



Felipe Cavalcante Bueno

**Desenvolvimento de Fonte Pulsada para deposição de filme
fino por meio de Pulverização Catódica por Magnetron de
Impulsos de Alta Potência (HIPIMS)**

Sorocaba

2025

Felipe Cavalcante Bueno

Desenvolvimento de Fonte Pulsada para deposição de filme fino por meio de Pulverização Catódica por Magnetron de Impulsos de Alta Potência (HIPIMS)

Projeto Final de Curso apresentado ao Instituto de Ciência e Tecnologia de Sorocaba, Universidade Estadual Paulista (UNESP), como parte dos requisitos para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Controle e Automação.

Orientador: Prof. Dr. José Roberto Ribeiro Bortoleto

Coorientador: Prof. Dr. Everson Martins

Sorocaba

B928d	Bueno, Felipe Cavalcante Desenvolvimento de Fonte Pulsada para deposição de filme fino por meio de Pulverização Catódica por Magnetron de Impulsos de Alta Potência (HIPIMS) / Felipe Cavalcante Bueno. -- Sorocaba, 2025 93 p. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia de Controle e Automação) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba Orientador: José Roberto Ribeiro Bortoleto Coorientador: Everson Martins 1. Fontes de alimentação (Eletronica). 2. Plasma (Gases ionizados). 3. Filmes finos. I. Título.
-------	---

FELIPE CAVALCANTE BUENO

**DESENVOLVIMENTO DE FONTE PULSADA PARA DEPOSIÇÃO DE FILME FINO POR
MEIO DE PULVERIZAÇÃO CATÓDICA POR MAGNETRON DE IMPULSOS DE ALTA
POTÊNCIA (HIPIMS)**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto de Ciência e Tecnologia de Sorocaba, Universidade Estadual Paulista (UNESP), como parte dos requisitos para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Controle e Automação.

Data da defesa: 04/06/2025

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. José Roberto Ribeiro Bortoleto

UNESP – Instituto de Ciência e Tecnologia – Campus de Sorocaba

Prof. Dr. Eduardo Verri Liberado

UNESP – Instituto de Ciência e Tecnologia – Campus de Sorocaba

Prof. Dra. Maria Glória Caño de Andrade

UNESP – Instituto de Ciência e Tecnologia – Campus de Sorocaba

Sorocaba

2025

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus Jesus Cristo por ter me concedido vida, inteligência e resiliência para cursar esta Universidade e aos meus pais que me deram suporte durante os anos que morei em Sorocaba.

Agradeço ao meu Professor Orientador, José Bortoleto, por sempre responder minhas perguntas nas aulas de Eletromagnetismo e sempre instigar os alunos a terem um pensamento crítico e buscarem conhecimento.

Agradeço ao meu Professor Coorientador, Everson Martins, por também sempre ter tempo para minhas perguntas e deter um vasto conhecimento sobre eletrônica aplicada, manipulação e análise de sinais que com certeza me ajudaram neste projeto.

Agradeço aos amigos com quem morei em Sorocaba, especialmente ao João Simoe e ao Rafael Yamamoto, que me ajudaram e fortaleceram nas tarefas e com quem sempre pude conversar para tirar o estresse da faculdade.

Agradeço ao Luiz Acciari com quem fiz inúmeros trabalhos, sempre prezando pela excelência e boa escrita nos Relatórios, além de sempre poder conversar sobre som e eletrônica no geral.

Agradeço ao Raul Ramos, doutorando do Professor Bortoleto, que sempre utilizou, testou e me devolveu sugestões sobre as fontes que montei para a sua pesquisa no laboratório de filme fino da Unesp Sorocaba.

Agradeço ao Sandro do almoxarifado do laboratório de eletrônica da Unesp por sempre estar disponível e me ajudar a encontrar componentes para a montagem dos protótipos em protoboard.

Agradeço a todos os professores, amigos e colegas que me ajudaram em qualquer momento da minha graduação em uma cidade que está no meu coração, Sorocaba.

Por fim, agradeço enormemente à Unesp Sorocaba por prover as instalações corretas para minha graduação e para conclusão deste trabalho e dessa graduação.

RESUMO

BUENO, F. C. **Desenvolvimento de Fonte Pulsada para deposição de filme fino por meio de Pulverização Catódica por Magnetron de Impulsos de Alta Potência (HIPIMS)**. 2025. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Controle e Automação) – Instituto de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Sorocaba, 2025.

No presente trabalho é discutido e explicado o desenvolvimento de uma fonte de tensão pulsada para uso em reatores de plasma no laboratório de deposição de filmes finos com materiais de fácil acesso e baixo custo que atenda às necessidades dos usuários do laboratório. A fonte desenvolvida neste trabalho possui tensão de saída de 30 a 950 Vdc com pulsos quadráticos de frequência variável, entre 1 e 10 KHz com ciclo de trabalho também variável entre 3 e 90%. Dois protótipos já haviam sido construídos, com Iniciação Científica PIBIC, o primeiro foi adaptado de um projeto montado pelo Profº Dr. Everson Martins, para o segundo foram estudados outros métodos geradores de pulso em diferentes frequências e neste último, dadas as características necessárias, componentes diferentes foram empregados para suportar maior potência e confiabilidade. Em todas as fontes, os modelos foram simulados em simuladores do tipo SPICE, em seguida foram montadas as placas de circuito impresso, testes e montagem final. Diferente do emprego comum de microcontroladores, a fim de facilitar a manutenção corretiva, componentes discretos e uma chave eletrônica do tipo IGBT foram escolhidos. Após a montagem final mais testes foram conduzidos e a fonte ficou instalada no laboratório.

PALAVRAS-CHAVE: Deposição; Filmes Finos; Plasma; Tensão Pulsada; Pulsos Quadráticos; Frequência Variável; Componentes Discretos; IGBT; Desenvolvimento de Hardware.

ABSTRACT

BUENO, F. C. Development of a Pulsed Power Supply for Thin Film Deposition Using High Power Impulse Magnetron Sputtering (HIPIMS). 2025. Final Paper (Bachelor's Degree in Control and Automation Engineering) – Institute of Science and Technology, São Paulo State University Sorocaba, 2025.

This work discusses and explains the development of a pulsed voltage power supply for plasma reactors used in the thin film deposition laboratory, built using low-cost and easily accessible components to meet the needs of laboratory users. The developed power supply operates with a variable output voltage from 30 to 950 Vdc, generating square wave pulses with adjustable frequency between 1 and 10 kHz and a duty cycle ranging from 3% to 90%. Two previous prototypes were built under a PIBIC undergraduate research project. The first was adapted from a design by Prof. Dr. Everson Martins, while the second explored other pulse generation methods at various frequencies. For the final version, different components were selected to support higher power levels, based on the required characteristics. All designs were simulated using SPICE-based software, followed by PCB assembly, testing, and final implementation. Unlike conventional approaches that rely on microcontrollers, this project employs discrete components and an IGBT switch to simplify corrective maintenance. After final assembly, the system was tested and installed in the laboratory.

Keywords: Deposition; Thin Films; Plasma; Pulsed Voltage; Square Pulses; Variable Frequency; Discrete Components; IGBT; Hardware Development.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	8
1.1 OBJETIVO.....	9
1.2 ESTRUTURA.....	9
2. CONCEITOS FUNDAMENTAIS	11
2.1 PLASMA.....	11
2.2. DEPOSIÇÃO DE FILME FINO	12
2.3. PULVERIZAÇÃO CATÓDICA.....	13
2.4. HIPIMs	16
2.5. FONTES DE TENSÃO PARA PULVERIZAÇÃO CATÓDICA	19
2.6. GERAÇÃO DE PULSO.....	24
3. SIMULAÇÕES	26
3.1. COMPORTAMENTO ELÉTRICO DO PLASMA.....	26
3.2. CIRCUITO OSCILADOR	28
3.3. SIMULADOR	36
4. METODOLOGIA.....	44
4.1. RETIFICADOR	46
4.3. GERADOR DE PULSO E DISPOSITIVO CHAVEADOR	48
4.2. DIAGRAMA ESQUEMÁTICO	52
4.3. MONTAGEM DAS PCIs	56
4.4. ORGANIZAÇÃO DO GABINETE.....	65
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	69
5.1. RESULTADOS PRELIMINARES	69
5.2. PRIMEIROS TESTES.....	71
5.3. PRIMEIRAS DEPOSIÇÕES	75
5.4. TESTES COM GABINETE	80
6. CONCLUSÃO	84
7. COMERCIALIZAÇÃO DA FONTE.....	85
7.1. PADRONIZAÇÃO DOS COMPONENTES.....	85
7.2. PRODUÇÃO EM SÉRIE.....	86
7.3. INVESTIDORES.....	86
7.4. ESTRATÉGIA DE VENDA.....	86
7.5. PÓS-VENDAS E MELHORIA CONTÍNUA.....	88
REFERÊNCIAS	89
ANEXO A - LISTA DE COMPONENTES.....	92

1 INTRODUÇÃO

Filme fino é um tipo de sólido ou líquido onde uma de suas dimensões, largura, altura ou profundidade, é muito menor que as outras duas, onde esta camada tem sua espessura variando de poucos angstroms até alguns micrometros, o material constituído pelo filme fino pode ser isolante, condutor ou semicondutor.

O filme fino pode ser aplicado por diferentes métodos, um destes é a Pulverização Catódica ou deposição física de vapor, onde íons são acelerados em uma atmosfera rarefeita para atingir um substrato, neste substrato é formado o filme fino constituído pelo material base dos íons. Os íons são formados por um campo elétrico estabelecido por uma fonte de tensão, um plasma é formado, esta fonte pode ser de tensão contínua ou de tensão pulsada, cada tipo de fonte traz uma concentração de filme diferente (LABORATÓRIO DE VÁCUO E CRIOGENIA, 2025).

O fenômeno de deposição física de vapor, especialmente a pulverização catódica, que é o método escolhido neste trabalho, compreende que é necessário um campo elétrico da ordem de alguns kV/m em uma atmosfera rarefeita e controlada, uma fonte de tensão é necessária para atingir estes parâmetros.

A fonte de tensão pode ser do tipo contínua, onde é aplicado um potencial positivo com uma referência de terra no sistema, fonte de rádio frequência, ou do tipo pulsada, baseada em um sistema gerador de pulsos, onde o operador pode controlar o tipo de pulso aplicado, o que afeta diretamente o comportamento do campo elétrico interno e conseqüentemente, a formação do filme fino.

O ambiente de deposição é um reator com atmosfera rarefeita que pode ser formada por um gás específico e que também pode afetar as características do filme. Na deposição com Magnetron este reator possui ímãs em sua base, que, pela intensidade do campo magnético, afeta a trajetória dos íons e também melhora as características de deposição deste filme fino, necessitando menos potência para atingir a ionização necessária do plasma.

A fonte pulsada é baseada em dois trabalhos executados anteriormente como iniciação científica, nestes trabalhos foram montadas fontes pulsadas para uso em pulverização catódica, o protótipo I (BUENO, 2022) suportava uma faixa de tensão de deposição, que foi superada no protótipo II (BUENO, 2023), em cada fonte foram realizadas melhorias, na fonte desenvolvida neste trabalho, diversas características foram melhoradas.

1.1 OBJETIVO

Neste trabalho será focalizado o desenvolvimento da fonte pulsada utilizada na deposição por pulverização catódica por magnetron, esta fonte precisa atender a requisitos dos usuários do laboratório de plasma da Unesp - Campus Sorocaba, ter boa durabilidade, ter o encapsulamento prático para a facilidade na montagem do sistema de deposição, além de exceder as características das duas fontes desenvolvidas em trabalhos anteriores.

Este tipo de fonte possui custo elevado no mercado, poucas empresas vendem este produto e no Brasil não existe nenhuma opção além de importar uma fonte pesada e volumosa, ignorando uma necessidade de manutenção e garantia. No entanto, com componentes discretos é possível construir uma fonte simples, robusta e de fácil utilização.

O custo benefício deste projeto é considerável, a construção e testes não é demorada e sua construção modular facilita a montagem e manutenção.

1.2 ESTRUTURA

Este trabalho está estruturado na forma indicada pela sequência. No capítulo 2 apresentam-se alguns conceitos fundamentais sobre os elementos que englobam o desenvolvimento de uma fonte pulsada para uso em deposição de filmes finos com impulsos de alta potência em magnetron. Os conceitos físicos do plasma envolvido, da pulverização catódica, a diferença na pulverização quando aplicada em um reator com magneto e como a energia aplicada em impulsos afeta a deposição, os tipos de fonte de tensão e a geração de pulso, um princípio aplicado em todo tipo de fonte pulsada.

No capítulo 3 são detalhados os simuladores utilizados durante a fase de testes do projeto, realizados antes da construção do protótipo, sendo investigados: tipo de simulador, circuitos da fonte e modos de utilização da fonte.

O capítulo 4 descreve a metodologia de prototipagem e confecção da fonte, desde o desenvolvimento do diagrama esquemático completo, layout de componentes eletrônicos nas placas de circuito impresso, confecção das placas, testes simples de funcionamento e disposição interna no gabinete da fonte.

Durante o capítulo 5 são descritos os testes para os quais a fonte foi submetida, testes de carga para compreender o funcionamento e anotar alguns parâmetros e testes de alta potência com deposições de alta tensão, assim como aplicação e testes de circuitos de proteção no dispositivo chaveador.

O Capítulo 6 conclui o trabalho e o capítulo 7 faz uma abordagem comercial sobre o desenvolvimento da fonte e como este protótipo poderia ser implementado em outras aplicações como um produto comercializável, englobando estratégias de venda e tratativas no pós-vendas e suporte técnico.

2 CONCEITOS FUNDAMENTAIS

2.1 PLASMA

Plasma é o nome dado para o quarto estado da matéria assim como o nome dado para a parte líquida do sangue, que transporta nutrientes e células. Para este trabalho e para a definição dos conceitos fundamentais, será focado o plasma como quarto estado da matéria. O Plasma, além dos estados sólido, líquido e gasoso da matéria, se forma quando um gás é aquecido a temperaturas tão altas que a energia térmica supera as forças que mantêm os elétrons em órbita ao redor dos núcleos atômicos. Isso resulta em uma massa de gás ionizado, composta por elétrons livres e íons positivos, que se comporta de maneira distinta dos gases comuns, podendo conduzir eletricidade e interagir com campos magnéticos (DANTAS, s.d.)

Algumas características físicas do Plasma:

- Condutividade Elétrica: O plasma é um excelente condutor de eletricidade.
- Emissão de Luz: Ao ser excitado eletricamente, o plasma emite luz, como observado em lâmpadas fluorescentes e auroras polares.
- Composição: O plasma é composto por partículas carregadas (íons e elétrons) e neutras (átomos e moléculas) que interagem através de forças eletromagnéticas.

O plasma é encontrado em abundância no universo, constituindo cerca de 99% da matéria visível, principalmente nas estrelas, incluindo o Sol.

Um conceito definido no estudo de plasma é o livre caminho médio (λ), que pode ser definido como a maior distância que uma partícula percorre, sem que haja uma colisão com outra partícula do meio. O livre caminho médio depende de uma constante (c_t) da característica daquele gás ou plasma sobre a pressão do meio (p) como mostra a equação (1) (MANSANO, 2019).

$$\lambda = \frac{c_t}{p} \quad (1)$$

O grau de ionização, isto é, a taxa em que as partículas sofrem ionização, é definido pela quantidade de partículas ionizadas pelo número total de partículas, em atmosferas de baixa pressão o grau de ionização é tipicamente 10^{-6} a 10^{-3} , para uso em deposição de filme fino por sputtering onde a pressão é menor ou igual a 10 mTorr este grau de ionização varia de 10^{-4} a 10^{-3} , o grau de ionização (α), mostrado na equação (2), que é a proporção da quantidade de moléculas ionizadas (n_i) sobre a quantidade de moléculas do gás (n) está relacionado também a energia necessária para se atingir o estado de plasma na atmosfera aplicada.

$$\alpha = \frac{n_i}{n} \quad (2)$$

O plasma utilizado neste trabalho é proveniente de gases confinados em um reator de baixa pressão, ou seja, hermeticamente fechado, os gases são Argônio e Oxigênio e sua proporção na atmosfera pode variar dependendo do tipo de deposição. Quando o reator atinge os níveis de pressão, o operador libera os gases oxigênio e Argônio já na proporção desejada e a atmosfera interna se torna propícia para disparo do plasma, o campo elétrico já aplicado gera a descarga elétrica que gera o plasma (SOUSA, 1990).

2.2. DEPOSIÇÃO DE FILME FINO

A superfície onde o filme é depositado é chamada de substrato e o filme deve aderir de forma que apenas o substrato forneça o suporte mecânico necessário sem que haja alteração do material, os substratos podem ser metais, vidros, cerâmicas policristalinas e monocristais.

A deposição de filme fino é o processo que faz o filme aderir ao substrato, o material que formará o filme fino geralmente é um óxido, metal ou polímero. Existem técnicas físicas e químicas de deposição, na deposição física o material é depositado sobre o substrato por meio de técnicas de evaporação em que a fase sólida do material é transformada em fase de vapor e posteriormente convertida em fase sólida, o processo pode ocorrer em ambiente de baixa pressão ou atmosfera controlada. Os processos físicos de deposição são eficazes porém de custo elevado, dependendo do nível do filme a ser atingido pode-se escolher uma deposição química que depende de reações químicas e outras características físicas, como viscosidade, por exemplo (PEIXOTO, 2021).

2.3.PULVERIZAÇÃO CATÓDICA

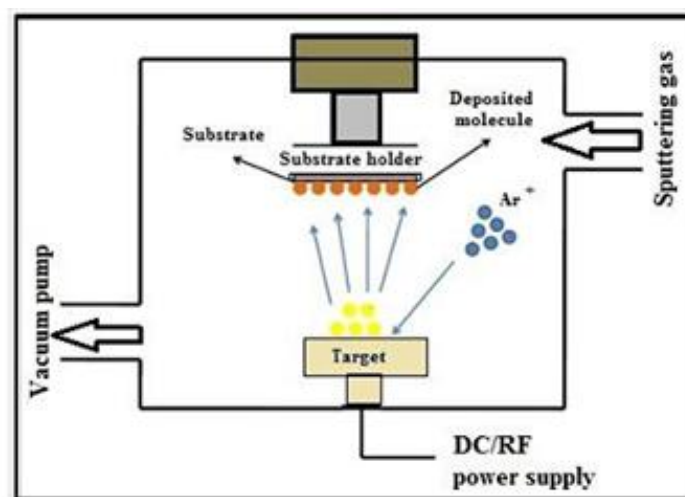
Entre as diversas técnicas de deposição física, uma destas é a pulverização catódica, a pulverização catódica ou *sputtering* é uma técnica de deposição física de vapor (PVD), alguns exemplos de pulverização catódica de vapor são a evaporação térmica e a evaporação por feixe de elétrons onde por meio de controle da temperatura com aquecimento extremo, onde o material é convertido em um vapor para posteriormente ser convertido em sólido na forma de filme fino. Este processo de PVD, ou E-Beam PVD, utiliza muita energia, pois precisa vaporizar o alvo, neste modo, um cátodo emite elétrons que são acelerados por uma diferença de potencial da ordem de 5~30 kV dependendo da deposição. Materiais mais frágeis podem sofrer desintegração neste tipo de deposição como cerâmicas, óxidos e semicondutores, tornando este método pouco efetivo para depositar este tipo de material.

A Pulverização catódica utiliza um método elétrico de deposição, onde o material do filme, também é depositado se for bombardeado com íons, as partículas (íons) do plasma transferem energia e momento para os átomos do material (alvo), causando sua ejeção e dando início a uma sequência de colisões. Esses íons são provenientes do disparo de um plasma de Argônio no reator de deposição, este plasma é mantido por uma fonte de tensão, que pode ser de tensão contínua ou de rádio frequência.

Os átomos ou moléculas ejetadas da superfície dependem da composição do material-alvo. Em sólidos cristalinos ou policristalinos, esse processo pode causar danos à rede cristalina, induzir modificações químicas e até mesmo resultar na implantação de partículas incidentes. Essas alterações podem modificar as propriedades do sólido na região impactada, influenciando suas características físicas e químicas.

A figura 1 mostra o modelo mais comum de pulverização catódica, onde os íons de Ar atingem o alvo e liberam as moléculas com mais energia que se movem em direção ao substrato.

Figura 1 — Modelo de reator de pulverização catódica com substrato e alvo, alimentado por fonte DC ou RF.



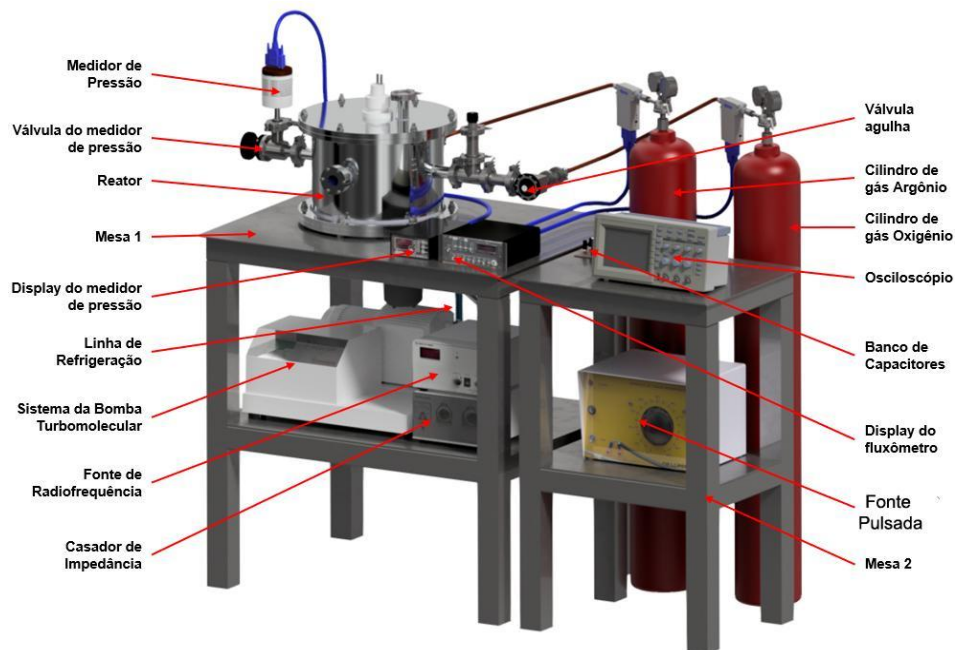
Fonte: PEIXOTO, 2021.

Com o plasma estabelecido, os íons são acelerados dentro do reator e começam a bombardear o alvo (material que constituirá o filme) arrancando átomos e ou moléculas e os direcionando por meio de campo elétrico e ou magnético ao substrato, desta forma os átomos e moléculas são adsorvidos se conectando por ligações eletrostáticas ou químicas ao substrato (lâmina de vidro) formando o filme fino, entre estas:

- Ligações eletrostáticas no vidro (SiO_2) que é um material polar e pode apresentar terminações de grupos hidroxila ($-\text{OH}$) na superfície. Dependendo das condições da deposição (temperatura, pressão parcial de oxigênio), os filmes finos mais utilizados nas deposições deste trabalho, os de ZnO e Nb_2O_5 também podem possuir carga superficial, favorecendo atração eletrostática entre as camadas.
- Ligações químicas (Pontes Oxigenadas) durante a deposição, na forma de reatividade química entre o material do filme fino e o vidro. Tanto o ZnO quanto o Nb_2O_5 possuem átomos de oxigênio que podem formar pontes químicas com os grupos $-\text{OH}$ da superfície do vidro, melhorando a aderência.
- Aderência Física (Interpenetração da Rede Atômica), em temperaturas elevadas, os átomos do filme depositado podem difundir ligeiramente na superfície da sílica, criando uma camada de transição que melhora a aderência.
- Polarização e Energia de Superfície, a energia de superfície do vidro e do filme pode influenciar a adesão. O ZnO e o Nb_2O_5 possuem características semicondutoras e podem interagir com a superfície do vidro por polarização.

A figura 2 mostra o sistema de deposição de filme fino no Laboratório de Investigação em Filmes e Superfícies (LIFS) da Unesp Campus Sorocaba, nesta figura, nota-se o advento da fonte pulsada, no entanto, para pulverização catódica convencional o operador deve apenas trocar o reator por um que não possua magneto e substituir a fonte pulsada por uma fonte DC ou de RF.

Figura 2 — Sistema de deposição de filme fino com reator de baixa pressão.



Fonte: Autoria Própria.

Independentemente da configuração utilizada para a deposição de filme fino, o processo apresenta diversas vantagens, entre elas:

- Possibilidade de depositar filmes de materiais complexos;
- Controle preciso e reprodutível da espessura do filme;
- Utilização de alvos de grandes áreas;
- Aplicação de polarização negativa para melhorar a aderência de filmes metálicos.

2.4. HIPIMs

Englobado na pulverização catódica, o HIPIMs, ou *High Power Impulse Magnetron Sputtering* é um processo de pulverização catódica que utiliza uma fonte diferente e uma estrutura de reator diferente. O HIPIMs pode gerar plasmas de alta densidade e alta ionização, resultando em filmes com propriedades superiores em comparação com métodos convencionais de pulverização catódica.

O reator de deposição para HIPIMs é semelhante ao reator convencional porém, um ímã é posicionado na base do reator, este ímã, possuindo um campo magnético constante, faz com que os íons do plasma estabelecido sofram efeito da força magnética quando entram nas dependências do campo magnético.

