão retificada, foi feito um divisor de tensão para alimentar a topologia amplificadora dos PWMs, utilizando TBJs.

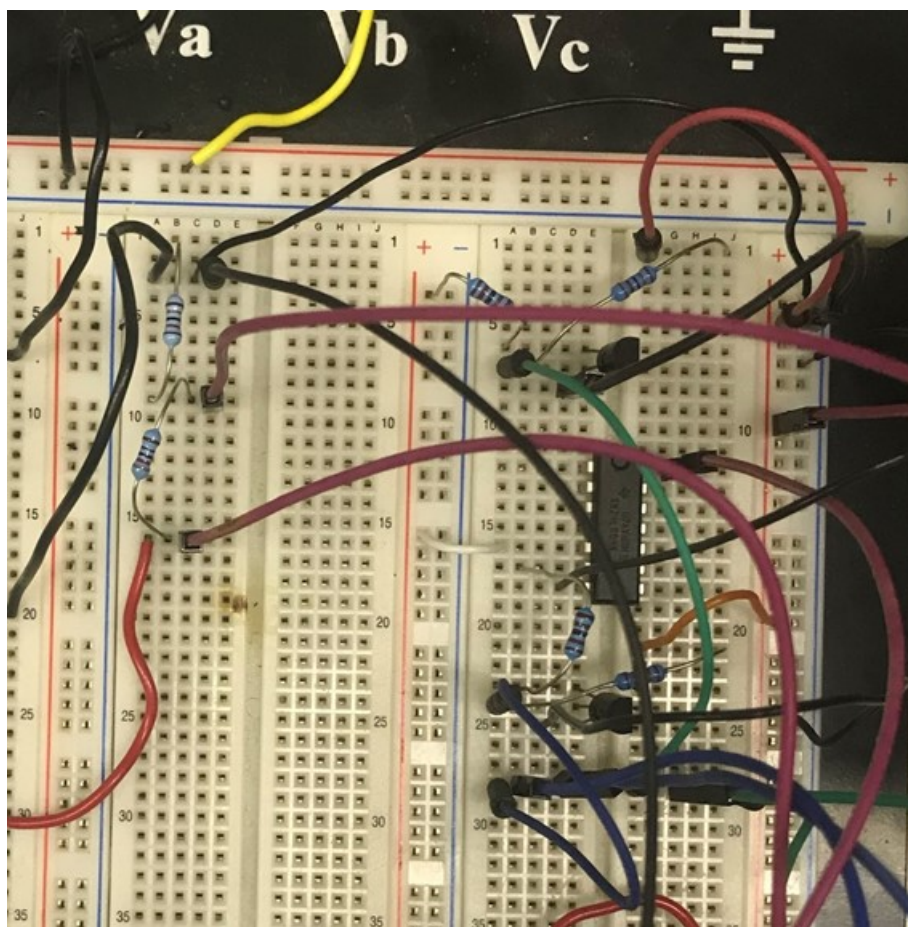


Figura 59: Experimento - Divisor de Tensão e Amplificador do PWM.

Com isso, o sinal do divisor de tensão ficou:

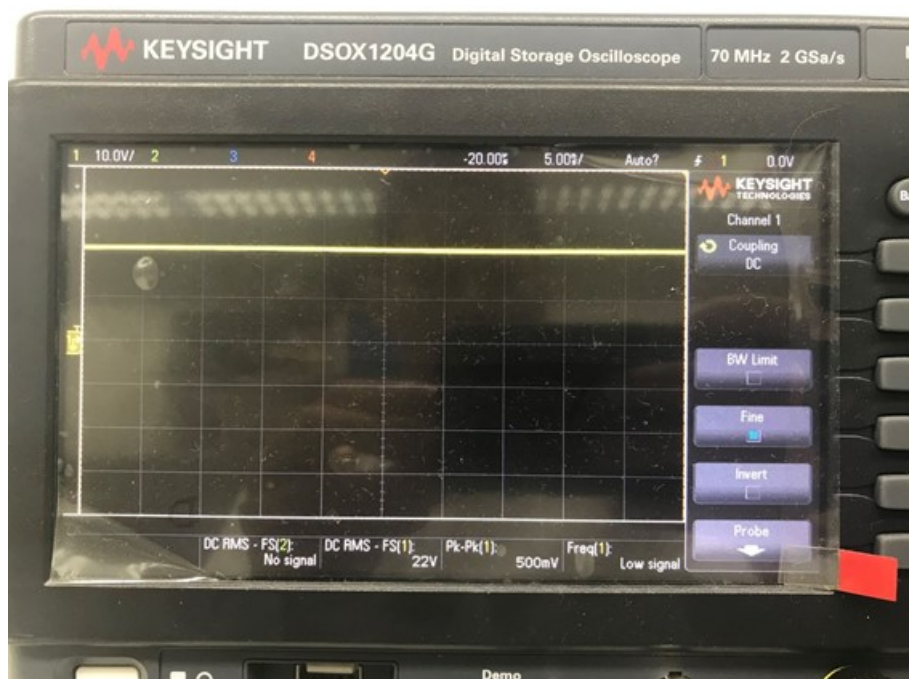


Figura 60: Experimento - Sinal no Divisor de Tensão.

Percebe-se que o sinal diminuiu a tensão para 22 V, como o esperado.

Em seguida, através do arduino, foi gerado o sinal PWM com frequência de 976 Hz e 6,5 V de amplitude. O código da implementação do PWM pelo arduino está em anexo no apêndice B.

