

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

Artur Magnus Piacentini

**DESENVOLVIMENTO DE UMA FONTE DE PLASMA  
ATMOSFÉRICO**

Florianópolis

2020



Artur Magnus Piacentini

**DESENVOLVIMENTO DE UMA FONTE DE PLASMA  
ATMOSFÉRICO**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica para a obtenção do Grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Telles Brunelli Lazzarin,  
Dr.

Coorientador: Prof. Cristiano Binder,  
Ph.D.

Florianópolis

2020

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Piacentini, Artur

Desenvolvimento de uma Fonte de Plasma Atmosférico /  
Artur Piacentini ; orientador, Telles Brunelli Lazzarin,  
coorientador, Cristiano Binder, 2020.  
87 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -  
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico,  
Graduação em Engenharia Elétrica, Florianópolis, 2020.

Inclui referências.

1. Engenharia Elétrica. 2. Plasma Atmosférico. 3.  
Transformadores Flyback. 4. Reatores Auto-Oscilantes. 5.  
Fontes de Plasma. I. Brunelli Lazzarin, Telles. II. Binder,  
Cristiano. III. Universidade Federal de Santa Catarina.  
Graduação em Engenharia Elétrica. IV. Título.

Artur Magnus Piacentini

**DESENVOLVIMENTO DE UMA FONTE DE PLASMA  
ATMOSFÉRICO**

Este Trabalho foi julgado adequado como parte dos requisitos para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Elétrica e aprovado, em sua forma final, pela Banca Examinadora

Florianópolis, 04 de dezembro de 2020.

---

Prof. Jean Viane Leite, Dr.  
Coordenador do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

**Banca Examinadora:**

---

Prof. Telles Brunelli Lazzarin, Dr.  
Orientador  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Cristiano Binder, Ph.D.  
Coorientador  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Gierry Waltrich, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Eng. Eletric. Julio César Dias, Me.  
Universidade Federal de Santa Catarina



## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à minha família, em especial aos meus pais, pelo apoio incondicional no decorrer dos anos de graduação, sem o qual não teria sido possível passar por esse período da mesma maneira.

Aos grandes amigos que fiz na universidade e aos grandes amigos que fiz antes dela por sempre estarem comigo quando precisei, sem os quais não teria tantas boas memórias desses anos de estudo. Em especial à melhor pessoa que a UFSC me trouxe, minha namorada Beatriz, obrigado por todo seu amor.

Aos funcionários e professores do departamento de Engenharia Elétrica por sempre se desdobrarem para trazer a melhor qualidade de ensino aos estudantes. Especialmente à equipe do INEP e ao Professor Telles, que além de me orientar pôde me ensinar muitos conceitos fundamentais ao trabalho.

Aos mestrandos Alex e Ingrid pela ajuda na análise de todos os resultados desse trabalho, bem como pela dedicação ao projeto. Ao Doutorando Júlio por todo o auxílio na parte de projetos.

E principalmente a toda a equipe do Laboratório de Materiais, que me recebeu como bolsista e motivou esse trabalho com um ambiente profissional acolhedor, o qual tornou-se minha segunda casa nesses últimos anos de graduação. Principalmente ao professor Cristiano por além da co-orientação, ter sempre a confiança no meu trabalho.





## RESUMO

Este trabalho trata-se da documentação da construção de uma fonte de plasma atmosférico fazendo uso de componentes reciclados, a qual será utilizada no tratamento da superfície de variados materiais. Partindo de uma metodologia de projeto é construído um protótipo funcional, o qual é empregado para dois diferentes estudos da modificação superficial de materiais. Uma explicação detalhada do funcionamento de reatores eletrônicos auto-oscilantes e transformadores flyback é apresentada, bem como nuances entre diferentes modelos comerciais disponíveis e uma breve revisão acerca de tratamentos, da topologia empregada, plasma e propriedades superficiais de materiais. Alguns testes e resultados experimentais também são expostos ao final do trabalho, provando o funcionamento da fonte e as implicações do tratamento de plasma em variados materiais.

**Palavras-chave:** Plasma Atmosférico. Transformador Flyback. Reatores eletrônicos.



## ABSTRACT

This work is about the construction of an Atmospheric Plasma source using recycled components that has been used in surface treatment of varied materials. A detailed explanation of self-resonant electronic reactors and flyback transformers besides some practical differences in commercial models and a brief revision about the chosen topology, plasma and surface properties are presented in the scope of the text. Some of the tests done to evaluate and proof the system operation and its application impact are also described at the end of this work.

**Keywords:** Atmospheric Plasma. Flyback Transformer. Electronic Reactors.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Diagrama do Protótipo Proposto .....	19
Figura 2	Estrutura Funcional do Projeto .....	22
Figura 3	Impedância Característica dos Regimes de Descarga ...	24
Figura 4	Núcleo de Ferrite e Enrolamentos Resinados .....	28
Figura 5	Diversos Modelos de Flyback .....	28
Figura 6	Característica $V \times I$ de uma Lâmpada Fluorescente .....	31
Figura 7	Modelo Simplificado de REAO .....	31
Figura 8	Modelo Completo de REAO .....	32
Figura 9	Esquemático da Topologia Escolhida .....	35
Figura 10	Componente Reciclado e Componente Novo .....	38
Figura 11	Processo de Isolamento com Óleo Mineral .....	40
Figura 12	Processo de Isolamento com Resina Epóxy .....	41
Figura 13	Resposta em Frequência do Componente Utilizado .....	42
Figura 14	Indutância Magnetizante Medida no Componente Utilizado .....	43
Figura 15	Ensaio Realizado pelo Enrolamento Primário .....	44
Figura 16	Ensaio Realizado pelo Enrolamento Secundário .....	44
Figura 17	Indutância de Dispersão medida no Componente Utilizado .....	45
Figura 18	Ensaio realizado em Ambos os Enrolamentos .....	45
Figura 19	Modelo Equivalente do Componente .....	46
Figura 20	REAO com Todas as Conexões .....	47
Figura 21	Circuito do Protótipo .....	48
Figura 22	Componentes e PCB dos Reatores INTRAL 16W, 32W, 32W Compacto .....	51
Figura 23	Circuito de Proteção por Autodesligamento .....	51
Figura 24	Fusível Impresso na PCB .....	53
Figura 25	Componentes e PCB dos Reatores ECP 32W e 36W ...	54
Figura 26	Componentes e PCB dos Reatores TRANCIL 32W e OSRAM 32W .....	55
Figura 27	Circuito Simulado no PSIM .....	56
Figura 28	Componentes do Filtro LCL Simulados .....	57
Figura 29	Tensão Coletor-Emissor dos Bipolares S1 e S2 .....	58

Figura 30 Tensão nos Terminais da Lâmpada em Detalhe . . . . .	58
Figura 31 Comparação do controle de Tensão no Barramento Gra- dador vs Conversor CC-CC. . . . .	60
Figura 32 Esquemático do Conversor CA-CC acoplado ao REAO. . . . .	61
Figura 33 Protótipo Conversor BUCK . . . . .	62
Figura 34 Sistema de Controle do Fluxo Gasoso. . . . .	63
Figura 35 Diferentes Regimes de Plasma Obtidos. . . . .	65
Figura 36 Suporte e Eletrodo Confeccionados para a Fonte. . . . .	65
Figura 37 Resultados Visuais da Aplicação em Superfícies Metáli- cas. . . . .	68
Figura 38 Goniômetro KRUSS DSA 25. . . . .	69
Figura 39 Superfícies Hidrofílica e Hidrofóbica Vistas pelo Goniô- metro . . . . .	69
Figura 40 Microscopia de Força Atômica da Superfície de Mem- brana de Ultrafiltração de PVDF Controle (a) e Avaliadas em Di- ferentes Dias de Exposição ao Tratamento com Plasma: d0 (b), d1 (c) e d7 (d) . . . . .	71
Figura 41 Microscopia Eletrônica de Varredura da Superfície de Membrana de Ultrafiltração de PVDF Avaliada em Diferentes Dias de Exposição ao Tratamento com Plasma: d0 (a), d1 (b) e d7 (c) . . . . .	72
Figura 42 Ângulo de Molhamento PVDF Controle (a) e Avaliado em Diferentes Dias de Exposição ao Tratamento com Plasma: d0 (b), d1 (c) e d7 (d). . . . .	73
Figura 43 Lista de Materiais, Esquemático e PCB do conversor desenvolvido . . . . .	83
Figura 44 Conversor BUCK com controle da tensão de saída . . . . .	85
Figura 45 Função de Transferência em Laço Aberto não Compen- sada do Conversor BUCK. . . . .	86
Figura 46 Função de Transferência Compensada do Conversor BUCK . . . . .	87

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Especificações Técnicas do Protótipo .....	22
Tabela 2	Características de Modelos Similiares .....	23
Tabela 3	Resultados dos Ensaios .....	46
Tabela 4	Micro Rugosidade de Superfícies à base de PVDF Tra- tadas com Plasma .....	71
Tabela 5	Parâmetros Buck .....	81





## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

LABMAT	Laboratório de Materiais . . . . .	17
CRT	Cathode Ray Tube . . . . .	18
EPA	Environmental Protection Agency . . . . .	18
N-LTE	<i>Non Local Thermal Equilibrium</i> . . . . .	25
AP	Atmospheric Pressure . . . . .	25
DBD	Descarga com Barreira Dielétrica . . . . .	26
TF	Transformadores Flyback . . . . .	27
CA	Corrente Alternada . . . . .	27
CC	Corrente Contínua . . . . .	27
REAO	Reator Eletrônico Auto-oscilante . . . . .	31
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor . . . . .	32
DIAC	Diode for Alternating Current . . . . .	32
PVC	Policloreto de Vinila . . . . .	39
BJT	Bipolar Junction Transistor . . . . .	49
DIAC	Diode for Alternated Currente . . . . .	49
SMD	Surface Mounting Devices . . . . .	50
NTC	Negative Thermal Component . . . . .	55
MCD	Modo de Condução Descontínua . . . . .	60
PCB	Printed Circuit Board . . . . .	60
PVDF	Fluoreto de Polivinilideno . . . . .	66
PES	Polietersulfona . . . . .	66
LABSEM	Laboratório de Separação com Membranas . . . . .	70
AFM	Atomic Force Microscope . . . . .	70
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura . . . . .	72



## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	17
1.1 MOTIVAÇÃO .....	17
1.2 OBJETIVOS .....	18
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	21
2.1 INTRODUÇÃO .....	21
2.2 METODOLOGIA DE PROJETO .....	21
2.3 PLASMA E FENÔMENOS FÍSICOS .....	24
<b>2.3.1 Plasma</b> .....	24
<b>2.3.2 Tratamento de Plasma Atmosféricos</b> .....	25
<b>2.3.3 Descargas com Barreira Dielétrica</b> .....	26
2.4 COMPONENTES ELETRÔNICOS .....	27
<b>2.4.1 Transformadores Flyback</b> .....	27
<b>2.4.2 Reatores Eletrônicos</b> .....	30
2.5 TOPOLOGIA ESCOLHIDA .....	34
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	37
3.1 INTRODUÇÃO .....	37
3.2 TRANSFORMADOR FLYBACK .....	37
<b>3.2.1 Preparo do Transformador</b> .....	37
3.2.1.1 Identificação dos Terminais, Conexão e Isolamento .....	37
3.2.1.2 Caracterização do Transformador Utilizado .....	41
3.3 REATOR ELETRÔNICO AUTO-OSCILANTE .....	47
<b>3.3.1 Preparo do Reator Eletrônico</b> .....	47
3.3.1.1 Identificação dos Terminais e Conexões .....	47
3.3.1.2 Caracterização dos Diferentes Modelos .....	49
<b>3.3.2 Simulações Computacionais</b> .....	56
<b>3.3.3 Controle de Potência</b> .....	59
3.4 APLICAÇÃO DO PLASMA ATMOSFÉRICO .....	62
<b>3.4.1 Aplicação em Condutores Metálicos</b> .....	62
<b>3.4.2 Aplicação em Membranas Poliméricas</b> .....	63
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	67
4.1 INTRODUÇÃO .....	67
4.2 RESULTADOS OBTIDOS EM SUPERFÍCIES METÁLICAS .....	67
4.3 RESULTADOS OBTIDOS EM SUPERFÍCIES POLIMÉRI- CAS .....	70
4.3.0.1 Microscopia de Força Atômica .....	70
4.3.0.2 Microscopia Eletrônica de Varredura .....	72
4.3.0.3 Ângulo de Molhamento .....	73

<b>5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>75</b>
<b>6 REFERÊNCIAS .....</b>	<b>77</b>
<b>APÊNDICE A - PROJETO DO CONVERSOR BUCK .</b>	<b>81</b>
<b>APÊNDICE B - PROJETO DA MALHA DE CONTROLE DO CONVERSOR.....</b>	<b>85</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O trabalho divide-se em cinco capítulos, sendo estruturado na mesma cronologia que foi executado. Primeiramente temos um capítulo introdutório trazendo os objetivos e motivações, seguido pelo desenvolvimento do trabalho, exposto nos capítulos de dois a quatro. Por fim a conclusão do trabalho e seus possíveis desenvolvimentos futuros no capítulo final.

No capítulo segundo foi feita uma revisão bibliográfica de diversos conceitos relevantes ao trabalho, desde a parte de metodologia do projeto até uma descrição dos elementos nele utilizados.

No terceiro capítulo há uma descrição aprofundada dos materiais e métodos, abordando desde a parte prática de montagem e caracterização até simulações computacionais e testes de bancada.

No quarto capítulo estão expostos os resultados obtidos em diferentes linhas de pesquisa bem como uma breve exposição do que foi realizado. Por fim no quinto capítulo encontram-se as conclusões do trabalho, seguidas de possíveis melhorias e continuações a serem realizadas futuramente.

### 1.1 MOTIVAÇÃO

Tratamentos à plasma são usualmente conduzidos em ambientes de pressão e atmosfera controlada, amplamente utilizados para processos de sinterização, limpeza e enriquecimento por deposição de espécies. Tendo em vista a dificuldade de operação sob pressões controladas, demandando sistemas de vácuo hermeticamente fechados, tratamentos de plasma sob pressão atmosférica provam-se mais fáceis e imediatos, bem como de custo reduzido em comparação com a contrapartida. O principal problema desses, por sua vez, é a demanda de fontes de energia com elevadíssimas tensões para a ionização do ar, o que torna seu projeto algo mais proibitivo.

A motivação desse trabalho é expandir a linha de pesquisa do LAB-MAT ( Laboratório de Materiais ) de maneira simples. Tratamentos de plasma sob pressão atmosférica ainda não foram abordados no laboratório em decorrência da falta de uma fonte para tal, a qual é justificada pela escassez no mercado nacional e pelo alto custo de equipamentos compatíveis com as especificações desejadas.

Com o crescente avanço da tecnologia, a atualização de equipamentos

torna-se algo frequente em nossa sociedade. Em decorrência disso, antigos equipamentos são descartados ou dados como obsoletos, gerando uma grande quantidade anual de lixo eletrônico. A reciclagem de componentes eletrônicos vem se tornando algo cada vez mais escasso tendo em vista a crescente modernização de componentes, pois muitas vezes chips ou circuitos integrados são de uso muito específico e de difícil ou inviável remoção. Entretanto, a história muda para magnéticos ou analógicos, principalmente componentes magnéticos, de maneira que seu reaproveitamento ou reprojeto é algo possível e viável de ser realizado. Tendo como objetivo a confecção de uma fonte de plasma de baixo custo, viu-se a reciclagem e o reaproveitamento do componente magnético mais importante de antigas televisões CRT - Cathode Ray Tube - como um caminho viável para elaboração de um projeto. Segundo o estudo conduzido pela EPA - Environmental Protection Agency - dos Estados Unidos, cerca de 244 milhões de televisores de tubo chegarão ao fim de sua vida útil nos próximos vinte anos apenas em território americano (KUUSAKOSKI, 2016). Este é, portanto, um produto abundante no mercado de eletrônicos obsoletos.

Em linhas gerais, a motivação desse trabalho vem da ideia de unir a aplicação de todos os conhecimentos obtidos no decorrer da graduação, ao desenvolvimento de uma nova área de pesquisa dentro da universidade e ao reaproveitamento de materiais para desenvolvimento de um novo produto.

## 1.2 OBJETIVOS

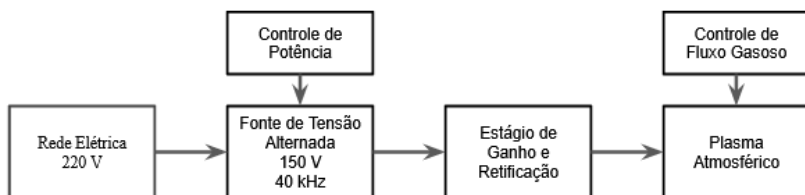
Tendo em vista a falta de recursos e a atual situação econômica da Universidade, o desenvolvimento de novas linhas de pesquisa torna-se algo complicado de ser executado. A demanda por aparelhagem de ponta é, de certa forma, inviabilizada pela escassez de uma alternativa nacional, aliada aos altos preços de materiais importados. Dessa maneira, desenvolver um nova linha de estudos com recursos tão reduzidos mostra-se um grande desafio, ainda que possa gerar bons frutos para a Universidade.

Toma-se como principal objetivo do trabalho a confecção de uma fonte de alta tensão, desde o projeto elétrico até um sistema de medições para uso laboratorial, desenvolvendo assim uma nova categoria de tratamentos no laboratório de materiais. Esse protótipo experimental para fonte de alta tensão de baixo custo será utilizado na aplicação de tratamentos superficiais a plasma frio em variados materiais. A aplicação

do tratamento em superfícies e análise de resultados vem com caráter secundário no trabalho. Tem-se como objetivo maior a variação da molhabilidade de superfícies metálicas e poliméricas fazendo o uso das descargas elétricas proporcionadas pelo aparelho desenvolvido neste projeto, criando assim superfícies hidrofílicas e hidrofóbicas.

Deseja-se portanto, criar um protótipo funcional de uma fonte de alta tensão utilizada em tratamentos a plasma. O protótipo será composto basicamente de uma fonte de tensão acoplada em um estágio de ganho, e pode ser simplificado pelo diagrama da Figura 1.

Figura 1 – Diagrama do Protótipo Proposto



Fonte: Autor.

Além de obter experiência na área de pesquisa e desenvolvimento, sair com proficiência em gerenciamento de projetos e desenvolvimentos de produtos também é um objetivo primário do trabalho em questão.





## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 INTRODUÇÃO

Nessa sessão é feita uma breve revisão sobre o tema do trabalho, desde a metodologia de projeto, passando por características físicas do plasma, até a topologia e o funcionamento de reatores eletrônicos e transformadores de alta frequência.

Primeiramente discute-se brevemente a preparação para iniciar os trabalhos e todos os passos que foram tomados para colocar no papel um projeto para ser seguido.

Em sequência aborda-se um pouco sobre o plasma e todos os fenômenos físicos envolvidos, o que apesar de não ser o foco do trabalho, foram conhecimentos importantes para entender um pouco mais sobre o funcionamento e o que seria necessário nesse projeto.

Segue-se então com uma discussão dos componentes utilizados e seu funcionamento em geral, terminando com uma breve apresentação da topologia escolhida no trabalho.

### 2.2 METODOLOGIA DE PROJETO

Para a metodologia de projeto tomou-se como base o trabalho de Gerhad (2005), seguindo todas as etapas de projeto na medida do possível. Dessa forma, tudo iniciou-se com um projeto informacional, onde foi especificada e detalhada uma tarefa, nesse caso a elaboração de uma fonte para tratamentos a plasma atmosférico. Ainda na parte informacional, foram feitos estudos de mercado, empresas concorrentes e produtos similares, bem como requisitos necessários, os quais futuramente tornam-se os parâmetros de projeto. Algumas características de fontes analisadas nesta etapa encontram-se na Tabela 2, junto da legenda com os estudos nos quais foram utilizadas.

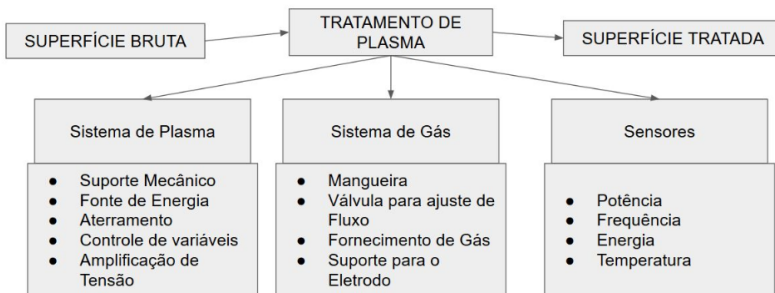
Terminada a parte informacional passou-se ao projeto conceitual, onde foram definidas as especificações da fonte junto com seus parâmetros de projeto, os quais foram definidos na Tabela 1. Também desenhou-se uma estrutura funcional apresentada na Figura 2, na qual foi colocada em linhas gerais o funcionamento do produto desejado, detalhando cada etapa do processo e do que ela era composta. Foram estudados os princípios e as estruturas de operação, bem como possíveis variantes de concepção junto de seus contra-critérios técnicos e econômicos.

Tabela 1 – Especificações Técnicas do Protótipo

Especificações de Protótipo	
Tipo	DC Pulsada
Frequência [ kHz ]	Inferior à 50
Gap [ mm ]	Inferior à 20 ( Variável )
Potência [ W ]	Inferior à 50 ( Variável )
V [ kVrms ]	Superior à 20

Seguiu-se então para o projeto preliminar, onde foram definidas algumas topologias para protótipos. Ainda nessa etapa foram realizados os leiautes preliminares detalhando a estrutura e lista de materiais necessários para o projeto de cada um dos protótipos, focando em minimizar quaisquer pontos fracos ou falhas deles. Tendo em mãos o estudo de cada topologia, foi selecionada a mais adequada delas, para a qual foi feito um projeto detalhado que se dá por este trabalho.

Figura 2 – Estrutura Funcional do Projeto



Fonte: Autor

Tabela 2 – Características de Modelos Similiares

FONTE	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
Tipo	DC	DC	AC	DC	DC	AC	DC
F [ kHz ]	25	-	30	0,5~1,3	17,1	20	17,1
Gap [ mm ]	1	-	1,5	0~100	0,5~1	5	3
P [ W ]	48~93	800	1k	-	50	-	50
V [ kVrms ]	13	-	9	0~22	-	1,15	-

1. Tantec Corona Generator Model HV09
  
2. Softal type “CLNE” utilizada em: Surface energy of corona treated PP, PE and PET films, its alteration as function of storage time and the effect of various corona dosages on their bond strength after lamination
  
3. Desenvolvida em: “Corona Discharge Surface Treater Without HVT”
  
4. Desenvolvida em: “Uso de Jato de Plasma a pressão atmosférica para realizar modificações de Superfície do titânio”
  
5. AFS-G10S Power Generator
  
6. Desenvolvida em: “Thin Film Deposition on Open-cell Foams by AP-DPD”
  
7. Desenvolvida em: “Chemical and Physical Effects of the Carrier Gas on the Atmospheric Pressure PECVD of Fluorinated Precursors”

## 2.3 PLASMA E FENÔMENOS FÍSICOS

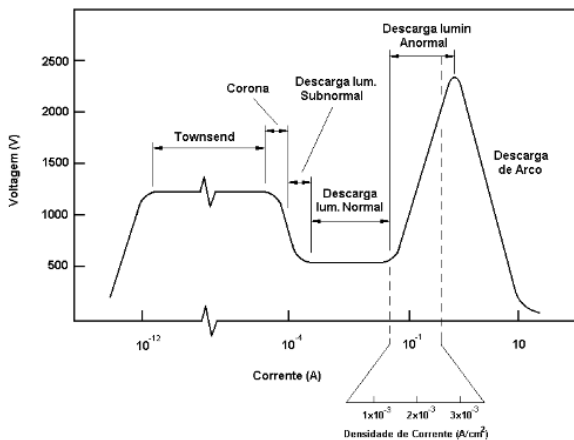
### 2.3.1 Plasma

Plasma é o dito quarto estado da matéria e corresponde à basicamente um gás ionizado. Um gás ionizado corresponde a um fluido no qual as cargas elétricas podem se mover, geralmente guiadas pela presença de um campo elétrico. Em suma, um plasma trata-se de um fluido no qual as cargas encontram-se em movimento.

Podemos dividi-los em plasmas obtidos eletricamente ou termicamente (CARDOSO, 2009), sendo o primeiro o foco deste estudo. Via de regra, sob tensões baixas e condições normais, gases comportam-se como isolantes elétricos, mesmo que existam íons. Portanto, para que exista a passagem de corrente elétrica através deles, é necessária sua ionização. O mecanismo de ionização elétrico é impor uma diferença de potencial tão elevada a ponto de fornecer energia cinética suficiente para que os elétrons se movam.

Na figura 3 temos uma curva característica de tensão-corrente relacionando os regimes de descarga com seus valores característicos de impedância.

Figura 3 – Impedância Característica dos Regimes de Descarga



Fonte: (CARDOSO, 2009)

Para o trabalho em questão empregam-se apenas descargas luminosas frias, ou seja, que se localizam na região central do gráfico, entre corona e descargas anormais. A região de descargas anormais é a mais indicada para os tratamentos realizados neste trabalho (CARDOSO, 2009), porém também foram realizados estudos com descargas no regime corona e até algumas descargas no regime de arco.

### **2.3.2 Tratamento de Plasma Atmosféricos**

Plasma pode ser definido como um estado físico da matéria que é composto por espécies neutras e eletricamente carregadas como elétrons, cátions e ânions, ou seja, diferentemente do gás, esse tem certa parcela das moléculas carregadas. Em laboratório pode ser gerado pela diferença de potencial entre dois pontos ou eletrodos. Essa diferença de potencial, por sua vez, pode ou não ionizar o ar, sendo que se dá ao ar ou gás ionizado o nome de plasma. O plasma pode estar contido em um ambiente controlado ou não, é dado o nome de plasma atmosférico ao ar ionizado fora de um sistema hermeticamente fechado, como por exemplo descargas atmosféricas.

Podemos dividir o plasma em duas categorias: em equilíbrio termodinâmico local e em não equilíbrio termodinâmico local. As principais diferenças entre eles são a densidade eletrônica e temperatura. Neste trabalho, o principal interesse é trabalhar com plasma em não equilíbrio termodinâmico local a pressão atmosférica (N-LTE), (PA) pois é de interesse tratar regiões pontuais de materiais sensíveis ou não à temperatura e eliminar o sistema de vácuo. Por não ser térmico, esse tipo de plasma concentra a energia fornecida na geração de um grande número de espécies quimicamente reativas. Portanto, o Plasma N-LTE tem caráter químico e é aplicado na modificação de superfícies termicamente instáveis (ALVES et al., 2017), (TENDERO et al., 2005), (LINDNER et al., 2017). Tratamentos com PA também tem encontrado aplicações em diversas outras áreas como: controle da poluição e geração de ozônio (CHANG et al., 1991), conservação de alimentos (LÍRIA, 2017), esterilização de materiais (NASCIMENTO NETO, 2004), aumento da adesão entre polímeros e adesivos (ASSUNCIÓN MARTÍNEZ GARCÍA et. al., 2003), dentre outras.

### 2.3.3 Descargas com Barreira Dielétrica

O tipo de plasma de interesse para algumas aplicações desse trabalho enquadra-se na categoria das descargas por barreira dielétrica (DBD), a qual caracteriza-se por pulsos com algumas dezenas de quilovolt em radiofrequência, onde pelo menos um dos eletrodos é envolvido com um material dielétrico, podendo este ser ou não o próprio ar.

As descargas por barreira dielétrica ocorrem quando um elevado potencial é imposto entre dois eletrodos condutores separados por um intermédio dielétrico, fazendo com que cargas acumulem-se em suas superfícies até o ponto de ruptura da rigidez dielétrica do meio entre eles. Para essa aplicação, apesar das altas tensões, temos uma densidade de corrente bem baixa fluindo pelo material, o que torna-se ideal, uma vez que o único interesse é a modificação das características superficiais deste. A energia entregue por pulso também é baixa, ficando na casa dos nJ (LINDNER et al., 2017), tratando-se de um plasma N-LTE em sua maior parte a energia é empregada nas reações químicas que ocorrem na superfície do material.

Dependendo do regime de operação, o plasma pode ficar no estado filamentar ou difuso, sendo o primeiro mais comum em aplicações industriais e o segundo mais recomendado para nossa aplicação, pelo fato de ser mais homogêneo e livre de arcos. O modo de operação do plasma depende de inúmeros fatores, os quais podem ser alterados no projeto a fim de obter o regime desejado. Parâmetros como gás de tratamento, fluxo e dosagem, sendo essa dependente da potência, frequência e distância dos eletrodos (ASSUNCIÓN MARTÍNEZ GARCÍA et al., 2003), influenciam fortemente a aplicação. Em linhas gerais, pode-se dizer que a tensão influencia de maneira diretamente proporcional ao regime difuso enquanto frequência e a distância entre eletrodos influenciam de maneira inversa. Ou seja, quanto maiores as dosagens, maior a tendência de operação no regime difuso. Já na seara dos gases, é comum na literatura o uso de hélio, neônio e nitrogênio, pois descargas difusas são mais facilmente obtidas com eles (TENDERO et al., 2005), porém também pretende-se trabalhar com fluidos à base de flúor e argônio neste trabalho.

Apesar do maior interesse do protótipo ser em descargas DBD difusas, o mesmo foi construído na configuração similar à (NASCIMENTO NETO et al., 2015), DBD-like com parâmetros variáveis, de maneira que outros tipo de descarga bem como de regimes de operação também possam ser executados alterando a disposição dos eletrodos, por exemplo .

## 2.4 COMPONENTES ELETRÔNICOS

### 2.4.1 Transformadores Flyback

Transformadores Flyback (TF) são transformadores de alta frequência empregados em aparelhos de televisão e monitores antigos. Apesar de denominados transformadores e terem o mesmo princípio de funcionamento desses, o local onde são empregados é de certa forma diferente das aplicações mais comuns de transformadores.

A maior diferença entre Transformadores Flyback e transformadores regulares é que esse é dimensionado para armazenar energia em seu circuito magnético, funcionando como um indutor, enquanto um transformador comum é projetado para transferir a energia do primário ao secundário, de maneira a minimizar a energia armazenada. O primeiro tem relutância do circuito magnético muito superior, devido à entreferros posicionados no núcleo, os quais também são utilizados como ferramenta de projeto, estes podem ser dimensionados para ter uma espessura de acordo com o necessário. Os entreferros são o elemento responsável pelo armazenamento da energia, e tem suas dimensões cuidadosamente calculados para tal. Geralmente são alimentados com ondas de alta frequência, sejam retangulares ou senoidais, e portanto são construídos com um núcleo de ferrite ou materiais nanocristalinos para melhorar a circulação de fluxo pelo ferro nessas condições.

Amplamente utilizados na ionização de raios catódicos em antigas televisões, considera-se esse componente magnético como o segmento central do trabalho. Tirando proveito de seu robusto encapsulamento e isolamento, os Transformadores Flyback mostraram-se perfeitos para o uso nesta aplicação, apesar de sua topologia não usual.

O núcleo dos componentes utilizados é feito de ferrite, com formato U-U, tendo a metade do enrolamento utilizado para o lado de alta em formato cilíndrico, amenizando quaisquer cantos vivos problemáticos. Um exemplo do núcleo em questão pode ser encontrado na figura 4. Vale notar também que tanto o primário quanto o secundário estão envolvidos por resina isolante para melhorar o desempenho do componente, o que também está exposto na figura por uma vista dos enrolamentos cortados.

Dentre os transformadores temos diferentes modelos, que podem ser observados na Figura 5. Podemos dividi-los em duas grandes categorias: os de corrente alternada (CA) e os de corrente contínua (CC). Flybacks CC (Figura 5 4A e 4B) são os mais comuns atualmente tendo

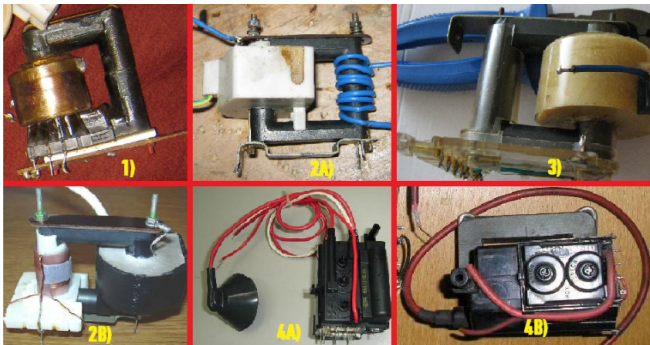
Figura 4 – Núcleo de Ferrite e Enrolamentos Resinados



Fonte: Autor

em vista que foram o último modelo presente em produtos comerciais como televisores e monitores, dessa forma tornam-se mais facilmente disponíveis. Contam com um diodo e um capacitor de alta tensão na saída dos enrolamentos de maneira a retificar a forma de onda do enrolamento de alta tensão. Também contam com um multiplicador de tensão, um duplicador ou um triplicador, como visto na Figura 2 em geral no enrolamento de mais alta tensão. Nesses modelos também está presente dois terminais de foco e contraste, os quais podem ser ajustados por potenciômetros inseridos no encapsulamento.

Figura 5 – Diversos Modelos de Flyback



Fonte: <http://boginjr.com/electronics/hv/flybacks-guide/>.



Já os flybacks AC, mais antigos, (Figura 5 1, 2A, 2B e 3) contam apenas com um enrolamento secundário resinado do qual são derivados os enrolamentos conectados a cada um dos pinos metálicos do componente, como as bobinas de projeção da imagem horizontal e vertical. Na Figura 5 pode-se ver a diferença dos modelos de transformador e como foram evoluindo com o tempo. Apesar das diferenças em modelos, temos sempre em comum um enrolamento de baixa tensão com algumas espiras, ao passo que no enrolamento de alta há milhares de voltas aliadas a um elemento multiplicador de forma a gerar o alto ganho desejado para a ionização dos elétrons projetados nas antigas telas.

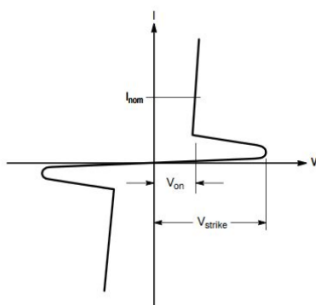
## 2.4.2 Reatores Eletrônicos

A mais simples alternativa para fonte de tensão que adequou-se ao projeto em questão foram os reatores para lâmpadas fluorescentes. Bastante difundidos há alguns anos, vemos que atualmente essas lâmpadas vêm perdendo espaço por causa do grande desenvolvimento dos modelos de LED's (IEA, 2020). Na maior parte dos casos de substituição, apesar de funcionais, os reatores são descartados junto com as lâmpadas no processo de troca, pois não terão mais utilidade alguma em outro papel. Portanto, reatores não só são abundantes no mercado atualmente como também tem grande reciclabilidade tendo em vista que sua parcela está sendo substituída pelos LED's.

Para poder suprir uma lâmpada fluorescente o circuito do reator deve conseguir satisfazer quatro condições: (a) proporcionar uma elevada tensão de ignição entre os eletrodos da lâmpada para a partida; (b) manter uma corrente constante quando em estado ativo; (c) assegurar a estabilidade do circuito mesmo sob condições de falta; e (d) estar dentro das regulações normativas elétricas, não gerando interferências para outros equipamentos. Adicionalmente podemos ter funções como dimerização da iluminação, monitoramento das condições da qualidade e da vida útil da lâmpada fluorescente e até controle remoto do acionamento.

Falando um pouco da carga usual dos reatores, a lâmpada fluorescente: quando desligada ela representa um circuito aberto, o qual ao chegar numa tensão de gatilho  $V_{strike}$  entre seus eletrodos tem sua mistura gasosa ionizada abrindo plasma dentro do bulbo e emitindo luz. Na curva retirada de (BAIRANZADE, 2009) mostrada na Figura 6 podemos ver uma característica  $VxI$  da lâmpada, pode-se notar que em operação os terminais da mesma encontram-se sob uma tensão mais baixa denominada  $V_{on}$ , sustentando uma corrente constante dentro do fluido ionizado em seu interior. A tensão de gatilho  $V_{strike}$  depende de inúmeros parâmetros construtivos e operacionais do tubo como: a mistura gasosa em questão, pressão, temperatura, dimensões do bulbo e tipo de eletrodos, tendo seus valores típicos entre 500 e 1200 V, ao passo que  $V_{on}$  mantém seu valor em torno de 40 a 120V dependendo do modelo (PHILLIPS ELETRONICS, 2000).