Os íons então sofrerão efeito da Força de Lorentz, equação (3), dada pela carga (q) da partícula multiplicada pelo produto vetorial do vetor velocidade (v) pelo vetor campo magnético (B). O campo magnético (B) atuará de forma perpendicular (produto vetorial) à trajetória inicial dada pelo vetor velocidade (v) do íon, desta forma a trajetória se tornará curva ou circular, aumentando a incidência dos íons de forma melhor espaçada obtendo melhor dispersão do filme fino.

$$\vec{F} = q(\vec{v} \times \vec{B}) \quad (3)$$

Considerando um campo magnético uniforme não apenas os íons mas também os elétrons livres do plasma serão afetados, os elétrons por serem de massa extremamente menor que os íons começam a orbitar o magnetron, o raio da órbita (ciclotron) dos íons pode ser calculado pela equação (4) que reside em uma função da massa (m) multiplicada pela velocidade (v) da partícula sobre a carga (q) da partícula multiplicada pelo campo magnético (B) (ANDERS, 2004).

$$r = \frac{mv}{qB} \quad (4)$$

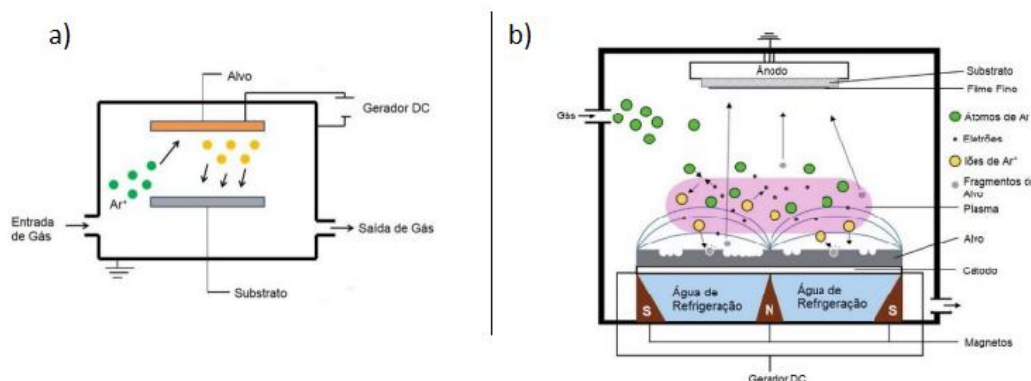
Este efeito do campo magnético na câmara (reator) de plasma de argônio com magnetron, faz com que a força magnética guie os elétrons, ainda sob a equação (4) em trajetórias helicoidais, aumentando a eficiência da ionização do gás, pois os elétrons acabam “capturados” pelas linhas de campo magnético, aumentando a chance de colisão com átomos de argônio neutros, e, consequentemente gerando mais íons de argônio (KJLC Innovate, 2016).

Os átomos de argônio sofrerão efeito desta força de Lorentz de forma semelhante, do mesmo modo demonstrado na equação (4), os átomos de argônio, por ter massa muito maior que os elétrons terão um raio muito maior de curvatura, isso também poderá gerar um menor confinamento magnético, pois devido a sua massa, a intensidade do campo magnético é o que determina se haverá um forte efeito ou um efeito baixo ou nulo em sua trajetória.

Os elétrons então farão mais colisões com átomos neutros e aumentando a produção de íons Ar^+ , desta forma, a energia necessária para manter o grau de ionização alto durante a deposição se torna menor. Em média, em um reator de pulverização catódica sem magnetron, a tensão aplicada ao cátodo, geralmente precisa ser mais alta, de 1–5 kV para garantir um número suficiente de elétrons energéticos e manter o plasma estável. Com o magnetron, é possível operar com tensões mais baixas de 300–900 V, pois os elétrons aprisionados fornecem mais ionizações por unidade de energia fornecida.

Na figura 3, encontram-se os esquemas de deposição nos reatores do tipo de deposição por pulverização catódica com fonte DC e pulverização catódica com magnetron com fonte DC. A rigor do que será abordado neste trabalho, o esquema de conexão será o de magnetron, no entanto a fonte conectada será uma do tipo pulsada de baixa frequência.

Figura 3 — a) Esquema do Reator para pulverização catódica. b) Esquema do Reator para pulverização catódica com magnetron.



Fonte: SILVA, 2021.

Nota-se, que o reator com magnetron possui mais uma característica não mencionada, que é a água de refrigeração, naturalmente, ímãs podem sofrer alterações em suas propriedades magnéticas devido à alteração de temperatura do ambiente, ímãs de neodímio, quando aquecidos temperaturas acima de 80°C podem perder suas propriedades magnéticas de forma irreversível, existem ímãs de grau especial que suportam até 200°C antes de perder totalmente suas propriedades magnéticas, da mesma forma, o ímã não pode ser resfriado a temperaturas menores que -40°C , onde suas propriedades magnéticas podem ser perdidas parcialmente, no entanto, ao retornar à temperatura ambiente, o ímã restaura suas propriedades magnéticas.

O reator de deposição de filme fino está conectado à uma fonte que fornece potência para o sistema e sua carcaça, feita de aço inoxidável irá dissipar boa parte desta potência em forma de calor, o magneto, ou ímã, localizado próximo ao cátodo do reator será afetado por este calor, por isso, o reator é especialmente construído com galerias de água em volta do ímã, onde são conectadas mangueiras de água corrente que auxiliam na dissipação de calor do reator e principalmente do ímã, mantendo seu campo magnético estável.

Além das nuances do reator, o tipo de fonte utilizada na deposição por magnetron é feita com uma fonte pulsada, diferente de uma fonte DC que fornece tensão constante para o sistema, a fonte pulsada trabalha com pulsos de onda quadrada, que para o sistema, funcionam como uma interrupção rápida no fornecimento de energia, isso faz com que a distribuição dos íons varie, e, consequentemente a dispersão do filme no substrato. Utiliza-se pulsos de alta potência com densidades na ordem de kW/cm^2 , aplicados em curtos intervalos de tempo, geralmente na faixa de dezenas a centenas de microssegundos, e com um ciclo de trabalho baixo (menos de 10%).

A deposição de filme fino por meio de pulverização catódica com magnetron terá maior eficiência na pulverização pois mais íons Ar^+ significam mais átomos ejetados do alvo com a mesma potência. Com isso, será gerado um filme mais denso e compacto, com menos porosidade, melhor aderência e maior qualidade. Com o HIPIMs há menos espalhamento e contaminação do material do alvo, trazendo menos desperdício. Tudo isso com menos energia para manter o Plasma aberto.

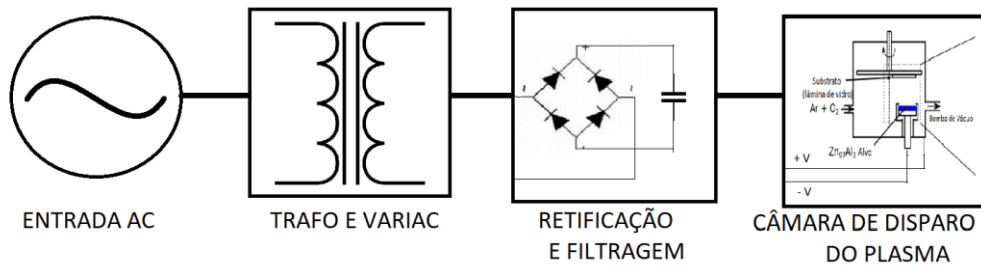
2.5. FONTES DE TENSÃO PARA PULVERIZAÇÃO CATÓDICA

Para a pulverização catódica, seja com magnetron ou não, é necessário um campo elétrico que mantenha o plasma aberto durante a deposição, para isso são utilizadas fontes de tensão, entre as fontes são utilizadas fontes de tensão contínua DC, fontes de rádio frequência e fontes de tensão pulsada.

A fonte de tensão DC constante é um gerador de tensão fixada, onde o operador pode utilizar configurações de baterias para conseguir o nível de tensão desejada ou pode utilizar uma entrada de tensão alternada e por meio de componentes eletrônicos, retificar e filtrar esta tensão para obter a corrente contínua na saída, o controle de corrente pode ser aplicado, no entanto, em deposições o controle por meio da tensão é o mais aplicado.

A figura 4 demonstra o diagrama de blocos de uma fonte DC controlável conectada ao reator. Fontes deste tipo tem custo baixo e podem gerar filmes de boa qualidade.

Figura 4 — Diagrama de blocos de uma fonte DC para pulverização catódica..

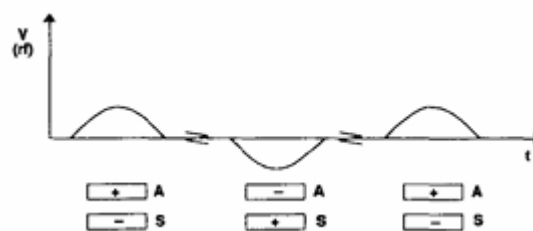


Fonte: Autoria Própria.

O controle deste tipo de fonte pode ser do tipo com ou sem feedback negativo, com o feedback, o operador denomina a tensão desejada e mesmo com alterações dinâmicas da carga a tensão se mantém constante. Sem feedback negativo, o operador precisa manter atenção ao plasma e a tensão medida para aplicar o controle manual, se necessário.

Além da fonte de tensão contínua, uma das mais utilizadas é a fonte de radiofrequência, antes do surgimento da pulverização por radiofrequência, era impossível pulverizar materiais não condutores, pois a carga acumulada no alvo não podia ser dissipada. No entanto, se essas cargas positivas pudessem ser neutralizadas, por exemplo, por bombardeamento de elétrons, a pulverização se tornaria viável. As fontes de radiofrequência possuem uma eletrônica mais complexa, estas utilizam a tensão constante DC e por meio de modulação de frequência geram na saída uma forma de onda semelhante a uma onda senoidal com frequências na ordem de 14 MHz. A figura 5 mostra a forma de onda da saída de uma fonte RF.

Figura 5 — Forma de onda de saída de uma fonte de RF para deposições.



Fonte: SOUSA, 1990.

Plasmas gerados por radiofrequência possuem a capacidade de depositar elétrons durante os semiciclos positivos, neutralizando as cargas formadas pela deposição de íons nos semiciclos

negativos. Como os elétrons possuem maior mobilidade no plasma em comparação aos íons, à superfície do alvo adquire um potencial negativo elevado, o que acelera os íons positivos, permitindo a pulverização do substrato (SOUSA, 1990).

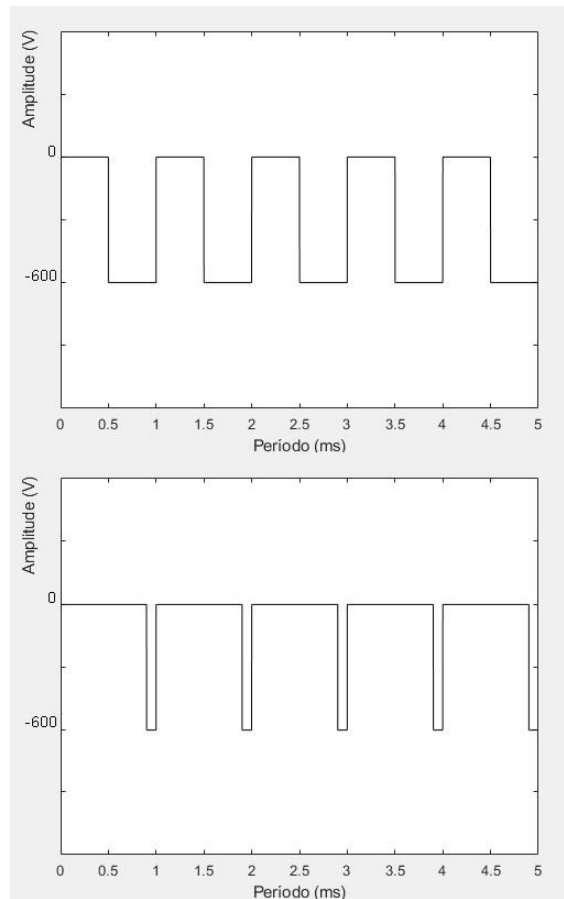
Para a geração eficiente de plasma, são necessárias frequências da ordem de 10 MHz, sendo que os sistemas comerciais geralmente operam em 13,56 MHz, frequência regulamentada para esse tipo de aplicação, como a faixa de frequência está próxima a outras faixas de frequência de rádio, a configuração de frequência precisa ser exata para não interagir ou afetar outros canais de rádio.

A pulverização catódica de isolantes por radiofrequência foi um avanço significativo para a técnica de pulverização catódica, possibilitando a comercialização de equipamentos com diversas configurações e aplicações.

O uso de uma modulação de potência por RF possibilitou deposições de filme fino com maior densidade por um gasto menor de energia que com uma fonte DC. Esta técnica é amplamente utilizada e as fontes de RF apesar de mais custosas que fontes DC continuam sendo um ótimo custo benefício para o operador.

Outra fonte para deposições de filme fino cuja utilização se tornou popular é a fonte pulsada. A fonte pulsada utiliza uma tensão DC e por meio de chaveamento eletrônico é capaz de gerar pulsos de onda quadrada na saída, a figura 6 a seguir mostra a forma de onda de uma fonte DC pulsada.

Figura 6 — Forma de onda de saída de uma fonte pulsada para HiPIMs.

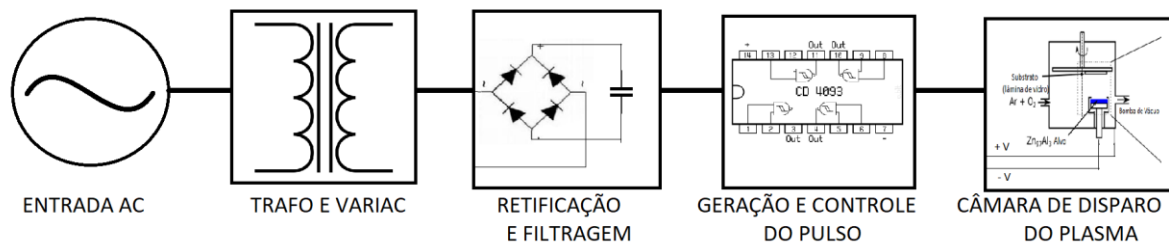


Fonte: Autoria Própria.

Os fatores controláveis de uma fonte pulsada são a tensão de saída, a frequência de chaveamento e a largura de pulso ou ciclo de trabalho da saída. A tensão de saída é controlada diretamente por um controle de tensão que pode ou não utilizar um feedback negativo, este ponto varia de fonte para fonte. A frequência de chaveamento pode variar entre 0,3 à 20 kHz. O ciclo de trabalho é a razão do período em que a saída permanece ligada, ou seja, com tensão positiva, pelo período que permanece desligada, esta razão pode variar de 5 a 100%. A configuração escolhida geralmente é trabalhar com um pulso entre 0,5 a 10 kHz com um ciclo de trabalho de 20 ou 10% e uma tensão de saída entre 300 e 700 V, a rigor de deposições de filme fino, a fonte sempre é conectada em polarização reversa, para que a tensão negativa atue na deposição.

Este tipo de chaveamento ajuda na polarização e despolarização instantânea do plasma, visto que o campo elétrico é constantemente ligado e desligado, desta forma, a fixação do filme no substrato pode ocorrer de forma dispersa, porém ainda com ótima densidade e concentração de filme por nm^2 de área do substrato. A figura 7 mostra o diagrama de blocos de um sistema de deposição com fonte pulsada.

Figura 7 — Diagrama de blocos de uma fonte pulsada para HiPIMs.



Fonte: Autoria Própria.

Por enviar um sinal de saída chaveado onde o ciclo de trabalho geralmente é menor que 30%, a fonte gasta muito menos energia para manter o plasma estável durante a deposição, isto é um fator muito importante dependendo da necessidade do operador, onde fazer 100 deposições com uma fonte pulsada pode ser muito mais em conta que fazer 100 deposições com fonte DC.

2.6. GERAÇÃO DE PULSO

Para a fonte pulsada, a geração do pulso e o controle do mesmo é uma das partes mais importantes do sistema de deposição, partindo de uma fonte DC constante, pulso nada mais é que uma chave ligada ao reator, onde o tempo de ligação e a velocidade de ligar e desligar são as variáveis controláveis. A seção elétrica da fonte pulsada pode ser reduzida ao circuito mostrado na figura 8.

Figura 8 — Circuito simplificado de uma fonte pulsada DC conectada a um Reator.



Fonte: Autoria Própria.

O dispositivo chaveador pode ser de vários tipos, desde chaves mecânicas como interruptores, distribuidores (como em carros a combustão), relés e contadores até chaves eletrônicas como transistores de junção bipolar (TJB), de efeito de campo (FET), de porta isolada (IGBT) ou válvulas termiônicas, para obter uma fonte pulsada, a frequência de chaveamento tem que ser de pelo menos 30 Hz, o que pode trazer certa complexidade ao projeto se forem usadas chaves mecânicas.

Para o projetista, cabe escolher se o pulso será gerado em um sinal de baixa potência que será amplificado, ou se o chaveamento será gerado direto na alta tensão, esta escolha depende muito do tipo de plasma que será obtido.

Em um reator de baixa pressão, a atmosfera rarefeita diminui muito a resistência interna, desta forma, o campo elétrico necessário para o disparo do plasma é muito menor, podendo variar de 300 até 600 V, em condições atmosféricas de temperatura e pressão, o campo elétrico necessário é muito maior, geralmente variando de 15 a 30 kV (ALVES, 2016), porém, dependendo da aplicação pode chegar até 50 kV.

Para fontes de até 1300 V, o recomendado é trabalhar com um circuito de geração de pulso como osciladores, podendo ser baseados em circuitos discretos como osciladores estáveis montados com portas lógicas ou CIs do tipo NE555 entre vários outros, assim como com o uso de microcontroladores, que podem fazer um controle muito mais preciso, como Arduino, ESP32, Raspberry PI, entre outros, o uso de microcontroladores aumenta um pouco o custo do projeto, porém isto fica a rigor do projetista, gerando o pulso com os circuitos discretos, controlar a largura de pulso e a frequência se torna fácil, pois este controle é feito antes da seção de potência da fonte. Após obter o pulso, este é conectado a um arranjo de transistores chaveadores, que irão trabalhar com potência, o arranjo de transistores depende da corrente de saída e do quanto cada um suporta, no geral, MOSFETs são os transistores mais escolhidos, por trabalharem em região de saturação, a perda de energia no chaveamento é muito menor, e, portanto, o calor dissipado também. IGBTs também podem ser uma boa escolha, pois suportam tensões maiores que os MOSFETs devido a sua região de transistor bipolar.

Com fontes de mais de 5 kV de saída, os transistores começam a ficar escassos, o projetista pode escolher seguir com válvulas termiônicas ou chaves mecânicas como relés e contadores, embora a frequência máxima de chaveamento dependa do componente escolhido. Em alguns experimentos com bobinas de Tesla, para obter o chaveamento de tensão da ordem de dezenas de kV, foi utilizada uma máquina lixadeira angular onde o disco foi substituído por um disco adaptado com contatos metálicos para realizar o chaveamento em alta velocidade (STYROPYRO, 2018), este aparelho pode se tornar a chave da fonte pulsada, podendo suportar tensões e correntes que dependem apenas do projetista, embora a rotação de um aparelho deste seja entre 130 e 200 Hz (8 a 12.000 RPM), a frequência de chaveamento depende da quantidade de contatos fixados no disco, 2 contatos igualmente opostos duplicam a frequência e assim por diante.

Para este trabalho, devido a diversos fatores, foi escolhido seguir com a geração de pulso por circuito oscilador discreto conectado a um acionador de IGBT, o desenvolvimento será discutido mais adiante.

3. SIMULAÇÕES

Para desenvolver a fonte, primeiramente foram realizados diversos testes com simulador, como o circuito escolhido foi um oscilador discreto, o simulador precisa suportar trabalhar com constantes de tempo para calcular como a alteração de frequência e largura de pulso afeta a saída do circuito.

Simuladores do tipo SPICE suportam este tipo de simulação, o SPICE é um programa de simulação de circuitos que foi desenvolvido na década de 1970 na Universidade da Califórnia, Berkeley. Sendo amplamente utilizado para simular circuitos analógicos e digitais, oferecendo uma representação matemática precisa do comportamento dos componentes eletrônicos. O SPICE é capaz de fazer análises de transiente, ou seja, permite observar como um circuito se comporta ao longo do tempo, capaz também de fazer análises em AC ou como é a resposta em frequência de circuitos. O SPICE também faz análise em DC e permite a modelagem de componentes, suportando uma ampla gama de modelos para resistores, capacitores, indutores, diodos, transistores e outros componentes eletrônicos, permitindo também ao usuário manipular as equações fundamentais que regem um componente, alterando suas propriedades internas, permitindo ao usuário experimentar com componentes nunca testados.

Entre os simuladores tipo SPICE mais comuns estão o LTspice, o Multisim, o PSpice, entre outros, existem simuladores que utilizam o modelo SPICE em conjunto com outros modelos de resolução de equações diferenciais como o PSIM, o Proteus, e vários outros.

3.1. COMPORTAMENTO ELÉTRICO DO PLASMA

Independentemente da fonte utilizada, e do tipo de simulador, é importante ressaltar que o plasma no reator se comporta eletricamente como uma carga não linear, ou seja, a corrente não varia linearmente com a tensão aplicada.

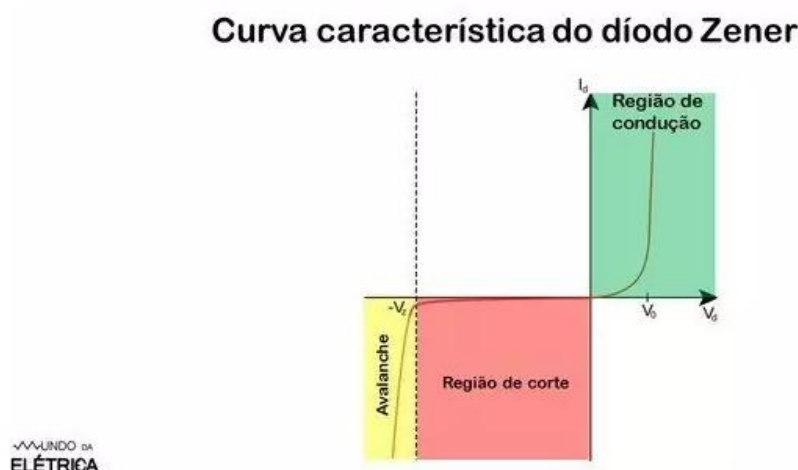
Cargas lineares são resistores, aquecedores, entre outras cargas resistivas, cargas não lineares em especial cargas RL, RC e RLC possuem um comportamento transiente diferente do comportamento em regime permanente, ainda assim, ambos podem ser determinados por equações relativamente simples.

Na modelagem eletrônica, diferentes arranjos de circuitos com capacitores, indutores e resistores podem ser determinados por equações diferenciais que atendem os modelos em quase todas as situações (SVOBODA, 2014).

As cargas podem ser dinâmicas ou estáticas, tomando um arranjo RLC série, ou seja, um circuito composto por um resistor, um indutor e um capacitor em série, quando os seus valores de indutância, capacitância e resistência são mantidos fixos, a carga é estática, embora ela ainda tenha um comportamento em transiente muito diferente do comportamento em regime permanente, estes dois estados permanecem inalterados durante toda a simulação do circuito. Cargas dinâmicas podem ter as suas variáveis alteradas durante o funcionamento do circuito, a modelagem consistente de circuitos deste tipo depende muito do tipo de simulador escolhido, visto que para entregar valores em tempo real o simulador precisa ter algoritmos de integração e diferenciação numérica bem ajustados, o tipo de simulação *Sweep* pode ser útil neste caso, sendo uma simulação onde se define qual será a variação do componente, fonte ou carga dentro de um intervalo fixo, desta forma, a simulação pode entregar resultados mais consistentes e utilizáveis.

Para este trabalho, a carga utilizada será o plasma de reator de baixa pressão, esta carga é completamente dinâmica, devido a interação do gás ionizado com o campo elétrico é muito trabalhoso simular este tipo de carga, no entanto parte de seu comportamento elétrico pode ser comparado à um diodo Zener.

Figura 9 — Curva característica de um diodo Zener.



Fonte: MATTETE, 2023.

O gráfico da figura 9 mostra as diferentes regiões de funcionamento do diodo Zener quando aplicada uma certa tensão V_d , tanto em polarização direta quanto reversa. O diodo zener atua como um diodo comum em polarização direta, tendo uma tensão de polarização que pode variar de 0,5 a 0,7 V, após a polarização a corrente tende ao infinito, região de condução, sendo limitada pelos outros componentes do circuito, o diodo Zener no entanto é amplamente utilizado em configuração de polarização reversa, onde a tensão necessária para atingir a região de avalanche, ou região de condução reversa, varia dependendo do diodo, podendo ser de 1, 3, 5, 12, 15, 20 V entre outros, desta forma após atingir esta tensão o diodo conduz corrente no sentido reverso, novamente esta corrente depende dos componentes externos, pois o diodo irá conduzir valores cada vez maiores de corrente, podendo levar a sua destruição, esta corrente deve ser limitada por um resistor em série ou pela fonte de tensão para evitar a destruição do componente.

Assim como um diodo Zener mantém uma tensão quase constante quando submetido a uma corrente reversa acima do valor de avalanche, o plasma em um reator de baixa pressão mantém uma queda de tensão relativamente estável após a ignição, apesar das variações de corrente. Isso ocorre porque, após a quebra dielétrica do gás, a condução é sustentada por processos de ionização e recombinação, mantendo a tensão relativamente fixa. Após atingir a tensão de avalanche ou túnel, a corrente pode variar significativamente sem uma grande mudança na tensão. No plasma, algo semelhante acontece: após a ignição, a tensão entre os eletrodos se estabiliza dentro de uma faixa relativamente estreita, mesmo que a corrente do plasma varie.

Entretanto, em algumas condições, a curva corrente-tensão de um plasma pode apresentar um comportamento de resistência diferencial negativa, o que significa que um aumento na corrente pode levar a uma redução da tensão, um comportamento análogo ao observado na região de ruptura de um diodo Zener.

Dadas estas condições de comportamento elétrico do plasma de baixa pressão, a rigor de corrente máxima de saída, neste trabalho as simulações foram feitas com uma carga puramente resistiva, posteriormente na construção do modelo físico também há um elemento resistivo adicionado à saída que será melhor explicado posteriormente.