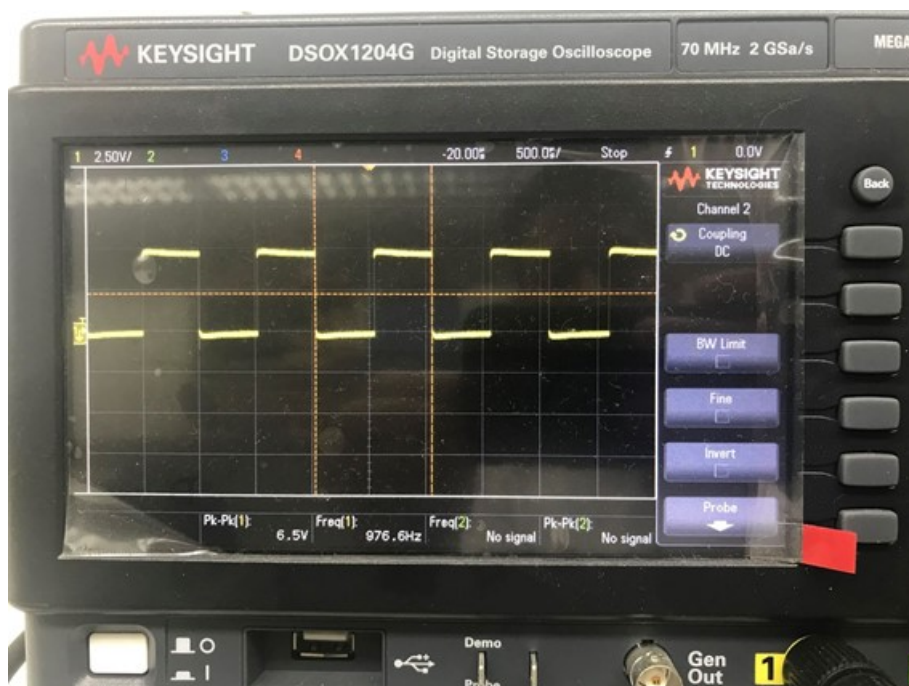


Figura 61: Experimento - Sinal de Controle PWM.

Como já citado anteriormente, a amplitude do sinal PWM é muito pequena para colocar os MOSFETs em condução, então junto com o divisor de tensão alimentando o TBJ e com o sinal do PWM, foi amplificado o próprio para que fosse possível realizar o inversor de frequência. Com isso, o sinal amplificado ficou:

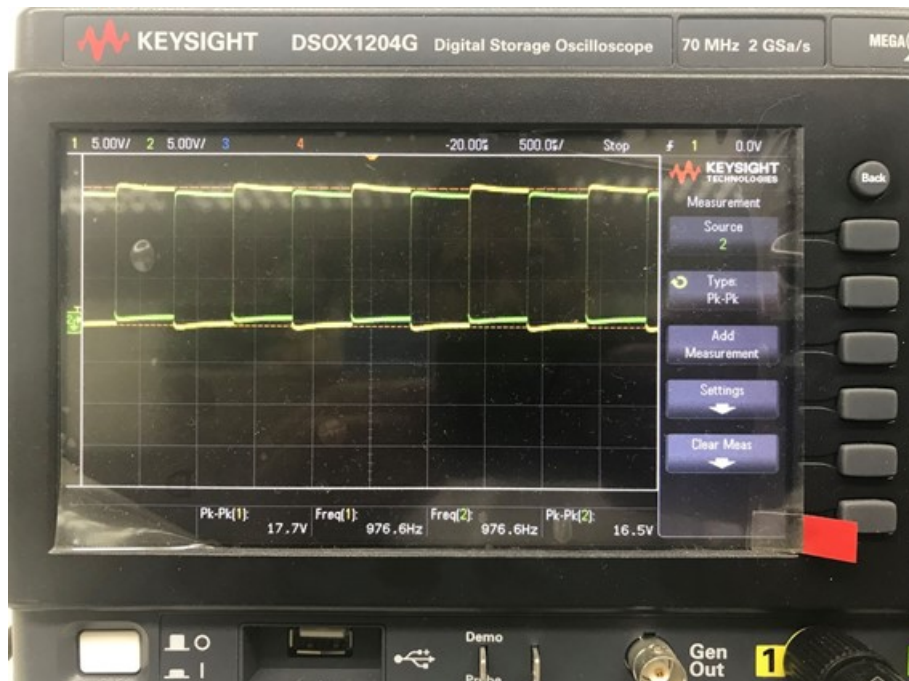


Figura 62: Experimento - Sinal de Controle PWM Amplificado.

Em teoria, a amplitude do sinal amplificado deveria ser o mesmo que a tensão de alimentação no coletor do TBJ, no entanto nota-se uma pequena diferença nessa. Percebe-se também, que o sinal amplificado não invertido está com uma queda de tensão maior que o sinal invertido, isso se deve ao fato de que a topologia amplificadora inverte o sinal, então para trazê-lo ao normal, teve-se colocar um inversor lógico, o que acabou causando essa pequena queda de tensão.

Com os PWMs já previamente amplificados, foi realizada a construção do inversor de frequência, como mostra abaixo:

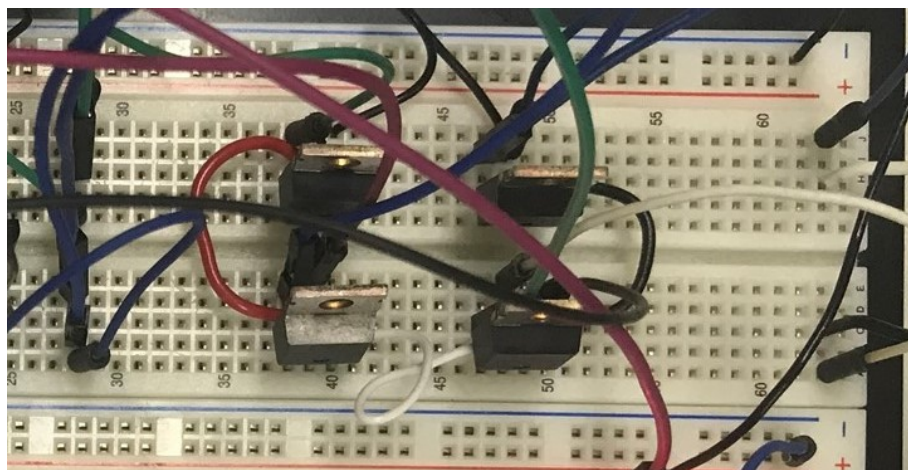


Figura 63: Experimento - Inversor.