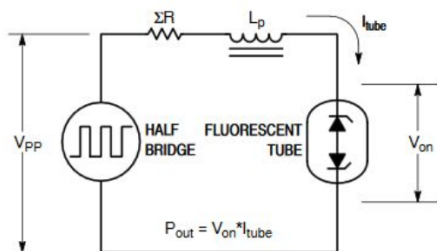
Figura 6 – Característica  $V \times I$  de uma Lâmpada Fluorescente



Fonte: BAIRANZADE, 2009

Uma boa aproximação da curva de operação da lâmpada para quando o circuito estaria em estado ativo pode ser obtida modelando-a como diodos Zener em série com tensão Zener  $V_{on}$ . Podemos adotar como regime transitório o período de ignição da lâmpada e desprezá-lo inicialmente, o que já fornece resultados acurados o suficiente para o trabalho em questão.

Figura 7 – Modelo Simplificado de REAO



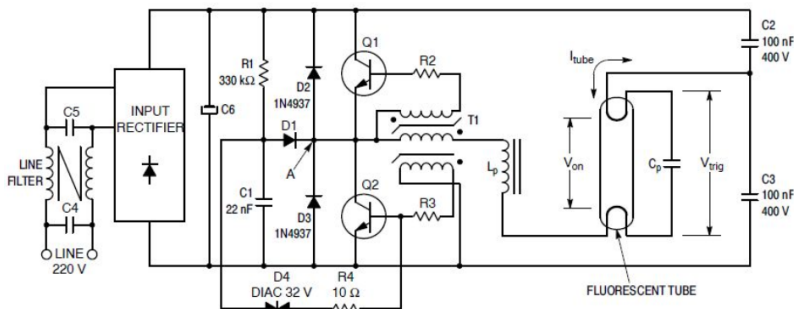
Fonte: BAIRANZADE, 2009

A topologia mais difundida dentre os modelos de Reatores Eletrônicos Auto-Oscilantes é de meia ponte série, onde temos apenas um braço com duas chaves acionadas pelo transformador saturável. O transformador funciona como driver das chaves, portanto envia pulsos de comando na frequência de oscilação do circuito. Uma imagem simplificada do circuito equivalente de um REAO conectado a sua carga mais usual,

a lâmpada fluorescente, pode ser vista na Figura 7. A placa do REAO pode ser explicada da seguinte maneira: seguindo a conexão com a rede temos um filtro indutivo para restringir quaisquer interferências eletromagnéticas ou harmônicas do conjunto e uma etapa de retificação para obter um barramento contínuo usando uma ponte de diodos junto de uma capacitância elevada; Logo após o barramento CC temos o braço de transistores bipolares ou MOSFET's com seus respectivos circuitos de condicionamento como resistores de base, diodos de proteção, dentre outros; Para o acionamento do conjunto temos um transformador saturável de núcleo toroidal composto de três enrolamentos, responsável pelo acionamento das chaves; Seguindo as chaves e o enrolamento principal do transformador, temos um filtro *LCL* responsável não só pela ressonância do circuito, como também pelo condicionamento da forma de onda fornecida à lâmpada. Por fim temos os terminais nos quais são conectados o bulbo fluorescente.

O esquema é praticamente o mesmo tanto em reatores maiores para lâmpadas tubulares quanto nos compactos para pequenos bulbos. Para tratar um pouco do funcionamento da topologia em questão será utilizada a Figura 8, na qual podemos observar uma versão mais detalhada do circuito em questão.

Figura 8 – Modelo Completo de REAO



Fonte: BAIRANZADE, 2009

Apesar de ser auto-oscilante esse circuito não tem partida automática, sendo necessário para isso algum componente para dar início à operação. As oscilações do circuito são geradas pelo transformador saturável  $T_1$ , porém o circuito não começará a oscilar sozinho. O pontapé inicial para isso é dado pelo DIAC  $D_4$ , Capacitor  $C_1$  e Resistor  $R_1$ . Ao

aplicar a tensão da rede no circuito,  $C_1$  começa a carregar exponencialmente através de  $R_1$  até chegar no valor da tensão de gatilho do  $D_4$ . Quando isso acontece o DIAC liga descarregando o capacitor  $C_1$  na base do transistor  $Q_2$ . Com isso  $Q_2$  por sua vez é chaveado impondo uma tensão no terminal primário de  $T_1$  e consequentemente em cada um de seus secundários. Mexendo na polaridade dos enrolamentos de  $T_1$ , podemos criar uma tensão negativa nos secundários do transformador para o transistor superior e positiva para o inferior. Isso polariza positivamente  $Q_2$  e faz sua corrente de coletor subir até ocasionar a saturação do núcleo de  $T_1$ . Uma vez em operação o diodo  $D_1$  garante a descarga instantânea do capacitor  $C_1$  e evita que o DIAC  $D_4$  volte a ser acionado.

Uma vez em funcionamento o circuito oscila com frequência de ressonância definida pelos parâmetros  $L$  e  $C$ , tendo amortecimento regido pela resistência de todos os componentes. Para a ignição da lâmpada deseja-se que o circuito opere em sua frequência de ressonância, pois é onde o mesmo tem o maior ganho de tensão, o qual é aproveitado para geração das altas tensões  $V_{strike}$ . Após o momento transitório da ignição, o circuito tem uma frequência de operação ligeiramente superior à ressonância, o que junto com as resistências do sistema, garante que o ganho de tensão não venha a instabilizá-lo. Os parâmetros  $L$  e  $C$  são determinados no projeto, e encontram-se na forma de um indutor e um capacitor de saída  $L_p$  e  $C_2, C_3$  série, conectados em série com os enrolamentos da lâmpada além de um capacitor paralelo  $C_p$  conectado paralelo aos terminais da lâmpada. Vale ressaltar que o conjunto também atua como Filtro  $LCL$ , evitando componentes de baixa frequência na lâmpada, as quais podem ocasionar fenômenos como efeito estroboscópico ou até ruído audível em algumas situações (LEHMAN; WILKINS, 2014).

## 2.5 TOPOLOGIA ESCOLHIDA

Existem inúmeras maneiras de se gerar plasma, sendo que algumas delas foram testadas no decorrer do trabalho até chegar-se à topologia selecionada. Dejesava-se uma fonte operando no regime DC pulsado, ou seja, uma forma que altere entre zero e  $V_{descarga}$ , sendo essa na casa dos  $20kV$ . É importante ter um plasma contínuo pois nos tratamentos deseja-se fluxo unidirecional dos elétrons, da fonte para a amostra, ou vice-versa, dependendo de como são conectados os eletrodos. O tempo que o plasma não fica aceso no regime DC Pulsado serve para aliviar o acúmulo de cargas no cátodo, que pode gerar descargas de arco indesejadas.

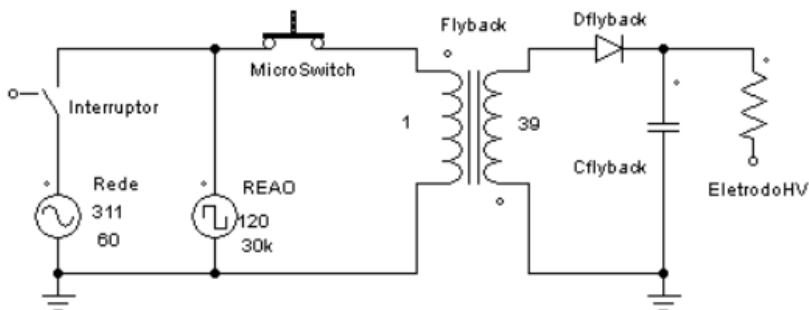
Para essa fonte de alta tensão foram construídos três principais protótipos para o projeto, que serão relatados brevemente nos parágrafos seguintes. Tentou-se criar um estágio de ganho para alguma das fontes de plasma à baixa pressão disponíveis no laboratório.

Primeiramente usou-se um circuito oscilador sem transformador de ganho, como no trabalho de Burany, Huber e Pejovic (2008). O circuito oscilador teria sua frequência de ressonância igual a frequência de operação da fonte de plasma, portanto, daria um ganho na tensão de saída na ordem do seu fator de qualidade  $Q$ . Este oscilador no entanto, não funcionou como deveria por motivos construtivos, o que levou a próxima alternativa.

A segunda tentativa foi feita com um multiplicador de tensão composto de inúmeros capacitores e diodos, comumente chamado de de Cockcroft-Walton. Este, apesar de gerar arcos, não servia para a aplicação desejada pois ele acabava gerando um plasma muito fraco e sem as características de frequência e potência necessárias. Testou-se multiplicadores com variados estágios de ganho, porém nenhum deles foi satisfatório, o que motivou a última alternativa.

A última topologia testada foi a do REAO aliado à um transformador de ganho. Com ela obteve-se ótimos resultados, o que motivou em seguir com essa configuração. Um esquemático da topologia adotada encontra-se na Figura 9.

Figura 9 – Esquemático da Topologia Escolhida



Fonte: Autor.

Uma das vantagens a ser destacada na topologia escolhida é a modularidade do sistema, ou seja, se pode acoplar o estágio de ganho em variadas fontes, obtendo-se o plasma na frequência desejada e auxiliando também no controle de potência, o que pode ser feito simplesmente ao variar-se a forma de onda no primário do transformador. Outra vantagem é a isolação da rede elétrica, visto que ao utilizar um transformador como estágio de ganho há a isolação galvânica entre a carga e a alimentação. Além disso, ao optar-se pelo uso do reator como fonte, já temos o plasma numa frequência aceitável, a qual junto da tensão pode ser manipulada ao mudar-se os parâmetros do circuito. A maioria dos reatores também possui circuitos de proteção e limite da corrente fornecida, portanto, mesmo quando o plasma atinge o estado de arco, a fonte se mantém estável. Dessa forma, é possível obter tanto descargas de barreira dielétrica quanto sem dielétrico adicional mantendo o regime de de descarga desejado. Por fim, mesmo com toda a isolação adicional requerida, por trabalhar em alta frequência o sistema ainda tem o volume bem reduzido, o que torna todo o aparato portátil e leve. Em linhas gerais, com essa topologia temos uma fonte versátil, compacta e robusta, o que justifica a sua escolha.





## 3 MATERIAIS E MÉTODOS

### 3.1 INTRODUÇÃO

Nesse capítulo foram discutidos os materiais utilizados na confecção da fonte, bem como processos adotados para a realização do trabalho. Primeiramente trata-se do transformador escolhido para o projeto, das suas características físicas e dos procedimentos de segurança adotados na sua isolação e conexão a uma fonte de tensão. Por fim apresenta-se um modelo equivalente encontrado através de ensaios com o componente.

Em sequência, há uma sessão sobre os reatores eletrônicos, em que apresenta-se todos os procedimentos tomados na conexão e acionamento, seguido por uma análise das diferentes alternativas de projeto adotadas em alguns modelos diferentes de REAO. Por fim, temos simulações qualitativas para comprovar algumas considerações práticas de projeto feitas para o modelo de reator utilizado no protótipo final. Finalizando o capítulo, é mostrada uma sessão acerca da montagem do sistema para a aplicação do plasma e algumas considerações tomadas para a montagem dos eletrodos, suportes e sistema para controle de fluxo gasosos quando necessário.

### 3.2 TRANSFORMADOR FLYBACK

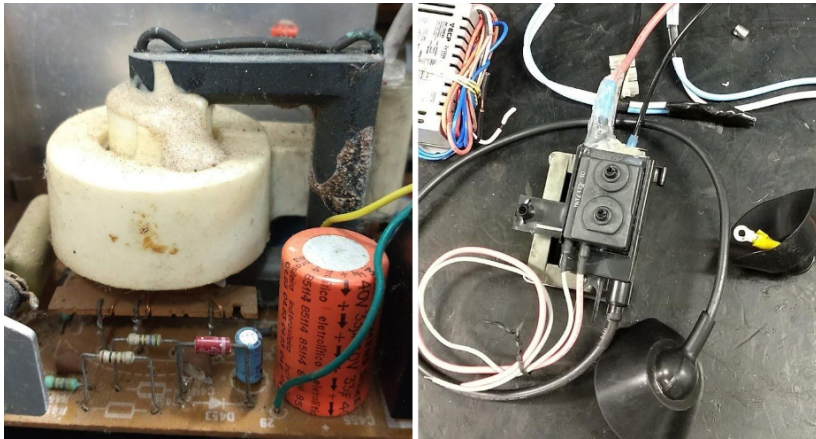
#### 3.2.1 Preparo do Transformador

##### 3.2.1.1 Identificação dos Terminais, Conexão e Isolamento

Foram analisados diferentes modelos de transformador, bem como diferentes formas de conexão e isolamento até obter a melhor configuração possível. Nesta seção será discutido mais a fundo todo o processo de análise e preparação realizado nos transformadores empregados na construção da fonte. Quando comprado novo, o processo torna-se um pouco mais imediato, entretanto certos modelos foram encontrados apenas na reciclagem de eletrônicos antigos, o que adiciona mais uma etapa ao processo. Na Figura 10 temos um exemplo de dois transformadores utilizados, sendo o da esquerda reciclado e o da direita novo. O transformador reciclado foi encontrado em um televisor da década de

setenta e teve que ser removido e reconicionado, enquanto o novo foi adquirido em uma loja de eletrônicos.

Figura 10 – Componente Reciclado e Componente Novo



Fonte: Autor.

O processo de preparo do transformador demanda algumas etapas de segurança, visto que trabalha-se com alta tensão no processo. Portanto, medidas especiais para conexões aos terminais do magnético, bem como na isolamento dele foram tomadas. Para o preparo do transformador o procedimento é realizado seguindo as etapas discutidas abaixo.

Primeiramente são identificados todos os cabos e terminais do transformador, dentre eles o de alta tensão, os fios de foco e contraste e os doze pinos metálicos inferiores. Os pinos correspondem a várias derivações da bobina de alta tensão, dentre as quais encontra-se o retorno de alta tensão, futuramente utilizado como terminal de aterramento do conjunto, e o enrolamento primário de baixa tensão. Feita a identificação de todos os pontos, inicia-se o preparo conectando cabos ao enrolamento de baixa tensão do transformador, o qual é identificado pelos terminais inferiores com resistência equivalente entre  $1,2 \Omega$  e  $1,5 \Omega$  dependendo do modelo. É comum o terminal primário do Flyback ser definido pelos dois primeiros pinos inferiores, os quais encontram-se espaçados dos demais, entretanto não há um padrão dentre todos os modelos, o que justifica a medida da resistência ôhmica para confirmação. Uma vez feita a conexão ao enrolamento primário, estanha-se todos os demais terminais metálicos inferiores e conecta-se cabos a cada

um deles como forma de facilitar a identificação do pino desejado, o qual corresponde ao retorno de alta tensão. A seguir, remove-se a proteção emborrachada do cabo principal e os cabos de foco e contraste, que são desnecessários para o processo.

O secundário consiste numa saída retificada por meio de diodos e capacitores, dessa forma, o segundo terminal desejado é a terminação inferior da bobina, a qual pode ser utilizada como terra da parte de alta tensão. Para identificá-lo, conecta-se uma fonte de tensão ao primário do TF e com o devido cuidado, aproxima-se o cabo de alta tensão de cada um dos fios soldados nos eletrodos inferiores. O terminal desejado será aquele que conduzir um arco estável com maior facilidade - o processo fica automático após algumas tentativas. Também é possível identificar o retorno de alta tensão ao ligar o transformador a vazio, quando podem ser vistos pequenos arcos do pino retorno até o núcleo de ferrite.

Notou-se que é comum o retorno de alta tensão ser um dos três últimos pinos do componente, geralmente o último, entretanto já foram analisados modelos nos quais o retorno encontrava-se logo ao lado do enrolamento primário, então não há uma regra exata para o processo de identificação. Adicionalmente, com o equipamento adequado pode-se medir a resistência de isolamento do retorno de alta tensão, que terá o maior valor dentre todos os pinos, uma vez que para o produto final deseja-se um bom isolamento entre o terminal de alta tensão e o terra. Nas medições realizadas pode-se checar uma resistência de isolamento na casa de alguns  $M\Omega$ . Nos modelos aferidos, mediu-se entre  $5M\Omega$  e  $10M\Omega$ . Por fim, uma vez identificado o retorno, conecta-se ao mesmo um cabo especial de alta tensão para atuar como "terra" da fonte.

A segunda parte do processo consiste no isolamento do transformador, feito para evitar quaisquer fugas de corrente indesejadas pela massa do componente. Primeiramente é feita uma limpeza do núcleo de ferrite, o qual muitas vezes encontra-se sujo com cola ou resina seca, que podem ser removidas com uma lixa. O entreferro plástico muitas vezes está ressecado ou rachado por isso é substituído por papel ou vidro de mesmas dimensões. A ferrugem das partes de suporte metálicas é removida com uma lixa.

O encapsulamento do transformador é feito em um cano de PVC, vedado por duas tampas de tubulação comum. O recipiente é preenchido com óleo mineral, conforme mostrado na Figura 11-C, e em uma das tampas são feitos quatro furos para a passagem dos cabos conectados aos enrolamentos, conforme pode ser visto na Figura 11-A e B, sendo os furos no plástico vedados com *araldite* ou silicone. Após o preen-

chimento do receptáculo com óleo, o mesmo é colocado dez minutos no ultrassom para remoção de bolhas, (Figura 11-D) sendo então feita a vedação com cola para canos de PVC. As conexões então são fixadas nos terminais desejados, facilitando o acoplamento do componente nas diferentes fontes de tensão e eletrodos. Uma vez feita a vedação de todos os cabos, é feito um teste rápido para comprovar o isolamento.

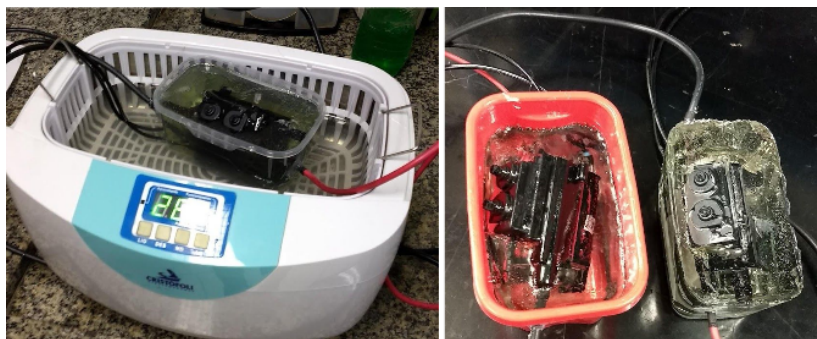
Figura 11 – Processo de Isolamento com Óleo Mineral



Fonte: Autor.