3.2. CIRCUITO OSCILADOR

Como foi citado anteriormente, uma das partes mais importantes de uma fonte pulsada é o seu circuito oscilador, para esta fonte, alguns fatores foram levados em conta, o primeiro deles, foi a facilidade de manutenção corretiva da fonte, ao utilizar microcontroladores, estes possuem uma

programação compilada e gravada em sua memória que muitas vezes requer uma expertise do reparador para acessar o programa e compreender seu funcionamento para fazer correções, modificações e até mesmo substituir o microcontrolador em casos de queima do componente. Entendendo que os operadores da fonte são físicos e não engenheiros eletrônicos ou eletricitas, quanto mais simples for a manutenção corretiva, melhor, por isso, foi escolhido seguir com um circuito oscilador com componentes discretos, os circuitos integrados.

Em protótipos anteriores, de trabalhos de iniciação científica, foram utilizados os circuitos integrados NE555 e o CD4093, ambos com condições de trabalho diferentes, o NE555 é um circuito integrado amplamente utilizado em aplicações de temporização, geração de pulsos e osciladores. Desde sua introdução na década de 1970, o NE555 tornou-se um dos componentes mais populares em eletrônica devido à sua versatilidade, simplicidade e baixo custo. Naquele trabalho foi utilizado o NE555 em configuração de oscilador astável gerando uma onda quadrada contínua. A frequência e o ciclo de trabalho da onda são definidos pelos resistores e capacitores externos ao circuito integrado.

Neste protótipo a frequência do chaveamento era determinada pelo capacitor da constante de tempo fixo do circuito, variando de 800 até 1200 Hz dependendo do ajuste realizado, este protótipo suportava no máximo 700 V de deposição (BUENO, 2022).

Para os objetivos da época, este circuito atendeu muito bem, como a iniciação científica foi estendida, a rigor de experimentação com circuitos diferentes, foi escolhido o CD4093 Schmitt Trigger, este circuito não é um temporizador, mas um arranjo de portas lógicas NAND do tipo Schmitt trigger que é projetado para converter um sinal de entrada analógico em um sinal digital com características de histerese. Isso significa que ele tem dois níveis de tensão: um nível de disparo (threshold) para a transição de baixo para alto e outro para a transição de alto para baixo.

Essa histerese ajuda a eliminar ruídos e oscilações indesejadas no sinal de entrada, garantindo uma saída limpa e estável, além de ter boa velocidade de resposta, o que o faz adequado para gerar PWM de frequências até 15 kHz, pois este CI pode ser configurado para gerar ondas quadradas ou sinais pulsantes.

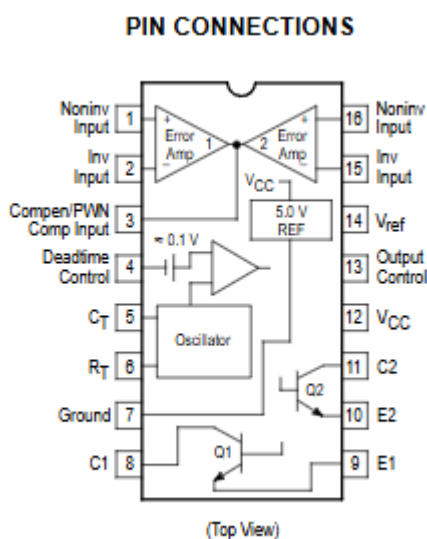
Naquele protótipo foi adicionada um controle de faixas de frequência, por meio da seleção com chave mecânica do capacitor utilizado na constante de tempo do chaveamento do circuito, poderiam ser escolhidas 4 faixas, de 800 a 1400 Hz, de 2 a 3,5 kHz, de 4 a 5,5 kHz e de 9 a 10,5 kHz, assim como a tensão de operação poderia ser de até 850 V para a deposição (BUENO, 2023).

No entanto, esta escolha de frequência não funcionava corretamente muitas vezes devido a características dos capacitores como a montagem, proximidade do circuito integrado, tipo de capacitor etc.

Por isso, neste trabalho foi escolhido outro circuito integrado, um CI comumente utilizado em fontes chaveadas de computador, o TL494, a principal diferença deste CI é que ele possui um oscilador interno, o que faz seu chaveamento ser muito mais preciso.

O TL494 mostrado na figura 10 é um circuito de controle de modulação de largura de pulso do tipo módulo chaveador, um circuito de controle de frequência fixa designado primeiramente para controle de fontes chaveadas.

Figura 10 — Diagrama interno do circuito integrado TL494.



Fonte: MOTOROLA (s.d.).

Capaz de trabalhar com tensão de alimentação de até 42 V, podendo suportar até 500 mA de corrente de saída de coletor e dissipar até 1 W de potência, o TL494 é um CI robusto, a sua frequência de oscilação é fixa por causa do oscilador interno, que é uma referência para o CI trabalhar com precisão no chaveamento mas pode ser alterada pelo uso de um circuito RC conectado externamente.

Um oscilador interno linear em dente de serra tem sua frequência programável por dois componentes externos, RT e CT. A frequência aproximada do oscilador é determinada pela equação (5) (MOTOROLA s.d.), onde Fosc é a frequência de oscilação, Rt é o resistor e Ct o capacitor da constante de tempo.

$$f_{osc} = \frac{1}{Rt \cdot Ct}$$

(5)

Para uma configuração de saída simples a razão da frequência de saída pela frequência de oscilação é fixa, em saída dupla esta razão será 2 vezes a frequência de oscilação como mostra a tabela 1.

Tabela 1 - Tabela Funcional de Saída do TL494

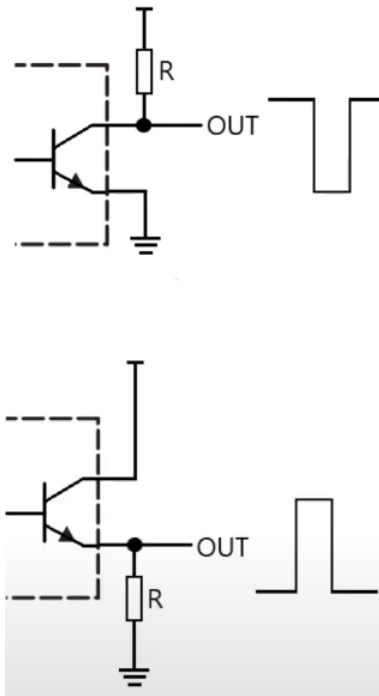
Controle de Entrada e Saída	Função de Saída	Fsaída/Fosc =
Aterrado	PWM simples em Q1 e Q2	1,0
Conectado à Tensão de Referência	Operação Push-Pull (meia ponte)	0,5

Fonte: MOTOROLA (s.d.).

No circuito oscilador escolhido para este trabalho a configuração de saída é simples, portanto, a razão da frequência de saída pela frequência de oscilação é 1, ou seja, são as mesmas.

Pela figura 10, algumas características devem ser destacadas, o TL494 possui dois transistores de saída internos que podem ser conectados em configuração de pull up, para obter um pulso negativo em relação à referência ou de pull down para obter um pulso positivo como mostra a figura 11.

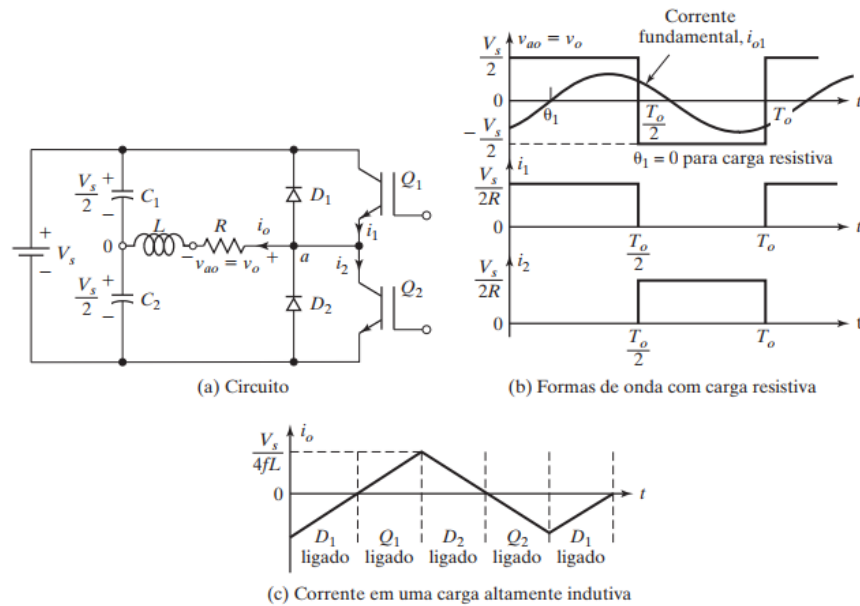
Figura 11 — Sinal de saída do TL494 dependendo das conexões externas.



Fonte: ELETRICMONKEYBRAIN, 2023.

O TL494 possui também um pino de controle de saída (pino 13), o que configura os transistores para trabalharem com saídas defasadas ou em fase, se conectado ao terra as saídas serão em fase, se conectado ao pino 14 de referência as saídas serão 180° defasadas. Saídas em fase são utilizadas para acionar chaves simples como um mosfet ou transistor (conversores Buck, Boost, acionadores de motores etc) e saídas defasadas para configuração tipo push pull ou meia ponte, figura 12, como acionadores de transformadores e inversores CC-CA.

Figura 12 — Inversor monofásico Meia Ponte



Fonte: RASHID, 2014, figura 6.2, p. 245.

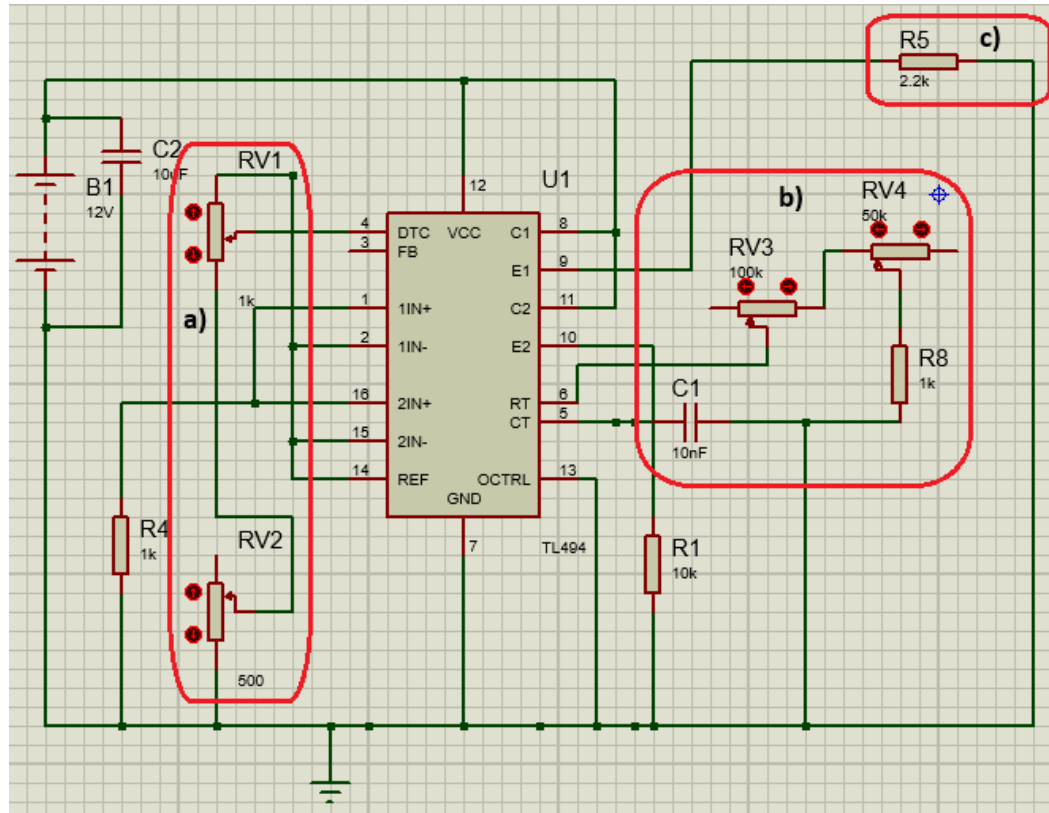
O pino 4 de DTC ou *dead time control* é o pino que controla o tempo morto entre os pulsos dos transistores de saída, ou seja, o tempo que um transistor leva para ligar após o outro desligar ou o tempo que um permanece ligado, um sistema de segurança muito importante para evitar curto circuito em configurações tipo meia ponte.

Este pino é muito importante, pois em configuração de saída em fase, este pino pode ser utilizado para configurar a largura do pulso de saída, se aplicado 0V neste pino, o tempo morto será de 3% do tempo, e se aplicado mais que 3,3 V o tempo morto será de 100% do tempo, a saída será nula, neste trabalho estes parâmetros foram utilizados para controlar o ciclo de trabalho entre 0 e 97% do pulso, utilizando a referência de 5 V, pino 14, do próprio CI (ELETRICMONKEYBRAIN, 2023).

Este CI possui dois amplificadores de erro para controlar a tensão de saída, os amplificadores podem ser conectados como comparadores utilizando a referência interna do CI e comparando com a referência da tensão de saída, controlando o pulso de saída dos transistores por feedback negativo e, desta forma, mantendo a saída do circuito estável, este recurso pode ser utilizado para o desenvolvimento de fontes chaveadas de saída automática.

Neste trabalho o CI será conectado com saída simples em fase e o circuito de geração de pulso utilizado foi baseado no seguinte esquema da figura 13, baseado em um circuito encontrado na internet (ALLAMERICANRADIO, 2018).

Figura 13 — Circuito proposto para geração de pulsos. a) Ajuste de largura de pulso b) Ajuste de frequência de oscilação, c) Resistor de carga (RL)



Fonte: Autoria Própria

A figura 13 mostra o circuito já montado, a alimentação escolhida foi de 12 V, a configuração simples será utilizando o transistor Q1 onde seu coletor está conectado à alimentação, o transistor Q2 não é utilizado, porém para evitar oscilações na saída seu emissor é conectado ao resistor R1 e seu coletor conectado à alimentação. na seção a) da figura está o arranjo de controle de largura de pulso, este arranjo utiliza um divisor de tensão com resistores conectado ao pino de controle de tempo morto e aos amplificadores de erro do CI utilizando a tensão de referência de 5 V do pino 14, foram aplicados dois potenciômetros para obter ajuste grosso e fino da largura de pulso utilizando a regra de 0 à 3,3 V no pino de DTC para controlar o ciclo de trabalho (diretamente proporcional à largura de pulso) entre 0 e 97%.

A seção b) do circuito mostra o arranjo de controle da frequência de saída do oscilador, foram conectados potenciômetros em série para o controle fino e grosso da frequência de saída, utilizando a equação 5 e aplicando os valores utilizados encontra-se a F_{min} e $F_{máx}$ de oscilação do circuito, onde:

F_{min} : Frequência onde a resistência do arranjo RC é a maior possível, com os potenciômetros na posição de resistência total.

$$f_{min} = \frac{1.1}{(8 + 3000 + 4000) \cdot 10^3} \leftrightarrow \frac{1.1}{(10000 + 5000) \cdot 10^3} = 728,47 \text{ Hz}$$

$F_{máx}$: Frequência onde a resistência do arranjo RC é a menor possível, com os potenciômetros na posição de resistência mínima.

$$f_{max} = \frac{1.1}{(8 + 300 + 400) \cdot 10^3} \leftrightarrow \frac{1.1}{(1000 + 0 + 0) \cdot 10^3} = 110 \text{ kHz}$$

Os valores de $F_{máx}$ e F_{min} foram calculados considerando condições ideais de funcionamento do circuito e componentes, na confecção da placa de circuito impresso, os valores sofreram alteração.

Para a fonte pulsada deste trabalho a frequência de chaveamento mais utilizada será de 1 kHz e a $F_{máx}$ aplicada não deve passar de 15 kHz, apesar de os componentes permitirem frequências maiores.

A seção c) da figura 13 se trata apenas de um resistor de carga, seu valor apenas não pode exceder a potência máxima de saída do circuito, de 1 W. Utilizando a figura 13 como referência, também foi aterrado o pino de controle (pino 13) e de acordo com a tabela 1, isso foi feito para que Q1 e Q2 sempre sejam ligados e desligados ao mesmo tempo. Nas simulações este circuito se mostrou confiável e pelo uso de poucos componentes externos e ser um circuito integrado discreto, o projeto seguiu com este modelo.

3.3. SIMULADOR

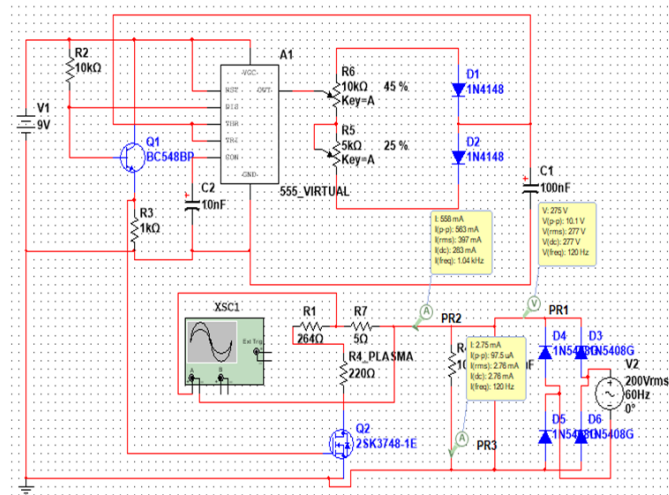
Os diferentes simuladores podem ser listados por suas características principais. O LTspice é excelente para circuitos analógicos, especialmente fontes chaveadas e amplificadores. Possui um motor de simulação altamente otimizado, sendo um dos mais rápidos na execução de análises transientes e AC, porém tem uma Interface não muito intuitiva e suporte limitado para circuitos digitais.

O Multisim possui uma interface gráfica intuitiva, ideal para estudantes e engenheiros iniciantes com suporte nativo a componentes digitais e microcontroladores, permite simulação interativa com instrumentos virtuais como osciloscópio, analisador lógico e gerador de função e integração com hardware NI (como LabVIEW) para testes reais. No entanto, é um simulador mais pesado e menos otimizado que o LTspice para análises complexas.

O Proteus por outro lado, possui simulação avançada de microcontroladores (PIC, AVR, ARM, Arduino, ESP32), um atributo que o LTspice e o Multisim carecem. O Proteus permite testar código de firmware embarcado, inclui design de PCB integrado (ARES), facilitando a transição do esquema para a placa de circuito impresso mas não é tão eficiente quanto o LTspice para análise detalhada de circuitos analógicos e fontes chaveadas.

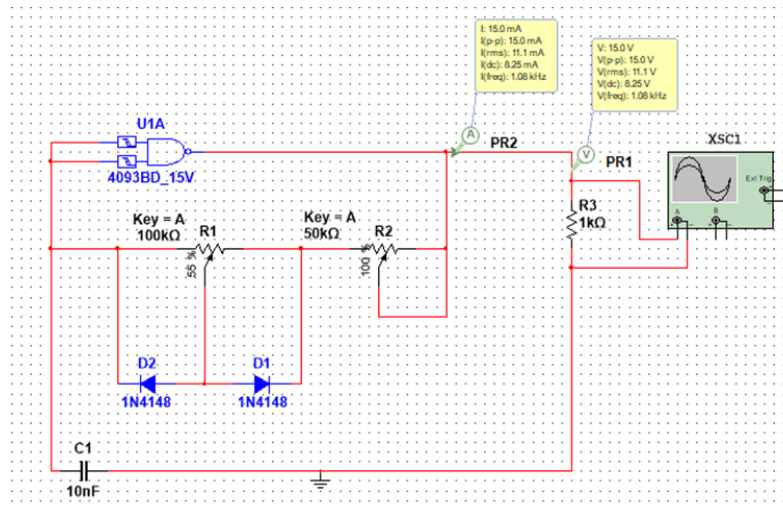
Alguns simuladores foram cogitados para este trabalho, em versões anteriores, onde foram utilizados outros circuitos integrados, o simulador escolhido foi o Multisim, pela precisão na simulação do NE555, como mostrado na figura 14 e do CD4093, como mostrado na figura 15, além da possibilidade de rodar um osciloscópio nativamente para trabalhar com os sinais de chaveamento.

Figura 14 — Circuito simulado em Multisim do circuito de chaveamento da Fonte pulsada da Iniciação científica PIBIC de 2021 com NE555.



Fonte: Autoria Própria

Figura 15 — Circuito simulado em Multisim do circuito de chaveamento da Fonte pulsada da Iniciação científica PIBIC de 2022 com CD4093.



Fonte: Autoria Própria

O Multisim atendeu a necessidade de compreensão dos circuitos e atestou a suas funcionalidades para que montar as placas de prototipagem fosse seguro. Neste trabalho o circuito integrado escolhido foi o TL494, no entanto este CI não é encontrado nas bibliotecas do Multisim, e desenvolver o circuito como um novo componente seria muito trabalhoso e provavelmente geraria erros em sua simulação.

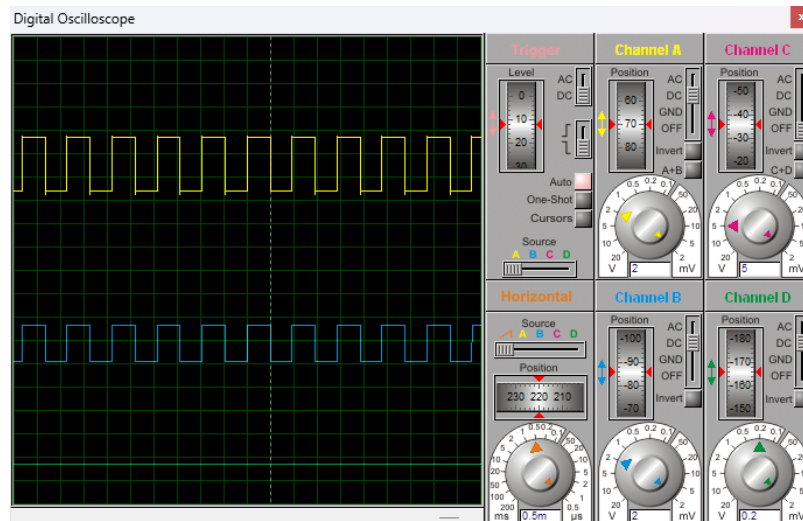
A porta dos FETs e IGBTs pode ser comparada a um capacitor, em condições ideais quando aplicada uma tensão, o capacitor é carregado e se mantém carregado a menos que tenha um circuito fechado conectado em seus terminais para drenar a energia. Em condições naturais o capacitor possui resistência interna que absorve a energia armazenada no componente. Da mesma forma, a porta de um FET ou IGBT tem o comportamento semelhante, quando energizada, a porta armazena esta energia fazendo com que mesmo cortando a alimentação da porta, o FET continua em região ativa, isto é um problema para circuitos de chaveamento, por isso, algumas técnicas podem ser utilizadas para garantir que a porta seja alimentada e desconectada sem o efeito da capacitância de porta.

A técnica mais simples é conectar um resistor pull down de porta, este resistor irá drenar a energia da porta quando o FET for desligado, esta técnica funciona bem para chaveamentos em baixas frequências menores que 1 kHz ou para acionamento direto de cargas do tipo on/off.

Outra técnica é utilizar um arranjo de transistores para rapidamente drenar a porta do FET, conectando a ao terra assim que o sinal de ligar for desligado, esta técnica também é muito boa para isolar o circuito oscilador da seção de chaveamento de potência ou acoplar FETs ou IGBTs de alta potência com o circuito oscilador. Apesar de ocupar espaço significativo na placa de circuito impresso, este circuito permite o chaveamento muito preciso em frequências que dependem apenas das características dos transistores, podendo chegar a até dezenas de KHz, o projetista pode escolher as características específicas do seu circuito.

O arranjo de transistores é chamado de *MOSFET DRIVER* e existem circuitos integrados especializados para este tipo de tarefa, os circuitos integrados variam em potência de trabalho e frequência de chaveamento, os CIs não ocupam espaço nas placas de circuito impresso apesar de ter o custo mais elevado que o arranjo de transistores. O circuito da figura 16 foi simulado e as formas de onda da saída do TL494 e do Arranjo de transistores foram as seguintes:

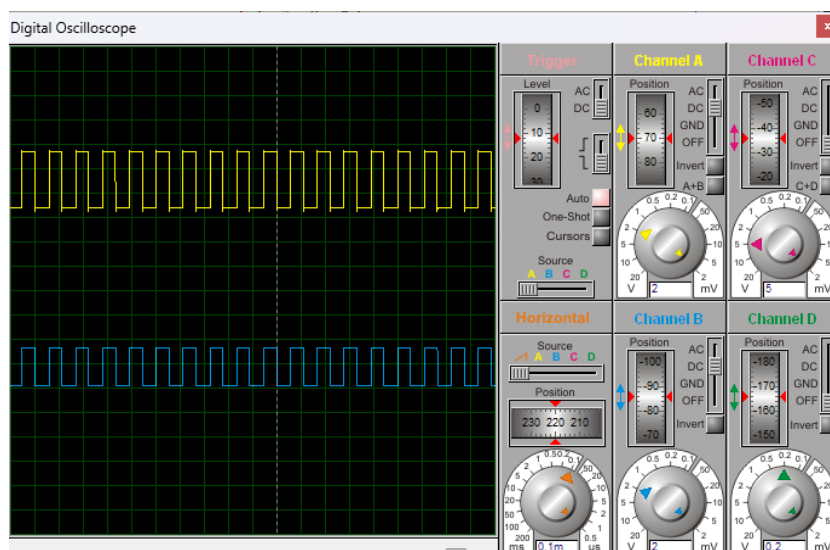
Figura 17 — Formas de onda do circuito simulado no Proteus 8 com ciclo de trabalho de 50% e frequência de 1 kHz; a curva em amarelo é a saída do TL494 e a curva em azul a saída do arranjo acionador.