Observação: Nota-se que os MOSFETs utilizados na simulação teórica são do tipo IRF1405z, devido a limitação de quantidade de componente do tipo 2n660. Porém, ambos possuem características semelhantes e funcionam de forma considerável em altas frequências.

A partir dessa topologia, observou-se o sinal do inversor:



Figura 64: Experimento - Tensão na Saída do Inversor.

A partir do sinal do inversor, o sinal foi transmitido para a bobina receptora.



Figura 65: Experimento - Transformador de Potência Simulando o Acoplamento Entre as Antenas.

Observação: As antenas transmissoras e receptoras foram simuladas com um transformador 1:1, uma vez que não foi possível obter as antenas em tempo viável. Todo estudo foi simulado na frequência de, aproximadamente, 1 KHz, pois para frequências maiores, o transformador começa a danificar o sinal, devido a maiores quantidades de correntes parasitas e de Foucault.

Colocando-se as conexões em 0V-110V em ambos bornes, tem-se a conexão 1:1.

Para concluir a estação transmissora, a topologia completa ficou:

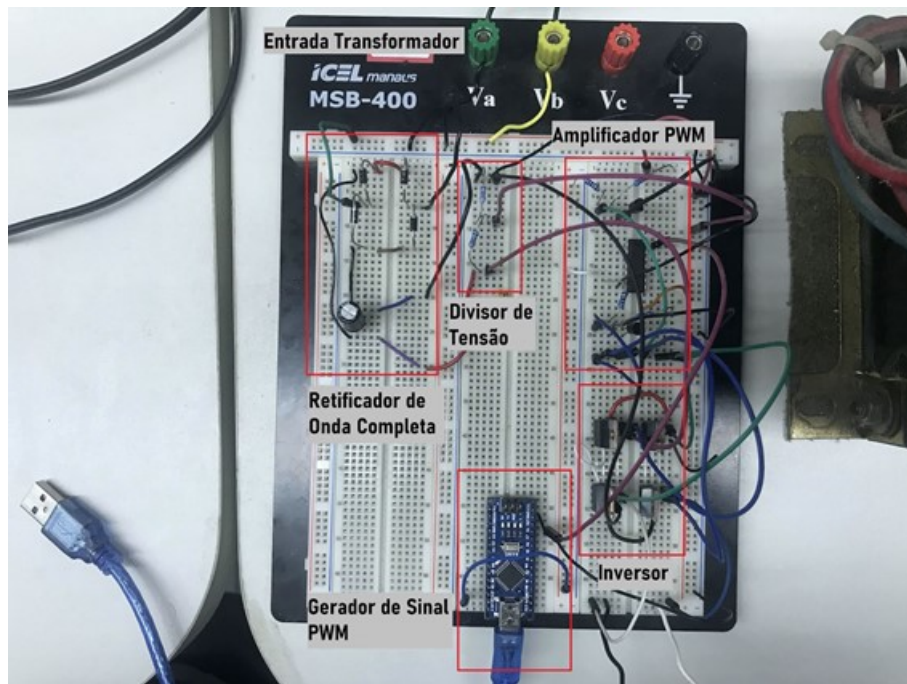


Figura 66: Experimento - Módulo Transmissor.

Portanto, o sinal recebido foi:



Figura 67: Experimento - Tensão na Antena Receptora.

Percebe-se que o sinal recebido tem umas certas diferenças com o sinal transmitido e isso se deve principalmente pelo fato da antena ser simulada com um transformador 1 V:1 V em uma frequência relativamente alta, mas é possível observar que o sinal recebido tende a manter a forma de onda transmitida bem como sua amplitude e frequência.

Após a recepção do sinal pela antena receptora, o sinal alternado é convertido em um sinal contínuo por meio de um retificador de onda completa. Essa topologia foi construída utilizando quatro diodos do modelo 1N4007 e um capacitor de 100 μF .

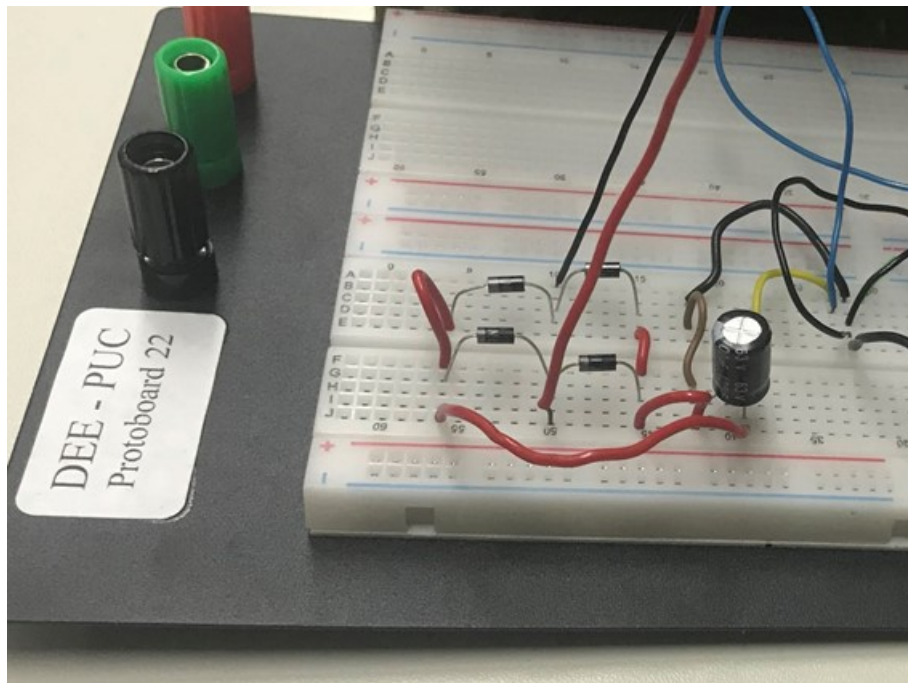


Figura 68: Experimento - Retificador do Módulo Receptor.