Uma alternativa abordada neste trabalho é a isolamento do componente com resina *epóxy*, como mostrada na Figura 12, da mesma maneira realizada em transformadores à seco. Foram realizados testes em dois espécimes com diferentes entreferros, porém o resultado obtido foi inferior ao obtido com óleo, acredita-se a saturação do núcleo provavelmente ocasionada por fugas em todas as regiões do elemento, as quais aumentam a corrente circulando pelos enrolamento. Acredita-se que mesmo deixando-a no ultrassom, por tratar-se de uma resina de baixa qualidade, ainda permanece uma camada de ar por toda a superfície do elemento, bem como algumas rachaduras no resultados final. Acredita-se que o resultado obtido seria similar nas duas alternativas caso fosse utilizada uma resina específica de isolamento, o que não foi o caso. Resinas de melhor qualidade não foram encontradas para venda em pequenas quantidades e tinham um preço muito elevado em relação ao óleo. Dessa maneira, optou-se pelo uso de óleo na isolamento dos componentes, alternativa que trouxe melhores resultados apesar de demandar maior volume.

Figura 12 – Processo de Isolamento com Resina Epóxy



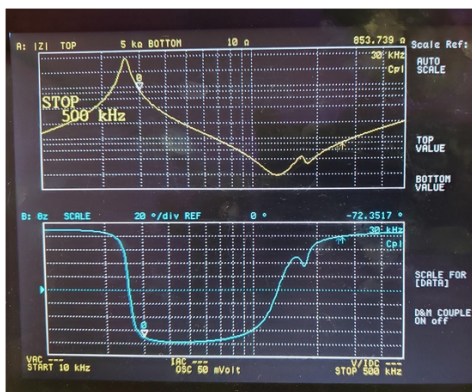
Fonte: Autor.

### 3.2.1.2 Caracterização do Transformador Utilizado

Para a análise do transformador Flyback foi utilizado um analisador de impedâncias do laboratório INEP. Com esse equipamento pode-se ter uma ideia do comportamento em frequência do componente, bem como extrair parâmetros como indutância dos enrolamentos e de dispersão para elaborar um modelo equivalente do transformador.

Primeiramente calibra-se o equipamento para desconsiderar a influência dos cabos na medição para então conectá-lo ao primário do transformador com o intuito de analisar sua resposta em frequência. Para isso o aparelho faz uma varredura em todo o espectro desejado, traçando um diagrama de Bode correspondente ao componente que é analisado no aparelho. Na Figura 13, pode-se ver a captura de tela obtida do analisador em impedâncias, com o comportamento do transformador em todas as frequências analisadas.

Figura 13 – Resposta em Frequência do Componente Utilizado



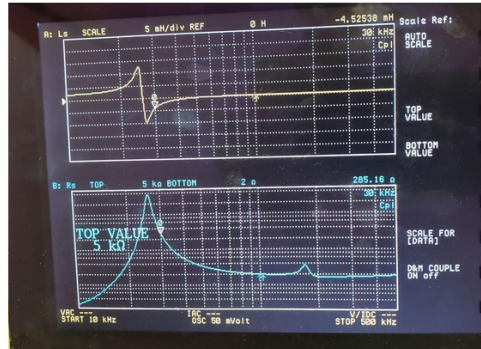
Fonte: Autor.

Essa análise é importante pois uma vez determinada a frequência de operação do circuito ao qual será acoplado o transformador, é desejado que o mesmo tenha um comportamento adequado para essa faixa de valores. Ajustou-se o equipamento para que a varredura inicie em 10 kHz e percorra o espectro até 100 kHz, sendo a frequência de operação destacada com um marcador (30 kHz). Observou-se uma impedância de 853,73Ω com fase de -72,35°, suficiente para não sobrecarregar a fonte, dessa forma pode-se assegurar a operação do conjunto sem problemas. Acredita-se que o comportamento capacitivo do componente representado pela fase negativa da impedância tem origem nos capacitores utilizados para retificação no secundário do TF. Por se tratarem de capacitores com valor elevado a impedância tem características capacitivas apesar de funcionar como um transformador.

Seguindo com os ensaios no analisador, o próximo passo foi obter a indutância magnetizante do primário  $L_{mag}^{prim}$ , que encontra-se em destaque

na Figura 14, tendo o valor de  $4,52mH$ .

Figura 14 – Indutância Magnetizante Medida no Componente Utilizado

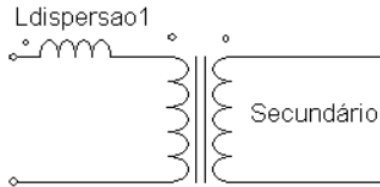


Fonte: Autor.

Para estimar o ganho foram realizados dois ensaios, um pelo primário e outro pelo secundário. Sabe-se que o aparelho mede as impedâncias de dispersão  $L_{disp}$  do componente como um todo, estando portanto incluídas as medidas do primário  $L_{disp}^{prim}$  e do secundário  $L_{disp}^{sec}$  no valor. Para a realização desse ensaio, portanto, curto-circuita-se o enrolamento onde não está sendo tomada a medida e mede-se o valor da indutância série obtida. Sabe-se também que curto circuitando o primário será obtido o valor visto por esse enrolamento e ao realizar o ensaio pelo secundário será obtido o valor visto pelo secundário. Ambos valores correspondem ao mesmo parâmetro  $L_{disp}$ , porém por dois pontos de vista diferentes. Ao utilizar a relação de transformação  $n$  do componente pode-se refletir o valor do parâmetro para ambos os enrolamentos. Nesse caso, sabe-se o valor do parâmetro nos dois enrolamentos e deseja-se obter a relação de transformação.

A indutância magnetizante  $L_{mag}$  de ambos os enrolamentos é muito superior à de dispersão e portanto, pode ser desconsiderada nos valores obtidos para essa análise. Primeiramente curto-circuitou-se o secundário e obteve-se o valor da indutância de dispersão visto pelo enrolamento primário  $L_{disp}^1$ , o qual é composto por uma parcela  $L_{disp}^{11}$  e uma parcela  $L_{disp}^{21}$ , que são respectivamente a parcela de dispersão do primário vista pelo primário e a parcela de dispersão do secundário vista pelo primário. O ensaio em questão encontra-se esquematizado na Figura 15.

Figura 15 – Ensaio Realizado pelo Enrolamento Primário

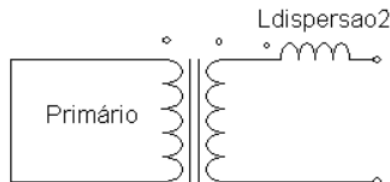


Fonte: Autor.

Em sequência curto-circuitou-se o primário e executou-se a mesma medida, porém agora vista pelo enrolamento secundário  $L_{disp}^2$ . Aqui o valor obtido também corresponde a duas parcelas, uma parcela  $L_{disp}^{12}$  e uma parcela  $L_{disp}^{22}$ , que são respectivamente a indutância de dispersão do primário vista pelo secundário e a parcela de dispersão do secundário vista pelo secundário. O ensaio em questão encontra-se esquematizado na Figura 16.

Para os cálculos indicados a seguir considerou-se que metade da dispersão do equipamento está em cada enrolamento, ou seja,  $L_{disp}^{prim}$  é igual a  $L_{disp}^{sec}$  em ambos os ensaios. Dessa maneira, o valor mostrado no visor do analisador de impedâncias correspondia a soma das duas partes.

Figura 16 – Ensaio Realizado pelo Enrolamento Secundário

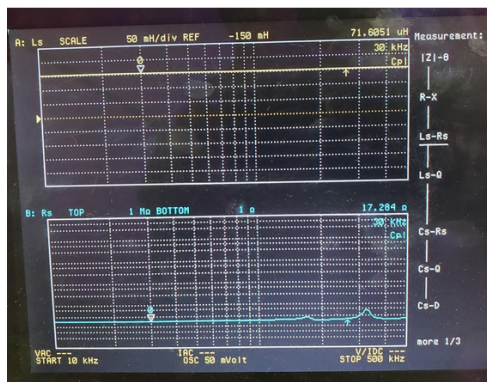


Fonte: Autor.

Na Figura 17 temos um exemplo de medição da impedância  $L_{disp}^1$  quando o ensaio é realizado pelo enrolamento primário, resultando no valor de 71,60uH que corresponde à soma de  $L_{disp}^{11}$  e  $L_{disp}^{21}$ .



Figura 17 – Indutância de Dispersão medida no Componente Utilizado



Fonte: Autor.

Para obter-se o sistema de equações a partir do qual poderá ser calculada a relação de transformação  $n$ , é preciso rebater o valor da dispersão do secundário para o primário no primeiro ensaio e, da mesma maneira, do primário para o secundário no segundo ensaio. Isso pode ser feito utilizando a relação de transformação elevada ao quadrado. Na Figura 18 é mostrada a relação comentada anteriormente entre as impedâncias.

Figura 18 – Ensaio realizado em Ambos os Enrolamentos



Fonte: Autor.

Como já foi dito, considera-se que metade da dispersão está em cada enrolamento, portanto  $L_{disp}^{11}$  tem o mesmo valor que  $L_{disp}^{21}$ , assim como  $L_{disp}^{12}$  e  $L_{disp}^{22}$ . Com as considerações feitas chega-se ao seguinte sistema de equações ao igualar o valor visto pelos dois enrolamentos:

$$L_{disp}^1 = L_{disp}^{11} + L_{disp}^{21} \cdot n^2 \quad (3.1)$$

$$L_{disp}^2 = \frac{L_{disp}^{12}}{n^2} + L_{disp}^{22} \quad (3.2)$$

Assim, ao adotar as considerações anteriormente destacadas, chega-se na simplificação:

$$L_{disp}^1 = L_{disp} \cdot (1 + n^2) \quad (3.3)$$

$$L_{disp}^2 = L_{disp} \cdot \left(1 + \frac{1}{n^2}\right) \quad (3.4)$$

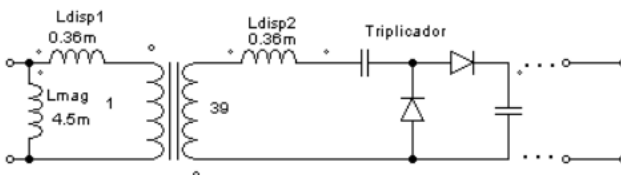
Assim, tendo posse dos valores de  $L_{disp}^1$  e  $L_{disp}^2$ , basta resolver o sistema para chegar numa estimativa da relação de transformação. Os valores obtidos nos ensaios e a solução do sistema encontram-se na Tabela 3. Ao final, chegou-se em resultados coerentes com o esperado para ambos valores, justificando as simplificações e considerações feitas.

Tabela 3 – Resultados dos Ensaios

Dispersão vista do Primário ( $L_{disp}^1$ ) [ H ]	71,6 $\mu$
Dispersão vista do Secundário ( $L_{disp}^2$ ) [ H ]	108,25 m
Relação de Transformação	38,88
Indutância $L_{disp}$ [ H ]	0,72 m

Por fim, chegou-se ao modelo para o TF em questão mostrado na Figura 19, onde foi levado em consideração uma etapa de ganho e retificação na saída do enrolamento secundário de acordo com Rahim (1989).

Figura 19 – Modelo Equivalente do Componente



Fonte: Autor.

### 3.3 REATOR ELETRÔNICO AUTO-OSCILANTE

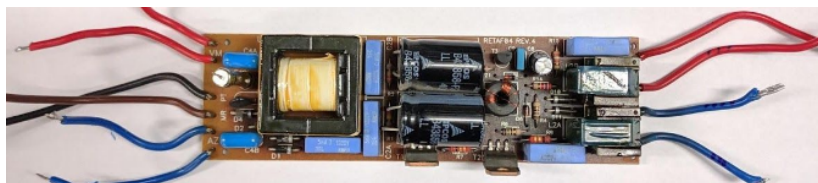
#### 3.3.1 Preparo do Reator Eletrônico

##### 3.3.1.1 Identificação dos Terminais e Conexões

Novamente, para a utilização do reator algumas medidas de preparo tomadas antes de sua conexão como fonte foram tomadas. Desde a identificação de modelos diferentes e sua categorização até algumas modificações na placa impressa para remover ou adaptar componentes. O primeiro passo sempre é identificar modelo e características de cada reator. As principais diferenças entre modelos encontram-se no desenho da placa e na escolha de componentes. Modelos mais robustos de marcas conhecidas empregam leiautes mais caprichados e organizados bem como componentes de melhor qualidade.

No geral, há dois ou três fios nos modelos bivolt destinados para alimentação do reator e outros oito fios para conexão às lâmpadas, os quais destinam-se a suprir duas lâmpadas. Portanto, podemos conectá-los em paralelo para utilizar toda a potência disponível no reator para a aplicação. Na Figura 20 podemos ver a placa de um REAO mostrando todos os cabos e conexões citados.

Figura 20 – REAO com Todas as Conexões



Fonte: Autor.

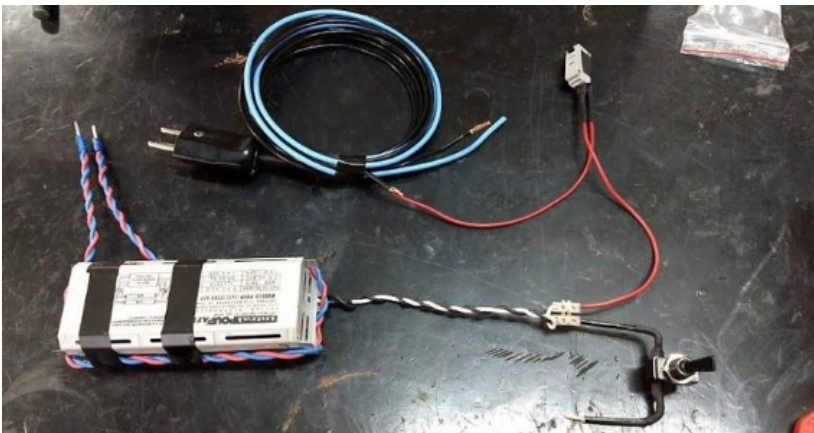
Dos fios empregados na alimentação da carga, temos quatro utilizados para o pré-aquecimento dos filamentos das lâmpadas, os quais forneceriam uma baixa tensão que não pode ser aproveitada. Portanto, o primeiro passo é removê-los da placa. Para identificação dos terminais é utilizado um multímetro Minipa ET2042-D. Conecta-se ele ao reator em vazio e analisa-se a tensão entre todos os contatos. Como resultado, obtêm-se quatro pares de conexões, dos quais temos interesse nos dois que fornecem a maior tensão. Identificados os quatro fios desejados,

dentre os quais temos uma tensão na casa dos 120 V a vazio, fixa-se neles um conector.

Liga-se então o reator com carga resistiva para checar o funcionamento do sistema em potência nominal. É utilizada uma resistência de 500  $\Omega$  para o teste. Ao comprovar-se o funcionamento do reator com a carga resistiva ele encontra-se pronto para a operação real.

Por fim, conecta-se na alimentação do reator um cabo de tomada comum de três vias com um interruptor e um *micro-switch* para operação do protótipo. Ao conectar o reator na rede pode-se controlar o acionamento dele com os interruptores instalados. Também é inserido um fusível adicional dimensionado para duas vezes a corrente nominal do reator, tendo em vista que muitas vezes já há um fusível impresso na placa para prevenção de faltas com valor de corrente superior. Podemos ver uma imagem da conexão final do reator após seu preparo com todos os componentes inseridos no circuito na Figura 21.

Figura 21 – Circuito do Protótipo



Fonte: Autor.

### 3.3.1.2 Caracterização dos Diferentes Modelos

Foram analisados diferentes reatores com variadas potências e frequências de operação e nesta seção serão apresentados alguns modelos desmontados para estudo. Serão discutidas as particularidades de cada modelo, bem como as diferenças e características de projeto feitas por cada empresa. Foram estudados reatores de quatro diferentes marcas: ECP, INTRAL, OSRAM, e TRANCIL, sendo todos os modelos analisados eletrônicos, auto-oscilantes, de partida instantânea e bivolt.

A estrutura geral dos reatores é basicamente a mesma em todos os casos, seguindo a topologia do circuito apresentado anteriormente. Pode ser visto nas imagens das Figuras 22, 25 e 26 que a principal diferença entre os modelos está na escolha de componentes e circuitos de proteção adicionais, tendo apenas alterações de um modelo para outro dependendo de parâmetros como potência e frequência de operação.

Quanto aos componentes magnéticos do reator, no geral são encontrados quatro: dois indutores de filtro simétricos, um filtro de entrada e um transformador toroidal saturável.

Quanto aos capacitores: são dois ou quatro eletrolíticos de alta tensão para o barramento CC, cerâmicos para pequenas capacitâncias no decorrer do circuito e capacitores de filme para o filtro de saída do circuito. O capacitor série  $C_s$  é dimensionado para a tensão do barramento e o capacitor paralelo  $C_p$  para altas tensões (1,2kV ou 1,6kV), uma vez que deve suportar a ignição da lâmpada.

A retificação da rede é feita utilizando uma ponte completa de diodos. São encontrados também dois diodos Zener que regulam a tensão de base dos transistores bipolares (BJT) e um DIAC para a partida do sistema. As chaves utilizadas nos modelos analisados são todas BJT's, mas sabe-se de modelos que utilizam MOSFET's para o chaveamento. O uso de MOSFET's implicaria em um transformador saturável com mais voltas ou um diodo Zener de maior tensão para regular  $V_{gate}$ , uma vez que são necessários níveis maiores de tensão Gate-Source para o acionamento desses componentes. Ao passo que temos de duas a cinco espiras em cada secundário para BJT's, seria necessário de dez à quinze espiras caso fossem utilizados MOSFET's. Talvez isso, aliado ao custo e disponibilidade na época explique o motivo do maior uso de bipolares, tendo em vista suas limitações em relação aos transistores por efeito de campo. Por se tratar de um circuito de comutação eficiente, não há grandes perdas nesse processo, o que justifica o uso de MOSFET's para o projeto.