Fonte: Autoria Própria

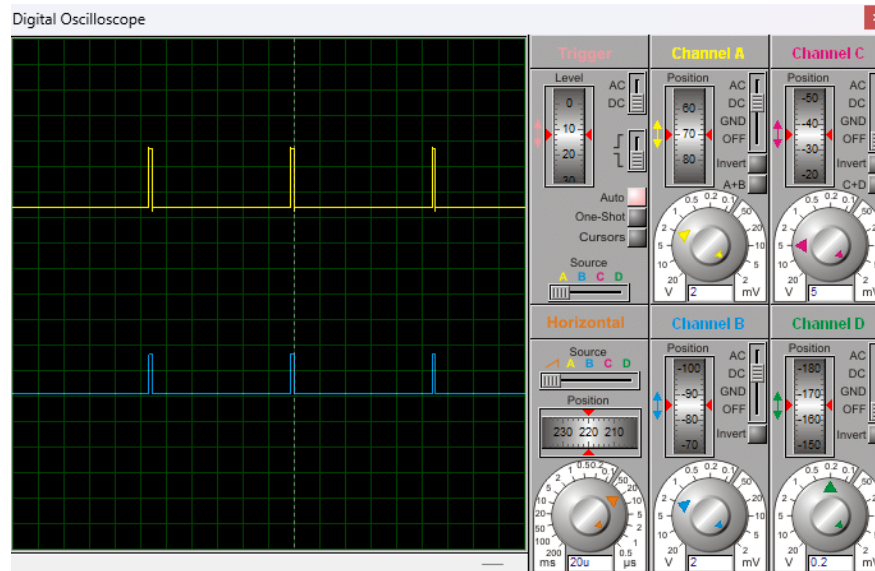
O circuito foi regulado para a frequência de 1 kHz que pode ser verificada pelo período de 1 ms da onda quadrada com ciclo de trabalho de 50%. Para atestar que o circuito atinge diferentes frequências outras formas de onda foram coletadas:

Figura 18 — Formas de onda do circuito simulado no Proteus 8 com ciclo de trabalho de 50% e frequência de 10 kHz; a curva em amarelo é a saída do TL494 e a curva em azul a saída do arranjo acionador.



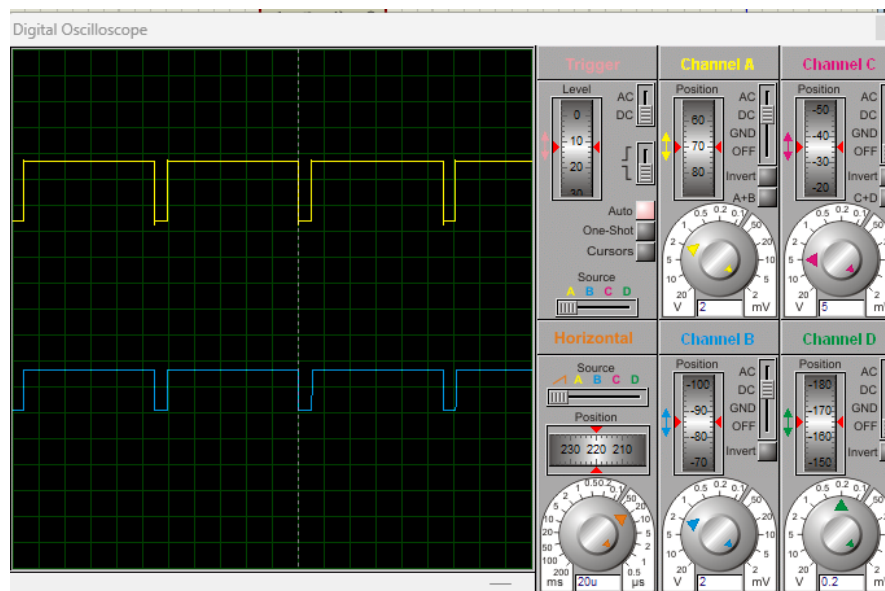
Fonte: Autoria Própria

Figura 19 — Formas de onda do circuito simulado no Proteus 8 com ciclo de trabalho <10% e frequência de 10 kHz; a curva em amarelo é a saída do TL494 e a curva em azul a saída do arranjo acionador.



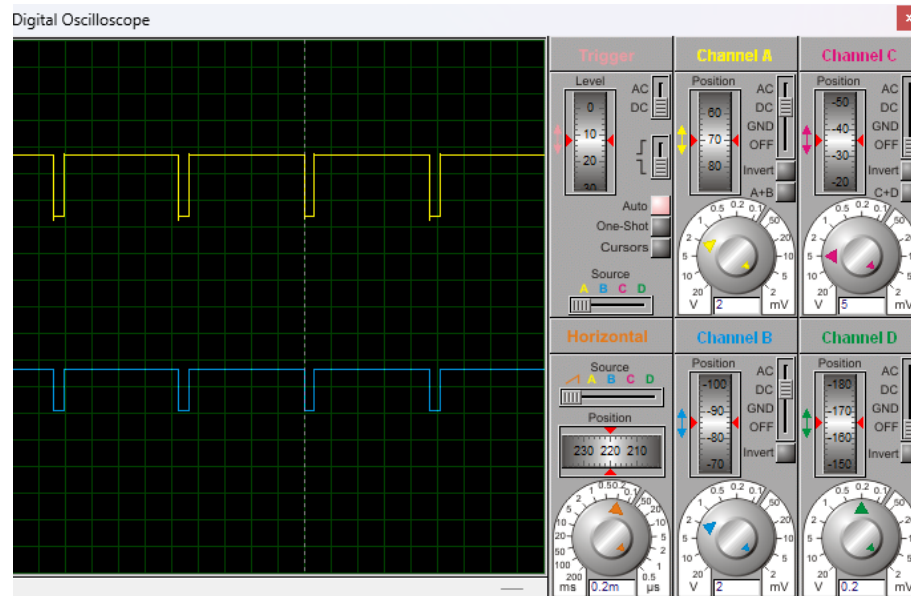
Fonte: Autoria Própria

Figura 20 — Formas de onda do circuito simulado no Proteus 8 com ciclo de trabalho de ~95% e frequência de 10 kHz; a curva em amarelo é a saída do TL494 e a curva em azul a saída do arranjo acionador.



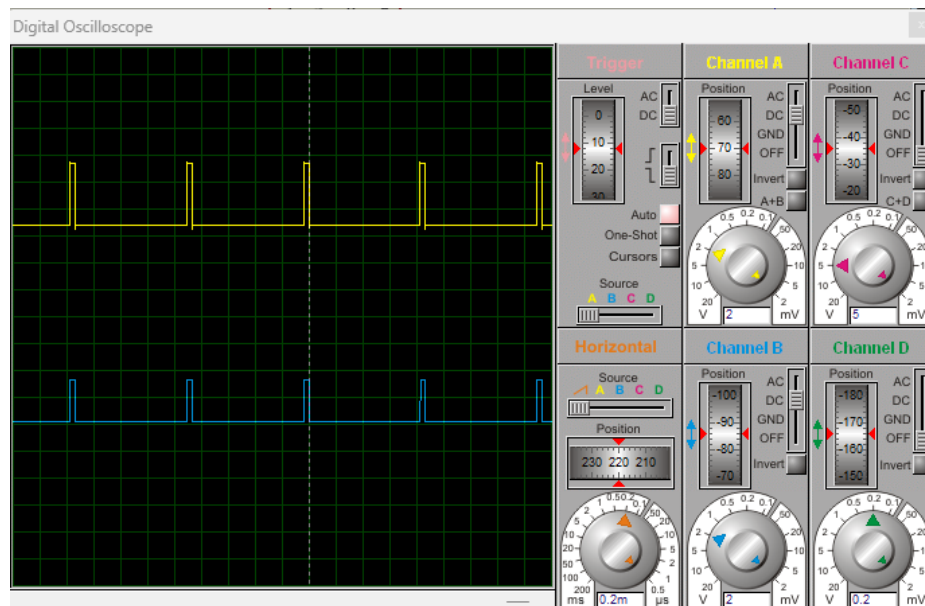
Fonte: Autoria Própria

Figura 21 — Formas de onda do circuito simulado no Proteus 8 com ciclo de trabalho de $\sim 95\%$ e frequência de 1 kHz; a curva em amarelo é a saída do TL494 e a curva em azul a saída do arranjo acionador.



Fonte: Autoria Própria

Figura 20 — Formas de onda do circuito simulado no Proteus 8 com ciclo de trabalho de $<10\%$ e frequência de 1 kHz; a curva em amarelo é a saída do TL494 e a curva em azul a saída do arranjo acionador.



Fonte: Autoria Própria

As simulações demonstraram que o controle desejado foi atingido e o desenvolvimento da placa de prototipagem poderia ser iniciado, no entanto a simulação do disparo do plasma não foi realizada devido às suas propriedades físicas não lineares do mesmo.

Em versões anteriores da fonte abordada neste trabalho, devido a característica de corrente de avalanche do plasma, nenhum semiconductor suportou o chaveamento de seu disparo sem sofrer danos críticos, por isso, já na primeira versão da fonte foi adicionada uma carga resistiva em série com a saída, para que mesmo durante o comportamento de avalanche, o resistor atuasse como uma proteção para o dispositivo chaveador, limitando a corrente máxima e também a potência máxima que o plasma poderia dissipar.

A rigor de simulações de potência, podemos reduzir todo o sistema a uma fonte de pulsos conectada a um resistor, porém o efeito da corrente no plasma não será linear, e em laboratório, nota-se que a corrente no plasma pode aumentar mesmo sem a variação de tensão, por isso, neste trabalho o disparo e manutenção do plasma foi considerado extremamente trabalhoso e muito incerto para ser simulado.

4. METODOLOGIA

No desenvolvimento da fonte, a metodologia foi dividida em blocos para melhor compreensão de como cada porção da fonte atua para o bom funcionamento do circuito como um todo.

A entrada AC de 127 V será conectada a um variac para controlar a tensão alternada que será conectada ao enrolamento primário de um transformador de potência com relação de transformação para o enrolamento secundário de 22 vezes, desta forma, a tensão máxima de saída ultrapassa 2500 V, no entanto, o Variac será utilizado para manter esta saída abaixo de 1000 V. Esta alta tensão será conectada a um módulo de retificação e filtragem para alimentar um módulo de geração e controle do pulso que possui uma seção de potência, onde o chaveamento do pulso é feito, o reator ou câmara de disparo então é conectado na seção chaveadora.

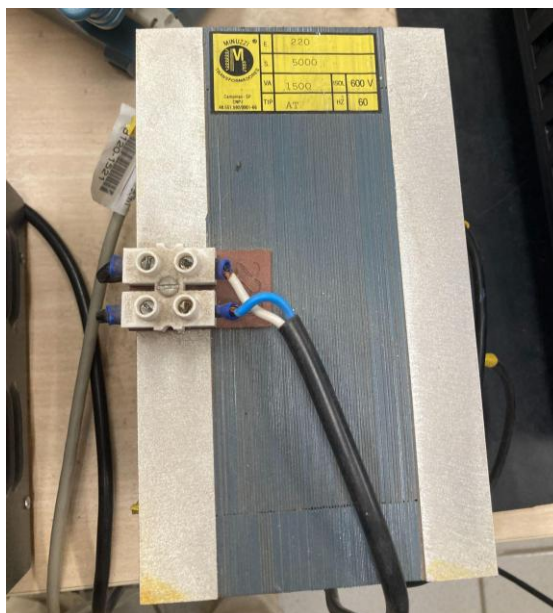
A fonte pulsada deve atender certas características apontadas pelos usuários do laboratório de plasma, características de corrente, tensão e potência:

- Tensão DC de 300 a 950 V
- Corrente média DC máxima 2 A;
- Corrente pulsada máxima 15 A (pico);
- Frequência de chaveamento de 1 a 10 kHz
- Ciclo de trabalho variável de 5 a 80%

Além dos parâmetros elétricos da fonte, a montagem física dos componentes modulares da fonte, isto é, seção retificadora, chaveadora e geradora de pulso, deverão ser incorporados em um gabinete específico, para atender questões de segurança e manejo do aparelho.

O transformador, figura 21, e Variac serão responsáveis por fornecer uma entrada variável AC de 300 a 1000 V para a seção retificadora, onde será transformada em DC para ser chaveada.

Figura 21 — Transformador de força utilizado para atingir tensão AC de mais de 500 V.



Fonte: Autoria Própria

Para o desenvolvimento do esquema elétrico completo e das placas de circuito impresso foi utilizada a plataforma EasyEDA, por ser muito intuitiva e por ser um aplicativo em nuvem, permitindo o trabalho em qualquer máquina ou local.

A fonte DC que alimenta o gerador de pulsos é um conjunto de uma fonte chaveada com um regulador do tipo Buck, a fonte chaveada é uma WLK4-POWER-MP-12-1-882-860-12 utilizada no aparelho Sony TA-SA300WR, esta fonte tem uma saída de 32 VDC, porém para obter os 13,5 V de alimentação da placa geradora de pulso e do dispositivo chaveador, a saída desta fonte foi conectada a um regulador buck, que diminui a tensão para 13,5 V.

Para ligar todo o sistema um arranjo de chaves foi utilizado para aproveitar a tensão de standby da fonte chaveada como a ignição de todo o sistema, isso é feito conectando um resistor de 1 k Ω entre os pinos 8 e 9 da fonte chaveada.

Para testar a fonte pulsada, esta será conectada primeiramente a uma carga resistiva, onde serão aplicadas a tensão e frequência espelho de uma deposição, verificando que a fonte suporta as condições de funcionamento por pelo menos 20 minutos, será realizada uma deposição teste no reator com pelo menos 20 minutos de duração, no caso da fonte suportar sem a necessidade de uma modificação (troca de componentes, melhoria de refrigeração, etc), a fonte será aprovada no teste de qualidade para ser utilizada por todos os usuários do laboratório.

4.1. RETIFICADOR

O retificador é a seção da fonte que transforma a tensão alternada do Variac em tensão contínua, consistindo em fusível, diodos de retificação e capacitores de filtro, foram escolhidos componentes que suportam a tensão necessária.

Os diodos escolhidos foram os SK3/16, estes diodos suportam até 1600 V de polarização direta e conseguem conduzir até 3 A, durante a montagem do circuito foram colocados dois em paralelo para cada braço da ponte retificadora, desta forma permitindo a fonte conduzir até 6 A de corrente média, mesmo que fosse deixado espaço para três diodos por braço retificador.

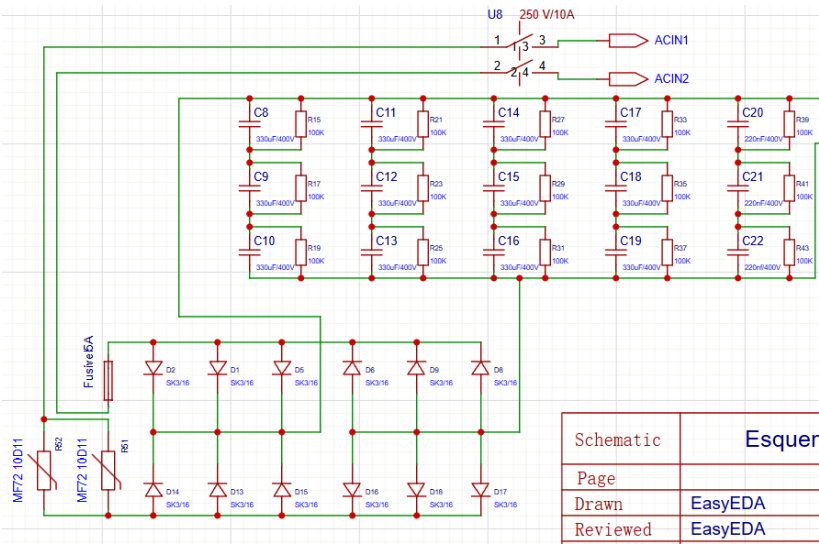
Os capacitores de filtragem devem suportar até mais que 1000 V e fornecer pelo menos 400 μF de filtragem, capacitores com estas características são raros e tem custo elevado, por isso foi montado um arranjo com 3 capacitores eletrolíticos de 330 $\mu\text{F}/400\text{V}$ em série formando 110 $\mu\text{F}/1200\text{V}$ e foram conectados em paralelo mais 3 destes arranjos, formando no total 440 $\mu\text{F}/1200\text{V}$.

Foi colocado também um arranjo de 3 capacitores de poliéster de 220 nF/400 V em série para obter 73,3 nF/1200 V, este arranjo é responsável por filtrar ruídos de alta frequência.

Dois NTCs MF72 10D11 em paralelo foram colocados antes dos diodos, estes dispositivos são utilizados para diminuir a corrente transiente de carregamento dos capacitores assim que a fonte é ligada, isso aumenta a vida útil dos diodos e dos capacitores, os NTCs foram colocados em paralelo para diminuir a dissipação de potência em cada um deles. Ao ligar a fonte estes dispositivos atuam como resistores limitadores de corrente de 5 Ω , e durante o funcionamento do circuito vão diminuindo sua resistência, permitindo a passagem de corrente e diminuindo sua dissipação térmica.

A figura 22 é um recorte do esquema elétrico da fonte, focando apenas a seção retificadora, em paralelo com os capacitores são colocados resistores para descarregar os capacitores após o uso por questão de segurança para os usuários., uma chave de potência foi conectada à entrada AC vinda do Variac, esta chave funciona como um controle de emergência em situações em caso de curto circuito ou se pelo comportamento do plasma a tensão e corrente ultrapassarem o valor máximo de funcionamento da fonte.

Figura 22 — Recorte do esquema elétrico da fonte pulsada, com foco na seção retificadora.

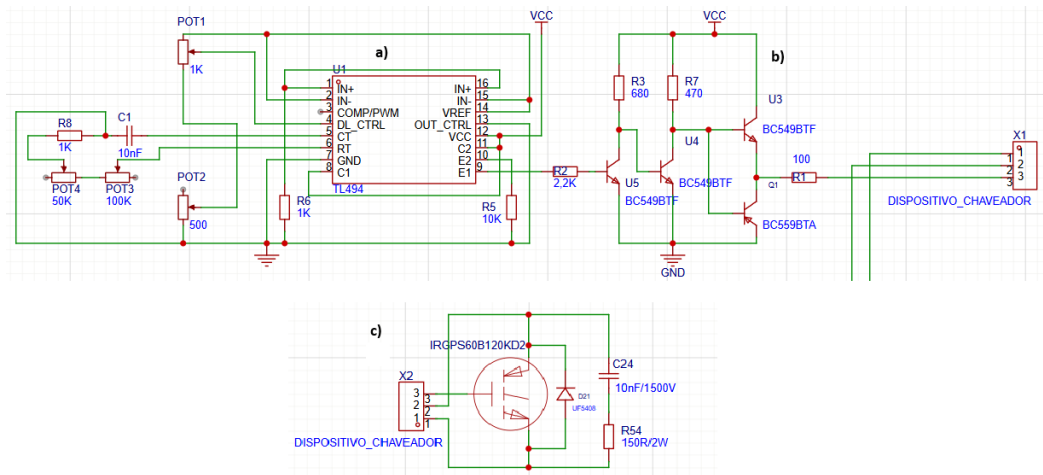


Fonte: Autoria Própria

4.3. GERADOR DE PULSO E DISPOSITIVO CHAVEADOR

O gerador de pulso, ou o circuito oscilador é o mesmo mostrado no capítulo 3.3 Simulador, porém o chaveamento é feito por um transistor do tipo IGBT com alguns componentes externos de proteção.

Figura 23 — Diagrama esquemático do circuito gerador de pulso com o dispositivo chaveador a) TL494 gerador do pulso b) Arranjo de transistores acionador de MOSFET/IGBT c) IGBT chaveador com filtro snubber.



Fonte: Autoria Própria

O diagrama da figura 23 mostra o gerador de pulso já discutido com o TL494 e o acionador de MOSFET ou IGBT, a saída deste acionador é ligada a um conector que conecta o dispositivo chaveador.

O dispositivo chaveador se trata de um IGBT com um circuito de proteção, o IGBT escolhido precisa ser acessível, relativamente fácil de encontrar e não possuir custo extremamente elevado, por isso, foi escolhido o IRGPS60B120KD2, um IGBT (Transistor Bipolar com Porta Isolada) desenvolvido pela International Rectifier, podendo suportar até 1200 V de tensão entre coletor emissor (V_{ces}), com uma tensão de coletor emissor ligado (V_{CEon}) de 2,5 V, uma tensão de porta emissor (V_{ge}) de 15 V e corrente de coletor emissor (I_{ce}) de até 60 A.

Além disso, de acordo com seu *datasheet*, este dispositivo possui as seguintes características úteis para o circuito:

O dispositivo utiliza tecnologia *IGBT Non Punch Through* (NPT), proporcionando maior robustez contra variações de tensão e melhor controle térmico. Apresenta baixa queda de tensão VCE (on), resultando em menor dissipação de energia durante a condução, e um diodo interno de baixa queda de tensão direta (VF), reduzindo perdas durante a operação.

Possui capacidade de curto-circuito de até 10 μ s, permitindo suportar condições adversas sem falhas imediatas. O RBSOA (*Reverse Biased Safe Operating Area*) quadrado garante operação segura e estável mesmo sob condições extremas. As características de recuperação reversa do diodo minimizam ruídos e picos de tensão durante a comutação, melhorando a eficiência do sistema.

O coeficiente de temperatura positivo de VCE (on) contribui para o balanceamento de corrente quando vários dispositivos operam em paralelo, aumentando a confiabilidade do sistema. O encapsulamento Super-247 otimiza a dissipação térmica e facilita a integração do componente em projetos eletrônicos de alta potência.

Entre os principais benefícios, destaca-se a alta eficiência para controle de motores, reduzindo o consumo de energia e melhorando o desempenho geral. A resistência a transientes elétricos garante robustez e confiabilidade, enquanto a baixa emissão de interferências eletromagnéticas (EMI) minimiza impactos sobre outros dispositivos eletrônicos.

A tecnologia do dispositivo empregada reduz significativamente a necessidade de circuitos snubber, simplificando o design e diminuindo custos, no entanto, devido às propriedades não lineares do plasma, ainda foi empregado um snubber para garantir alta proteção ao transistor. O excelente compartilhamento de corrente em operação paralela permite o uso do dispositivo em aplicações que demandam maior capacidade de corrente, mantendo a eficiência e estabilidade do sistema.

Concomitante ao IGBT, foi empregado um filtro snubber e um diodo de roda livre, o filtro snubber funciona como um amortecedor de transientes durante o chaveamento de cargas indutivas, fazendo com que os picos de corrente sejam absorvidos pelo resistor e pelo capacitor, para escolher os componentes deste circuito, é necessário compreender a indutância da carga, no entanto, é muito trabalhoso calcular a indutância do plasma em todos os seus estados, por isso, foi considerada uma indutância máxima de 1 mH, uma tensão máxima de 900 V e um ciclo de trabalho de até 15% e uma corrente máxima de 2 A.

A energia armazenada na indutância (L) de sua carga em cada ciclo pode ser estimada pela equação (6) (SVOBODA, 2014), onde EL é a energia em joules, L é a indutância e I a corrente que atravessa o componente.

$$E_L = \frac{1}{2} L I^2 \quad (6)$$

A energia armazenada no capacitor de sua carga em cada ciclo pode ser estimada pela equação (7), onde EC é a energia em joules, C é a capacitância e V a tensão que polariza o componente.

$$E_C = \frac{1}{2} C V^2 \quad (7)$$

Igualando as equações 6 e 7 e isolando a capacitância C, temos a equação 8:

$$C = \frac{E_L}{\frac{1}{2} V^2} \quad (8)$$

Substituindo os valores, temos:

$$C = \frac{E_L}{\frac{1}{2} V^2} = \frac{1 \times 10^{-3} \times (2)^2}{(900)^2} = 4,93 \times 10^{-9} \text{ F}$$

Para maior margem, pode ser utilizado um capacitor de 10 nF a 47 nF, com tensão nominal de pelo menos 1,2 kV (50% acima do máximo). Para encontrar o resistor que dissipa a energia do circuito podemos utilizar a equação (9), onde a resistência é dada pela raiz da indutância pela capacitância máxima.

$$R = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (9)$$

Substituindo os valores, temos:

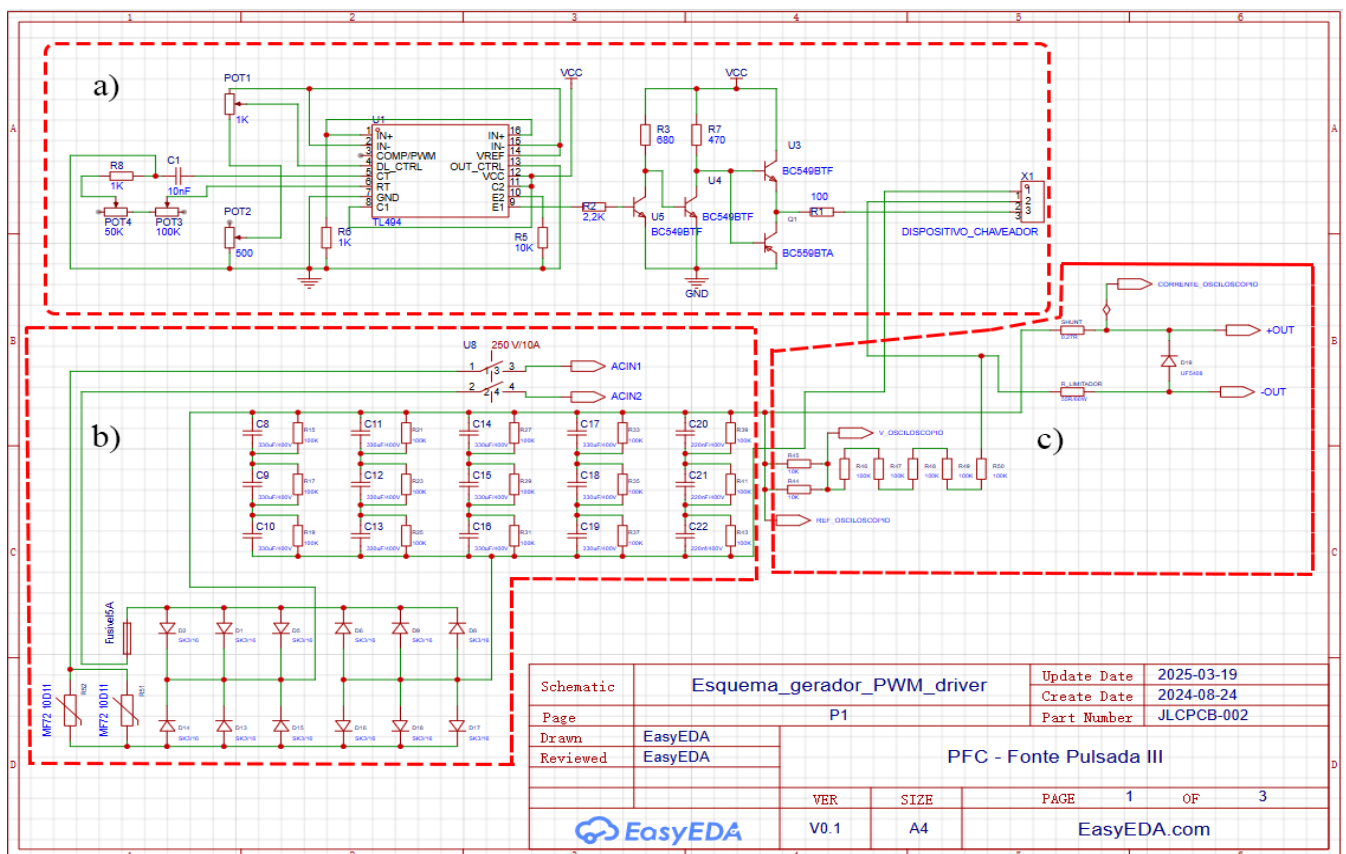
$$R = \sqrt{\frac{L}{C}} = \sqrt{\frac{1 \times 10^{-3}}{47 \times 10^{-9}}} = 145,86 \, \Omega$$

Com o resistor e o capacitor calculados, os valores comerciais escolhidos para os componentes são um resistor de 150 Ω / 3W e um capacitor de 10 nF/1500 V. O diodo de roda livre conectado em anti paralelo com o Coletor e o Emissor do IGBT foi o UF5408, um diodo de alta velocidade de recuperação que suporta até 1000 V de tensão reversa, embora o diodo interno do IGBT possuir esta propriedade, o diodo externo foi colocado para que, em caso de substituição do componente chaveador, por um transistor bipolar ou um MOSFET o diodo de roda livre oferece uma camada maior de proteção.