Assim, o sinal retificado ficou com aproximadamente 9,2 V e um *ripple* de 200 mV, consideravelmente baixo.



Figura 69: Experimento - Tensão Retificada.

A ideia principal é alimentar a bateria de um VANT. Dessa maneira, o modelo de bateria escolhido foi uma

do tipo LiPo de uma célula, com 3,7 V e com capacidade nominal de 530 mAh.



Figura 70: Experimento - Bateria do tipo LiPo.

Como a tensão de entrada máxima dessa bateria é de 4,2 V, após a retificação do sinal foi utilizado um módulo regulador de tensão ajustável, ao invés do LM7805, definindo sua tensão de saída em 4,1 V para que seja capaz de carregar a bateria de forma adequada.

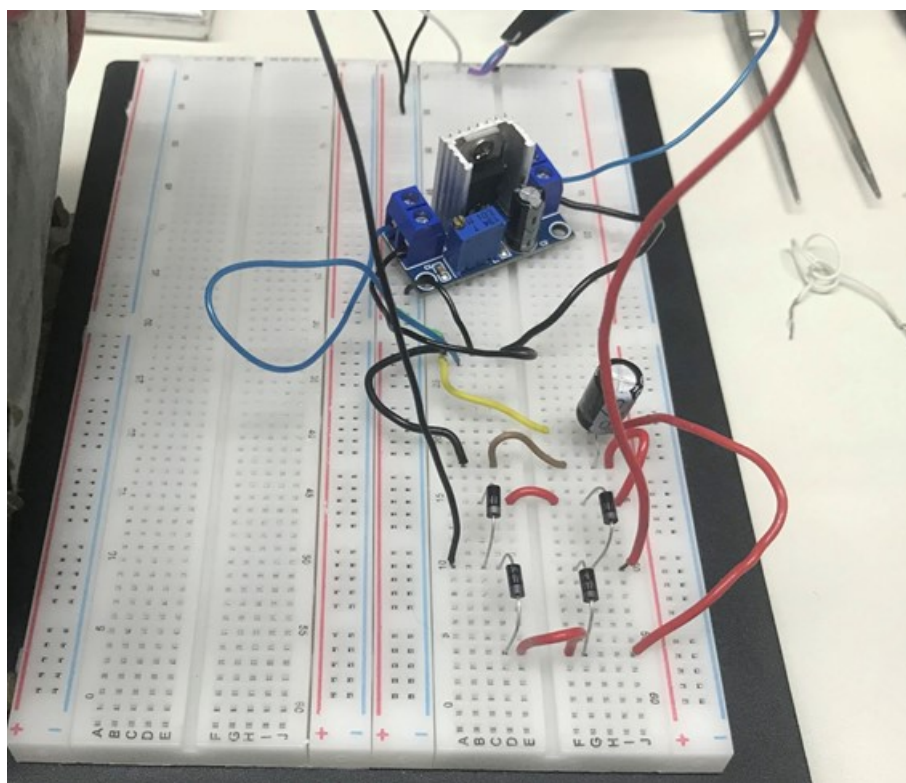


Figura 71: Experimento - Módulo Receptor com Regulador de Tensão Ajustável.

Dessa forma, o sinal de saída na saída do regulador ficou em 4,1 V e um *ripple* de aproximadamente 200 mV.



Figura 72: Experimento - Tensão de Saída do Regulador.

Em seguida, foi medida a tensão na bateria antes dela ser acoplada ao circuito. Então, foi constatado que a tensão estava por volta de 3,5 V, conforme mostra a figura abaixo (sinal verde do osciloscópio).



Figura 73: Experimento - Tensão da Bateria antes de ser alimentada.

A última etapa é efetivamente acoplar a bateria ao circuito e avaliar a carga da bateria através de sua tensão. Sendo assim, o módulo receptor da estação está completo, conforme mostra a imagem abaixo.

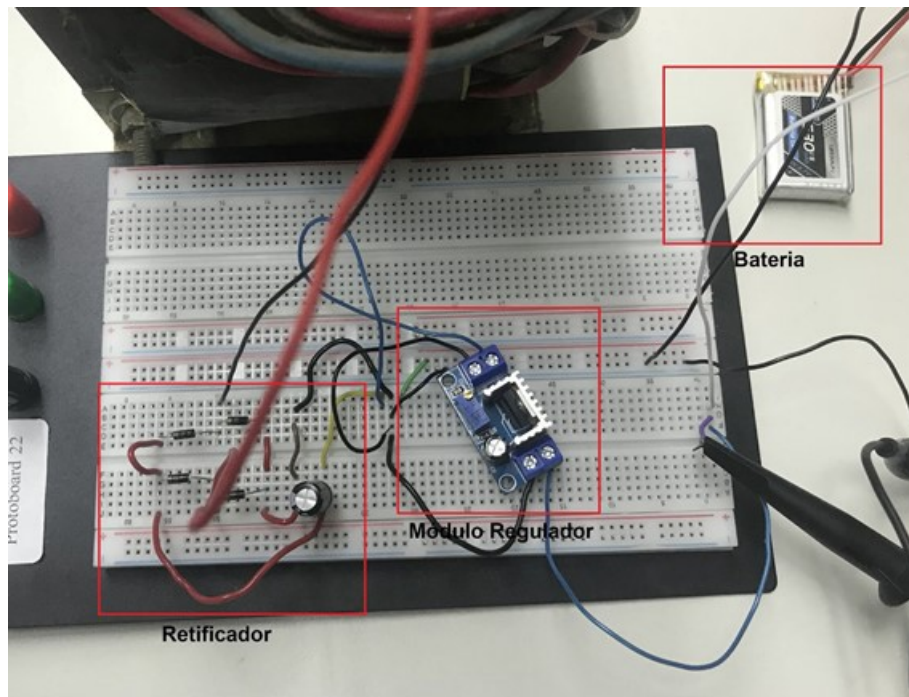


Figura 74: Experimento - Módulo Receptor.

