



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**  
**GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**VICENTE VENTURA MARQUES NETO**

**UTILIZAÇÃO DE ELETROCUSSÃO DE PLANTAS EM ALTA FREQUÊNCIA  
PARA ELIMINAÇÃO DE ERVAS DANINHAS.**

**FORTALEZA**

**2023**

VICENTE VENTURA MARQUES NETO

UTILIZAÇÃO DE ELETROCUSSÃO DE PLANTAS EM ALTA FREQUÊNCIA  
PARA ELIMINAÇÃO DE ERVAS DANINHAS.

Monografia apresentada ao Curso de  
Engenharia Elétrica do Centro de  
Tecnologia da Universidade Federal do  
Ceará, como requisito parcial para  
obtenção do título de Bacharel em  
Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Sergio Daher

FORTALEZA  
2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Sistema de Bibliotecas  
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

- M321u Marques Neto, Vicente Ventura.  
Utilização de eletrocussão de plantas em alta frequência para eliminação de ervas daninhas / Vicente Ventura Marques Neto. – 2023.  
54 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2023.  
Orientação: Prof. Dr. Sérgio Daher.
1. Ervas daninhas. 2. Eletrocussão. 3. Subestações. I. Título.

CDD 621.3

---

VICENTE VENTURA MARQUES NETO

UTILIZAÇÃO DE ELETROCUSSÃO DE PLANTAS EM ALTA FREQUÊNCIA  
PARA ELIMINAÇÃO DE ERVAS DANINHAS.

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Elétrica do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Sergio Daher

Aprovada em: 11 / 07 /2023.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Sergio Daher (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Laurinda Lúcia Nogueira dos Reis  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Eng. Esp. Alex Sander de Moraes Cardial  
Enel Distribuição Ceará

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela minha existência e pela chance de ter chegado até aqui.

Agradeço à minha mãe Virgínia e à minha avó Mariana por terem sido o meu alicerce, me incentivado, me estimulado e me mostrado que a vida é cheia de possibilidades e que poderia chegar onde eu quisesse. Sou eternamente grato por ser abençoado de ter pessoas tão incríveis. Amo vocês!

Agradeço aos meus irmãos, Mário e João, pela paciência e por terem me apoiado durante todo esse tempo.

Ao professor Sérgio Daher, por ter aceitado o desafio de me orientar e por toda a atenção e disponibilidade.

A meu amigo Gleydson, que me apoiou desde o início do curso e foi meu companheiro em diversas ocasiões.

Aos meus amigos que fiz durante o curso, em especial Allam, Gabriel, Leandro e Mário Igor, que sempre estiveram ao meu lado durante toda a graduação proporcionando momentos mais agradáveis e descontraídos.

Ao setor de manutenção de alta tensão da Companhia Energética do Ceará, que me acolheu e proporcionou diversos momentos de aprendizagem das quais levarei comigo pelo resto da vida, em especial ao Alex Sander, que me incentivou ao desenvolvimento deste trabalho, ao Carlos Magno, Marcondes e Glaubio por sempre terem tempo de me ensinar algo novo.

Aos amigos que fiz no caminho, em especial Maria Leticia e Ariadne, que no último semestre me apoiou na elaboração do trabalho além de deixar os momentos no trabalho leves e descontraídos.

Aos membros da banca deste trabalho, por terem aceitado o convite e se disponibilizarem para contribuir com o crescimento desta pesquisa.

A UFC, que me acolheu e me permitiu desenvolver uma série de atividades que tiveram bastante relevância na minha formação pessoal e profissional.

“Se estiver se sentindo  
desmotivado ou sentindo que  
não é bom o suficiente,  
incendeie o seu coração.”

Koyoharu Gotouge.

## **RESUMO**

No contexto de manutenção de subestações um problema recorrente, mas não muito sinalizado devido ao seu grau de importância ser secundário é a remoção de ervas daninhas que crescem de maneira recorrente em algumas regiões e que por muitas vezes prejudicam serviços. Com isso é necessário buscar técnicas cada vez mais avançadas e eficientes para a eliminação desse tipo de vegetação, uma das alternativas que pode ser utilizada é o método da eletrocussão de vegetal.