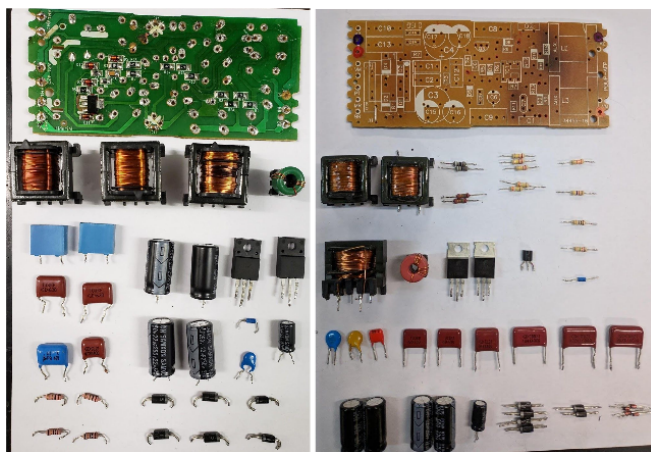
Para as resistências do circuito são utilizados resistores de um quarto de

watt com os mais variados valores, desde alguns  $M_{\Omega}$  até a casa dos  $M_{\Omega}$ . Resistores de base e de emissor geralmente tem os menores valores do circuito, sendo os que mais aquecem no sistema. Pode-se observar marcas de aquecimento nos locais onde ficam esses componentes e os indutores de saída em algumas das figuras desta sessão.

Agora serão discutidas algumas diferenças entre todos os modelos analisados. Pôde-se ver designs mais e menos eficientes dentre todos os analisados, bem como boas práticas e soluções de projeto que no geral otimizaram bastante alguns reatores em relação à outros. Como todos os modelos analisados são dimensionados para o mesmo nível de potência, pode-se fazer uma comparação direta entre eles. Também será comentado um pouco sobre os componentes utilizados no projeto dos reatores de diferentes marcas, um pouco sobre escolhas de projeto de cada empresa e sobre os desempenhos dos reatores. Os modelos selecionados para teste em protótipo foram estudados mais a fundo. Eles foram escolhidos com base na disponibilidade, frequência de chaveamento e nível da tensão de ignição. Ao final foi definido o melhor reator para servir de alimentação à fonte de plasma com base nesses parâmetros.

Iniciando pela empresa INTRAL, temos modelos de 16 W, 32 W e 32 W compactos. Os modelos não compactos compartilham a mesma placa mostrada na Figura 22 (esquerda), diferindo apenas em alguns componentes do circuito. Já o modelo “Poup” da Figura 22 (direita) tem roteamento bem diferente com a utilização de vários componentes SMD na placa, o que ajuda a diminuir o volume final do REAO. Ambas as linhas da marca possuem circuito de auto-desligamento utilizando um transistor lógico, o qual tem capacidade de abrir o barramento DC quando a temperatura limite é atingida, interrompendo o funcionamento o circuito. Mesmo sendo um circuito relativamente simples que proporciona uma camada de segurança adicional ao projeto, o auto-desligamento não estava presente no projeto de todas as outras marcas. Também vale lembrar que os modelos dessa marca tem partida instantânea, isto é, sem pré-aquecimento dos filamentos da lâmpada conectada a ele. O pré-aquecimento dos filamentos não só facilita a ignição da lâmpada (BAIRANZADE, 2009), como também aumenta sua vida útil e a potência ativa do sistema (LOPES, 2010). No entanto, apesar de ignorar o tempo de pré-aquecimento dos filamentos, uma tensão contínua de alguns volts sempre é aplicada neles, conservando parte desses benefícios.

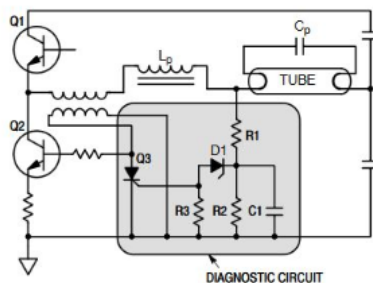
Figura 22 – Componentes e PCB dos Reatores INTRAL 16W, 32W, 32W Compacto



Fonte: Autor.

Para explicar o funcionamento do circuito de auto-desligamento podemos usar como exemplo o circuito de segurança proposto em Op Het Veld (2000), mostrado na Figura 23. Nele a rede oscilante é desligada aterrando a base do transistor inferior. Isso pode facilmente ser realizado com um transistor que descarrega a corrente de base do bipolar inferior da mesma forma que no projeto desses reatores.

Figura 23 – Circuito de Proteção por Autodesligamento



Fonte: BAIRANZADE, 2009

Nas normas de segurança há apenas a exigência de um fusível para a operação em regime permanente, servindo para tirar da rede o circuito quando uma falta ocorra. Entretanto, circuitos de segurança mais sofisticados também podem ser empregados para proteção do reator. Aqui nos reatores da INTRAL, o fusível de segurança é impresso na placa, barateando o custo e facilitando o design. Dessa forma, pode-se investir algum recurso adicional em outras alternativas para segurança.

O estágio de retificação é uma constante em todos as marcas, sendo feito o uso de diodos como o 1N4937 ou o IN4007, pois não são necessárias grandes preocupações com correntes de partida ou perdas de condução e comutação para investir em componentes mais robustos. Os capacitores empregados no barramento contínuo também não variam muito como dito anteriormente. Eles estão dimensionados para aguentar a tensão do barramento, não havendo restrições adicionais por causa da potência relativamente baixa do sistema. Os capacitores eletrolíticos empregados no projeto da INTRAL são de 250 V, portanto tomou-se a decisão de conectar dois componentes em série para atender aos requisitos de tensão. Essa escolha talvez tenha sido tomada por custar menos, porém também pode ser decorrente da necessidade de um ponto médio no barramento, para operação com outra tensão de alimentação.

A escolha de diodos Zenner também é uma constante em todas as marcas, sendo empregados os componentes 1N4740, os quais vem com tensão  $V_{zener}$  de 10 V e são dimensionados para  $\frac{1}{2}W$ . Outra constante em todos os projetos é o DIAC escolhido, trata-se de modelo DB3 com tensão de gatilho de 32 V e capacidade máxima de corrente 1 A.

Todas as chaves do circuito, apesar de certa variedade na escolha dos modelos, todas as opções têm limites e parâmetros parecidos. Temos componentes com tensão coletor-emissor de 400 V e capacidade de 4 A para corrente de coletor. No modelo compacto vemos o encapsulamento T0-220HF ao passo que nos comuns temos o TO-220 simples.

Falando um pouco dos magnéticos do circuito, vemos no projeto desses modelos um bom capricho na montagem dos mesmos. Todos os indutores estavam embebidos em resina para melhorar sua estabilidade mecânica, isolamento e troca térmica. Novamente um padrão em todos os modelos, temos dois indutores de saída na casa de 2 a 3 mH e um indutor na entrada de energia de valor maior, na casa de 7 a 10 mH, também dependendo do design. Em todos os outros reatores analisados temos uma quantidade semelhante de indutores. A maior diferença está no projeto do magnético, escolha de núcleo, fio e entreferro.

Passando para os modelos da marca ECP já temos outro tipo de carcaça. Ao passo que nos reatores anteriores havia uma carcaça metálica,

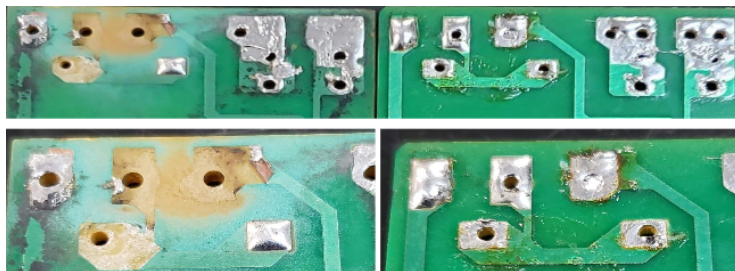


em modelos da ECP ela é feita de plástico, o que dispensa isolamento adicional nos semicondutores, além de facilitar o uso de um dissipador metálico. Aqui também temos reatores de partida rápida, ou seja, que não aquecem os filamentos da lâmpada antes da ignição. Isso significa uma demanda de tensões maiores para a ionização inicial do gás dentro do tubo (LOPES, 2010).

Nos modelos da ECP também temos um fusível impresso na placa, que como dito anteriormente diminui o custo, porém isso torna o reator de certa maneira “descartável”. O fusível impresso trata-se de uma trilha mais fina que as outras, impressa logo depois da entrada de energia. Por ter largura menor, essa trilha é feita para aguentar uma capacidade de corrente mais baixa que as outras. Portanto, no caso de uma falta, a corrente passando pelo circuito destruirá a trilha exatamente nesse ponto, operando como um fusível. Passada a falta, o reparo do circuito não pode ser feito substituindo um componente, sendo necessária uma modificação mais elaborada na placa com a adição de fios no lugar da trilha destruída. Quase sempre que ocorre uma falta suficiente para rompimento da trilha fusível outros componentes também são danificados, porém pode haver uma situação onde apenas a troca do fusível resolveria o problema. Este cenário fica inviabilizado optando pelo fusível impresso.

Houveram casos em que os diodos da ponte retificadora e as chaves do circuito queimaram durante a falta. Entretanto, houveram casos onde ao restaurar a trilha desintegrada o circuito voltou a operar normalmente. Podemos ver na Figura 24 um fusível impresso em destaque depois de uma falta ao lado de uma placa com o fusível intacto.

Figura 24 – Fusível Impresso na PCB

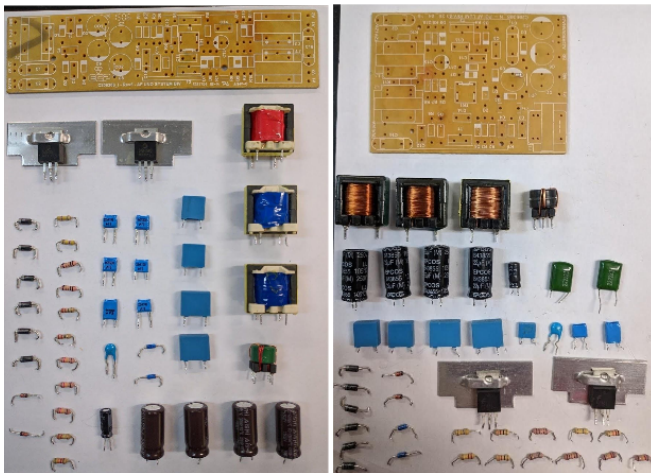


Fonte: Autor.

Outra diferença no projeto é quanto à dissipação térmica. Como dito anteriormente, por dispensar uma carcaça metálica, o uso de dissipadores metálicos é uma boa opção aqui. O dissipador é uma chapa de alumínio acoplada ao bipolar e não é utilizada pasta térmica ou isolador para a fixação do componente. Mesmo assim, não foi percebido o aquecimento deles ainda que em operação prolongada, portanto acredita-se que tenha sido um dissipador bem dimensionado.

Em sequência, na Figura 25, encontram-se os dois modelos de reatores estudados. Em comparação com os outros modelos é visível um design mais organizado e otimizado, sendo esses os reatores de menor volume dentre todos. Também pode-se notar a ausência de marcas de aquecimento observadas em outras placas, o que também indica um projeto bem executado.

Figura 25 – Componentes e PCB dos Reatores ECP 32W e 36W



Fonte: Autor.

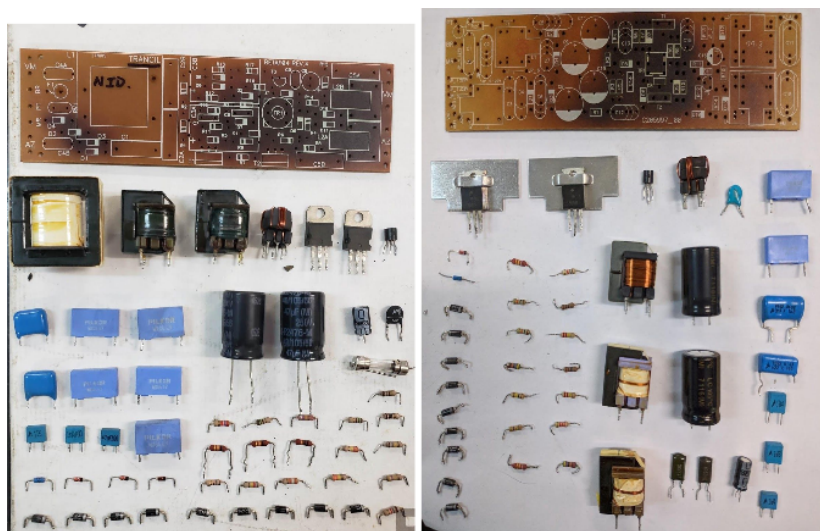
Nos demais componentes, também temos escolhas bem similares às de outros modelos analisados, tanto em magnéticos quanto em capacitores, diodos e resistores. A maior diferença dentre as marcas é na frequência de operação, pois temos uma frequência na casa dos 50 kHz para os modelos da ECP ao passo que para os da marca INTRAL fica na casa dos 30 kHz.

Por fim, temos os últimos modelos analisados, expostos na Figura 26, os quais foram desmontados apenas para estudo uma vez que já estavam

inoperantes. Pode-se notar que nos últimos dois modelos temos visíveis marcas de aquecimento nas placas, ocasionadas pela operação prolongada. Outra possível causa para esse problema pode ser os magnéticos, que foram projetados com núcleos menores em ambos modelos. Isso faz com que os componentes tenham uma elevação maior de temperatura para as mesmas perdas.

No reator da Figura 26 (esquerda) vemos tanto o circuito de autodesligamento com transistor quanto outras camadas de segurança, como fusível não impresso e NTC para limitar a corrente de partida da lâmpada.

Figura 26 – Componentes e PCB dos Reatores TRANCIL 32W e OS-RAM 32W

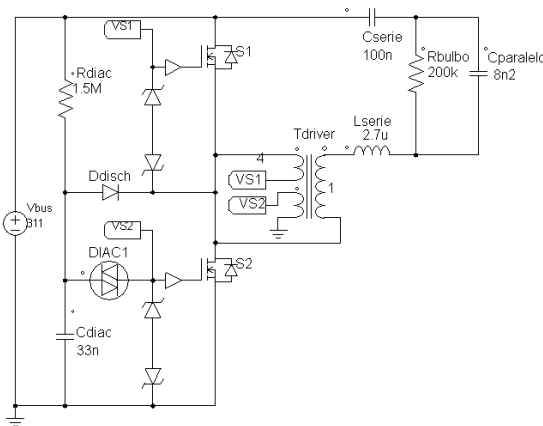


Fonte: Autor.

### 3.3.2 Simulações Computacionais

Aqui serão discutidas algumas simulações simples que foram realizadas utilizando o software PSIM com o modelo do circuito de um REAO mostrado na Figura 27. O intuito da simulação é analisar a ressonância e a frequência de operação do reator por si só, já que a adição do transformador e do eletrodo traria muitas incertezas ao processo. Estimar a carga do reator para quando ele opera na fonte de plasma é um processo complicado, pois além de depender do transformador e dos seus componentes internos, depende também de todo o sistema de eletrodos montado para a fonte e de características do plasma. Parâmetros como dimensões do eletrodo, materiais envolvidos no tratamento, fluxo de gás e atmosfera influenciam fortemente o processo. Dessa maneira, resolveu-se simular apenas o funcionamento do reator com uma carga resistiva emulando uma lâmpada fluorescente quando acesa. O objetivo da simulação foi ter uma noção da frequência de oscilação e de como o transformador saturável atua no processo de acionamento dos transistores.

Figura 27 – Circuito Simulado no PSIM



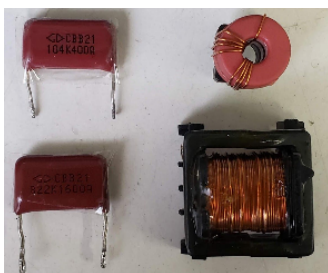
Fonte: Autor.

Para isso observou-se as formas de onda na base dos BJT's, onde espera-se uma onda quadrada na frequência de operação do circuito. Pode-se mudar um pouco a frequência de operação do conjunto adicionando

uma impedância adicional em paralelo aos diodos. Com isso altera-se a inclinação da onda quadrada gerada pelo transformador, aumentando ou diminuindo um pouco o período ativo de cada bipolar, o que pode ser empregado no controle da potência entregue à carga (LOPES, 2010). Também verifica-se a tensão nos terminais da lâmpada fluorescente, que terá frequência similar à do plasma DC pulsado gerado na saída da fonte. Com isso, espera-se ter uma noção geral do funcionamento do circuito.

Foram realizadas as simulações do circuito com base nos componentes do reator INTRAL 32 W mostrados na Figura 28, isto é: Capacitor série  $C_s$  com 100 nF; Capacitor paralelo  $C_p$  com 8,2 nF; Indutor série  $L_s$  com 2,8  $\mu$  H; e transformador saturável  $T_s$  com quatro espiras por derivação.

Figura 28 – Componentes do Filtro LCL Simulados



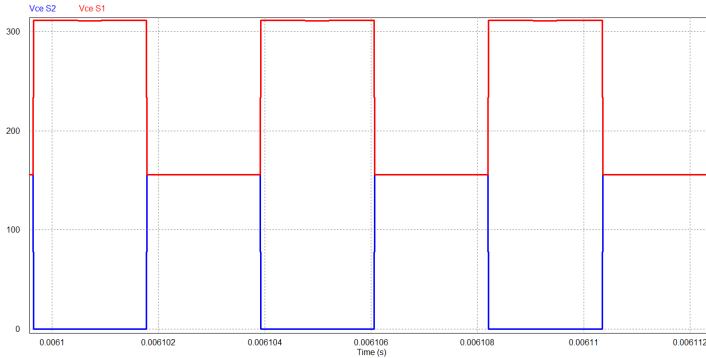
Fonte: Autor.

Por causa do acoplamento magnético invertido nos secundários do transformador toroidal temos formas de onda complementares nas bases dos bipolares, o que impede um eventual curto-circuito no braço do inversor. Uma vez que o pulso para o BJT superior é gerado em decorrência da ausência do pulso para o inferior, temos uma garantia da operação segura do circuito.

Na Figura 29 mediu-se a tensão coletor-emissor de ambos BJT's. Temos em azul a tensão do bipolar inferior  $S_2$  e em vermelho a do superior  $S_1$ . Pode-se notar que quando em aberto, a tensão máxima sob a qual estarão submetidos é a de barramento, o que justifica os limites de tensão escolhidos para os componentes em projeto. As formas de onda são mostradas em detalhe na Figura 29. Pode-se notar que as formas de onda de comando geradas pela oscilação do circuito e sobre os BJT's têm a mesma frequência uma vez que são dependentes, isto

é, a oscilação gera o chaveamento e o chaveamento gera a oscilação.