Após cerca de 10 minutos, o circuito foi desligado e a tensão da bateria medida novamente para avaliar se a mesma foi devidamente alimentada. Então foi constatado que sua tensão se elevou de 3,5 V para 3,8 V, provando que o circuito funcionou de maneira efetiva.

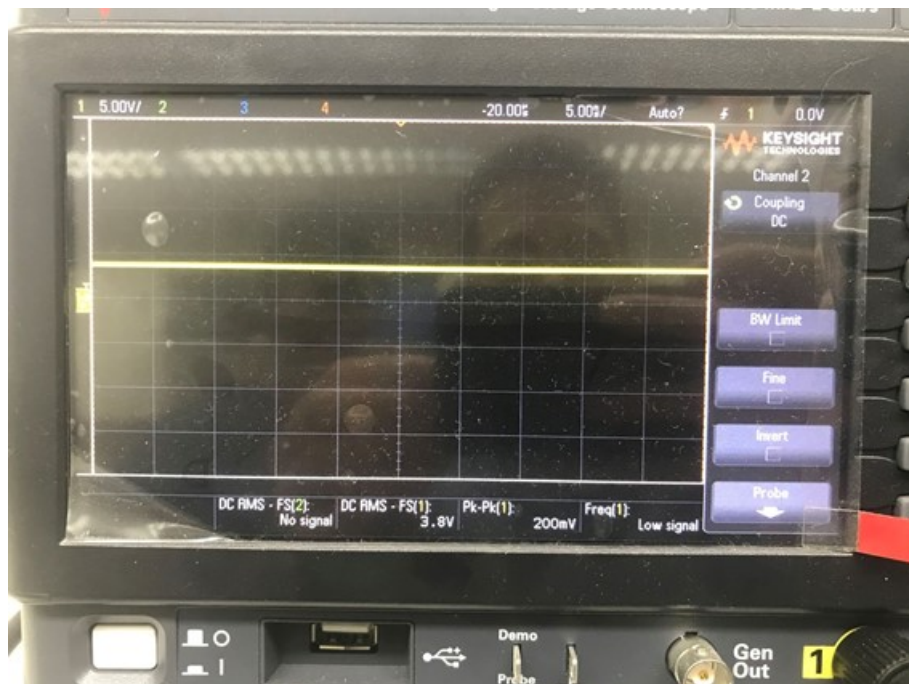


Figura 75: Experimento - Tensão da Bateria após ser alimentada.

Portanto, toda a implementação experimental foi feita de maneira efetiva, os sinais foram avaliados e foi constatado que o circuito funcionou de acordo com o esperado.

6 Conclusão e Trabalhos Futuros

Diante das simulações computacionais e experimentais desenvolvidas ao longo desse trabalho, é possível avaliar de maneira positiva a viabilidade de implementação da estação de carregamento para os veículos aéreos não tripulados. Baseado nos estudos realizados, o módulo transmissor é composto por um transformador 127 V : 24 V, diodos, capacitor, MOSFETs, arduino e uma antena transmissora, tal parte não interfere na dinâmica do drone, haja vista que este não está acoplado no próprio. Por sua vez, o módulo receptor é composto por uma antena receptora, capacitor, diodos e um regulador de tensão, estes são equipamentos que ficam agregados ao drone, e por isso, são componentes leves e que não alteram toda a estrutura mecânica do próprio, além de serem componentes de baixo custo. Com isso, o projeto implementado vai de encontro com o objetivo principal, que buscava fornecer uma maior autonomia ao drone diante a alta dependência de uso de outra bateria externa, determinada pela pouca capacidade de carga. Com o carregamento por indução sem fio (WPT), esta subordinação é praticamente eliminada com a adição de componentes leves e de baixo custo, sendo assim, capaz de pousar em uma estação de pouso e carregar sua bateria, podendo, depois, continuar sua viagem sem que seja necessário a interrupção da tarefa.

Para trabalhos futuros, existem alguns pontos que podem ser explorados a fim de otimizar ainda mais o projeto, seja como outros temas de conclusão de curso ou iniciação científica. Os principais pontos de melhoria estão listados abaixo.

- **Compensação Reativa:** Uma das possibilidades é adicionar uma compensação reativa antes da antena transmissora e após a antena receptora com o objetivo de eliminar grande parte da potência reativa que é transmitida/recebida e ter a certeza que a bateria está sendo carregada única e exclusivamente por potência ativa.
- **Projeto de antenas reais:** Conjuntamente a isso, é aconselhável realizar o projeto e dimensionamento de antenas transmissoras e receptoras reais, que trabalham em frequências maiores. Dessa maneira, pode substituir o transformador 1 V : 1 V por elas e realizar um estudo sobre o comportamento do circuito na transmissão em altas frequências.
- **Regulador automático de tensão:** Em paralelo a isso, na parte receptora, pode-se pensar em implementar o circuito de conversão CC-CC Boost, pois ao contrário do regulador de tensão que mantém a saída fixa em um valor, o conversor Boost teria um arduino auxiliando na leitura da tensão transmitida e, conforme o drone estivesse posicionado na estação transmissora, arduino mandaria um sinal para o boost para regular automaticamente a tensão que iria para bateria, alimentando-a com a tensão correta.
- **Fonte de corrente contínua:** Por fim, é necessário fazer o controle da corrente que passa pela bateria, pois como se trata de uma tensão constante alimentando a própria, quanto mais carregada ela fica, menor será a diferença de tensão entre a tensão fixa e a bateria e com isso, a corrente injetada vai sendo reduzida gradativamente.