Nas últimas décadas, vários estudos têm comprovado a eficácia da capina elétrica em comparação com a capina química. No entanto, há uma lacuna na pesquisa em relação ao desenvolvimento do circuito necessário para a eletrocussão das ervas daninhas. Esse método requer tensões e frequências elevadas para ser eficaz, o que gera preocupações em relação à montagem de protótipos.

**Palavras-chave:** ervas daninhas, eletrocussão, subestações.

## **ABSTRACT**

In the context of substation maintenance, a recurring problem, albeit often overlooked due to its secondary importance, is the removal of weeds that grow persistently in certain areas, thereby hindering services. To address this challenge, it is necessary to seek increasingly advanced and efficient techniques for eliminating this type of vegetation. One alternative that can be employed is the method of plant electrocution.

In recent decades, several studies have demonstrated the effectiveness of electrical weeding compared to chemical weeding. However, there is limited research on the development of the circuit required for weed electrocution. This method necessitates high voltages and frequencies to be effective, which raises concerns regarding prototype assembly.

**Keywords:** weeds, electrocution, substations.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fotos de uma infestação de Buva ( <i>Conyza spp</i> ) em uma lavoura de soja. ....	12
Figura 2: Implantação de uma Linha de Transmissão. ....	14
Figura 3: Utilização de Roçadeira Para Limpeza de Subestação. ....	16
Figura 4: Aplicação de herbicidas por pulverização em uma subestação de distribuição. ....	17
Figura 5: Estrutura química do glifosato. ....	18
Figura 6: Estrutura química do 2,4-D. ....	18
Figura 7: Estrutura química da Atrazina. ....	19
Figura 8: Divisão Sistemática das Plantas. ....	20
Figura 9: Retificador de Onda Completa com Filtro Capacitivo. ....	24
Figura 10: Formas de onda da tensão em um circuito retificador de pico com $CR \gg$ Período. O diodo é considerado ideal. ....	25
Figura 11: Configuração do CI LM555 no modo astável. ....	26
Figura 12: Formas de onda de saída do oscilador astável. ....	26
Figura 13: Registro da variação da resistência das plantas pelo tempo da descarga elétrica (a), Distribuição da tensão através do condutor de aterramento (b). ....	30
Figura 14: Diagrama de blocos da modularização do projeto. ....	30
Figura 15: Representação das tensões de Entrada e Saída do módulo retificador. ....	32
Figura 16: Configuração do CI 555 no modo astável para operar em uma frequência de 12,5 kHz. ....	33
Figura 17: Saída de tensão de 12 V e 12,5 kHz. ....	33
Figura 18: Montagem do circuito do módulo de potência no software PSIM. ....	35
Figura 19: Valores de saída do módulo de potência. ....	35
Figura 20: Arduino UNO R3. ....	36
Figura 21: Sensor de Corrente Alternada SCT-013. ....	36
Figura 22: Representação dos circuitos internos do sensor SCT-013. ....	37
Figura 23: Circuito utilizado para simular o módulo de controle do sistema. ....	38
Figura 24: Esquema elétrico de ligação do sensor no arduino. ....	39
Figura 25: Circuito na condição de funcionamento extremo, botão acionado e corrente elevada. ....	40
Figura 26: Circuito na condição de funcionamento extremo, botão acionado e corrente abaixo de 1 A. ....	40
Figura 27: Montagem do circuito completo de eletrocussão vegetal no software PSIM. ....	42

Figura 28: Formas de onda da tensão de entrada e saída do retificador no software PSIM.....	43
Figura 29: Formas de onda da tensão de saída do módulo oscilador e saída do módulo de potência no software PSIM.....	44
Figura 30: Formas de onda da corrente de saída do módulo de potência no software PSIM.....	45

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Parâmetros iniciais para o cálculo do transformador.....	28
Tabela 2: Parâmetros dimensionados do transformador.....	28
Tabela 3: Propriedades desejadas da descarga elétrica e Eletrodo.....	29
Tabela 4: Componentes do módulo retificador. ....	32
Tabela 5: Componentes do módulo Oscilação. ....	34
Tabela 6: Valores dos modelos do sensor de corrente SCT-013.....	37
Tabela 7: Condições para a ativação do módulo de potência.....	39
Tabela 8: Valores de frequência e período por módulo.....	43

## LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS

INBEP	Instituto Brasileiro de Educação Profissionalizante
DAER	Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem
ANVISA	Agência Nacional de Vigilância Sanitária
UFV	Universidade Federal de Viçosa
UNESP	Universidade Estadual de São Paulo
RPM	Rotações por minuto
SIN	Sistema Interligado Nacional
IPEA	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
ONS	Operador Nacional do Sistema
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
V <sub>p</sub>	Valor de pico
Hz	Hertz
V	Volt
F	Faraday
Ω	Resistência
CI	Circuito integrado
W	Watt
g	Grama
s	Segundo
A	Ampère
°C	Grau Celsius

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	12
1.1 OBJETIVOS.....	14
1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO .....	14
2 TIPOS DE CAPINA.....	15
2.1 CAPINA MECÂNICA.....	15
2.2 CAPINA QUÍMICA.....	16
2.3 CAPINA ELÉTRICA.....	19
3 SETOR ELÉTRICO .....	22
3.1 LINHAS DE DISTRIBUIÇÃO OU TRANSMISSÃO.....	22
3.2 SUBESTAÇÕES DE DISTRIBUIÇÃO OU TRANSMISSÃO.....	23
4 DESCRIÇÃO DOS COMPONENTES UTILIZADOS .....	24
4.1 RETIFICADOR DE ONDA COMPLETA COM FILTRO CAPACITIVO.....	24
4.2 OSCILADOR .....	25
4.3 TRANSFORMADOR .....	27
5 ANÁLISE TÉCNICA DO CIRCUITO .....	29
5.1 MÓDULO DE RETIFICAÇÃO.....	31
5.2 MÓDULO OSCILADOR.....	32
5.3 MÓDULO DE POTÊNCIA.....	34
5.4 MÓDULO DE CONTROLE.....	36
5.4.1 Montagem do circuito do módulo de proteção.....	38
6 SIMULAÇÃO E DISCUSSÕES .....	42
7 CONCLUSÃO.....	46
REFERÊNCIAS .....	47
ANEXO A – DATASHEET SENSOR SCT -013.....	49
APÊNDICE A – ALGORITMO PARA DIMENSIONAMENTO E PARÂMETRIZAÇÃO DO TRANSFORMADOR DO MÓDULO DE POTÊNCIA. ..	50
APÊNDICE B – ALGORITMO PARA ACIONAMENTO DO MÓDULO DE CONTROLE DO PROJETO.....	53

## 1 INTRODUÇÃO

Um dos primeiros passos para preparar um terreno para construção ou cultivo é realizar a remoção da vegetação invasora do local. Uma das principais vegetações invasoras são as ervas daninhas, que são qualquer planta de caráter silvestre que cresce em áreas controladas pelos humanos, como cultivos, hortas ou jardins, e cuja presença é majoritariamente indesejada. De acordo com Fisher (1973), suas principais características são a possibilidade de sobrevivência em condições adversas e a rusticidade.

As ervas daninhas são o motivo de preocupação de diversos setores econômicos dentro dos quais pode-se citar, o setor agrícola, que apresenta quase um quinto dos seus custos de produção destinados ao combate de ervas daninhas, um exemplo de infestação em lavouras está ilustrado na figura 1.

O crescimento de mais de uma espécie de planta no mesmo ambiente causa uma disputa para obtenção de água, luz e nutrientes fundamentais para o desenvolvimento da planta. Essa competição causa perdas na produtividade e qualidade do produto final. Algumas ervas daninhas possuem característica de parasitas, causando perdas na produtividade e até morte da planta. Outra maneira que ervas daninhas afetam lavouras é atuando como hospedeiras de pragas e doenças malélicas na plantação. Além disso, causam dificuldades de manejo após o cultivo e no momento de colheita (VIVIAN, 2005).

Figura 1: Fotos de uma infestação de Buva (*Conyza spp*) em uma lavoura de soja.



Fonte: Bayer (2020)

Outro setor que é afetado diretamente com o crescimento desse tipo de vegetação é o setor elétrico, que historicamente necessita de grandes terrenos para construção de usinas, subestações de transmissão ou distribuição a fim de acomodar os seus equipamentos, e as linhas tanto de distribuição quanto de transmissão que sofrem muito com queimadas ocasionadas por vegetação seca.

O surgimento constante de vegetação nessas áreas acarreta em riscos adicionais, como o surgimento de animais silvestres que buscam fontes de calor dentro dos equipamentos, provocando danos à subestação.