4.2. DIAGRAMA ESQUEMÁTICO

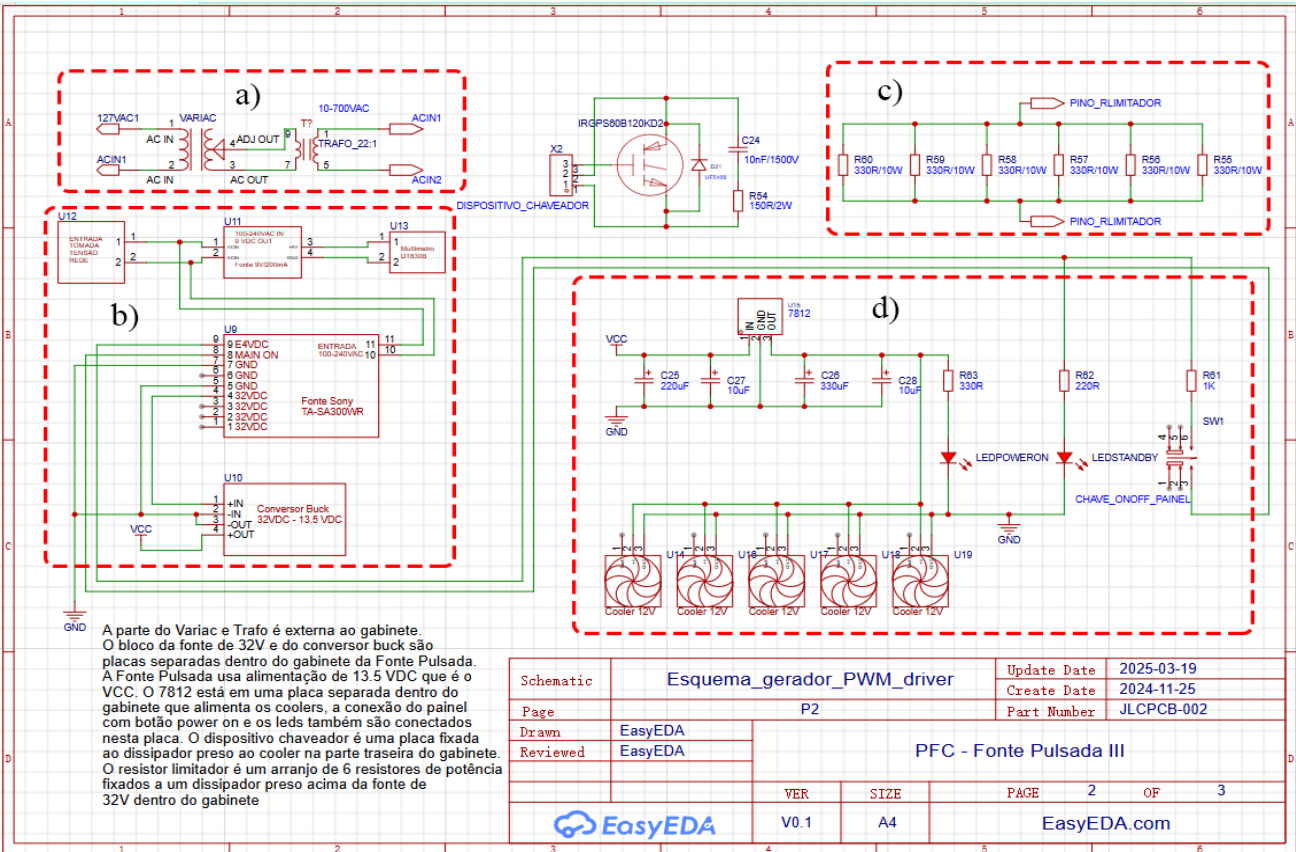
As partes mais importantes da fonte já foram discutidas, porém outros periféricos do sistema também foram desenvolvidos para chegar ao esquema elétrico completo. A fonte de tensão DC que alimenta o gerador de pulso, os ventiladores internos do gabinete e a distribuição de energia ao mesmo e a conexão ao plasma, o esquema elétrico será dividido em duas partes, como mostra a figura 24.

Figura 24 — Diagrama esquemático do circuito da fonte pulsada a) seção gerador de pulso e acionador do IGBT b) Seção retificadora de alta tensão c) Divisor de tensão para medida de tensão instantânea no plasma.



Fonte: Autoria Própria

Figura 25 — Diagrama esquemático das conexões internas do gabinete. a) Esquema de ligação do Trafo e Variac. b) Ligação da fonte de alimentação da fonte pulsada. c) Esquema de ligação do resistor limitador. d) Conexão dos ventiladores internos e botão de liga/desliga do gabinete.



Fonte: Autoria Própria

As figuras acima, mostram os diagramas esquemáticos das ligações internas do gabinete e da fonte pulsada, a figura 24 na seção (a) mostra as conexões do TL494 e do acionador do IGBT, a seção (b) é o retificador de alta tensão, porém a parte ainda não mencionada é a seção (c), esta seção possui as conexões para o osciloscópio que serão utilizadas para medição da tensão e corrente no plasma.

O divisor de tensão se faz necessário para proteger a ponteira de prova do osciloscópio, estas ponteiras geralmente suportam até 500 V, a fonte pulsada ultrapassa este valor com facilidade, por isso um divisor de tensão resistivo de proporção 10:1 foi montado, o usuário precisa aplicar a multiplicação na tensão medida para fazer as medições corretamente.

Além do divisor, dois elementos resistivos são vistos, o resistor shunt e o resistor limitador. O resistor shunt, é um elemento utilizado para medir a corrente consumida pelo reator de deposição durante o disparo e manutenção do plasma, a corrente que atravessa o plasma vai atravessar o resistor shunt e haverá uma queda de tensão sobre ele, medindo esta tensão o usuário pode calcular a corrente instantânea e visualizar a forma de onda da corrente no osciloscópio, este resistor é um resistor de $0,27 \Omega$, o valor baixo é importante para que o resistor não consuma muita potência ou inflija alta resistência e acabe afetando o funcionamento do sistema, geralmente resistores shunt variam entre $0,01$ até 1Ω .

O resistor limitador, melhor apontado na seção (c) da figura 25 é um elemento crucial para proteger o dispositivo chaveador durante o disparo, consistindo de seis resistores de $330 \Omega/10 \text{ W}$ em paralelo, que forma um resistor de $55 \Omega/60 \text{ W}$, após alguns testes, estes resistores aqueceram muito, e por isso foram fixados a um bloco dissipador de calor volumoso, para garantir a saúde dos componentes. O valor do componente foi escolhido pelo Doutorando do laboratório de filme fino, pois após diversos testes, se tornou um valor importante para garantir também a estabilidade do plasma e um elemento consumidor da energia ruidosa que pode ser gerada pelos elementos indutivos e capacitivos do plasma.

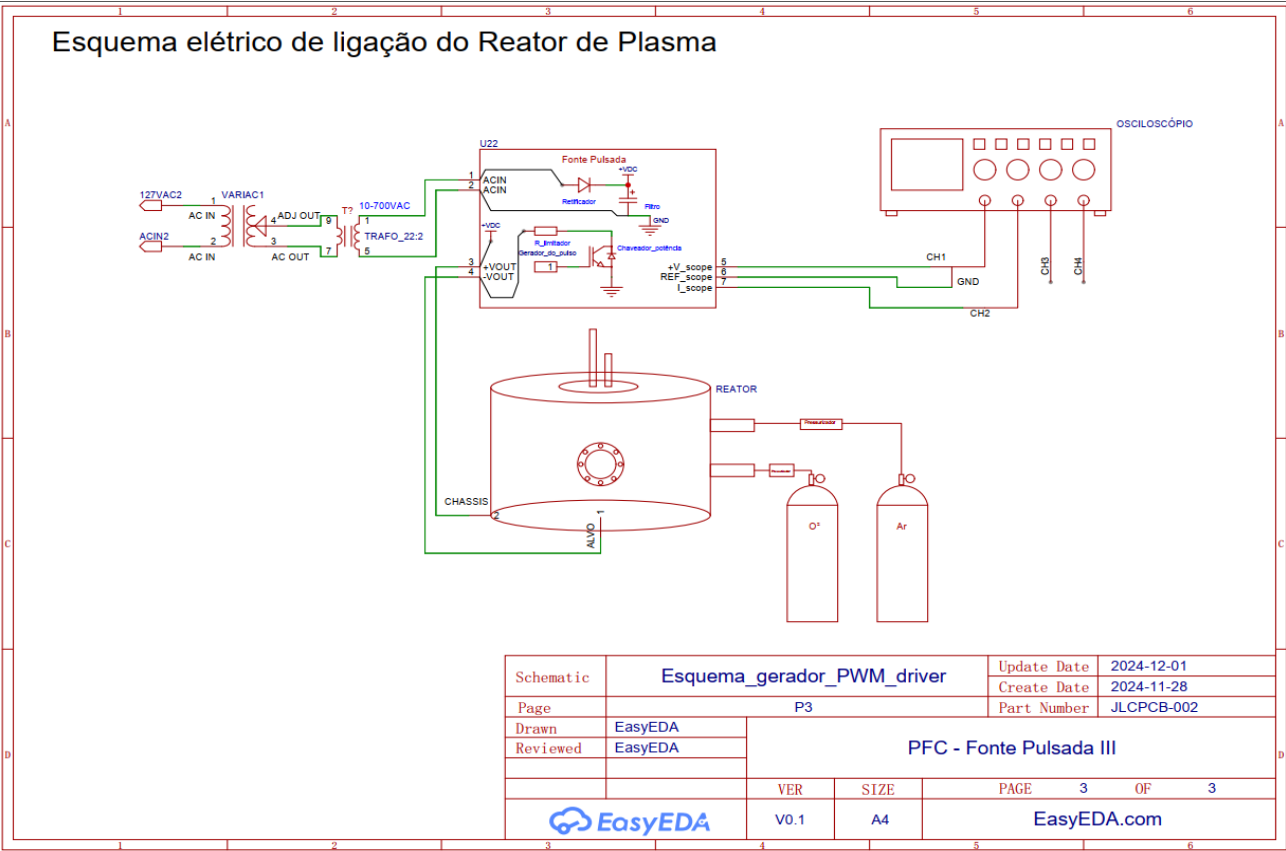
O diodo UF5408 colocado em antiparalelo com a conexão ao plasma é um diodo colocado para garantir proteção contra tensão reversa, desta forma, a fonte pode acionar outras cargas além do plasma.

As conexões do osciloscópio estão mostradas na seção (c) da figura 24, o usuário pode configurar o uso de duas pontas de prova para medir tensão e corrente como mostram bem ilustrado no esquema.

Na figura 25 temos o esquema geral de ligação interna do gabinete, dividido pelo bloco (a) do Variac e do Trafo de alta tensão, onde o usuário faz o controle da tensão de saída da fonte, a seção (b) mostra o esquema de ligação da fonte DC conectada ao conversor Buck e também o esquema de ligação para alimentar um multímetro para medir a tensão de saída da fonte. A seção (c), mostra a ligação dos resistores de potência em paralelo, do resistor limitador e a seção (d) mostra a alimentação e conexão dos ventiladores internos do gabinete e as conexões do botão de ligar e desligar a fonte.

Há também uma nota no esquema elétrico sobre a ligação dos ventiladores, por fim, as conexões externas ao gabinete, tanto da alimentação da parte de potência quanto a conexão ao reator são mostradas na figura 26.

Figura 26 — Diagrama esquemático das conexões elétricas do reator de Plasma com as conexões externas do gabinete.



Fonte: Autoria Própria

O polo positivo de saída da fonte é conectada ao chassis do reator, este chassis é conectado ao terra da rede elétrica, é muito importante que a fonte pulsada não seja aterrada a nenhuma referência, isto é, que a referência da fonte seja um terra flutuante, isolado galvanicamente (pelo transformador de alta tensão) da rede elétrica, caso contrário haverá curto circuito na fonte. O osciloscópio também deve ter o seu conector terra isolado, para evitar curto circuito interno no osciloscópio.

O polo negativo de saída da fonte é conectado ao alvo (material que será depositado), este material sofrerá os pulsos de tensão negativa para o disparo do plasma e para a deposição de filme fino. A figura também aponta o esquema de ligação do osciloscópio.

4.3. MONTAGEM DAS PCIs

Após desenvolver os diagramas esquemáticos, o processo seguinte é desenvolver os layouts dos circuitos e fazer o processo de prototipagem das placas de circuito impresso (PCIs). A plataforma utilizada para desenvolver os layouts foi o EasyEDA por ter uma biblioteca de componentes imensa e muito atualizada, isto é muito útil, pois em muitos casos o projetista pode precisar montar do zero alguns componentes para montar o layout das placas.

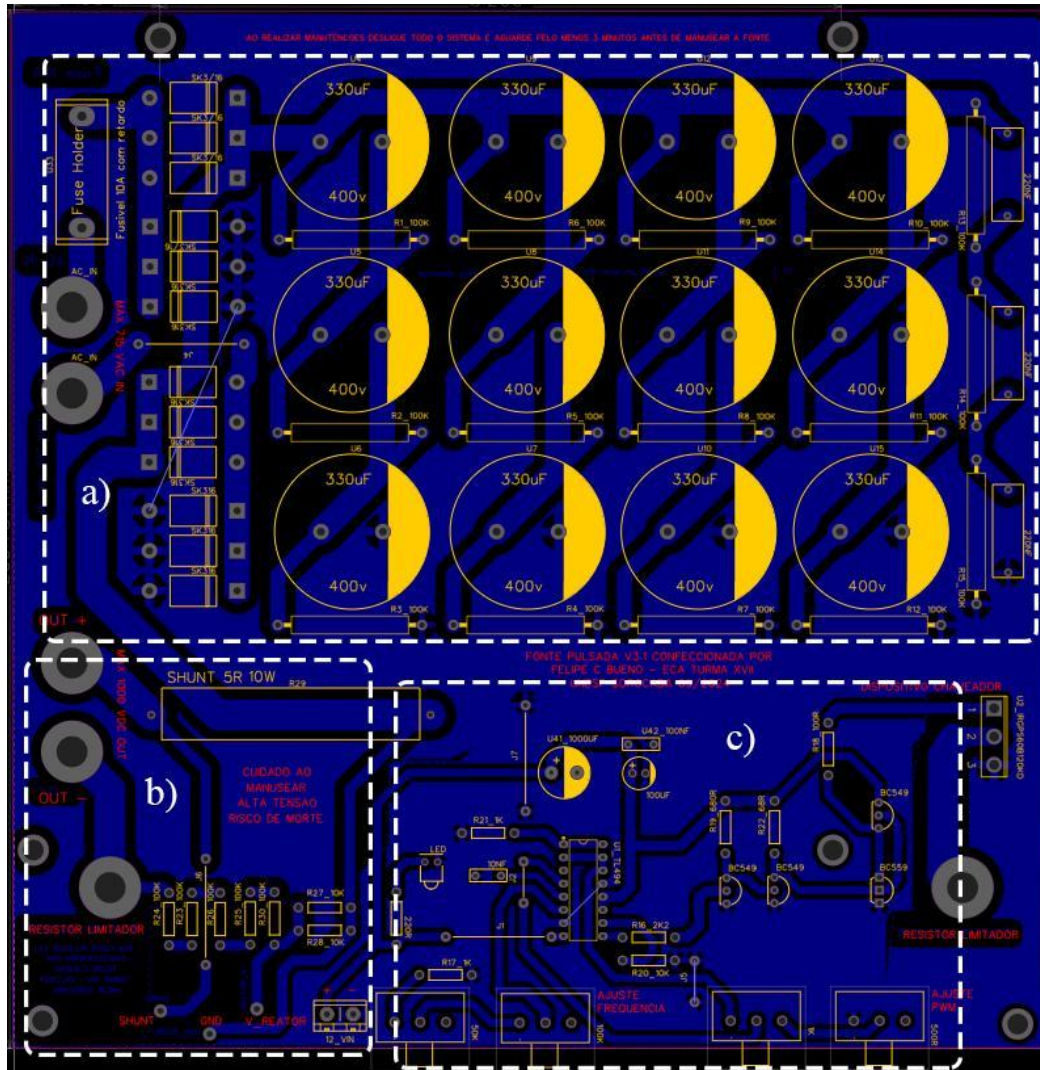
Para este desenvolvimento, os primeiros passos são as definições físicas de espaço onde serão montadas as placas, ou seja, a escolha do Gabinete, para isso foi escolhido um Gabinete de computador pessoal do tipo full tower ITX, este gabinete possui uma furação padrão para placa mãe ATX, uma placa de tamanho padrão de 30,5 x 24,4 cm, por isso, foi escolhida uma placa cobreada de face simples de 20 x 20 cm onde ficará todo o layout do retificador e gerador de pulso.

O gabinete também tem bom espaço para que fique a fonte DC, o regulador Buck, a placa de distribuição de energia dos ventiladores e a placa onde fica o dispositivo chaveador.

O processo de desenvolvimento do layout consiste em, colocar a placa de 20 x 20 cm, trazer os componentes para o ambiente de trabalho do EasyEDA e fazer as devidas conexões das malhas (conexões diretas entre componentes).

Após este processo ocorre o rearranjo dos componentes no ambiente de trabalho dentro do espaço de 20 x 20 cm da melhor forma possível, de modo que sejam usados o menor número de jumpers (fios que conectam ilhas pelo lado não cobreado da placa) e que os componentes tenham espaço para dissipar o calor, assim como não haja arcos elétricos devido ao uso de alta tensão, até 950 V.

Figura 27 — Layout da placa principal da Fonte Pulsada, onde: a) Retificador b) Divisor de tensão e conexões do osciloscópio c) Gerador de pulso e acionador de IGBT



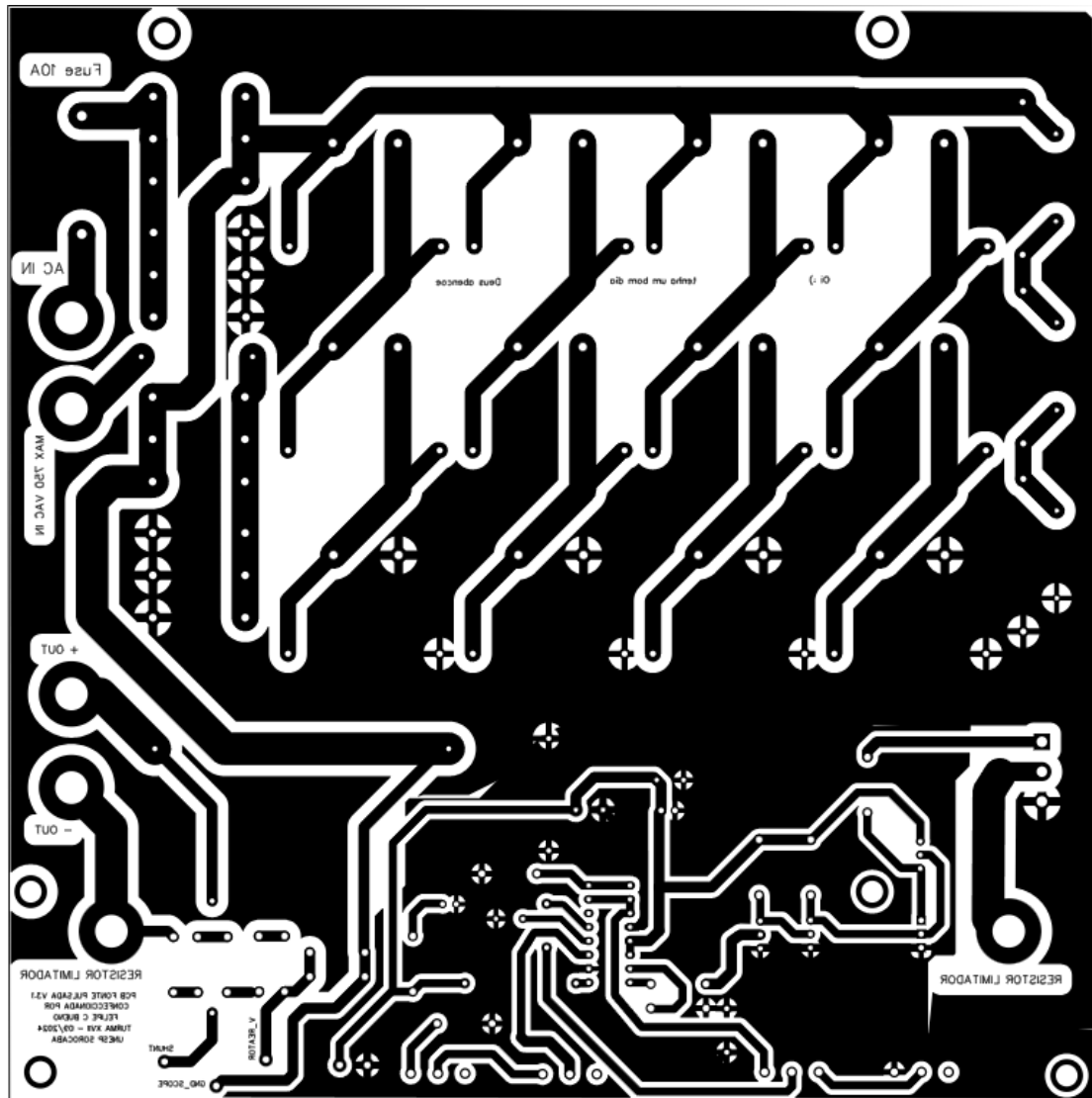
Fonte: Autoria Própria

A figura 27 mostra o layout final da placa principal da fonte pulsada, note que foi utilizada a técnica de área de cobre para utilizar a referência como a maior porção do cobre da placa, isto é muito útil para acelerar o processo de corrosão das áreas onde não haverá cobre e ajuda na redução de ruídos elétricos.

As trilhas variam de tamanho devido à tensão e à corrente que cada trilha vai carregar, alguns jumpers foram necessários, mas seu número foi reduzido ao menor possível. Vale ressaltar que a largura das trilhas não pode ser muito estreita pois durante a transferência do layout ou a soldagem dos componentes as trilhas podem acabar quebrando e o projetista precisará refazer ou reparar as trilhas.

Após montar todo o layout, a camada de fundo do layout com as trilhas, figura 28, é exportada em PNG para que possa ser impressa, esta camada precisa ser impressa com impressora a laser em papel couché de gramatura baixa para que seja possível fazer a transferência do layout para a face cobreada da placa.

Figura 28 — Camada de fundo, com as trilhas de conexão dos componentes da placa principal da Fonte Pulsada.



Fonte: Autoria Própria

O layout não precisa ser espelhado, pois durante a transferência já será espelhado. Para realizar a transferência, isto é, transferir o layout em papel para a placa cobreada, algumas técnicas podem ser empregadas, a mais comum é a transferência térmica, onde com o uso de uma prensa térmica ou um ferro de passar, aquecendo o papel sobre a placa, a tinta aquecida acaba se aplicando no cobre, esta técnica não é extremamente complicada mas o controle de pressão e temperatura deve ser muito bem feito, caso contrário a tinta não irá se aderir em alguns pontos da placa ou a placa pode entortar, e quanto maior for a placa, mais difícil será fazer a transferência com boa qualidade.