Com essas melhorias, o projeto ficará cada vez mais sólido e completo, alimentando as baterias dos VANT's de maneira mais rápida e eficiente. Dessa forma, será possível consolidar todos os equipamentos e realizar o estudo do investimento necessário para seu desenvolvimento em escala.

7 Referências Bibliográficas

- [1] MOHAN, N., UNDELAND, T. M., ROBBINS, W. P. (1995). Power electronics: converters, applications, and design. New York, Wiley.
- [2] BAGULEY, C.A.; JAYASINGHE, S.G.; MADAWALA, U.K.. Theory and Control of Wireless Power Transfer Systems. Control Of Power Electronic Converters And Systems, Auckland, v. 2, n. 22, p. 291-307, jan. 2018.
- [3] ALMEIDA, Jorge Virgilio de. Data and Power Transmission for Underwater Monitoring System Using Metamaterials. 2021. 140 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2021.
- [4] PRISACARIU, Vasile. THE HISTORY AND THE EVOLUTION OF UAVs FROM THE BEGINNING TILL THE 70s. Journal Of Defense Resources Management, Brasov, v. 8, n. 14, p. 181-189, abr. 2017.
- [5] SAH, Ajay Kumar. Design of Wireless Power Transfer System via Magnetic Resonant Coupling at 13.56MHz. Proceedings Of Ioe Graduate Conference, Nepal, v. 1, n. 1, p. 202-210, nov. 2013.
- [6] CAPUA, Giulia di et al. Power and efficiency analysis of high-frequency Wireless Power Transfer Systems. Electrical Power And Energy Systems, Fisciano, v. 84, p. 124-134, ago. 2016.
- [7] EDUARDO, Guilherme Siqueira; SILVA NETO, Manoel Feliciano da. DESIGNING A COMPUTER VISION SYSTEM FOR HOOP DETECTION TO AID MAV NAVIGATION. 2018. 54 f. TCC (Bachelor) - Electrical Engineering, Pontifical University Of Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.
- [8] SARAIVA, Henrique Pinheiro. NAVEGAÇÃO AUTÔNOMA, RECONHECIMENTO E DESVIO DE OBSTÁCULOS COM DRONES MULTIROTORES. 2018. 52 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

A Apêndice - Código TopSpice

```

1
2 TCC_circuito_completo
3
4 ***** DEFINIÇÃO DOS COMPONENTES *****
5
6 * Ideal op amp function
7 *
8 .SUBCKT OPAMPF in1 in2 out
9 *      +in -in
10 + PARAMS:
11 +   GAIN=1E5      ;open loop gain
12 +   RIN=1E15      ;input impedance
13 RIN in1 in2 {RIN}
14 E1 out 0 in1 in2 {GAIN}
15 R1 out 0 1E12      ;dummy load to avoid open node error
16 .ENDS OPAMPF
17
18
19 *
20 .MODEL 1N4007/A D (
21 +   IS=2.55E-009 RS=0.042 N=1.75 TT=5.76E-006 CJO=1.85E-011
22 +   VJ=0.75 M=0.333 BV=1000 IBV=9.86E-005 )
23 *
24
25 * inverter
26 *
27 .SUBCKT 74LS04 1 2
28 *      IN OUT
29 U1 INV 2 1 74LS 74LSUIO
30 .ENDS 74LS04
31 *
32 * Power MOSFET
33 *
34 .MODEL 2N6755 NMOS (
35 +   LEVEL=3 GAMMA=0 DELTA=0 ETA=0 THETA=0
36 +   KAPPA=0.2 VMAX=0 XJ=0 TOX=1E-007 U0=600
37 +   PHI=0.6 RS=0.1207 KP=2.135E-005 W=1.1 L=2E-006
38 +   VTO=3.143 RD=0.06468 RDS=600000 CBD=1.273E-009 PB=0.8
39 +   MJ=0.5 FC=0.5 CGS0=7.297E-010 CGD0=3.104E-010 RG=5.839
40 +   IS=4.421E-014 N=1 TT=3.7E-007 )
41 *
42
43 * MOSFET NMOS
44 *
45 .MODEL 2N6660 NMOS (
46 +   LEVEL=3 GAMMA=0 DELTA=0 ETA=0 THETA=0
47 +   KAPPA=0.2 VMAX=0 XJ=0 TOX=2E-006 U0=600
48 +   PHI=0.6 KP=1.047E-006 W=0.32 L=2E-006 RS=0.02
49 +   VTO=1.8 RD=0.4672 RDS=6E+006 CGS0=1.885E-012 CGD0=7.564E-012
50 +   CBD=1.18E-010 MJ=0.5 PB=0.8 FC=0.5 RG=209.5
51 +   IS=1E-014 N=1 )
52 *
53
54 *
55 .MODEL 2N6756 NMOS (
56 +   LEVEL=3 GAMMA=0 DELTA=0 ETA=0 THETA=0
57 +   KAPPA=0.2 VMAX=0 XJ=0 TOX=1E-007 U0=600
58 +   PHI=0.6 RS=0.1207 KP=2.135E-005 W=1.1 L=2E-006
59 +   VTO=3.143 RD=0.00468 RDS=1E+006 CBD=1.273E-009 PB=0.8
60 +   MJ=0.5 FC=0.5 CGS0=6.796E-010 CGD0=1.974E-010 RG=9.781
61 +   IS=4.345E-015 N=1 TT=3.48E-007 )
62 *
63
64 *TopSPICE library: Models\OPAMP.MDB
65 *PART NUMBER: LM741
66 *MODEL NAME: LM741
67 *SYMBOL: XOPAMP
68 *
69 * Op amp
70 *
71 .SUBCKT LM741 1 2 99 50 28
72 *      +in -in vcc vee out