A presença desse tipo de vegetação acaba gerando riscos ambientais que de acordo com o centro de treinamento INBEP, que tipifica os agentes ambientais ou riscos ambientais como substâncias ou elementos presentes no ambiente de trabalho que, se não forem controlados de maneira correta, podem ocasionar problemas à saúde dos trabalhadores. Eles são divididos em 5 categorias: riscos químicos, físicos, biológicos, ergonômicos e de acidentes. Os principais riscos de termos vegetações robustas nesses ambientes são:

- Riscos de Acidente já que muitas vezes os operadores necessitam realizar alguma manobra ou manutenção e acabam tendo a visão do ambiente prejudicada, pois elas podem esconder falhas no terreno ou até mesmo ocultando falhas no equipamento como perda de isolamento.
- Riscos Biológicos, pois, esse tipo de ambiente acaba facilitando a proliferação de roedores e outros animais peçonhentos que podem vir a entrar em contato com seres humanos em momentos de manutenção ou inspeção.
- Riscos Físicos, já que para a aplicação de herbicidas é necessário uma vestimenta especial, que pode ocasionar fadiga se utilizada por um longo período de tempo.
- Risco Químico, devido a exposição do operador com o herbicida.

Outro aspecto importante a ser destacado é que as ervas daninhas são grandes facilitadores naturais de incêndio em regiões mais secas, como o caso do nordeste. Um grande volume de vegetação seca nessas áreas pode ocasionar focos de incêndio nas faixas de servidão das linhas de transmissão e distribuição, além de dentro das subestações, gerando assim prejuízo para a concessionária de energia e para o consumidor final com a interrupção do fornecimento de energia.

Figura 2: Implantação de uma Linha de Transmissão.



Fonte: <https://www.engefoto.com.br/case/linhas-de-transmissao-edp/> (2015)

## 1.1 OBJETIVOS

O objetivo deste estudo é abordar o problema recorrente da remoção de ervas daninhas em subestações, muitas vezes negligenciado devido à sua importância secundária. O objetivo é explorar técnicas avançadas e eficientes, focando no uso da eletrocussão vegetal como uma alternativa viável.

## 1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

Para o desenvolvimento do presente trabalho, foram estabelecidos os seguintes pilares para seu desenvolvimento:

- a. Verificar as principais soluções no mercado para eliminação e remoção de ervas daninhas;
- b. Definir os principais alvos onde a solução poderá ser usada (Subestações de Distribuição e Faixas de Servidão);
- c. Levantamento dos parâmetros da capina elétrica;
- d. Idealização de um projeto de capina elétrica;
- e. Viabilidade da utilização da capina elétrica comparada com os métodos já usados em subestações.

## 2 TIPOS DE CAPINA

A capina é uma das formas mais utilizadas de remoção e eliminação de vegetação indesejadas nos mais variados ambientes, e durante ao longo da história ela sofreu várias mudanças para melhorar cada vez mais a sua eficiência.

O processo inicial que consistia em remover a vegetação invasora manualmente ou com o auxílio de equipamentos rudimentares, foi se desenvolvendo conforme as habilidades de ferragem, surgindo a enxada que durante muito tempo foi amplamente utilizada nas primeiras etapas de cultivo, o que de acordo com CONSTANTIN (2005) *“Pode-se dizer que esse método é vantajoso para áreas muito pequenas, como o jardim de uma casa, mas para situações onde existe uma grande área a ser cuidada, se torna um trabalho muito exaustivo, lento, e que requer o trabalho de várias pessoas. Estima-se que a capacidade de capina para uma pessoa é de oito a doze dias por hectare”*.

### 2.1 CAPINA MECÂNICA

Com o aumento do processo produtivo, tornou-se evidente que a extração manual da vegetação não conseguiria acompanhar a velocidade em que as áreas de cultivo aumentavam. A extração manual da vegetação não era mais uma alternativa viável surgindo então as técnicas de corte mecanizado.

O corte mecanizado envolve o uso de instrumentos capazes de realizar o corte superficial da planta, eliminando o sistema aéreo, mas mantendo a parte radicular. As ferramentas mais comuns para esse fim são as roçadeiras, tratores e motosserras.

Um aspecto interessante sobre o corte mecanizado é que ele corta superficialmente a vegetação, o que requer uma periodização dos cortes. No entanto, é amplamente aceito em locais onde é necessária a manutenção da vegetação, como campos de futebol que precisam ter a grama sempre em um nível uniforme.