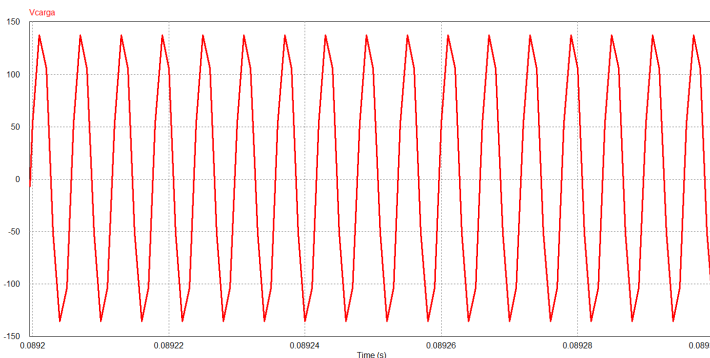
Figura 29 – Tensão Coletor-Emissor dos Bipolares S1 e S2



Fonte: Autor.

A seguir, temos a tensão nos terminais do reator que alimentariam o bulbo fluorescente. Essa forma de onda é a utilizada como fonte para o primário do transformador Flyback. Aqui temos em detalhe a forma de onda da tensão na saída do reator, Figura 30, onde podemos ver claramente a oscilação do circuito em 33 kHz, tendo os mesmos níveis de tensão e frequência medidos experimentalmente.

Figura 30 – Tensão nos Terminais da Lâmpada em Detalhe



Fonte: Autor.

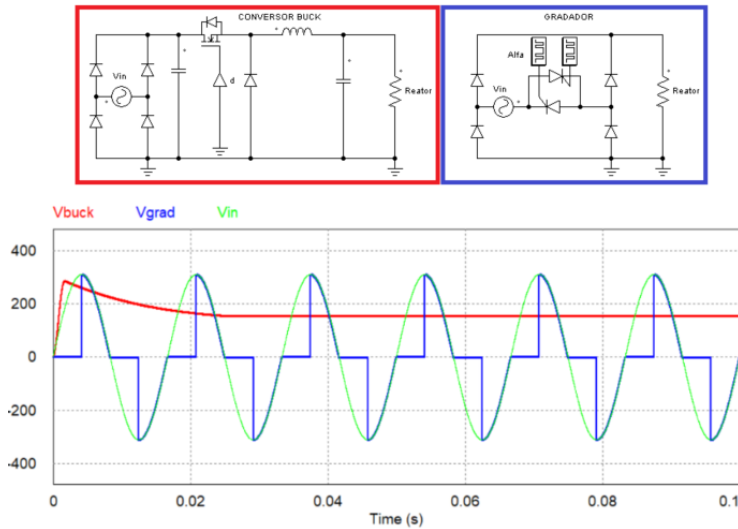
### 3.3.3 Controle de Potência

Para o sistema de controle da potência de saída do protótipo foram empregadas duas diferentes abordagens. A primeira e mais simples, consistia em atuar na parte alternada do circuito com um circuito gradador. A segunda e mais elaborada abordagem foi acoplar um conversor CA-CC para controle da tensão de barramento da fonte. Ambas baseiam-se em (CHEONG;BARSOUM, 2010) pois buscam controlar a potência entregue à carga pelo reator via tensão de barramento. Ainda destaca-se que o controle da potência do reator pode ser feito de outras formas, citando como exemplo o trabalho de Lopes (2010), o mesmo é feito variando a frequência de operação do reator inserindo uma impedância variável na base do transistor. Nesse trabalho optou-se pela primeira alternativa de controle pois inicialmente poderia ser validada de forma mais simples com o circuito gradador, dispensando modificações no circuito do REAO.

Com o circuito gradador a ideia era baixar o nível eficaz de tensão na entrada da fonte, baixando assim todos os níveis de tensão do circuito em questão. A conexão do gradador ao circuito é exemplificada na Figura 31. Uma vez que o nível de tensão do barramento CC do circuito-fonte é gerado pela retificação da onda de entrada, o valor deste é totalmente dependente da variável  $V_{in}$ . E como o barramento contínuo da placa corresponde à tensão a qual os transistores chaveiam quando em operação, este está relacionado com a tensão de saída do reator. A tensão de saída é a variável amplificada para geração do plasma DC, portanto, controlando-a pode-se controlar a alta tensão do plasma.

Com o conversor CA-CC a ideia é basicamente a mesma: baixar a tensão do barramento contínuo da placa, entretanto, de maneira diferente. Invés de abaixar a tensão de entrada foi desenvolvido um conversor capaz de operar com ciclo de tarefa variável, portanto, capaz de dar variados ganhos na tensão de entrada. Por exemplo, ao operar com um ângulo de disparo  $\pi/2$  no gradador obtém-se uma tensão com nível eficaz de aproximadamente metade do valor de pico padrão da rede (BARBI, 2006). Trabalhando com o conversor BUCK por exemplo, pode-se operar com um *duty-cycles* de 0,5 para obter um resultado similar, ainda com a vantagem de minimizar as distorções harmônicas dimensionando corretamente o capacitor de entrada e realizar o PFC da entrada (WEI; BATARSEH, 1998). Formas de onda de ambas abordagens expostas encontram-se na Figura 31 para destacar o apresentado nesse parágrafo.

Figura 31 – Comparação do controle de Tensão no Barramento Gradador vs Conversor CC-CC



Fonte: Autor.

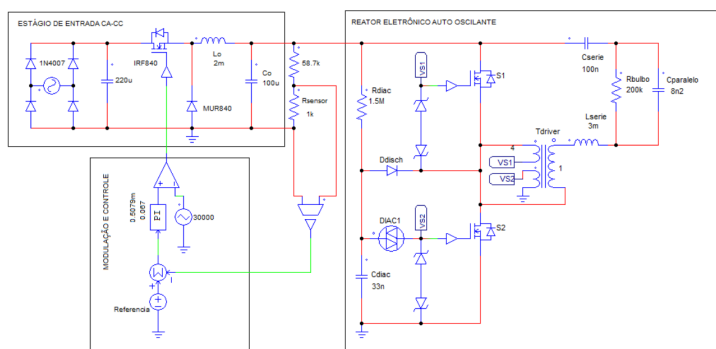
Juntando uma entrada retificada da rede elétrica com um conversor estático não isolado chegamos no circuito desejado. Há na literatura inúmeras opções de conversores CC-CC adequados para a situação. Todas as topologias que podem funcionar como abaixadoras teoricamente provam-se adequadas para reduzir a potência do plasma, entretanto, outras variáveis podem ser levadas em conta. Primeiramente, deseja-se que o conversor opere inerentemente em modo de Condução descontínua, ou seja, sua corrente deve se anular dentro de um período de comutação (BARBI, 2006). Deseja-se também uma saída em corrente facilitando associá-la diretamente com a saída do circuito. Após analisadas algumas topologias, optou-se pelo conversor BUCK, pois é o com menor número de magnéticos, menores esforços de tensão e corrente sobre os interruptores e mais simples de se projetar. Utilizando apenas um elemento magnético e um interruptor ele exige o menor esforço de projeto dentre as opções disponíveis, além de ser um conversor muito simples de se implementar uma malha de controle direta (COELHO, 2020).

Depois de elaborado o projeto foi feita uma PCB para o o conversor e montado um protótipo para testes iniciais, mais detalhes sobre o pro-



jetos são apresentados nos Apêndices A e B do trabalho. Para acoplar o conversor a uma placa de reator auto-oscilante remove-se desta os componentes responsáveis pelo estágio de entrada e conecta-se o barramento na saída do conversor. O esquemático completo da fonte de tensão junto do conversor CA-CC é exposto na figura 32 e uma foto do protótipo na figura 33.

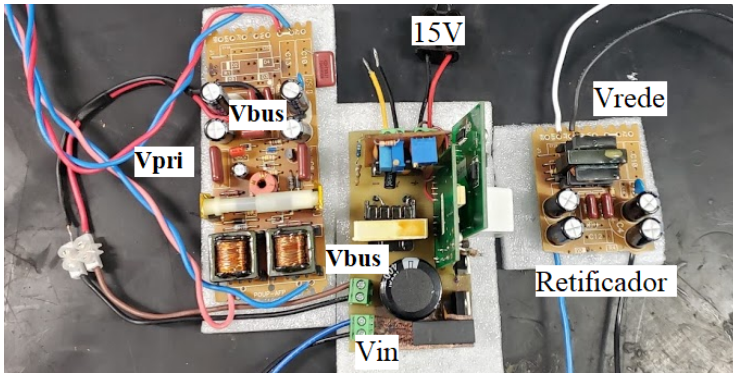
Figura 32 – Esquemático do Conversor CA-CC acoplado ao REAO



Fonte: Autor.

Após testes qualitativos observando a região de descarga do plasma e a superfície das amostras tratadas sob diferentes condições concluiu-se que o circuito gradador é uma boa alternativa para um controle rápido, simples, que dispensa projeto e pode ser obtido de forma barata. Com ele pode-se validar que o controle da potência da fonte pode ser feito partindo da tensão de barramento. O protótipo do conversor ainda encontra-se em desenvolvimento porém acredita-se que será o caminho escolhido para a versão final da fonte, tendo sido comprovado o método de controle. Conseguem-se controlar o plasma das duas maneiras, portanto, chega-se no mesmo *tradeoff* de tempo, preço e qualidade da maioria dos projetos na engenharia, por isso cabe ao projetista definir qual a melhor alternativa.

Figura 33 – Protótipo Conversor BUCK



Fonte: Autor.

### 3.4 APLICAÇÃO DO PLASMA ATMOSFÉRICO

A aplicação do plasma aconteceu em duas condições diferentes seguindo a linha de dois trabalhos desenvolvidos em parceria com o LABMAT. A primeira frente foi na aplicação de jatos de plasma em superfícies metálicas almejando a hidrofobicidade ou a hidrofilicidade. Já na segunda frente foram aplicadas descargas DBD em membranas poliméricas com o objetivo da modificação superficial em membranas de ultrafiltração para melhorar sua adsorção e vida útil. Ambos processos de aplicação estão descritos nesta seção.

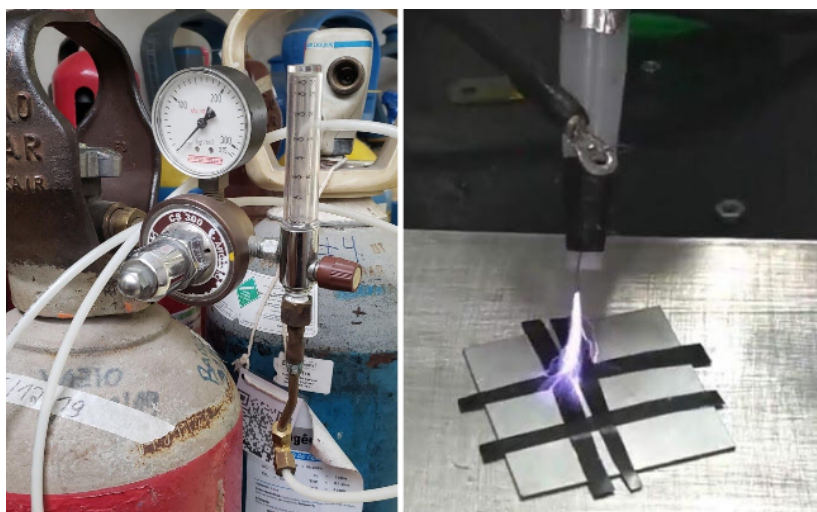
#### 3.4.1 Aplicação em Condutores Metálicos

Para a primeira frente foi desenvolvido um sistema para controle do gás, o qual poderia ser acoplado a diferentes cilindros. Ele é composto por uma válvula geral, um manômetro e um rotâmetro para controle de fluxo, mostrados na Figura 34 (esquerda). Na ponta da mangueira saindo do cilindro há um eletrodo conectado ao terminal da fonte que proporciona a alta tensão necessária para a ionização do fluido com o elemento em questão, Figura 34 (direita). O sistema de fluxo gasoso opera como uma pistola, a qual é passada pela superfície desejada, tratando-a com o gás ionizado do elemento químico desejado. Foram testados três elementos comuns na literatura: Argônio, Oxigênio, e

Flúor, tendo cada um deles um efeito diferente na aplicação. Para o Flúor utilizou-se o R134a, um gás empregado na refrigeração de compressores; para o Oxigênio a linha de ar comprimido do laboratório; e para o Argônio utilizou-se um cilindro comum de *Ar* industrial.

A aplicação foi realizada ora em toda a superfície teste, uma chapa de aço inox polida de 45x45mm, ora em partes específicas dela. Também na Figura 34 (direita) é mostrada uma aplicação do jato de plasma em uma amostra onde pode-se ver o fluxo do gás sendo utilizado.

Figura 34 – Sistema de Controle do Fluxo Gasoso



Fonte: Autor.

### 3.4.2 Aplicação em Membranas Poliméricas

Já para a segunda frente dispensou-se o sistema de gás e realizou-se os tratamentos com a atmosfera ambiente. Para implementação da barreira dielétrica entre o eletrodo de alta tensão e o terra foram testados materiais como teflon, cerâmica, vidro e chapas de madeira. Inicialmente utilizava-se uma chapa de teflon com espessura de um centímetro, porém optou-se por substituir o polímero por chapas de alumina de um milímetro. Com as chapas era possível fazer um ajuste fino na espessura da barreira e consequentemente na intensidade da descarga.

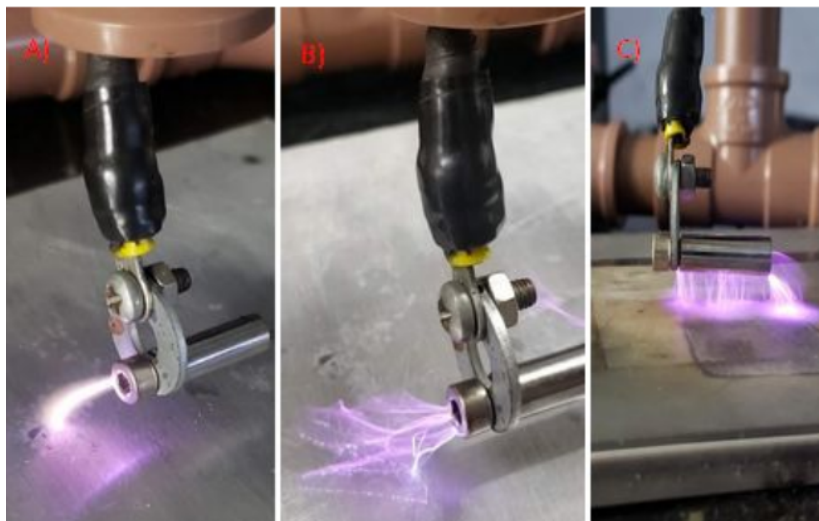
Ao final de um período de testes chegou-se na configuração de duas chapas de alumina como o suficiente para assegurar que a membrana tratada não se danifique. É importante manter uma barreira para que o plasma não seja quente, o que danificaria a estrutura de materiais termicamente sensíveis como os utilizados nessa etapa.

Para o eletrodo escolheu-se um formato cilíndrico assegurando uma área de tratamento maior e evitando cantos vivos. Para isso, utilizou-se um cilindro metálico de dimensões 2,5 cm de comprimento e 0,7 cm de diâmetro. Também foi montado um suporte plástico para manter o eletrodo a uma distância fixa da superfície alvo, Figura 36 (esquerda), a qual foi ajustada para aproximadamente 5 mm. A frequência do plasma DC pulsado nas aplicações foi cerca de 30 kHz, a tensão de saída da fonte estima-se estar na casa de 20 kV e a potência da descarga aproximadamente 25 W após o controle. Medições adicionais como formas de onda e valores mais precisos de potencial não foram tomadas devido à falta de equipamento para tal.

Uma vez removido o fluxo de gás o regime de arco é atingido de maneira mais imediata (LI; HUANG; WANG, 2009). Portanto, para conseguirmos uma descarga difusa, é necessário diminuir a potência da fonte ou adicionar barreiras dielétricas extras de forma a manter o regime desejado. Em sequência, na Figura 35, pode-se ver esse processo. Inicialmente na Figura 35-A é mostrada a descarga sem de fluxo de gás, onde apenas um arco é gerado. Quando com fluxo, na Figura 35-B, é obtida uma descarga difusa, similar à operação com barreiras dielétricas, como na Figura 35-C. Foi utilizado o mesmo reator e mesma potência para todas os cenários da imagem, alterando apenas outros parâmetros que influenciam o regime do plasma, como a barreira dielétrica e o fluxo gasoso no caso.

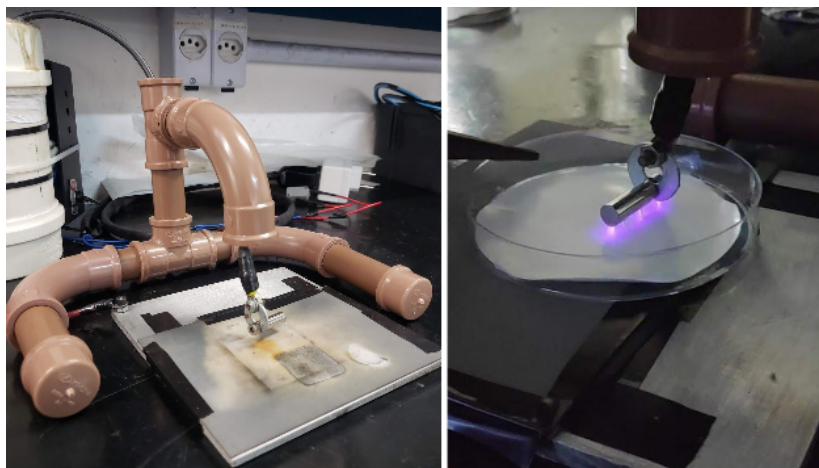
Portanto, como dito anteriormente, para permanecer no regime de descargas frias e difusas, foram inseridas duas placas de alumina entre o terminal de alta tensão e o terminal de terra, como pode ser visto na Figura 36. Também foi realizada a redução da potência da fonte empregando as técnicas discutidas no capítulo anterior. Nesta mesma figura é mostrada a aplicação na superfície polimérica de uma descarga difusa como desejado para o tratamento.

Figura 35 – Diferentes Regimes de Plasma Obtidos



Fonte: Autor.

Figura 36 – Suporte e Eletrodo Confeccionados para a Fonte



Fonte: Autor.