Além deste método, existe também a transferência química, a transferência fotográfica, desenhar com caneta permanente na placa ou utilização de máquina CNC com fresa para arrancar o cobre onde for preciso, deixando apenas o layout na placa.

No entanto, justamente devido ao tamanho da placa, de 20 x 20 cm, a transferência térmica não foi empregada, e sim a transferência química, de dissolução da tinta com o uso de solventes. Utilizando removedor de esmalte com acetona, é possível dissolver a tinta e transferi-la para a placa de cobre.

Figura 29 — Layout impresso em papel couché, placa cobreada (não limpa) e removedor de esmalte com acetona para realizar a transferência.

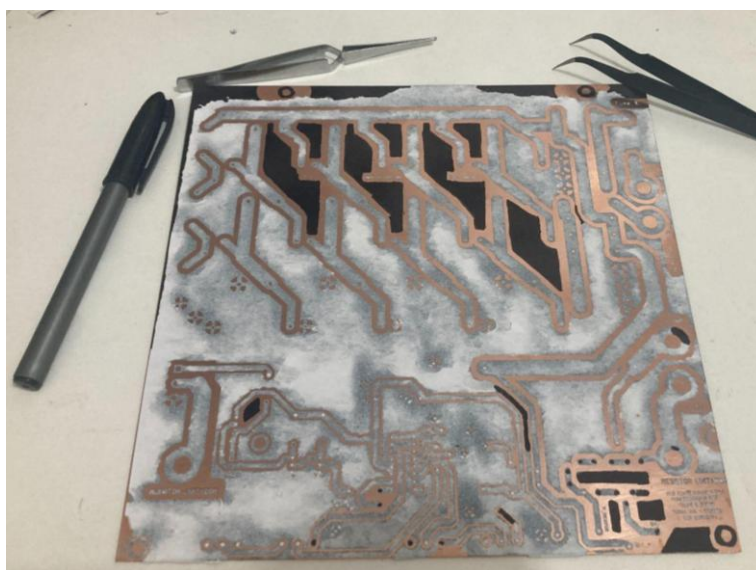


Fonte: Autoria Própria

Primeiramente a placa de cobre deve ser muito bem limpa, para que não tenha impurezas na transferência, utilizando palha de aço, é feito um polimento na placa e logo após uma limpeza com algodão e álcool isopropílico, a placa deve estar bem seca, por isso todo o álcool deve evaporar. Com o removedor de esmalte com acetona, este removedor deve ser bem espalhado na placa com uma espátula limpa, após espalhar bem, rapidamente a impressão do layout deve ser colocada sobre a placa, sem escorregar, para que a tinta não seja borrada, após colocar, deve-se aplicar um peso leve sobre um papel toalha aplicado sobre a impressão sobre a placa de cobre por cerca de 45 segundos. A placa deve descansar por cerca de 5 minutos, onde o processo de limpeza do papel excedente deve ser feito.

Com o papel impresso preso à placa de cobre, o processo de limpeza do papel excedente deve ser feito arrancando o papel que não tenha a tinta, no entanto, é dificultoso fazer isso sem arrancar porções com tinta, por isso a placa é mergulhada em água para que o papel seja dissolvido e apenas a tinta fique. A placa é mergulhada por cerca de 10 minutos e retirada, após isso, com ajuda de uma pinça e uma agulha, com muito cuidado se arranca o papel dissolvido nos locais onde não há tinta, a placa é mergulhada novamente em água algumas vezes, sempre dissolvendo aos poucos e arrancando o papel, em trilhas menores algumas vezes a tinta acaba descolando da placa, nesse caso as correções podem ser feitas com uma caneta permanente, o resultado final é mostrado na figura 30.

Figura 30 — Layout transferido para a placa cobreada com correções feitas com caneta permanente, as pinças foram utilizadas para arrancar o material das áreas onde o cobre será corroído.



Fonte: Autoria Própria

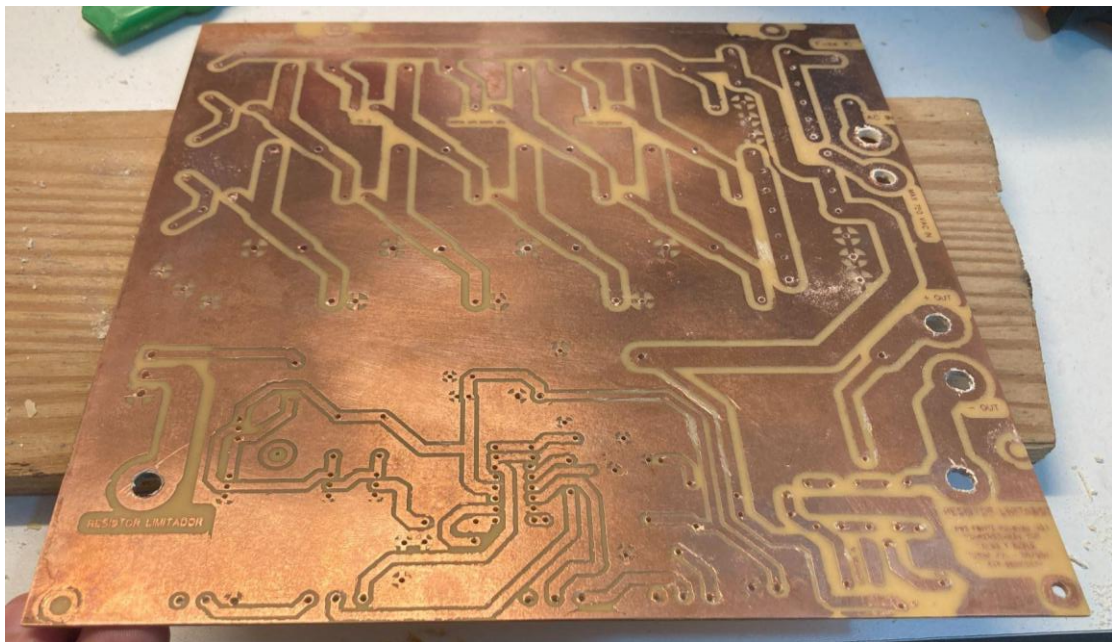
Com o layout imbuído na placa, o processo de corrosão pode ser iniciado, é necessária uma solução ácida para dissolver o cobre sólido da placa, esta solução pode ser feita com ácido muriático, ácido clorídrico, ácido sulfúrico, a concentração geralmente é menor que 20%, o objetivo é transformar o cobre sólido em algum sal de cobre líquido, assim tirando o cobre da região onde não precisa estar, o material mais usado é o percloreto de ferro (FeCl_3) em solução aquosa, a equação (10) mostra a reação de oxidação do cobre em solução aquosa de percloreto de ferro.

$$\square\square + 2\square\square\square\square 3 \rightarrow \square\square\square\square 2 + 2\square\square\square\square 2$$

(10)

A placa deve ficar mergulhada na solução de percloroeto de ferro por cerca de 20 minutos, após a corrosão, a placa é lavada com água e sabão para tirar todo o papel remanescente, após a lavagem a placa seca é furada em todas as ilhas e em todos os furos em que haverá passagem de componentes, após a furação a placa é polida com palha de aço para que a solda dos componentes seja realizada.

Figura 31 — Placa principal corroída e furada para soldagem dos componentes.

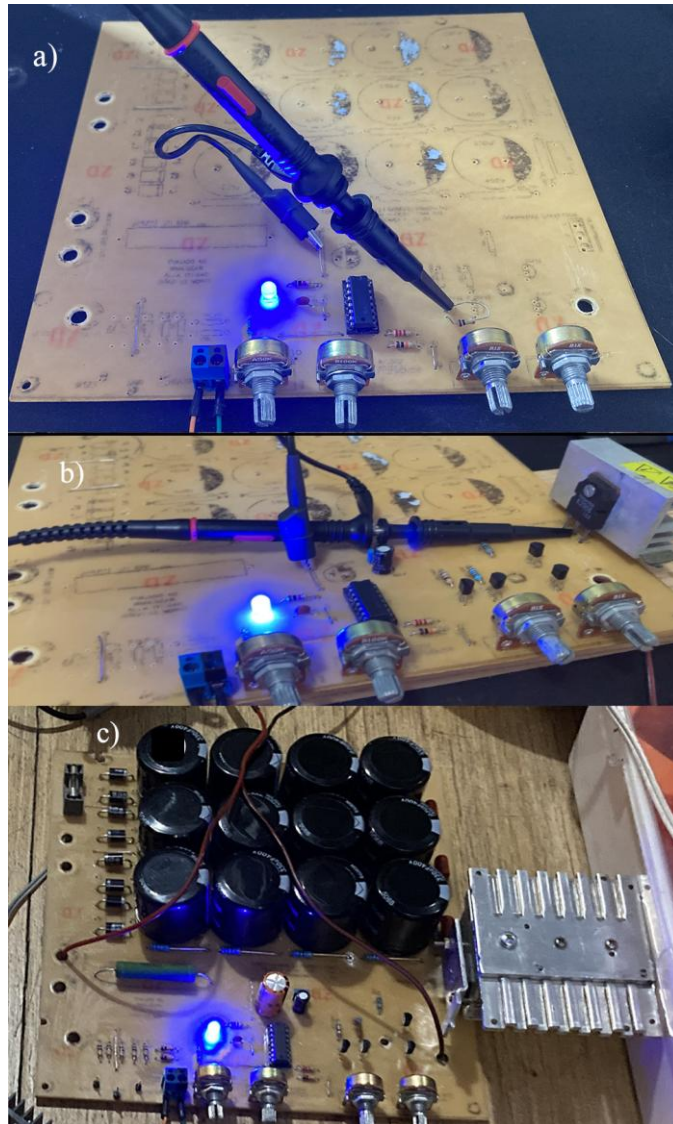


Fonte: Autoria Própria

Após a furação, o layout chamado de top silk, que contém todas as terminações dos componentes foi impresso em papel couché e transferido para a placa por transferência térmica, onde aplicando pressão com um ferro de passar em temperatura máxima, a tinta do papel derrete e é transferida para a madeira da placa.

Tendo o cobre já corroído e furado, se inicia o processo de solda, para os primeiros testes foram soldados apenas os componentes geradores de pulso, comprovando-se o funcionamento da geração do pulso, posteriormente foi soldado o dispositivo chaveador e a seção retificadora.

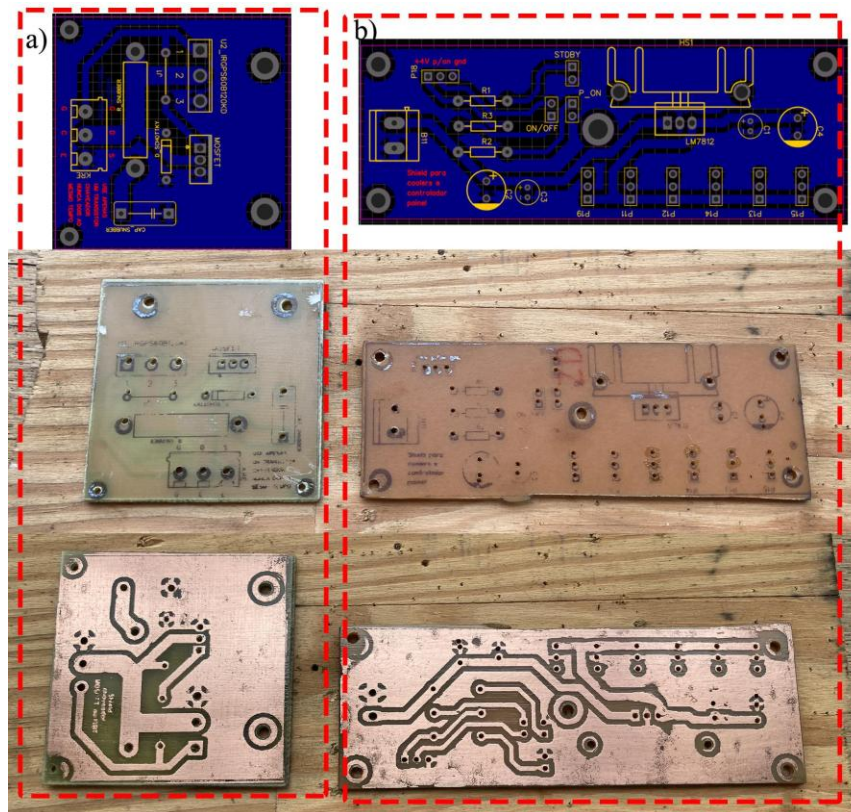
Figura 31 — Placa principal energizada. a) Placa principal com apenas o gerador de pulso soldado para teste inicial b) Placa principal soldada com o gerador de pulso, acionador de IGBT/MOSFET em teste c) Placa principal com todos os componentes soldados para teste de carga.



Fonte: Autoria Própria

A placa principal foi montada e passou por testes, para os testes preliminares o dispositivo chaveador foi soldado diretamente na placa principal sem o filtro snubber fixado. Além da placa principal, as outras duas placas, uma com o dispositivo chaveador com filtro snubber e a outra com a distribuição de energia para os ventiladores internos e botão liga desliga, foram confeccionadas da mesma forma que a placa principal.

Figura 32 — Placas secundárias do gabinete a) Placa do dispositivo chaveador com filtro snubber b) placa distribuidora de energia para os ventiladores e com as conexões de liga desliga.



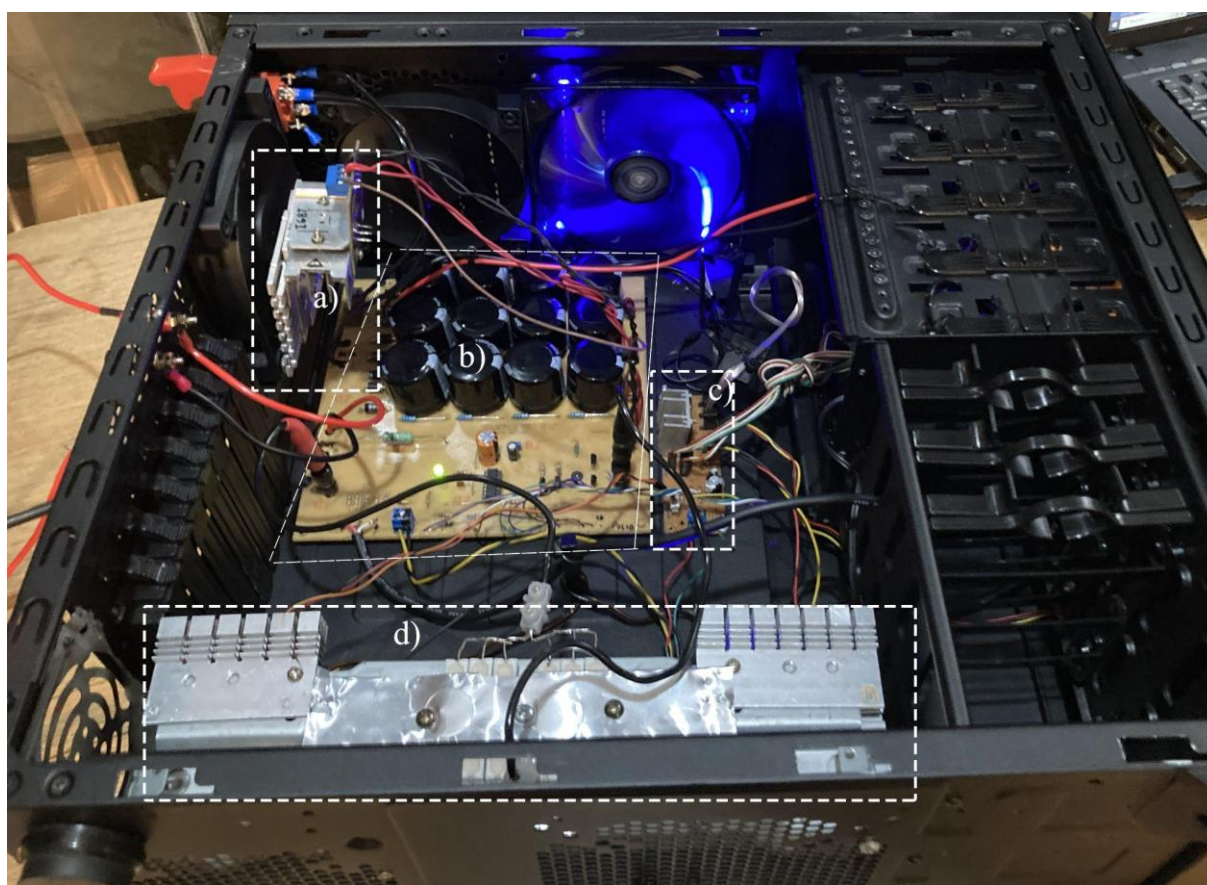
Fonte: Autoria Própria

4.4. ORGANIZAÇÃO DO GABINETE

Com as placas de circuito impresso montadas, resta organizar e fixar estas dentro do gabinete, assim como os ventiladores, a fonte DC que alimenta o gabinete e o resistor limitador. Primeiramente algumas mudanças foram realizadas para que todas as placas e adereços sejam colocados no gabinete.

Se fizeram necessárias diversas furações e parafusos foram colocados para que todas as placas ficassem bem espaçadas dentro do gabinete.

Figura 33 — Visão de topo do gabinete energizado a) Placa do dispositivo chaveador com filtro snubber b) Placa principal com retificador e gerador do pulso c) placa distribuidora de energia para os ventiladores e com as conexões de liga desliga. d) Resistor limitador fixado no dissipador de calor.



Fonte: Autoria Própria

A figura 33 mostra as placas fixadas no gabinete, foram utilizados cinco ventiladores na montagem onde dois deles puxam ar de fora do gabinete para dentro e outros três puxam o ar interno e jogam para fora, trazendo melhor eficiência na dissipação de calor.

O dispositivo chaveador (IGBT) está fixado em um dissipador de calor preso a um ventilador, a razão disso se dá pois o elo fraco que pode ser danificado de toda fonte é o dispositivo chaveador, isolar este em uma placa específica faz com que reparos e trocas sejam realizados com muita facilidade, assim os usuários posteriores da fonte não irão precisar remover a placa principal.

Todo o gabinete é projetado para facilitar a manutenção preventiva ou corretiva, a placa de distribuição para os ventiladores, por exemplo, possui conectores, desta forma conectar e desconectar os ventiladores, ou o botão de liga desliga para realizar manutenções se torna uma tarefa simples.

Figura 34 — Visão frontal do gabinete energizado a) Terminais de medição de tensão e corrente com osciloscópio b) Multímetro fixo medindo tensão DC no retificador c) Potenciômetros de controle de largura de pulso e frequência de chaveamento.



Fonte: Autoria Própria

A figura mostra a visão frontal do gabinete com as terminações de conexão para medição de corrente e tensão instantânea, assim como os potenciômetros de controle e um multímetro que foi fixado para facilitar a leitura da tensão DC do retificador, o multímetro possui fonte interna isolada, para que não haja a necessidade de troca de baterias.

Figura 35 — Visão traseira e lateral do gabinete a) Conectores de alta tensão alternada com chave série de alta potência b) Conectores de saída da fonte para ligar ao reator c) Conexão AC da fonte DC interna que alimenta os módulos da fonte pulsada d) Foco no dissipador de calor do resistor limitador e da fonte isolada do multímetro.



Fonte: Autoria Própria

A figura 35 mostra a visão traseira e frontal do gabinete, o gabinete possui passagens estratégicas de ar para melhorar o resfriamento interno dos componentes, assim como as conexões da entrada de alta tensão alternada para a saída pulsada da fonte.

O uso de um gabinete foi escolhido para garantir a segurança dos usuários e a robustez da fonte, as placas internas, os ventiladores, fontes DC, conectores e chaves desde o princípio de sua concepção foram pensadas para encaixar no gabinete de forma que qualquer manutenção necessária fosse simples de ser realizada, o topo do gabinete de acrílico permite ao usuário verificar atentamente se algum componente interno sofrer algum dano visível e permite também que sejam apoiados outros equipamentos sobre o gabinete, economizando espaço físico no laboratório ou na bancada.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção serão discutidos os resultados da montagem da fonte, as deposições e o comportamento dos componentes durante e após o uso.

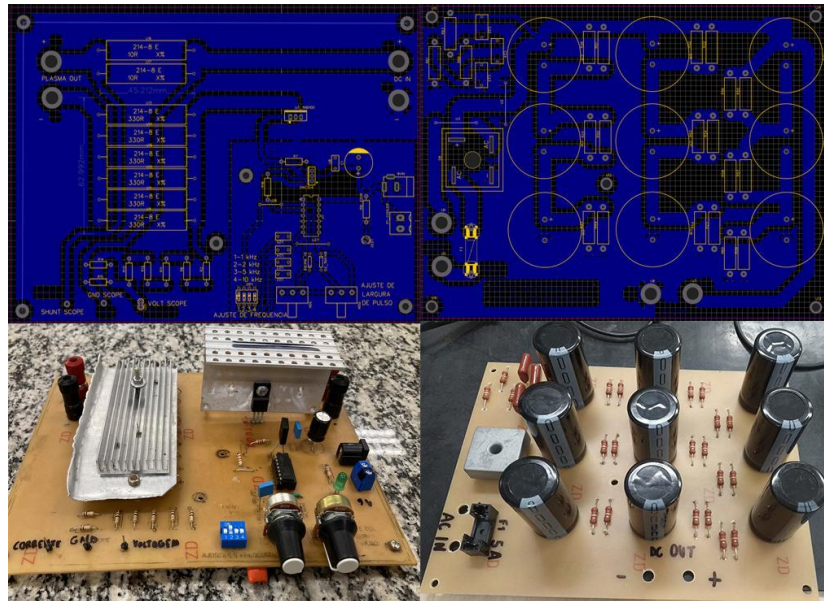
A rigor de testes, a fim de garantir o funcionamento da fonte, os testes foram em momentos diferentes da montagem, antes de soldar todos os componentes da seção retificadora, é necessário garantir que o gerador de pulso, que é a parte crucial, funcione corretamente, por isso foi testado primeiramente o gerador de pulso, posteriormente o acionador de IGBT, todos os primeiros testes são com baixas tensões, chaveando primeiramente 12 V, posteriormente chaveando 127 V retificados e por fim testes com cargas diferentes do reator de plasma.

5.1. RESULTADOS PRELIMINARES

O projeto da fonte pulsada é baseado em duas iniciações científicas já submetidas nos anos anteriores, no protótipo I, a fonte montada suportava trabalhar com deposições de um pouco mais de 600 V com um gerador de pulso baseado em um circuito integrado muito popular, o NE 555 (BUENO, 2022), no protótipo II a tensão máxima de deposição foi aumentada para até pouco mais de 900 V, além de explorar outro tipo de gerador de pulso, baseado em um circuito tipo Schmitt Trigger, porém as placas não foram montadas em gabinete (BUENO, 2023).

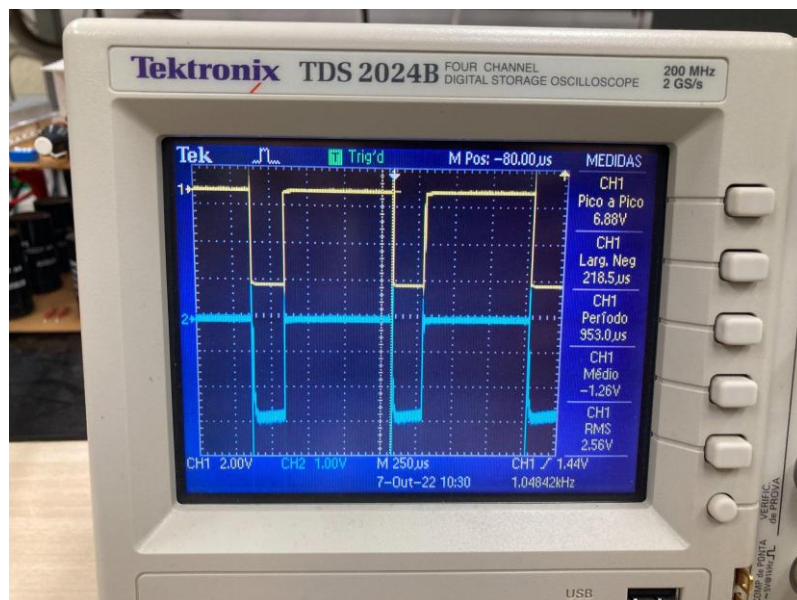
A fonte do protótipo II foi utilizada pelos usuários do laboratório de plasma por muito tempo, esta fonte, já citada neste trabalho, utilizou outro circuito integrado e outro transistor chaveador de potência, os knobs de configuração de frequência e ciclo de trabalho não possuíam ajuste fino. Alguns problemas foram relatados, a fonte atingia níveis de dissipação de calor muito altos, que inclusive foram suficientes para estufar a placa de circuito impresso, o transistor chaveador sofreu danos e foi trocado duas vezes ao longo de dois anos. A potência máxima da fonte anterior chegava a 2 KW, a faixa de tensão máxima era de 900 V. A figura 36 mostra como a fonte anterior foi montada e a figura 37 demonstra a forma de onda obtida na saída.

Figura 36 — Layouts e Placas de Circuito Impresso da seção chaveadora e retificadora da fonte pulsada montada anteriormente (2023).



Fonte: BUENO, 2023.

Figura 37 — Formas de onda de corrente (curva cor azul) e tensão (curva cor amarelo) durante uma deposição em laboratório da fonte pulsada montada em 2023.