Atualmente esse é o tipo é amplamente utilizado como alternativa a aplicação de herbicidas nas subestações de distribuição como visto na figura 3, nela são utilizadas roçadeiras para remoção da vegetação, mas como supracitado ela gera a “obrigação” de uma manutenção preditiva periódica fazendo assim com que as distribuidoras de energia tenham um grande custo com esse tipo de serviço, a capina mecânica também é utilizada quando falamos de limpeza de faixa de servidão para esse tipo de remoção de vegetação são utilizados tratores, motosserras e

roçadeiras já que nessas áreas a vegetação rasteira é muito mais densa necessitando de um gama de equipamentos mais ampla.

Para sua execução são necessários seguir diversas etapas como exemplificado nas Normas do Departamento Autônomo de Estradas de Rodagem (DAER), são elas:

- a) Sinalizar o ambiente onde será realizada a capina;
- b) Retirar objetos que possam ser prejudiciais para o exercício da atividade;
- c) Executar o serviço usando os equipamentos de proteção individual, como botas, óculos de proteção, protetor auricular e máscara;
- d) Retirar o material proveniente da capina, pois em muitos casos não é permitida a queima, sendo necessário transportá-lo para um descarte adequado.

Figura 3: Utilização de Roçadeira Para Limpeza de Subestação.



Fonte: Próprio Autor (2023)

## 2.2 CAPINA QUÍMICA

A Capina química consiste na utilização de produtos químicos com ênfase nos herbicidas para inibir o crescimento da vegetação, também conhecidos como agrotóxicos. Apesar de terem sido desenvolvidos durante a primeira guerra mundial (1914-1918), foi só após a segunda guerra que a primeira classe de agrotóxicos foi utilizada como defensivo de lavouras para eliminar possíveis pragas na lavoura, inseticidas.

No Brasil a utilização de agrotóxicos se iniciou na década de 60 com a expansão do mercado agrícola brasileiro através de pacotes tecnológicos. Compostos por adubos químicos altamente solúveis, agrotóxicos e maquinários, sem a utilização do pacote tecnológico não era

possível conseguir crédito para o financiamento da produção, forçando assim os produtores rurais a aderirem a este estilo de agricultura (MOREIRA, 2000).

Segundo a Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA) o Brasil é considerado um dos maiores usuários de agroquímicos, em 2009 o consumo ultrapassou a marca de um milhão de toneladas tornando-se o recordista mundial.

Figura 4: Aplicação de herbicidas por pulverização em uma subestação de distribuição.

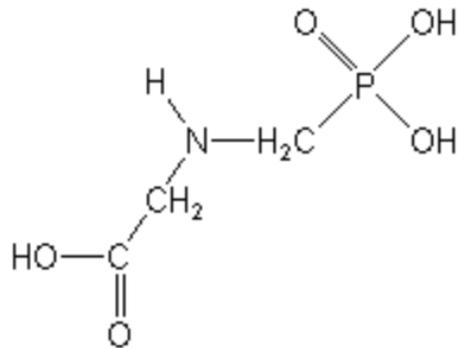


Fonte: Próprio Autor

Mas afinal como funciona a capina química, ela consiste na aplicação dos Herbicidas que são os responsáveis por ocasionar a morte das ervas daninhas, no Brasil os herbicidas mais utilizados são:

- **Glifosato ou N-(fosfometil) glicina (glyphosate)**, que é o mais difundido globalmente, ele funciona inibindo a enzima EPSPS (5-enolpiruvato-chiquimato-3-fosfato sintase) da via metabólica do ácido chiquímico, impedindo a síntese de alguns aminoácidos fundamentais para o crescimento das plantas.

Figura 5: Estrutura química do glifosato.

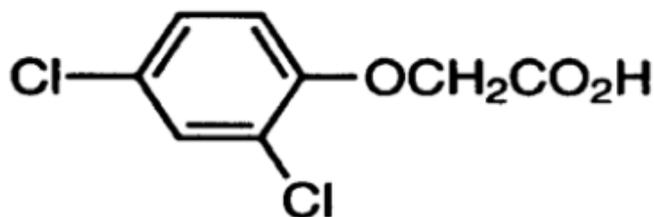


Fonte: UFV

- **2,4-D (Ácido 2,4 diclorofenoxiacético)**, o 2,4-D foi o primeiro herbicida de uso exclusivo para eliminação de ervas daninhas latifoliadas anuais, que são bem presentes no Brasil devido ao seu desenvolvimento em climas quentes, seu princípio de funcionamento é a mimetização das auxinas naturais da planta ou regulação do crescimento, por herbicidas com esse tipo de funcionamento são denominados de herbicidas hormonais.