A aplicação do plasma era realizada passando cinco vezes o eletrodo pela superfície da amostra, com um tempo de aplicação inferior a um minuto. Foram tratados dois materiais diferentes: PVDF e PES. As fibras de PVDF eram mais sensíveis ao plasma. Dessa maneira, foi necessário reduzir ainda mais a potência da aplicação fazendo uso do circuito gradador na entrada da fonte. Como foi comentado na Sessão 3.3.3, o dimmer na entrada tem como função reduzir a tensão de alimentação do reator, fazendo com que o nível DC de seu barramento caia. Consequentemente, aparece um nível de tensão menor no primário do transformador Flyback proporcionando uma tensão menor no eletrodo de saída. Essa técnica de controle da potência foi adaptada de Cheong e Barsoun (2010) onde foi empregada para o controle da luminosidade gerada por um conjunto de lâmpadas fluorescentes, fazendo uso de um auto-transformador para regular a tensão de alimentação de seus reatores. Vale lembrar que esse nível de controle não propicia um ajuste tão preciso da potência para a aplicação, pois passando de um certo limiar no barramento DC do reator não há tensão suficiente para manter o plasma aceso. O método em questão também distorce a forma de onda de alimentação bem como introduz harmônicas indesejadas no circuito. Isso motivou o desenvolvimento do método mais preciso de controle da potência do reator utilizando um conversor estático CA-CC acoplado à placa do REAO.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 INTRODUÇÃO

Nesse capítulo apresenta-se alguns resultados da aplicação do plasma gerado pela fonte, seu impacto e modificações micro-estruturais em diferentes tipos de materiais, bem como uma breve discussão desses resultados.

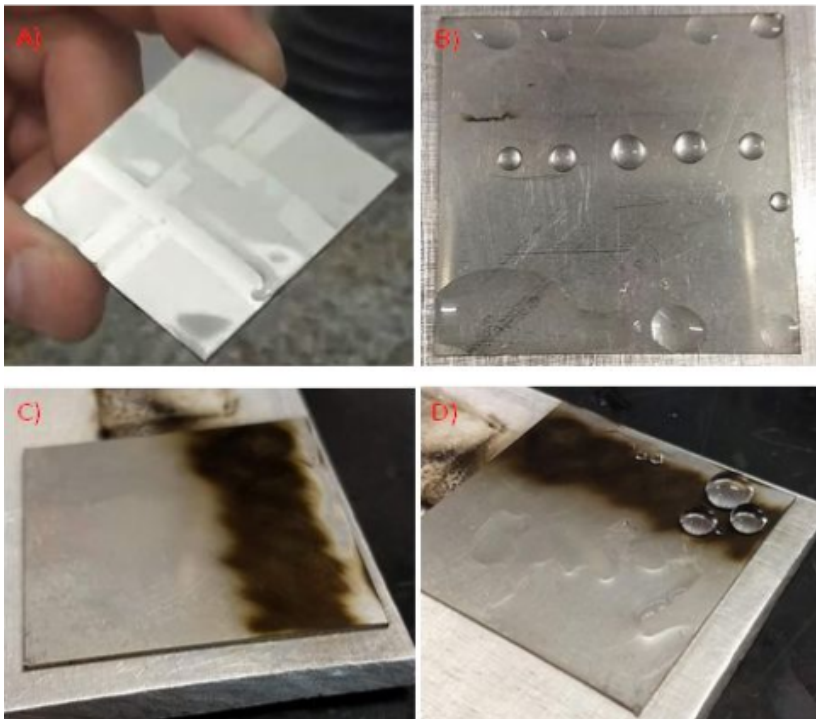
Como a aplicação do plasma foi empregada em duas diferentes linhas de pesquisa, os resultados do tratamento também foram analisados dessa maneira, sendo que resultados positivos foram obtidos em ambas. A análise dos resultados da primeira frente baseou-se na análise do ângulo de molhamento, observando a diminuição ou aumento do ângulo de contato da água na superfície das amostras. Na segunda frente, toda uma caracterização da superfície da membrana foi feita, desde o ângulo de molhamento da água até a caracterização microestrutural por microscopia eletrônica de varredura e de força atômica.

### 4.2 RESULTADOS OBTIDOS EM SUPERFÍCIES METÁLICAS

Para as superfícies metálicas, os resultados obtidos em todas as aplicações foram visualmente muito satisfatórios e o que era esperado foi alcançado. Para o Oxigênio e o Argônio obteve-se a hidrofiliabilidade na superfície, sendo o efeito com o uso do Argônio mais duradouro, mantendo-se por cerca de 12 horas. Para o Flúor obteve-se a hidrofobicidade, efeito que perdurou por meses devido ao filme de carbono formado sobre a superfície.

Na Figura 37 pode-se observar os diferentes efeitos obtidos com o tratamento. Em 37-A é possível ver uma amostra tratada com Oxigênio, onde a região exposta ao plasma saiu com uma molhabilidade muito superior, podendo-se notar um fino filme de água aderido nessas partes. O mesmo pode ser visto em 37-B, onde é mostrada uma amostra tratada com Argônio. A diferença nesse segundo caso é a duração do tratamento, que é superior. Em 37-C e 37-D temos duas chapas tratadas com R134a, onde pode-se notar um filme de carbono depositado na superfície da amostra. Para esses casos, a região tratada ficou com fortes propriedades hidrofóbicas, repelindo quaisquer gotas de água depositadas nessas áreas.

Figura 37 – Resultados Visuais da Aplicação em Superfícies Metálicas



Fonte: Autor.

A análise dos dados foi feita utilizando o goniômetro. Esse equipamento pinga uma gota de água na superfície e tira uma foto do seu perfil. Analisando o ângulo da superfície até a extremidade da gota, com o auxílio de software, é possível estimar a molhabilidade da superfície, sendo esse ângulo de molhamento a figura de mérito empregada para isso. Ângulos agudos correspondem à superfícies hidrofílicas, ou seja, nas quais a água se espalha melhor. Já ângulos obtusos correspondem a superfícies hidrofóbicas, onde a gota toma um formato esférico e não adere bem à superfície. Os dados brutos do goniômetro não foram compilados como na segunda etapa das aplicações, entretanto o resultado foi suficientemente satisfatório para seguir com o projeto adiante. Pode-se ver um exemplo dos resultados obtidos em fotos capturadas com o goniômetro da Figura 38. Na Figura 39 temos um exemplo destes resultados, onde observa-se as duas condições obtidas com o tratamento. Primei-



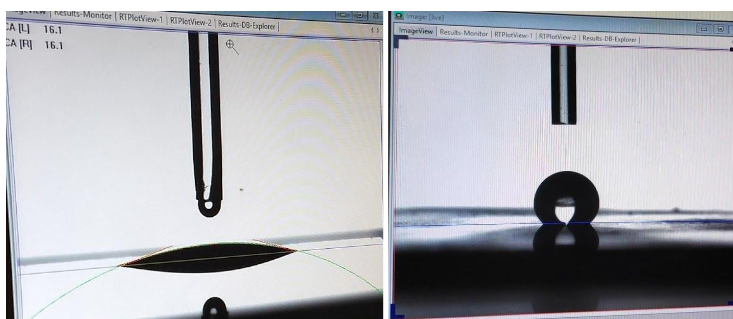
ramente, no lado esquerdo da figura, o de superfície hidrofílica obtida através da aplicação de descargas de Oxigênio. Em sequência, no lado direito, o exemplo de superfície hidrofóbica obtida da mesma maneira, porém com R134a como gás aplicado. Pode-se notar baixo ângulo de molhamento no primeiro caso ao passo que um valor mais obtuso é visto no segundo.

Figura 38 – Goniômetro KRUSS DSA 25



Fonte: Autor.

Figura 39 – Superfícies Hidrofílica e Hidrofóbica Vistas pelo Goniômetro



Fonte: Autor.

Em suma, pode-se dizer que os resultados para aplicação do plasma em

superfícies metálicas saiu como esperado, o que comprovou o funcionamento da fonte de plasma. Uma compilação de todos os resultados bem como um estudo do impacto deles para a eficiência na troca térmica de diferentes materiais estará disponível numa dissertação ainda em processo de finalização.

### 4.3 RESULTADOS OBTIDOS EM SUPERFÍCIES POLIMÉRICAS

O principal objetivo da aplicação do plasma nas membranas poliméricas é o de melhorar a capacidade de adsorção proteica, aumentando sua vida útil no processo de filtração. Isto é, reter mais moléculas de proteína na superfície das membranas por mais tempo. Como dito na sessão anterior, foram testadas duas membranas, uma composta de Fluoreto de Polivinilideno (PVDF) e outra composta de Polietersulfona (PES), ambas submetidas à tratamentos similares. Dessa maneira, esperava-se além da modificação superficial da amostra, uma diminuição no ângulo de molhamento da água, resultado similar ao obtido para as superfícies metálicas tratadas com Argônio ou Oxigênio.

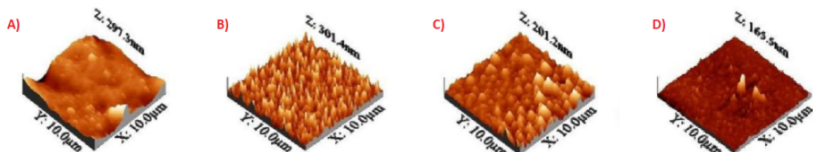
Para avaliação dos resultados foram empregadas algumas técnicas de análise superficial nos corpos de prova. Serão comentadas as três principais figuras de mérito utilizadas: microscopia eletrônica de varredura, microscopia de força atômica e visualização do ângulo de molhamento da água. Todas essas análises foram realizadas em uma parceria com o Laboratório de Separação com Membranas (LABSEM) junto de uma mestranda da pós-graduação em engenharia química, sendo que os resultados detalhados estarão disponíveis num artigo submetido junto com esse trabalho. Apresenta-se a seguir uma compilação dos resultados para as membranas de PVDF, porém resultados similares em todas as métricas foram obtidos para as membranas de PES também.

#### 4.3.0.1 Microscopia de Força Atômica

Nas figuras capturadas pela microscopia de força atômica (AFM) é possível ter uma ideia da rugosidade na superfície do material. Sabe-se que com tratamentos de plasma é possível aumentar a rugosidade de uma superfície momentaneamente (ASSUNCIÓN et al., 2003), (LINDNER et al., 2017). Assim sendo, como resultado imediato espera-se que seja visível um aumento na micro-rugosidade superficial do material tratado.

Na Figura 40 temos algumas imagens da mesma superfície de PVDF em três períodos diferentes. Na Figura 40-A temos uma superfície de controle; em 40-B a superfície no dia do tratamento, chamado Dia 0; em 40-C um dia após o tratamento; e em 40-D sete dias após o tratamento.

Figura 40 – Microscopia de Força Atômica da Superfície de Membrana de Ultrafiltração de PVDF Controle (a) e Avaliadas em Diferentes Dias de Exposição ao Tratamento com Plasma: d0 (b), d1 (c) e d7 (d)



Fonte: Compilação feita pelo Autor

Logo em sequência, na Tabela 4, estão expostos os dados de rugosidade em seus valores médios ( $R_a$ ) e RMS ( $RMS$ ), além de indicativos da amplitude máxima ( $R_t$ ) e mínima ( $R_v$ ) dos picos e vales nas imagens bem como o valor pico-a-pico de um vale até um pico ( $R_p$ ).

Tabela 4 – Micro Rugosidade de Superfícies à base de PVDF Tratadas com Plasma

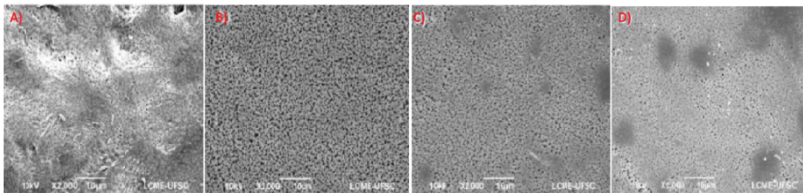
	$R_a$ (nm)	$RMS$ (nm)	$R_t$ (nm)	$R_v$ (nm)	$R_p$ (nm)
d0	45,32	57,72	250,72	451,48	451,58
d1	28,88	37,79	220,05	430,84	430,84
d7	31,41	41,04	170,70	428,92	428,92

Há estudos indicando que um aumento na potência de tratamento pode manter esses efeitos por um período maior (LINDNER et al., 2017), entretanto não optou-se por aumentar a potência de tratamento devido à fragilidade das amostras. Tanto pelas imagens da Figura 40 quanto pelos dados expostos na Tabela 4 pode-se concluir que obteve-se resultados positivos, visto que o aumento na rugosidade superficial de materiais tratados com plasma similar é comum. Esse aumento da rugosidade também é reforçado pelas imagens de microscopia eletrônica de varredura na próxima seção onde temos uma vista mais ampla da superfície.

#### 4.3.0.2 Microscopia Eletrônica de Varredura

Nessa sessão temos as imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) das superfícies de PVDF mostradas na Figura 41, desde o primeiro dia até o sétimo dia após o tratamento. Pode-se pensar nessa imagem como uma vista superior mais ampliada das imagens mostradas na Figura 40 e com isso é possível destacar uma área muito maior onde há o efeito da aplicação do plasma. Aqui também pode-se notar a suavização da superfície, onde no dia zero temos uma padronização de toda a região tratada correlacionada ao aumento da rugosidade mostrada anteriormente, a qual vai perdendo seu efeito lentamente. Essa modificação superficial também tende a voltar ao normal dentro de um determinado tempo, entretanto notou-se que mesmo no sétimo dia após a aplicação (Figura 41-D) ainda há um impacto visível do tratamento no material.

Figura 41 – Microscopia Eletrônica de Varredura da Superfície de Membrana de Ultrafiltração de PVDF Avaliada em Diferentes Dias de Exposição ao Tratamento com Plasma: d0 (a), d1 (b) e d7 (c)



Fonte: Compilação feita pelo Autor

### 4.3.0.3 Ângulo de Molhamento

Para as medidas do ângulo de molhamento era esperado uma diminuição no seu valor, o que tornaria a superfície mais propícia à adesão dos líquidos filtrados a base de água. Era esperado também a diminuição no valor do ângulo de molhamento, seguido pelo seu aumento até próximo do valor inicial dentro de um determinado período. Foi analisada uma superfície de controle junto de uma superfície tratada com plasma até sete dias depois da aplicação.

Na Figura 42 temos os resultados obtidos para a membrana de PVDF, os quais mostraram-se alinhados com o que era esperado. Pode-se notar uma grande diminuição no ângulo de contato inicial (d0) seguida pelo aumento de seu valor com a passagem do tempo (d1, d7), se estabilizando em um valor próximo do inicial no sétimo dia (d7). O ângulo medido vai da superfície até a reta destacada em vermelho, sendo que a superfície é dita mais hidrofílica quanto mais agudo for esse valor.

Figura 42 – Ângulo de Molhamento PVDF Controle (a) e Avaliado em Diferentes Dias de Exposição ao Tratamento com Plasma: d0 (b), d1 (c) e d7 (d)



Fonte: Compilação feita pelo Autor

De forma similar às imagens obtidas com o auxílio do goniômetro para as amostras metálicas, pode-se notar que menores ângulos de contato correspondem à um melhor espalhamento da água na superfície, o que concede propriedades hidrofílicas à mesma. Portanto, estes resultados são mais um indicativo de que o tratamento com o plasma causa o impacto desejado no material, comprovando o funcionamento da fonte desenvolvida nesta trabalho.



## 5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Buscava-se com esse trabalho colocar em prática o conhecimento adquirido no decorrer do curso de engenharia elétrica, o qual muitas vezes não supera a barreira teoria-prática. Vários conceitos acerca de circuitos elétricos, eletrônica de potência, eletromagnetismo e muitas outras áreas puderam ser vivenciados e trabalhados de maneira satisfatória. No geral, foi possível obter um ótimo conhecimento sobre plasma, circuitos osciladores, alta tensão e propriedades físicas de materiais, bem como prática no desenvolvimento de circuitos e protótipos.

Boas parcerias foram firmadas com o laboratório possibilitando novas pesquisas em áreas pouco abordadas pelo LABMAT. Não só em decorrência dos bons resultados obtidos, como também da dedicação e empenho com o projeto, tanto com o laboratório mencionado da engenharia mecânica quanto com o da química, desenvolveu-se uma boa relação que poderá render frutos no futuro.

Tendo em vista o apresentado, pode-se considerar o resultado final do projeto um sucesso, porém futuras modificações e adaptações ao protótipo ainda serão desenvolvidas. Para os próximos passos do projeto o maior objetivo é desenvolver uma estrutura mecânica de mais confiabilidade, pois tanto o suporte ao eletrodo quanto o eletrodo em si ainda precisam de ajustes para melhorar o uso do sistema. Além disso, um ponto no projeto elétrico que ainda precisa ser desenvolvido é um painel de medição, com um mostrador indicando algumas variáveis chave durante a operação, porque atualmente utiliza-se um multímetro para tal. O último ponto seria o desenvolvimento do novo estágio de entrada acoplado a um REAO, como descrito no trabalho. Pretende-se criar um design de circuito único integrando todas as partes propostas para o controle de potência e medições.

Por fim, todos os objetivos propostos na introdução foram alcançados, desde a reciclagem de materiais até o desenvolvimento de circuitos e protótipos, passando pela aplicação de testes e análise de resultados, aplicação do conhecimento e a criação de novas linhas de pesquisa. Assim sendo, encerra-se essa etapa do projeto com muita satisfação, tendo em mente que a conclusão da construção dessa fonte de plasma ajudou muito na formação profissional de toda a equipe envolvida.





## 6 REFERÊNCIAS

KUUSAKOSKI/PDC.CRT Glass Processing Capacity and Latest Enhancement to the Kuusakoski/PDC CRT Glass Solution. [www.kuusakoski.com](http://www.kuusakoski.com), 2016. Disponível em: [www.kuusakoski.us/wp-content/uploads/2017/05/Kusakoski-Glass-White-Paper-9-2016.pdf](http://www.kuusakoski.us/wp-content/uploads/2017/05/Kusakoski-Glass-White-Paper-9-2016.pdf). Acesso em: 10 set. 2019.

GERHAD, Paul. Projeto na engenharia: fundamentos do desenvolvimento eficaz de produtos, métodos e aplicações. 1 ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2005.

ALVES, D. P.; PINHEIRO, C. J. G.; MOISES, C.R.; PASSAMAI J. L.; MELO, D. C. A.; Gerador de Plasma frio de baixo custo, VIII ENCONTRO CIENTÍFICO DE FÍSICA APLICADA, Blucher Physics Proceedings, v. 4, p. 195-197, 2017.