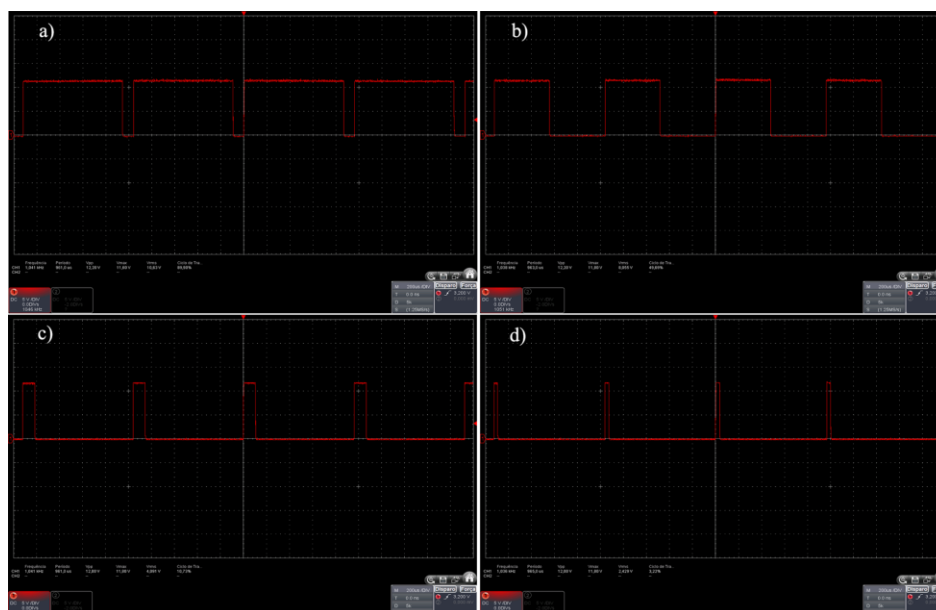
Fonte: BUENO, 2023.

Como um fator de melhoria em relação ao projeto anterior, a fonte desenvolvida neste trabalho superou a potência da fonte anterior, forneceu um controle mais assertivo da frequência e ciclo de trabalho, tem maior durabilidade e é mais simples de montar e ser utilizada no sistema de deposição, trazendo segurança para os usuários do laboratório de plasma. Por isso, o dispositivo chaveador e o gerador de pulso do modelo de fonte deste trabalho difere bastante dos trabalhos anteriores, para que as características necessárias fossem atendidas.

5.2. PRIMEIROS TESTES

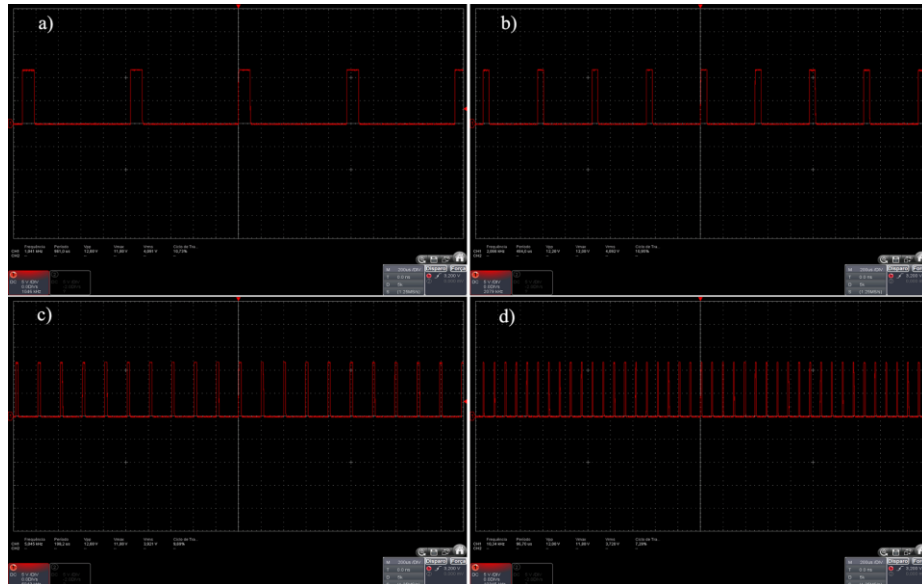
Os primeiros testes reais da fonte se iniciaram com a soldagem apenas dos componentes do circuito isolado do gerador de pulso, como mostra a figura 31 (a) na seção 4.3. deste trabalho, após a solda dos componentes geradores do pulso, o TL494 com os componentes externos, a placa foi energizada e na saída do TL494 foi conectado um resistor de 10 k Ω com seu outro terminal ligado ao conector negativo da placa, utilizando um osciloscópio USB OWON modelo VDS1022I, no entanto, na saída não foi encontrada nenhuma forma de onda se não 0 V, ao inspecionar a placa, foram encontrados dois terminais do TL494 que não foram soldados, após aplicar solda, não houve mudança na saída, foi necessária fazer a substituição do CI TL494 para que o pulso fosse gerado, e o CI anterior foi descartado.

Figura 38 — Formas de onda de tensão no resistor conectado à saída do TL494 com frequência fixa de 1 kHz a) Tensão na saída 90% de ciclo de trabalho b) Tensão na saída com 50% de ciclo de trabalho c) Tensão na saída com 10% de ciclo de trabalho d) Tensão na saída com cerca de 3% de ciclo de trabalho.



Fonte: Autoria Própria.

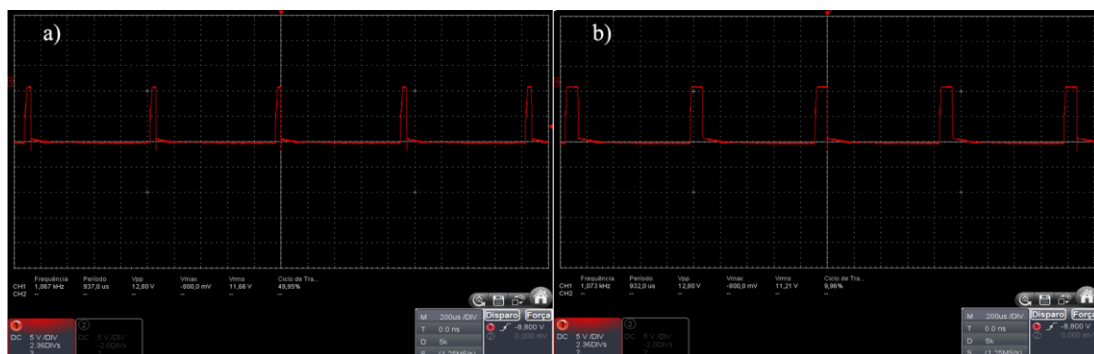
Figura 39 — Formas de onda de tensão no resistor conectado à saída do TL494 com ciclo de trabalho fixo em 10%
a) Frequência de 1 kHz b) Frequência de 2 kHz c) Frequência de 5 kHz d) Frequência de 10 kHz.



Fonte: Autoria Própria.

Utilizando os potenciômetros de ajuste de largura de pulso e frequência, a saída foi testada com frequências de 1 até 10 kHz e com ciclo de trabalho de 3 a 90%. com estes testes foi provado que o gerador de pulso estava funcionando corretamente, e, posteriormente foi soldado o arranjo de transistores acionador de IGBT/MOSFET mostrado na figura 31 (b) na seção 4.3 deste trabalho, conectando uma carga resistiva na saída do IGBT utilizando 12 V para chavear e medindo a tensão no coletor do mesmo foram colhidas outras formas de onda.

Figura 40 — Formas de onda de tensão no coletor do IGBT com frequência fixa em 1 kHz a) Ciclo de trabalho de 10% b) Ciclo de trabalho de 5%.



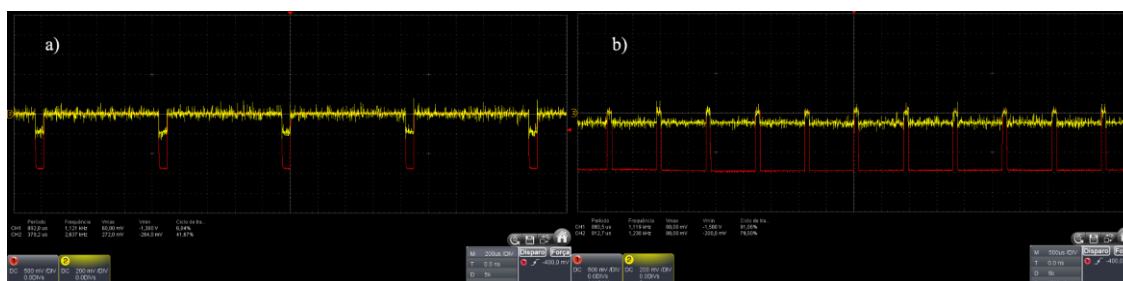
Fonte: Autoria Própria.

Dado que as deposições de filme fino são focadas em um pulso muito estreito, embora a fonte atinja ciclo de trabalho de até 90%, os testes posteriores tiveram o foco em pulsos de 5 a 15% de ciclo de trabalho.

Com as formas de onda colhidas, logrou-se êxito no funcionamento do gerador de pulso e do dispositivo chaveador, o passo seguinte foi soldar todos os outros componentes da placa principal e testar o chaveamento com carga de potência e retificando tensão da rede de 127 V, para finalmente levar a placa ao laboratório e realizar uma deposição teste.

Utilizando uma lâmpada incandescente de 220 V/100 W e conectando a entrada AC nos 127 V da rede pública, desta forma obtendo uma tensão DC de chaveamento de 179,6 V, pode-se realizar os testes de potência do IGBT para o chaveamento, foram colhidas formas de onda medindo tanto a tensão com o divisor de tensão e medindo a corrente com o uso do resistor Shunt. É importante ressaltar que o resistor Shunt utilizado primeiramente foi um resistor de 5,6 Ω .

Figura 41 — Formas de onda de tensão (curva vermelha) e corrente (curva amarela) com Lâmpada Incandescente
a) 1 kHz Ciclo de trabalho de ~6 % b) 1 kHz Ciclo de trabalho de ~90%.



Fonte: Autoria Própria.

A figura 41 acima mostra as formas de onda utilizando uma carga resistiva de potência na saída, variando o ciclo de trabalho para observar a curva de corrente (em amarelo) de acordo com a tensão pulsada aplicada, nota-se que com o ciclo de trabalho maior (a), a corrente é menor do que com o ciclo de trabalho menor (b), isso ocorre pois a lâmpada quando submetida a um ciclo de trabalho maior vem a ascender, isto aquece muito o filamento, podendo chegar a até 3000°C, esta temperatura acaba aumentando a resistência da lâmpada consideravelmente, quando com o ciclo de trabalho menor, a luz emitida pela lâmpada é muito menor, a temperatura do filamento também é menor, e a corrente se torna maior.

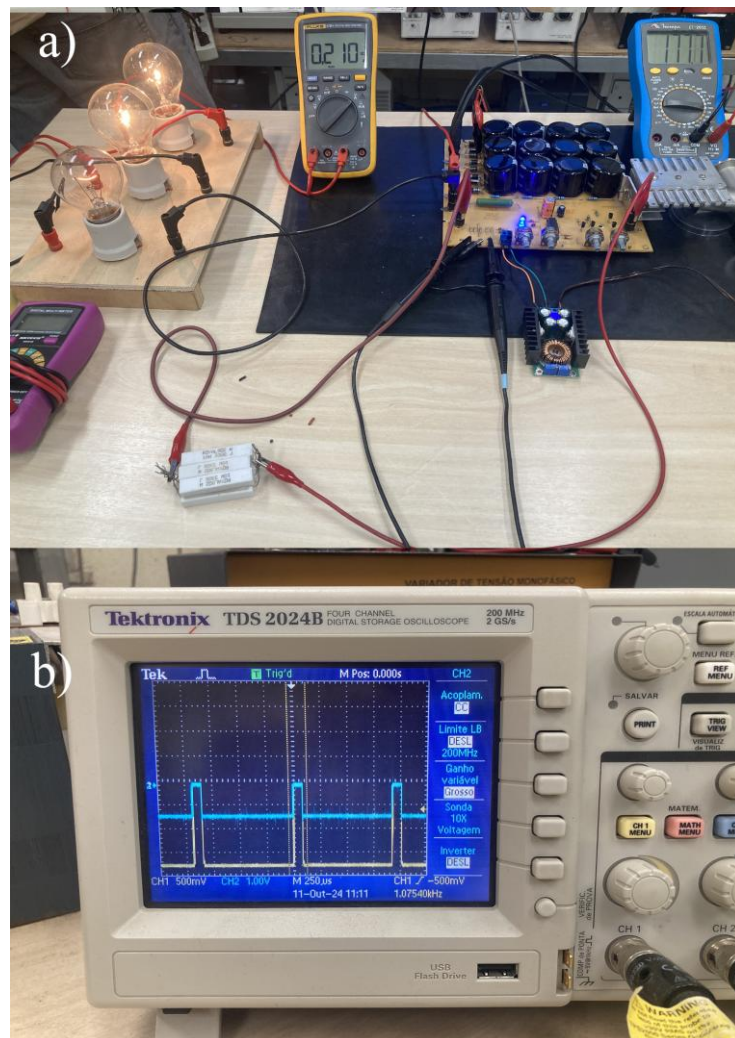
Esta carga ficou ligada por muito tempo, o dissipador do IGBT não chegou a ficar morno, isto foi muito satisfatório, pois como diz a folha de dados do componente, a tensão coletor emissor ligado baixa do mesmo diminui a perda por efeito joule.

Durante estes testes, apenas a placa principal havia sido concluída, antes de montar o gabinete com as placas secundárias e o sistema de resfriamento, se fazia necessário provar com testes que a placa principal e o IGBT suportariam testes com deposições de filme fino.

5.3. PRIMEIRAS DEPOSIÇÕES

A placa principal foi levada ao laboratório de plasma para que fosse feita uma deposição de filme fino. Primeiramente foi feito um teste com lâmpadas em laboratório, a fim de que fosse ajustado o pulso antes de conectar o reator de plasma para uma deposição teste.

Figura 42 — Teste com lâmpadas em laboratório a) Fonte em bancada com 177 V DC para chaveamento b) Formas de onda de tensão (curva azul) e corrente (curva amarela) com Lâmpada Incandescente 1 kHz Ciclo de trabalho de ~90%.

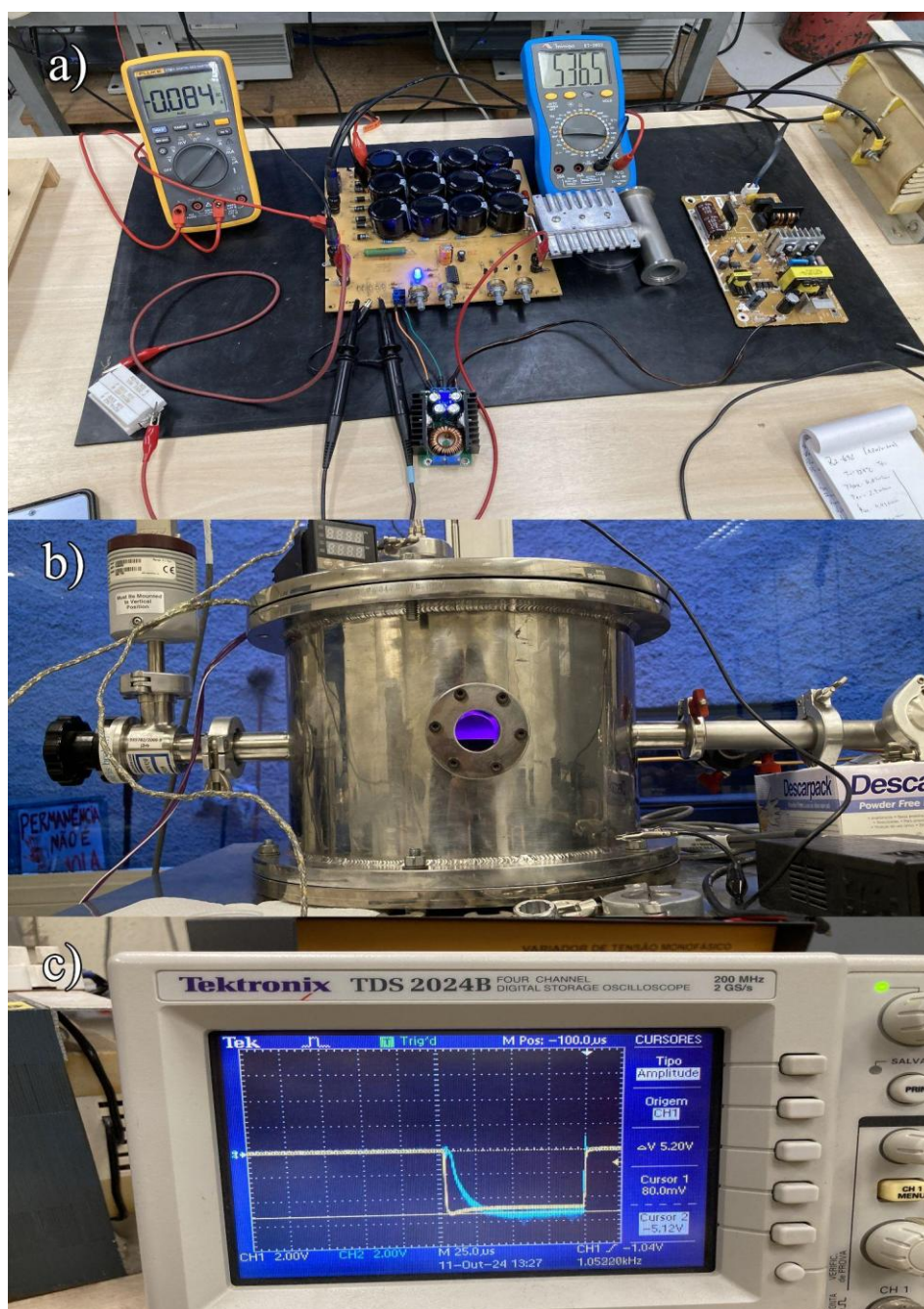


Fonte: Autoria Própria.

Após ajustar a largura de pulso, a tensão AC do variac é desligada e o reator é conectado à saída da fonte de acordo com a figura 26 da seção 4.2. deste trabalho, um período de tempo foi necessário para que o reator atingisse uma pressão interna de aproximadamente 3 mTorr.

Utilizando AZO como alvo, substrato de vidro e utilizando Argônio e Oxigênio para a deposição, regulando o pulso para 1 KHz e tempo ligado de 100 μ s e controlando a tensão DC de chaveamento do com o Variac, a tensão foi aumentada para 315 V e o plasma foi aberto, durante a deposição de 10 minutos, a tensão foi elevada para 542 V, corrente de 906 mA medida no resistor Shunt, que ao final da deposição reduziu para 850 mA.

Figura 43 — Primeira deposição com a fonte pulsada a) Configuração da Placa principal b) Reator durante a deposição c) Formas de onda da tensão (curva amarela) e corrente (curva azul).



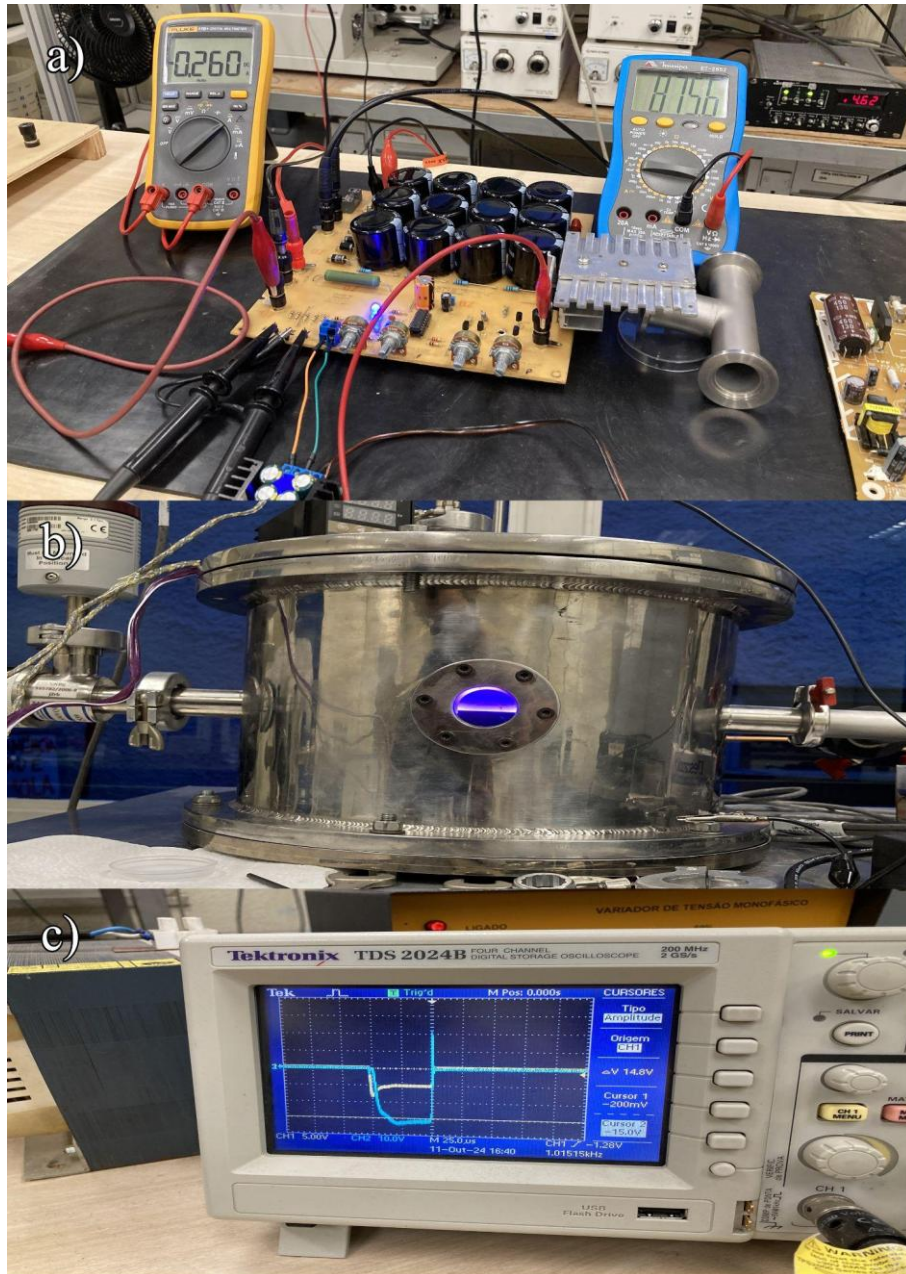
Fonte: Autoria Própria.

A deposição ocorreu bem e nenhum problema foi aferido após a deposição, o dispositivo chaveador não esquentou e a seção retificadora funcionou corretamente. O substrato recolhido apresentou boa qualidade de distribuição e densidade do filme.

Devido ao tempo considerável que leva para preparar o reator para uma nova deposição, foi decidido realizar uma deposição de alta potência para garantir a robustez da placa principal da fonte pulsada, a fim de iniciar a montagem do gabinete posteriormente.

A deposição de potência foi feita com o mesmo substrato, alvo e gases, porém a largura do pulso foi reduzida para 50 μ s a fim de trabalhar com 800 V, a princípio foi escolhido tempo de 10 minutos, que foi reduzido para 5 minutos logo depois. O Plasma foi disparado em tensão semelhante à tensão da última deposição, durante a deposição a tensão variou de 870 até 930 V. Em 874 V, 1 kHz, corrente contínua de 260 mA e corrente pulsada de 4,91 A.

Figura 44 — Segunda deposição com a fonte a) Configuração do Placa principal b) Reator durante a deposição c) Formas de onda da tensão (curva amarela) e corrente (curva azul).



Fonte: Autoria Própria.

A potência instantânea da fonte chegou a incríveis 4,28 kW de potência, com potência média de 228 W, durante a deposição o resistor Shunt aqueceu muito, a ponto de fumaça sair do mesmo, o resistor limitador também chegou a derreter a borracha onde estava, foi necessário ligar um ventilador externo rapidamente para que estes componente não perdessem suas características físicas e elétricas, o dispositivo chaveador não chegou a esquentar, o que foi muito bom, levando em conta que MOSFETs no geral esquentam mais, utilizar o IGBT auxilia muito em reduzir a dissipação de calor.

Na figura 44, na seção (b), podemos notar que a intensidade do plasma é muito maior que a intensidade da primeira deposição, figura 43 seção (b), isto ocorre pois a potência foi muito maior.

Ao retirar o substrato no final da deposição, o filme metalizou, fenômeno que ocorre quando a espessura do filme se torna muito alta, e a permissividade visível diminui consideravelmente, para o uso de filmes no laboratório, este tipo de filme é pouco aproveitado, porém, isso não é ruim, pois o propósito desta deposição era testar a potência da fonte. Os usuários do laboratório ficaram muito satisfeitos com o comportamento e a potência da nova fonte.

Por fim, os componentes foram testados com o sistema desligado e nenhuma falha ou dano foi aferido, no entanto, foi decidido trocar o resistor Shunt por um de valor muito menor e o resistor limitador deveria ser fixado a um dissipador de calor de boa proporção, isto permitiu a organização e montagem do gabinete para retorno ao laboratório a fim de fazer novas deposições e entregar a fonte completa.