Ele é recomendado para pastagens, gramados, gramíneas e aplicado junto com inibidores de fotossíntese nos plantios de cana-de-açúcar, porém um ponto importante sobre ele é que com o envelhecimento da planta ela vai apresentar maior tolerância ao seu uso.

Figura 6: Estrutura química do 2,4-D.

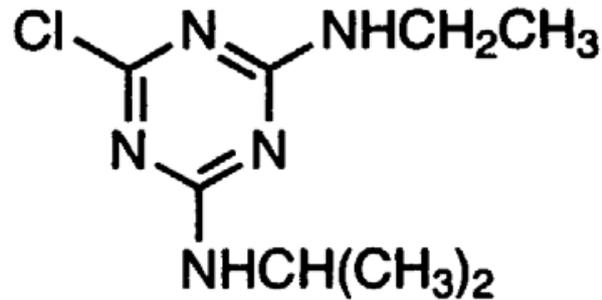


Fonte: UFV

- **Atrazina ou 6-cloro-N-etil-N'-(1-metiletil)-1,3,5-triazina-2,4-diamina**, este herbicida é do tipo inibidor de fotossíntese, ele age no aparelho fotossintético da planta impedindo o transporte de elétrons ocasionando um acúmulo em determinadas regiões causando a peroxidação dos lipídios na parede da membrana celular levando ao seu

rompimento desenvolvendo clorose e depois necrose da planta até que ela morra, a Atrazina é muito usada em cultivos como milho, cana-de-açúcar, café, fruteira e cacau, ele é bem mais barato que os diversos herbicidas no mercado e pode ser utilizada em conjunto com outros herbicidas como 2,4-D.

Figura 7: Estrutura química da Atrazina.



Fonte: UFV

A aplicação dos herbicidas é uma alternativa que está cada vez mais sendo utilizada quando se falar de manutenção preventiva de sistemas elétricos, pois possibilita um intervalo maior entre as realizações dos ciclos de manutenção dentro das subestações.

Dentro do sistema elétrico, um dos herbicidas amplamente utilizados é o Arsenal NA. Sua aplicação em subestações é altamente recomendada devido à sua capacidade de não causar danos à malha de terra. É importante ressaltar que o Arsenal NA possui laudos de aprovação emitidos pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, o que reforça sua eficácia e segurança no uso específico para esse fim.

Outro ponto a se destacar é que existe uma legislação rigorosa para que empresas e produtores rurais possam utilizar herbicidas, pois a não utilização correta acarreta em diversos problemas ambientais e relacionados à saúde, além disso como destacamos alguns herbicidas acabam desenvolvendo plantas resistentes a sua composição, fazendo com que uma dosagem maior, e conseqüentemente mais nociva para o meio ambiente, tenha que ser utilizada para gerar o efeito pretendido (DARE, 1978; ROSA, 2005, p.66-67).

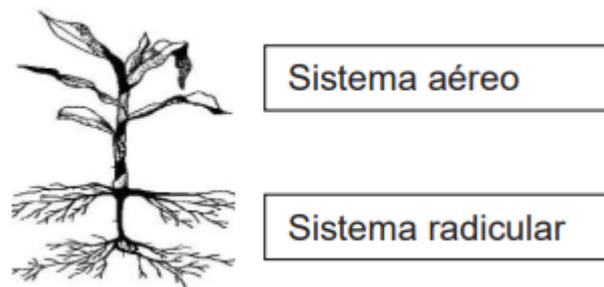
### 2.3 CAPINA ELÉTRICA

A capina elétrica consiste na utilização de eletrodos que disparam pulsos elétricos de alta tensão para eletrocutar a planta. A corrente flui através do sistema aéreo para o radicular e, eventualmente, o solo com um eletrodo de aterramento em contato. Como resultado, os tecidos

vegetais são danificados do alto campo elétrico, aquecimento e onda de choque de pulsos (Diprose e Benson 1984).