```

```

73  *
74  *****INPUT STAGE*****
75  IOS 2 1 20N                               ;Input offset current
76  R1 1 3 250K
77  R2 3 2 250K
78  I1 4 50 100U
79  R3 5 99 517
80  R4 6 99 517
81  Q1 5 2 4 QX
82  Q2 6 7 4 QX
83  *Fp2=2.55 MHz
84  C4 5 6 60.3614P
85  *
86  *****COMMON MODE EFFECT*****
87  I2 99 50 1.6MA                             ;Supply current
88  EOS 7 1 POLY(1) 16 49 1E-3 1             ;Input offset voltage
89  R8 99 49 40K
90  R9 49 50 40K
91  *
92  *****OUTPUT VOLTAGE LIMITING*****
93  V2 99 8 1.63
94  D1 9 8 DX
95  D2 10 9 DX
96  V3 10 50 1.63
97  *
98  *****SECOND STAGE*****
99  EH 99 98 99 49 1                           ;Level shifter
100 G1 98 9 5 6 2.1E-3
101 *Fp1=5 Hz
102 R5 98 9 95.493MEG
103 C3 98 9 333.33P
104 *
105 *****POLE STAGE*****
106 *Fp=30 MHz
107 G3 98 15 9 49 1E-6
108 R12 98 15 1MEG
109 C5 98 15 5.3052E-15
110 *
111 *****COMMON-MODE ZERO STAGE*****
112 *Fpcm=300 Hz
113 G4 98 16 3 49 3.1623E-8
114 L2 98 17 530.5M
115 R13 17 16 1K
116 *
117 *****OUTPUT STAGE*****
118 F6 50 99 POLY(1) V6 450U 1                 ;Supply current correction
119 E1 99 23 99 15 1
120 R16 24 23 25                               ;Output resistance
121 D5 26 24 DX
122 V6 26 22 0.65V
123 R17 23 25 25
124 D6 25 27 DX
125 V7 22 27 0.65V
126 V5 22 21 0.63V
127 D4 21 15 DX
128 V4 20 22 0.63V
129 D3 15 20 DX
130 L3 22 28 100P                             ;Output inductor
131 *
132 .MODEL DX D(IS=1E-15)
133 .MODEL QX NPN(BF=625)
134 .ENDS LM741
135
136
137 *TopSPICE library: Models\VREG.MDB
138 *PART NUMBER: LM7805
139 *MODEL NAME: LM7805
140 *SYMBOL: XVREF
141 *
142 * Voltage regulator
143 *
144 .SUBCKT LM7805 1 2 3
145 *           In GND Out
146 QT6        23 10 2 Q_NPN 0.1

```

```

147 QT7      5  4  10  Q_NPN 0.1
148 QT5      7  6  5   Q_NPN 0.1
149 QT1      1  9  8   Q_NPN 0.1
150 QT3     11  8  7   Q_NPN 0.1
151 QT2     11 13 12   Q_NPN 0.1
152 QT17     1 15 14   Q_NPN 10
153 C2      10 23    4P
154 R16     12  5    500
155 R12     16  2   12.1K
156 QT18    17 23 16   Q_NPN 0.1
157 D1      18 19    D_D
158 R11     20 21    850
159 R5      22  3   100
160 QT14    24 18  2   Q_NPN 0.1
161 R21      6  2   2.67K
162 R20      3  6   640
163 DZ2     25 26   D_5V1
164 R19      1 26   16K
165 R18     14  3   250M
166 R17     25 14   380
167 R15     25 15   1.62K
168 QT16     1 20 15   Q_NPN 1
169 QT15     2 24 21   Q_PNP 0.1
170 *OFF
171 R14     21 24    4K
172 C1      27 24   20P
173 R13     19  2    4K
174 QT13    24 27 18   Q_NPN 0.1
175 QT12    20 25 22   Q_NPN 1
176 *OFF
177 QT11    20 28  2   Q_NPN 0.1
178 *OFF
179 QT10    20 11  1   Q_PNP 0.1
180 R10     17 27   16.5K
181 R9      5  4    1.9K
182 R8      4 23    26
183 R7     10  2    1.2K
184 R6     29  2    1K
185 QT9     11 11  1   Q_PNP 0.1
186 QT8     27 16 29   Q_NPN 0.1
187 QT4     15  6 17   Q_NPN 0.1
188 DZ1      2  9   D_5V6
189 R4      1  9    80K
190 R3     28  2   830
191 R2     13 28   4.97K
192 R1      8 13    7K
193 .MODEL D_5V1 D( IS=10F N=1.16 BV=5.1 IBV=0.5M CJO = 1P TT = 10p )
194 .MODEL D_5V6 D( IS=10F N=1.16 BV=5.6 IBV=5U CJO = 1P TT = 10p )
195 .MODEL Q_NPN NPN( IS=10F NF=1.16 NR=1.16 BF=80 CJC=1P CJE=2P
196 +   TF=10P TR=1N )
197 .MODEL Q_PNP PNP( IS=10F NF=1.16 NR=1.16 BF=80 CJC=1P CJE=2P
198 +   TF=10P TR=1N )
199 .MODEL D_D D( IS=1F N=1.16 CJO = 1P TT = 10p )
200 .ENDS LM7805
201
202 * Bipolar transistor European
203 *
204 .MODEL BC368 NPN (
205 +   IS=1.406E-014 XTI=3 EG=1.11 VAF=100 BF=187.6
206 +   ISE=1.372E-013 NE=1.468 IKF=4.103 XTB=1.5 BR=4.541
207 +   ISC=4.413E-014 NC=1.471 IKR=1.701 RC=0.091 CJC=5.224E-011
208 +   MJC=0.3333 VJC=0.5 FC=0.5 CJE=1.56E-010 MJE=0.3333
209 +   VJE=0.5 TR=1E-008 TF=9.648E-010 ITF=595.3 XTF=1001
210 +   VTF=10 )
211
212
213 ***** CIRCUITO TRANSMISSOR*****
214
215 *Fonte AC (Tomada)
216 Vfonte 1 0 sin(0 127 60)
217 R1 1 2 10
218 *Primário do Transformador
219 L1 2 0 28.00174H
220 *Secundário do Transformador