5.4. TESTES COM GABINETE

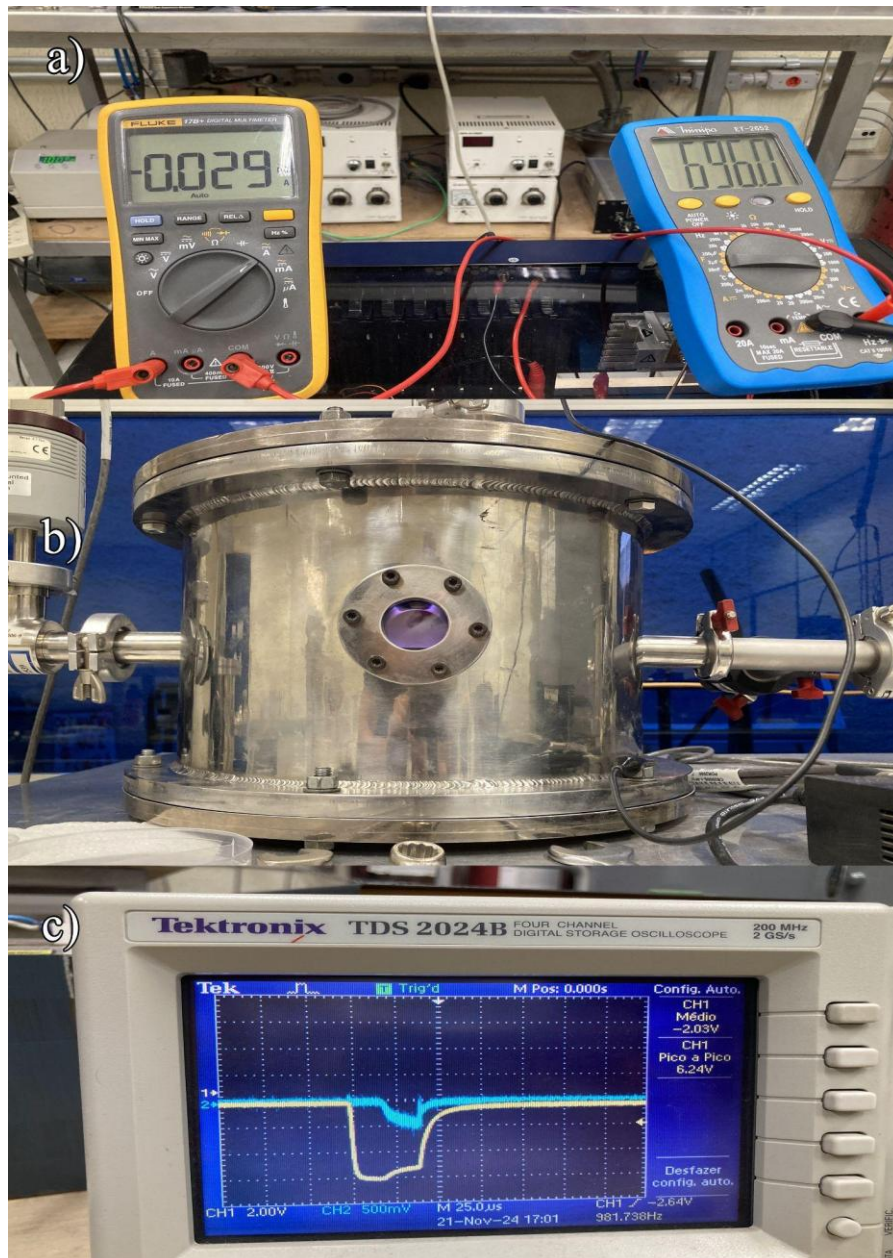
Toda a montagem do gabinete é descrita na seção 4.4. deste trabalho, após a montagem do gabinete, foram conduzidos alguns testes com cargas resistivas (lâmpadas) e indutivas (motores), durante estes testes foi notado que ao acionar a chave geral do gabinete (localizada na parte traseira), faíscas saíam dos terminais da chave devido à corrente transiente de carregamento dos capacitores de filtro, este efeito é indesejado, pois diminui a vida útil da chave, dos diodos e dos capacitores, por isso, os NTCs foram adicionados, comumente utilizados em fontes chaveadas, estes atuam como resistores limitadores para a corrente transiente de carregamento dos capacitores. o circuito snubber no dispositivo chaveador também foi adicionado.

Ao realizar testes com cargas indutivas, mesmo utilizando o filtro snubber, o efeito indutivo gerava tensão reversa na carga e dificultava o controle de velocidade do motor série, por isso foi colocado um diodo de roda livre em paralelo com a saída, um UF5406, após soldá-lo e realizar testes o controle de velocidade do motor com tensão (largura de pulso) e frequência, foi muito mais preciso e funcional, o que torna a fonte versátil para outros tipos de carga diferentes do reator de plasma.

Após instalar as modificações na versão final da fonte pulsada no gabinete, o gabinete foi levado ao laboratório para testes com deposições, foram realizadas duas deposições, a primeira com tensão menor e a segunda com tensão maior.

A primeira deposição foi realizada com alvo de AZo, substrato de vidro, tempo de deposição de 10 minutos, pulso de 1 kHz com 50 μ s e tensão entre 600 e 700 V.

Figura 45 — Primeira deposição com a fonte pulsada em gabinete a) Configuração do gabinete com multímetros b) Reator durante a deposição c) Formas de onda da tensão (curva amarela) e corrente (curva azul).



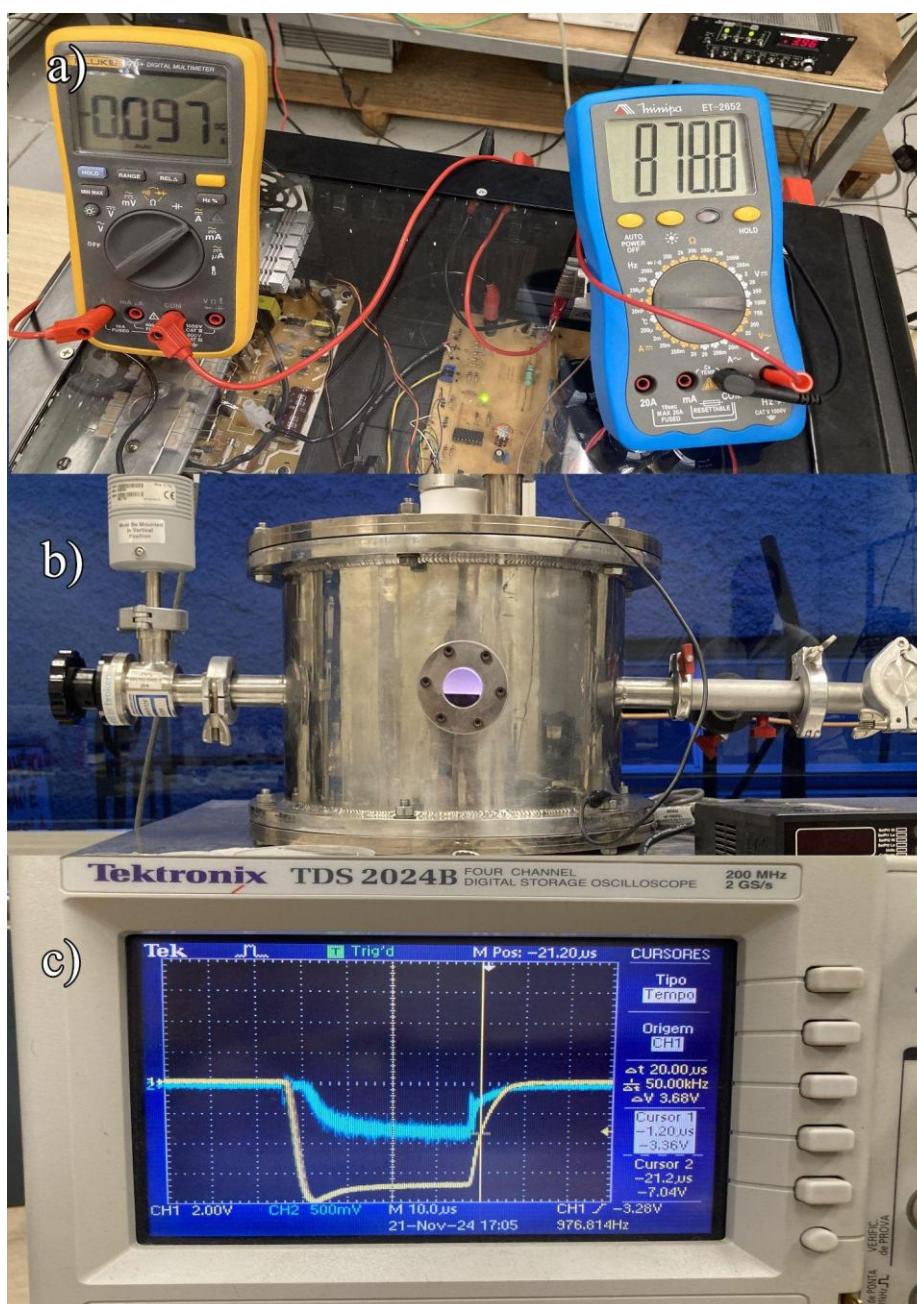
Fonte: Autoria Própria.

A figura 45 mostra a primeira deposição realizada com o gabinete com filtro snubber e diodo de roda livre na saída, nota-se como o formato do pulso mudou consideravelmente, no entanto, a tensão reversa sofreu redução significativa, o que irá garantir a vida útil dos componentes da fonte, em especial do IGBT chaveador.

A deposição ocorreu bem, o filme fino formado foi de boa qualidade e agradou os usuários, com o uso dos ventiladores internos do gabinete, a temperatura dos componentes da fonte se manteve na temperatura ambiente do laboratório, de cerca de 25°C.

O sistema foi configurado para mais uma deposição, desta vez com potência maior, novamente, para trabalhar com mais de 870 V durante a deposição.

Figura 46 — Segunda deposição com a fonte pulsada em gabinete a) Configuração do gabinete com multímetros b) Reator durante a deposição c) Formas de onda da tensão (curva amarela) e corrente (curva azul).



Fonte: Autoria Própria.

A segunda deposição foi realizada no gabinete com filtro snubber e diodo de roda livre na saída, nesta deposição, a luminosidade do plasma aumentou consideravelmente devido à tensão aplicada, a corrente pulsada de 1,85 A em tensão de 875 V.

Novamente a fonte pulsada não aqueceu e tudo correu bem durante a deposição, o filme fino não foi aproveitado pois metalizou, novamente, isto não é um problema, pois a deposição de potência foi realizada apenas para garantir o funcionamento da fonte.

6. CONCLUSÃO

Todo este trabalho foi realizado para que fosse entregue uma fonte pulsada capaz de atender as necessidades dos usuários do laboratório de filme fino e superar as capacidades das fontes anteriormente desenvolvidas em iniciações científicas.

A fonte desenvolvida teve êxito em entregar um pulso extremamente curto, de valores menores que 50 ns, com correntes pulsadas de até 5 A, tensão de até 950 V e suportar deposições de longa duração.

Diferente das opções no mercado, a fonte deveria ter custo baixo, componentes de fácil acesso, manutenção simples e fornecer segurança aos usuários durante o manejo da fonte, todas estas necessidades foram atendidas entregando um filme fino de excelente qualidade quando comparada a fonte RF ou a fonte DC pura.

A fonte, no entanto, levou tempo considerável para ser montada, onde poderia ter sido melhor executada, o benefício de preparar a fonte com sistemas de segurança contra tensão reversa, deixa-a muito versátil para trabalhar com vários tipos de carga.

Para desenvolvimentos futuros, o controle do pulso e da frequência pode ser substituído por um sistema com microcontrolador e feedback negativo, aplicando controle preciso no sistema, no entanto, esta solução gera custo maior e maior complexidade para manutenção e desenvolvimento, fatores que devem ser levados em conta.

7. COMERCIALIZAÇÃO DA FONTE

A fonte pulsada para deposição de filme fino foi projetada e testada em três projetos diferentes, duas iniciações científicas e um projeto final de curso, o principal motivo da construção destas fontes foi a questão de custo e disponibilidade, visto que, no Brasil não são encontradas muitas ofertas deste equipamento. Por isso, um ponto discutível é a comercialização deste equipamento discutido neste trabalho.

Um enorme desafio seria conseguir a patente da Fonte Pulsada, este processo no Brasil pode levar de 7 a 10 anos, com a patente, produzir a fonte em larga escala se tornaria mais seguro, evitando plágio.

A fim de obter um produto confiável, rentável e atingir os clientes certos, alguns pontos comerciais são destacados nesta seção.

7.1. PADRONIZAÇÃO DOS COMPONENTES

Deixando de lado algumas questões de publicidade e branding, como nome dos modelos e design, primeiramente, a fonte precisa ser discriminada, a discussão de lançar um modelo fixo, ou mais modelos depende da relação entre versatilidade e custo, se uma fonte capaz de chavear altas potências tem custo pouco maior que uma fonte que chaveia baixas potências não há sentido em manter um produto de menor potência na linha.

Para isso, a fonte deve ser dividida em blocos específicos, não mais do que cinco, estes blocos devem ser padronizados, como:

1. Fonte de alta tensão
2. Gabinete
3. Gerador de pulso
4. Dispositivo chaveador
5. Controle e medição

De todos estes blocos, a fonte de alta tensão é o mais complexo, diversos testes teriam de ser feitos, utilizar por exemplo, um transformador com saída de 700 V e dispositivos semicondutores como Triacs e Tiristores para modular a alta tensão, antes do retificador, ou utilizar um Variac com Transformador embutido diretamente no gabinete.

O gabinete do produto final também seria um ponto importante, escolher um modelo já comercializado diminuiria muito os custos, no entanto, seria necessário um projeto totalmente novo de disposição dos blocos da fonte, o que poderia afetar sua potência máxima.

Os componentes também deveriam ser facilmente encontrados, evitando problemas com entrega do produto ou manutenção.

7.2. PRODUÇÃO EM SÉRIE

Ter a fonte em estoque é imprescindível, o custo baixo da fonte permite que sua produção seja dividida nos blocos já citados, no primeiro momento, seria necessário obter ou alugar uma oficina ou galpão para montagem e construção da fonte, assim como uma seção de pesquisa e desenvolvimento, de modo que constantemente a fonte fosse atualizada e os custos de produção fossem reduzidos.

7.3. INVESTIDORES

O protótipo não se tornará um produto comercializável em escala considerável a menos que investidores entrem com capital na operação, para isto, levar a fonte para diversos ambientes de pesquisa seria importante, assim como contatar empresas que trabalham com os reatores de baixa pressão e empresas que produzem os sistemas de vácuo que permitem a realização da deposição, desta forma, unindo o reator à fonte pulsada, o governo também deveria ser contatado para auxiliar com capital no fomento às novas tecnologias nacionais empregadas na fonte.

7.4. ESTRATÉGIA DE VENDA

A estratégia de venda do produto se resume ao marketing, ou seja, entender a necessidade do cliente, este cliente pode variar de universidades a empresas que realizam pesquisas na área de plasma e encaixar a fonte na necessidade destes.

É importante fazer o composto de marketing, ou conjunto de variáveis controláveis que a empresa pode usar para influenciar a resposta dos consumidores, popularizado por McCarthy a elaboração dos “quatro P” (KOTLER, 1980) da Fonte Pulsada podem auxiliar neste composto, Partindo do conceito dos “quatro P”, isto é:

- Produto: Qualidade; Características e opções; Estilo; Marca; Linha de produtos; Garantias; Assistência técnica.
- Praça: Canais de distribuição, cobertura; Pontos de vendas; Níveis e locais dos estoques.
- Promoção: Propaganda; Publicidade; Venda pessoal.
- Preço: Nível; Descontos; Formas de pagamento.

Inicialmente, para esta fonte, o Produto se trata da potência, ajustes de parâmetros da Fonte e manutenção corretiva e preditiva. A Praça seria por meio de canais online ou feiras de tecnologia e pesquisa. Promoção, montar pacotes de compra, possivelmente fechando parcerias com empresas que vendem reatores de plasma. Preço, a precificação básica é feita calculando o custo dos componentes, as horas de trabalho, taxas, imposto e frete, adicionando uma margem de lucro que seria estudada com auxílio de um estudo de mercado, compreendendo quais são as outras opções no mercado.

Segundo Tupiniquim e Freitas (1999, p. 90), no subcapítulo *"O interesse, baseado em necessidades e desejos"*, o interesse pelo produto será tão maior quanto maior for o seu elo de valor, ou seja, a ligação entre a sua finalidade e as necessidades e desejos a satisfazer do consumidor em potencial.

Quanto maior a alavancagem do interesse, evidenciando suas necessidades e destacando a possibilidade do consumidor de tê-las satisfeitas, menores serão as dificuldades de influenciar sua decisão de compra (TUPINQUIM; FREITAS, 1999, p. 94). Em relação à precificação do produto,

Empresas de tecnologia estatais, como Petrobras e Embrapa deveriam ser contatadas, para desenvolvimento também de todo este segmento de pesquisa com HIPIMs.

Customizações da fonte, seja potência, tamanho, largura do pulso ou frequência são customizações que são importantes dependendo do cliente, por isso, o setor de vendas precisa estar

bem alinhado ao setor de P&D, para que as expectativas sejam atendidas, contanto que a customização não acarrete em muito tempo adicionado na produção, pois isto pode se tornar um problema logístico e resultando em um produto pouco rentável do ponto de vista de horas de trabalho.

7.5. PÓS-VENDAS E MELHORIA CONTÍNUA

É extremamente importante assegurar que todo o cliente seja acompanhado, para receber pesquisas de satisfação, assim como anúncios de novos produtos ou substituição da fonte por um modelo mais novo, o contato deve ser mantido também para que a manutenção preventiva da fonte seja realizada no momento correto, ou que atualizações necessárias no software sejam feitas sem custos adicionais.

Mesmo dando entrada em uma patente, este processo é muito demorado, por isso, as partes internas da fonte precisam de confidencialidade, diferente da fonte desenvolvida neste trabalho, a fonte para comercialização deveria ser montada com o uso de um microcontrolador, desta forma, o código fonte ficaria escondido, evitando cópias, todo o circuito também deveria ser mergulhado em resina, os semicondutores com sua identificação raspada, a fim de evitar plágios.

Os clientes deveriam ficar sempre no banco de dados para que se tornem potenciais leads de novos produtos, seja prestado atendimento, pesquisas de qualidade, pesquisas de mercado e customizações posteriores.

REFERÊNCIAS

ALLES, D. P.; PINHEIRO, C. J. G.; MOISES, C. R.; PASSAMAI, J. L.; MELO, D. C. A. **Gerador de plasma frio de baixo custo**. In: ENCONTRO CIENTÍFICO DE FÍSICA APLICADA, 8., 2016, Vitória. Anais [...]. São Paulo: Blucher, 2016. v. 3, n. 1, p. 195–197. Disponível em: <https://pdf.blucher.com.br/physicsproceedings/viii-efa/40.pdf>. Acesso em: 4 mai. 2025.

ALLAMERICANFIVERADIO. **TL494 Pulse Width Modulation Control Circuit**. YouTube, 2018. Disponível em: https://www.youtube.com/watch?v=bErcY_iDxlQ. Acesso em: 15 set. 2024.

ANDERS, André; ANDERSSON, Joakim; HORWAT, David; EHIASARIAN, Arutun. **Physics of High Power Impulse Magnetron Sputtering**. Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, 2004. Disponível em: <https://eta-publications.lbl.gov/sites/default/files/lbnl-62147.pdf>. Acesso em: 10 dez. 2024.

BUENO, Felipe Cavalcante; BORTOLETO, José Roberto Ribeiro; MARTINS, Everson. **Desenvolvimento de fonte pulsada para síntese de filmes transparentes e condutivos**. XXXIII Congresso de Iniciação Científica da Unesp, 2022. Disponível em: <https://www.even3.com.br/anais/XXXIIICICUNESP/458221-DESENVOLVIMENTO-DE-FONTE-PULSADA-PARA-SINTESE-DE-FILMES-TRANSPARENTES-E-CONDUTIVOS>. Acesso em: 11 nov. 2024.

BUENO, Felipe Cavalcante; BORTOLETO, José Roberto Ribeiro; MARTINS, Everson. **Desenvolvimento de fonte pulsada para síntese de filmes transparentes e condutivos II**. XXXIV Congresso de Iniciação Científica da Unesp, 2023. Disponível em: <https://www.even3.com.br/anais/XXXIVCICUNESP/608218-DESENVOLVIMENTO-DE-FONTE-PULSADA-PARA-SINTESE-DE-FILMES-TRANSPARENTES-E-CONDUTIVOS-II>. Acesso em: 11 nov. 2024.

DANTAS, Robson Alves. **Plasma**. Mundo Educação, s.d. Disponível em: <https://mundoeducacao.uol.com.br/fisica/plasma.htm>. Acesso em: 11 set. 2024.

ELETRICMONKEYBRAIN. **Guide to the TL494 PWM Chip**. YouTube, 2023. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=RKx7Lh7pPBU>. Acesso em: 15 set. 2024.

KJLC INNOVATE. **High Power Impulse Magnetron Sputtering (HIPIMS)**. Kurt J. Lesker Company, 2016. Disponível em: <https://www.lesker.com/blog/high-power-impulse-magnetron-sputtering-hipims>. Acesso em: 22 nov. 2024.

KOTLER, Philip. **Marketing**. 3. ed. Edição Compactada. São Paulo: Atlas S.A., 1980.

LABORATÓRIO DE VÁCUO E CRIOGENIA. **Filmes Finos**. Instituto de Física Gleb Wataghin, 2025. Disponível em: <https://sites.ifi.unicamp.br/labvacrio/filmes-finos/>. Acesso em: 10 set. 2024.

MANSANO, Ronaldo Domingues. **Descargas Elétricas e Plasmas para Processos de Deposição e Corrosão de Materiais**. PSI5841 - Descargas Elétricas e Plasmas para Processos de Deposição e Corrosão de Materiais (2019). Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/enrol/index.php?id=67471>. Acesso em: 5 dez. 2024.

MATTETE, Henrique. **Diodo Zener, funcionamento e aplicações!** Mundo da Elétrica, 2023. Disponível em: <https://www.mundodaeletrica.com.br/diodo-zener-funcionamento-e-aplicacoes/>. Acesso em: 10 jan. 2025.

MOTOROLA. **TL494 – Pulse-Width-Modulation Control Circuit**. [S.l.]: Motorola, [s.d.]. Disponível em: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/5775/MOTOROLA/TL494.html>. Acesso em: 12 set. 2024.

PEIXOTO, Raul Batista. **Física do processo de deposição de filmes finos por spin coating**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Física) – Centro de Ciências, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2021. Disponível em: https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/61016/7/2021_tcc_raupeixoto.pdf. Acesso em: 10 dez. 2024.

RASHID, Muhammad H. **Eletrônica de Potência**. 4 ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2014. p. 245.

SILVA, Daniela Andrade da. **Desenvolvimento de filmes finos de ZnO e TiO₂ por pulverização catódica para sensores de fibra óptica**. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Física) – Departamento de Física, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa, Lisboa, 2021. Disponível em: https://run.unl.pt/bitstream/10362/135852/1/Silva_2022.pdf. Acesso em: 28 nov. 2024.

SOUSA, Marina; SOARES, Olivério. **Pulverização catódica – Notas introdutórias**. Gazeta de Física, Porto, v. 13, n. 3, p. 123-128, 1990. Disponível em: <https://www.spf.pt/magazines/GFIS/431/article/1404/pdf>. Acesso em: 6 dez. 2024.

STYROPYRO. **DIY Overclocked Plasma Globe. 2500V to a MILLION volts**. YouTube, 3 nov. 2018. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=Oij-BdIkPgQ>. Acesso em: 6 mai. 2025.

SVOBODA, James A.; DORF, Richard C. **Introduction to Eletric Circuits**. 9. ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2014.

TUPINIQUIM, Armando Correa; FREITAS, Sebastião Nelson. **Marketing básico e descomplicado**. 2. ed. São Paulo: STS Publicações e Serviços Ltda., 1999.

ANEXO A - LISTA DE COMPONENTES

Ao leitor, cabe examinar o nome dos componentes e comparar com as imagens e diagramas deste trabalho para obter precisão em uma reprodução.

Número	QTD	Comentário	Designador	Valor
1	4	Conector	127VAC1,127VAC2,ACIN1,ACIN2	
2	1	10nF	C1	10nF
3	12	330uF/400V	C8,C9,C10,C11,C12, C13,C14,C15,C16,C17,C18,C19	330uF/400V
4	2	220nF/400V	C20,C21	220nF/400V
5	1	220nf/400V	C22	220nf/400V
6	1	10nF/1500V	C24	10nF/1500V
7	1	220uF	C25	220uF
8	1	330uF	C26	330uF
9	2	10uF	C27,C28	10uF
10	1	Filtro	C29	10uF
11	12	SK3/16	D1,D2,D5,D6,D8,D9,D13,D14,D15,D16,D17, D18	
12	2	UF5408	D19,D21	
13	1	Retificador	D22	
14	1	FUSE	Fusível5A	
15	1	HDR-M_2.54_1x1P	Gerador_do_pulso	
16	1	IGBT	IRGPS60B120KD2	
17	2	LED_0402-R	LEDPOWERON,LEDSTANDBY	
19	1	1K	POT1	1K
20	1	500	POT2	1K
21	1	100K	POT3	1K
22	1	50K	POT4	1K
23	1	BC559BTA	Q1	
24	1	Chaveador_potência	Q2	
25	1	100	R1	100
26	1	2,2K	R2	2,2K
27	1	680	R3	680
28	3	10K	R5,R44,R45	10K
29	3	1K	R6,R8,R61	1K
30	1	470	R7	470
31	20	100K	R15,R17,R19,R21,R23,R25,R27,R29,R31,R33, R35,R37,R39,R41,R43,R46,R47,R48,R49, R50	100K

32	2	MF72 10D11	R51,R52	Power
33	1	150R/2W	R54	150R/2 W
34	6	330R/10W	R55,R56,R57,R58,R59,R60	330R/10 W
35	1	220R	R62	220R
36	1	330R	R63	330R
37	1	R_limitador	R64	10K
39	1	55R/60W	R_LIMITADOR	55R/60 W
40	1	0.27R	SHUNT	0.27R
41	1	CHAVE_ONOFF_PAINEL	SW1	250V 20 A 4 polos
43	1	TL494	U1	
44	3	BC549BTF	U3,U4,U5	
45	1	4 pole toggle switch	U8	
46	1	FONTE_SONY_HOME_THE ATER	WLK4-POWER-MP-12-1-882-860-12	
47	1	Buck_converter	U10	
48	1	Fonte 9V	U11	
49	1	AC_OUTLET	U12	
50	1	MULTIMETRO	U13	
51	5	cooler 120mm	U14,U16,U17,U18,U19	
52	1	7812	U15	
53	1	Bloco fonte	U22	
54	2	VARIAC	VARIAC,VARIAC1	
55	2	DISPOSITIVO_CHAVEADOR	X1,X2	
56	1	Gabinete computador		
57	4	Pés de gabinete		