Essas lesões podem ser na membrana das células ocasionando o rompimento da membrana ou mesmo explosão de células. O dano está ligado às propriedades elétricas iniciais (por exemplo, impedância) da planta, sua arquitetura e estágio de crescimento, e estão relacionados com a atual frequência e intensidade.

Figura 8: Divisão Sistemática das Plantas



Fonte: Adaptado de Eletrocussão de Plantas - Capina elétrica (2015)

Os primeiros estudos sobre esse assunto no Brasil foram desenvolvidos na Universidade Estadual de São Paulo (UNESP) em 1988, nos primeiros estudos foram utilizadas quantidades de energia na faixa de 100 a 5000 Joules como faixa de eletrocussão das ervas daninhas (ALMEIDA, 1988) que apesar das tecnologias limitadas em quesitos de eficiência energética da época apresentaram bons resultados práticos.

Com a evolução das tecnologias de aplicação e o desenvolvimento de estudos sobre eficiência energética, em 2009 Brighenti e Brighenti estudaram o emprego da capina elétrica no plantio de soja para controlar as ervas daninhas, onde utilizou-se um trator com os eletrodos nas pontas, aumentando a potência total do sistema já que o sistema se utilizava da transformação da energia cinética provida pela rotação do trator de 2200 RPM. Assim foi concluído que quanto maior potência se utiliza no momento da aplicação mais eficiente será o controle das ervas daninhas.

Em um estudo realizado por Landers em 2013, foi indicado que a utilização de pulsos em alta frequência na capina elétrica apresenta um índice de efetividade comparável ao do glifosato, um herbicida amplamente utilizado. Além disso, o estudo constatou que os animais importantes para a fertilização do solo são capazes de sobreviver ao processo de capina elétrica.

Ao comparar a utilização do uso de eletrocussão vegetal com as dos herbicidas mais usados no mercado, que tem por característica deixar resíduos químicos nas plantas após a aplicação que podem durar alguns dias, a capina elétrica apresenta visibilidade imediata não deixando resíduos químicos no ambiente possibilitando o acesso imediato o que é excelente quando olhamos na perspectiva do setor elétrico ele possibilita que mesmo após a capina seja possível intervenções no sistema elétrico imediato diminuindo os riscos de anomalias prolongadas.

### **3 SETOR ELÉTRICO**

No Brasil, o setor elétrico é representado pelo Sistema Interligado Nacional (SIN). O SIN possui uma matriz elétrica com capacidade instalada de 166,76 GW, sendo que 86,4% dessa capacidade é proveniente de fontes renováveis. A rede básica de transmissão brasileira possui uma extensão total de 183.245 km de linhas de transmissão, considerando as linhas outorgadas e com capacidade de transformação entre outubro de 2020 e outubro de 2021, de acordo com o ONS (2021).

O SIN coordenado pelo Operador Nacional do Sistema (ONS) é o responsável por levar a energia gerada nas usinas até o sistema de distribuição de eletricidade, onde o sistema de distribuição fornece energia para os consumidores finais.

Quando falamos de áreas do setor elétrico que utilizam a capina em suas manutenções preventivas destacamos os sistemas de Transmissão e o de Distribuição, nas figuras das Linhas sejam elas de Transmissão ou Distribuição ou Subestações que também estão presentes nas duas subdivisões.

#### **3.1 LINHAS DE DISTRIBUIÇÃO OU TRANSMISSÃO**

As linhas de transmissão transportam energia por longas distâncias através de grandes torres que conectam usinas geradoras aos grandes consumidores, como indústrias de grande porte e distribuidoras de energia.

O sistema de transmissão é composto por 18.748 km de linhas transmitindo em corrente contínua e o restante, por 164.497 km, em corrente alternada. O ONS prevê um aumento dessa extensão de 28% até 2024 (ONS, 2021).

As linhas de distribuição são compostas por linhas de baixa, média e alta tensão. Elas possuem maior extensão e ramificações já que necessitam de um sistema com mais recursos, pois são responsáveis por distribuir a energia aos consumidores de níveis de tensão mais baixos.

Para que não ocorram problemas nas linhas decorrentes de vegetação as concessionárias de energia incorporam ao seu plano de manutenção a limpeza de faixa de servidão e aceiros em suas redes a fim de proteger os circuitos.