MARTÍNEZ GARCÍA, Asunción; SÁNCHEZ RECHE, Ana; GISBERT SOLER, Santiago; CEPEDA JIMÉNEZ, Carmen M.; TORREGROSA MACIÁ, Rosa; MARTÍN MARTÍNEZ, José Miguel. Treatment of EVA with corona discharge to improve its adhesion to polychloroprene adhesive. Journal Of Adhesion Science And Technology, [S.L.], v. 17, n. 1, p. 47-65, jan. 2003. Informa UK Limited.

CHANG, J.-S.; LAWLESS, P.A.; YAMAMOTO, T.. Corona discharge processes. Ieee Transactions On Plasma Science, [S.L.], v. 19, n. 6, p. 1152-1166, 1991. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).

JANAÍNA GUARINO LIRIA. Avaliação Microbiológica após a irradiação com plasma atmosférico em sementes de linhaça dourada. 2017. 40 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Biomédica) - Universidade do Vale do Paraíba, 2017.

NASCIMENTO NETO, A. B. DO; SOUZA, I. A. DE; FERNANDES, C. A.; VALENTIM, R. A. DE M.; COUTINHO, K. D.; GUERRA NETO, C. L. DE B. Uso de jato de plasma a pressão atmosférica para modificações de superfície do Titânio. Revista Brasileira de Inovação Tecnológica em Saúde - ISSN:2236-1103, v. 5, n. 2, 2 jun. 2015.

NASCIMENTO NETO, Arlindo Balbino do. Desenho e Construção de um protótipo gerador de jato de plasma frio a pressão atmosférica para aplicações biomédicas. 2014. 77 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Materiais; Projetos Mecânicos; Termociências) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2014.

LINDNER, Martina; RODLER, Norbert; JESDINSZKI, Marius; SCHMID, Markus; SÄNGERLAUB, Sven. Surface energy of corona treated PP, PE and PET films, its alteration as function of storage time and the effect of various corona dosages on their bond strength after lamination. *Journal Of Applied Polymer Science*, [S.L.], v. 135, n. 11, p. 1-9, 17 nov. 2017. Wiley.

TENDERO, Claire; TIXIER, Christelle; TRISTANT, Pascal; DESMAISON, Jean; LEPRINCE, Philippe. Atmospheric pressure plasmas: a review. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, [S.L.], v. 61, n. 1, p. 2-30, jan. 2006. Elsevier BV.

Cheong, Zhi Xiong and Barsoum, Nader. 2010. Implementation of Energy Saving Controller for Electromagnetic Ballast Fluorescent Lamps, in Barsoum, N. (ed), *Third Global Conference of Power Control and Optimization*, Feb 2 2010, pp. 164-174. Gold Coast, QLD: American Institute of Physics (AIP).

LOPES, Juliano de Pelegrini. Development of methodology of self-oscillating electronic ballast design with universal input. 2010. 131 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2010.

OP HET VELD, J. H. G. (2000). Self Oscillating 25W CFL Lamp Circuit (Application Note No.AN00048). Disponível em: <http://educy-pedia.karadimov.info/library/AN00048.pdf>. Acesso em: 06 set. 2019.

BAIRANZADE, M. (2009). Electronic Lamp Ballast Design (Application Note No.AN1543/D). Disponível em: <https://www.onsemi.com/pub/Collateral/AN1543-D.PDF>. Acesso em: 06 set. 2019.

RAHIM, Z. (1989). Understanding the Operation of a CRT Monitor (Application Note No.AN656). Disponível em: <https://www.electronic-specifier.com/product-centre/manufacturers/texas-instruments/> ap-

plication -notes/ 7c2de294f6579ff0db0d5. Acesso em: 06 set. 2019.

BOGIN, Josef. A Guide to Flyback Transformers. [www.boginjr.com](http://www.boginjr.com), 2012. Disponível em: [http:// boginjr.com/electronics/hv/flybacks-guide/](http://boginjr.com/electronics/hv/flybacks-guide/). Acesso em: 14 set. 2019.

CARDOSO, R. P. Aspectos básicos sobre plasmas DC fracamente ionizados. Florianópolis, 2009. (Apostila).

COELHO, R. F. Princípios de controle aplicados à conversores estáticos. Florianópolis, 2020. (Apostila).

LEHMAN, Brad; WILKINS, Arnold J.. Designing to Mitigate Effects of Flicker in LED Lighting: reducing risks to health and safety. *Ieee Power Electronics Magazine*, [S.L.], v. 1, n. 3, p. 18-26, set. 2014. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).

IEA (2020), Lighting, IEA, Paris Disponível em:<https://www.iea.org/reports/lighting>. Acesso em: 20 nov. 2020.

LI, Shou-Zhe; HUANG, Wen-Tong; WANG, Dezhen. The effect of gas flow on argon plasma discharge generated with a single-electrode configuration at atmospheric pressure. *Physics Of Plasmas*, [S.L.], v. 16, n. 9, p. 1-6, set. 2009. AIP Publishing.

WEI, Huai; BATARSEH. I.. Comparison of basic converter topologies for power factor correction, *Proceedings IEEE Southeastcon 98 Engineering for a New Era*, Orlando, FL, USA, 1998, pp.348-353. abr. 1998. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).

BARBI, Ivo. *Eletrônica de Potência*, 6ª Edição, Ed. do Autor, Florianópolis, 2006.

BURANY, Nandor; HUBER, Laszlo; PEJOVIC, Predrag. Corona Discharge Surface Treater Without High Voltage Transformer. *Ieee Transactions On Power Electronics*, [S.L.], v. 23, n. 2, p. 993-1002, mar. 2008. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).



## APÊNDICE A - PROJETO DO CONVERSOR BUCK

Aqui encontra-se o projeto do conversor BUCK desenvolvido para o controle da potência da fonte de plasma. O protótipo ainda se encontra em testes porém fica disponível para consulta nesse documento. Deseja-se variar a tensão do barramento de do valor nominal até metade do valor de pico da rede, portanto, é necessário que o conversor BUCK opere com *duty-cycle*  $d$  variável de 1 até 0,5. Os parâmetros de projeto encontram-se na tabela 5.

Tabela 5 – Parâmetros Buck

Descrição	Valor
Tensão de saída	$V_o = 155 - 311V$
Tensão de entrada	$V_{in} = 311V$
Potência	$P = 100W$
Frequência de chaveamento	$f_s = 30kHz$
Ondulação de Corrente no Indutor	$\Delta I_o = 30\%$
Ondulação de Tensão no Capacitor	$\Delta V_o = 5\%$
Resistência de carga	$R_o = 625\Omega$
Corrente de Saída	$I_o = 0,32 - 0,64$
Indutância	$L = 2,03mH$
Capacitor	$C = 100\mu F$
Tensão de referência	$V_{ref} = 2,5 - 5,1V$
Ganho do sensor de tensão	$K_{vo} = 0,0164$
Valor de pico da onda triangular	$V_T = 1V$
Ganho do modulador	$K_{PWM} = \frac{1}{V_T} = 1 \frac{1}{V}$
Coeficiente de amortecimento	$\zeta = \frac{1}{2R_o} \sqrt{\frac{L}{C}} = 0,0062$
Frequência natural de oscilação do circuito	$\omega_n = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}} = 12,91k \frac{rad}{s}$

Os cálculos foram feitos de maneira a assegurar que o conversor opere

em Modo de Condução Descontínua para os *duty-cycles* mais elevados. O valor de indutância  $L_o$  foi calculado de maneira a garantir MCD mesmo para os maiores *duty-cycles*, isto é, sua corrente deve se anular a cada período de operação para o maior  $d$  possível. É inevitável que para  $d = 1$  haja condução contínua, entretanto, considerou-se que até um ciclo de tarefa  $d = 0,8$  ele opere em MCD. Considerando uma folga de 20% e utilizando a seguinte relação chegou-se ao valor de indutância  $L$  da tabela 5:

$$L_{crit} = \frac{V_{in} \cdot (1 - d) \cdot d \cdot T_s}{2 \cdot (I_o - \frac{\Delta I_o}{2})} * 0.8 \quad (6.1)$$

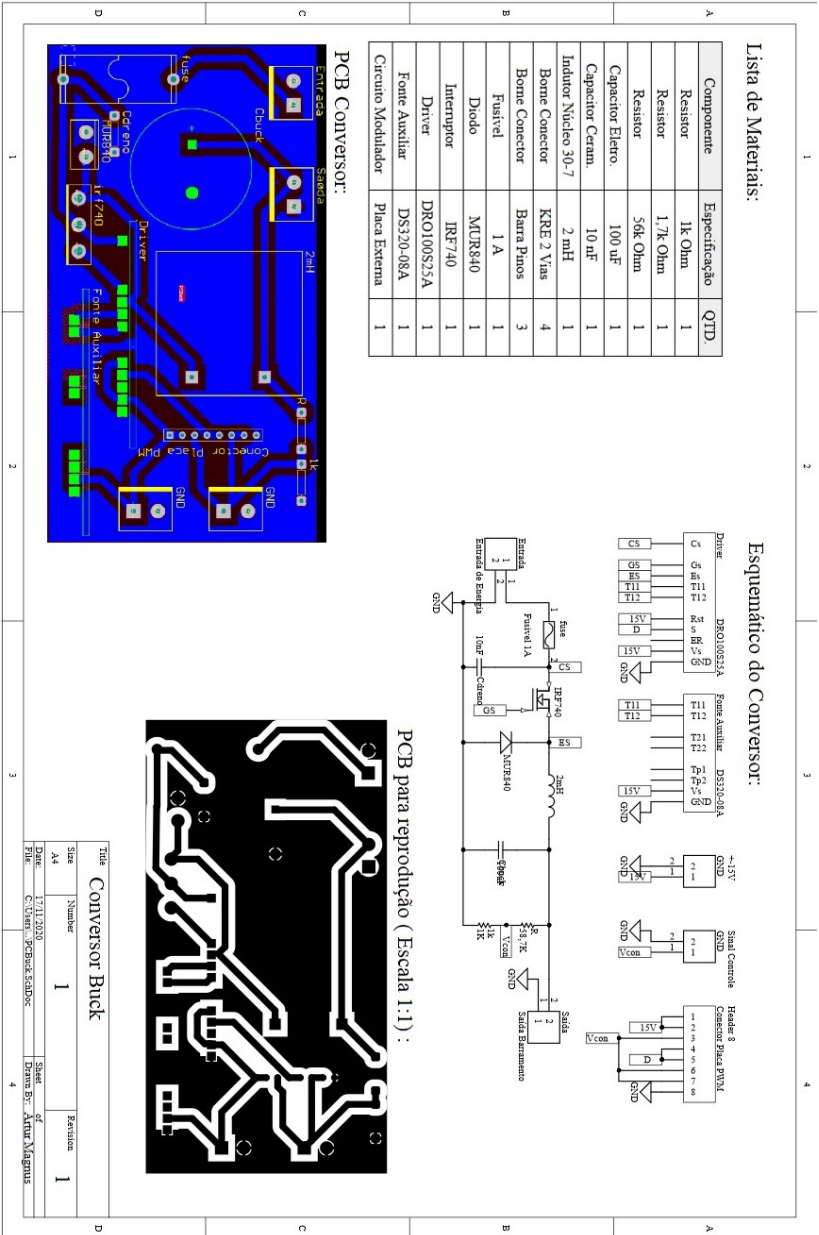
Portanto, utilizando um indutor com valor de no mínimo  $L_{crit}$  assegura-se que o circuito opera em condução descontínua.

O valor da Capacitância de Saída do conversor foi calculado pelo critério de Hold-up time, que visa eliminar as oscilações de baixa frequência na saída do conversor. Utilizou-se a seguinte expressão para o cálculo:

$$C_{HoldUp} = \frac{P_o}{2 \cdot \pi \cdot f_{rede} \cdot V_o^2 \cdot \Delta V_o} \quad (6.2)$$

Logo em sequência é apresentada a PCB do conversor, bem como seu respectivo esquemático e lista de materiais na figura 43. A modulação PWM e acionamento do conversor são da preferência do projetista. No trabalho em questão, utilizou-se o integrado SG3525 na geração da moduladora para o controle do *duty-cycle* e para acioná-lo um *driver* isolado da *Supplier* modelo DRO100S25A alimentado pela fonte auxiliar modelo DS320-08A. As entradas para tais placas estão planejadas na placa porém fica a cargo do projetista escolher uma alternativa para modulação e acionamento. A escolha desse projeto baseou-se no que encontrava-se disponível na época.

Figura 43 – Lista de Materiais, Esquemático e PCB do conversor desenvolvido



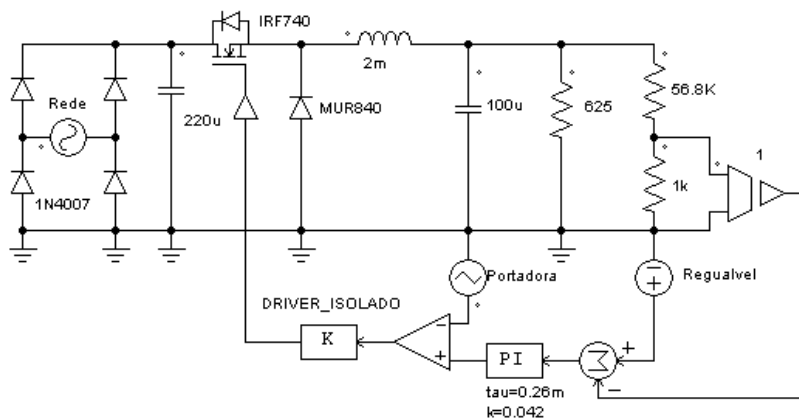




## APÊNDICE B - PROJETO DA MALHA DE CONTROLE DO CONVERSOR

Aqui se comenta um pouco sobre a parte de controle da tensão de saída do conversor. Seguiu-se a metodologia de projeto presente no trabalho de Coelho (2020) para calcular a função de transferência do conversor e os parâmetros do controlador escolhido. Empregou-se um controlador PI para o controle da tensão de saída do conversor, para tal, aproveitou-se o próprio circuito integrado SG3525 utilizado na modulação PWM. Tendo em vista que podemos implementar uma função de transferência de primeira ordem com o amplificador operacional interno ao CI podemos realizar todo o controle diretamente no modulador. Um exemplo do conversor operando em malha fechada encontra-se na figura 44.

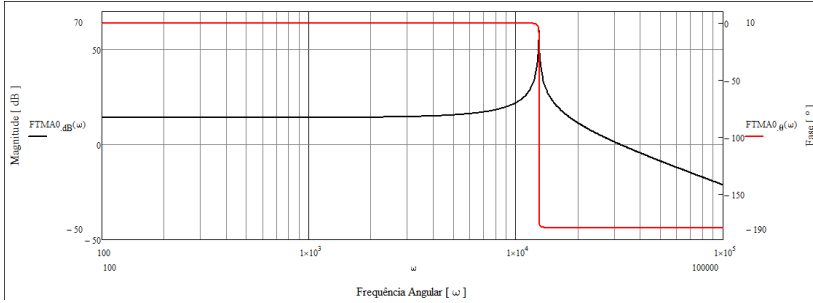
Figura 44 – Conversor BUCK com controle da tensão de saída



Fonte:Autor

A referência de tensão utilizada pelo chip é de 5,1 V portanto, regulou-se o sensor resistivo na saída do conversor com um ganho de  $\frac{5,1}{311}$ . Primeiramente obteve-se a função de transferência de laço aberto não compensada e traçou-se seu diagrama de fase e magnitude. O diagrama de bode do conversor em malha aberta encontra-se na figura 45.

Figura 45 – Função de Transferência em Laço Aberto não Compensada do Conversor BUCK



Fonte: Autor

Aloca-se a frequência do zero do controlador uma década abaixo da frequência de chaveamento do conversor (COELHO, 2020) em 3000 Hz ou  $18,85 \text{ k} \frac{\text{rad}}{\text{s}}$  e estipula-se uma margem de fase de 40°. Tendo em mãos esses parâmetros pode-se obter a constante de ganho  $K_c$  do PI e sua constante de tempo  $\tau$  utilizando as seguintes relações:

$$\omega_{zeroPI} = \frac{\omega_{cruzamento}}{\tan(M_{fase} - \frac{\pi}{2} - |FTLANC(\omega_{cruzamento})|)} \quad (6.1)$$

$$\tau_{PI} = \frac{1}{\omega_{zeroPI}} \quad (6.2)$$

$$K_c = \frac{\omega_{cruzamento}}{|FTLANC(\omega_{cruzamento})| \cdot \sqrt{\omega_{cruzamento}^2 + \omega_{zeroPI}^2}} \quad (6.3)$$

Assim chega-se na função de transferência do controlador:

$$FT_{PI}(\omega) = \frac{K_c \cdot (j\omega + \omega_{zeroPI})}{j \cdot \omega} \quad (6.4)$$

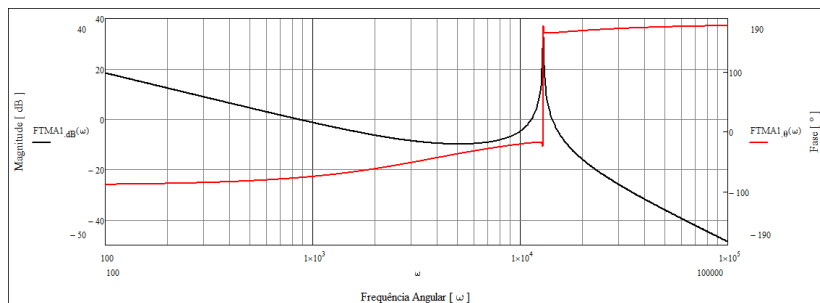
Agora tendo em mãos a função de transferência do controlador, os ganhos do sensor, do modulador e a função de transferência de laço aberto pode-se calcular a função de transferência de malha fechada com a seguinte expressão:

$$FTLF(\omega) = FT_{PI}(\omega) \cdot K_{vo} \cdot K_{PWM} \cdot FTLANC(\omega) \quad (6.5)$$

Por fim, na figura 46 apresenta-se o diagrama de Bode de magnitude

e fase do conversor BUCK já considerando os sensores e o controlador PI.

Figura 46 – Função de Transferência Compensada do Conversor BUCK



Fonte: Autor

Não optou-se por adotar uma malha interna de corrente tendo em vista que sua principal função seria limitar a corrente de saída do conversor, a qual já é limitada pelos próprios circuitos de segurança do REAO.