```

```

221 L2 3 4 1H
222 *Acoplamento Magnético
223 K12 L1 L2 1
224 *Retificador de Onda Completa (Antena Transmissora)
225 D1 3 5 1N4007
226 D2 0 3 1N4007
227 D3 4 5 1N4007
228 D4 0 4 1N4007
229 C1 5 0 22mF
230 *Onda Quadrada para modulação (PWM) - freq = 62.5 kHz - periodo = 16us (50% duty cyle)
231 Vpwm 8 0 PULSE 0 3.5V 0 0.5ps 0.5ps 8us 16us 0
232 *Divisor de tensão
233 R2 5 10 270
234 R3 10 0 1.2k
235 *Amplificador PWM
236 R4 10 11 13k
237 R5 8 9 1.2k
238 Q1 11 9 0 BC368
239 XINV 8 12 74LS04
240 R6 12 13 1.2k
241 R7 10 14 13k
242 Q2 14 13 0 BC368
243 *Inversor
244 M1 5 14 6 6 2N6660
245 M2 6 11 0 0 2N6660
246 M3 5 11 7 7 2N6660
247 M4 7 14 0 0 2N6660
248 *Primário do Transformador (Antena Transmissora)
249 L3 6 20 1.1mH
250 R8 20 7 1
251 *Secundário do Transformador (Antena Receptora)
252 L4 16 21 1.1mH
253 R9 21 17 1
254 *Acoplamento Magnético (Antena Receptora)
255 K34 L3 L4 1
256 *Retificador de Onda Completa (Antena Receptora)
257 D5 16 19 1N4007
258 D6 0 16 1N4007
259 D7 17 19 1N4007
260 D8 0 17 1N4007
261 C4 19 0 100uF
262 *Regulador de Tensao*
263 X8 19 0 24 LM7805
264 RL 24 0 50
265
266 ***** ANÁLISE *****
267 .TRAN 1ms 300ms 0ms 1ms
268
269 #AUTO PLOT TRAN V(24) I(RL)
270 .SAVE
271 .END
272
273
274 ***** SINAIS IMPORTANTES *****
275 * V(1) - Fonte AC (tomada)
276 * V(3,4) - Secundário do transformador (127V : 24V)
277 * V(5) - Saída retificador transmissor
278 * V(6,7) - Saída Inversor
279 * V(8) - Sinal PWM
280 * V(11) - Sinal PWM Amplificado Invertido
281 * V(14) - Sinal PWM Amplificado
282 * V(19) - Saída retificador inversor
283 * V(24) - Tensão na carga
284 * I(RL) - Corrente na carga

```

B Apêndice - Código PWM Arduino

```

1 void determina_Duty_Cycle_pino03(float duty_cycle); //Seleciona o duty cycle no pino 3
2 void determina_Duty_Cycle_pino11(float duty_cycle); //Seleciona o duty cycle no pino 11
3 void selecionaFrequencia(char freq); //Seleciona a frequência do PWM
4
5 int armazena_analogico = 0x00; //Armazena grandeza analógica
6
7 void setup()
8 {
9     pinMode( 3, OUTPUT);    //saída PWM pino 3
10    pinMode(11, OUTPUT);    //saída PWM pino 11
11
12    TCCR2A = 0xA3;          //Configuração em FAST PWM
13    selecionaFrequencia(4);  //Seleciona opção para frequência (1 a 7 - Ver tabela abaixo)
14
15    determina_Duty_Cycle_pino03(80);
16    determina_Duty_Cycle_pino11(50);
17
18 }
19
20 void loop(){
21     armazena_analogico = analogRead(A0);
22
23     armazena_analogico = map(armazena_analogico, 0, 1023, 1, 100);
24
25     determina_Duty_Cycle_pino03(armazena_analogico);
26     determina_Duty_Cycle_pino11(armazena_analogico);
27
28 }
29
30 // Converte o Duty Cycle para inteiro e armazena no registrador
31 void determina_Duty_Cycle_pino03(float duty_cycle){
32     int duty_cycle_int;
33
34     duty_cycle = duty_cycle / 100;
35
36     duty_cycle_int = (duty_cycle * 256) - 1;
37
38     OCR2B = duty_cycle_int;
39 } //end determinaduty_cycle_intCycle_pino3
40
41 // Converte o Duty Cycle para inteiro e armazena no registrador
42 void determina_Duty_Cycle_pino11(float duty_cycle){
43     int duty_cycle_int;
44
45     duty_cycle = duty_cycle / 100;
46
47     duty_cycle_int = (duty_cycle * 256) - 1;
48
49     OCR2A = duty_cycle_int;
50
51 }
52
53 // Seleciona a frequência de acordo com a tabela e armazena no registrador
54 void selecionaFrequencia(char freq){
55
56     TCCR2B = freq;
57 }
58
59 /*
60  Opções de Frequência do Arduino:
61
62      1      62.5  kHz
63      2      7.81  kHz
64      3      1.95  kHz
65      4      976.56 Hz
66      5      488.28 Hz
67      6      244.14 Hz
68      7      61.03  Hz
69
70 */
71

```