A limpeza de faixa consiste no corte e derrubada rente ao solo, na altura máxima de 20 cm, de toda vegetação de qualquer porte e corte de galhos que estejam dentro da faixa de segurança, em faixas de terreno conforme local e características da rede, cujo eixo coincide com eixo da respectiva faixa.

Os aceiros são faixas de terra de 1 metro ao redor dos postes de madeira e 0,5 metros dos postes de concreto, sem vegetação, mantidas limpas com grades, roçadeira, ou até mesmo com ferramentas manuais para evitar a propagação do fogo.

### **3.2 SUBESTAÇÕES DE DISTRIBUIÇÃO OU TRANSMISSÃO**

Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel), pela Resolução Normativa no 414 – Condições Gerais de Fornecimento Energia Elétrica, uma subestação é parte do sistema de potência que compreende os dispositivos de manobra, controle, proteção, transformação e demais equipamentos, condutores e acessórios, abrangendo as obras civis e estruturas de montagem.

As subestações desempenham um papel importante no controle do fluxo de potência, na modificação das classes de tensão, na inversão da corrente elétrica e na garantia da proteção do sistema. Elas são fundamentais nos sistemas de transmissão e distribuição elétrica para assegurar a qualidade do fornecimento de energia.

Para prevenir alguns riscos e assegurar o pleno funcionamento faz-se necessário uma série de medidas relacionadas à manutenção da subestação, dentre as quais destaca-se a manutenção preditiva da vegetação no local.

Para isso, como mencionado nos capítulos anteriores, as concessionárias de energia elétrica utilizam de diversos métodos de capina para prevenir o crescimento da vegetação no local, cada um deles apresenta uma especificação técnica para realização do procedimento.

Uma dificuldade que muitas distribuidoras enfrentam é com relação à periodicidade da manutenção já que a capina mecânica exige execuções em períodos menores de tempo e a química envolve uma série de questões ambientais que impossibilitam seu uso em algumas áreas.

Com isso a capina elétrica surge para fazer um contraponto com relação às demais já que apresenta uma periodização comparável com as dos herbicidas, mas com menos impactos ambientais.

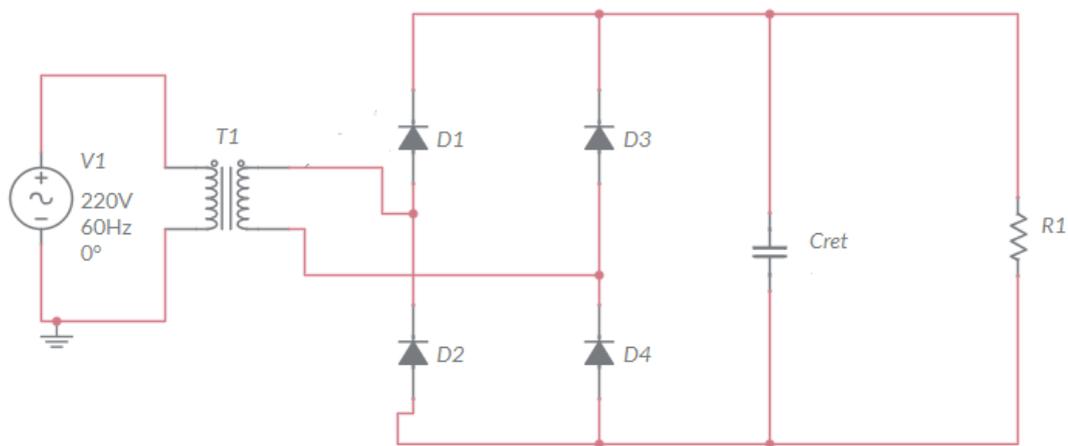
## 4 DESCRIÇÃO DOS COMPONENTES UTILIZADOS

Este capítulo destina-se a explicar os componentes utilizados durante as simulações, uma vez que alguns deles possuem peculiaridades que devem ser destacadas.

### 4.1 RETIFICADOR DE ONDA COMPLETA COM FILTRO CAPACITIVO.

Os retificadores de onda completa com filtro capacitivo são circuitos responsáveis pela conversão de corrente alternada em corrente contínua. Essa conversão ocorre devido à sua configuração, que consiste em um agrupamento de diodos em conjunto com um filtro capacitivo

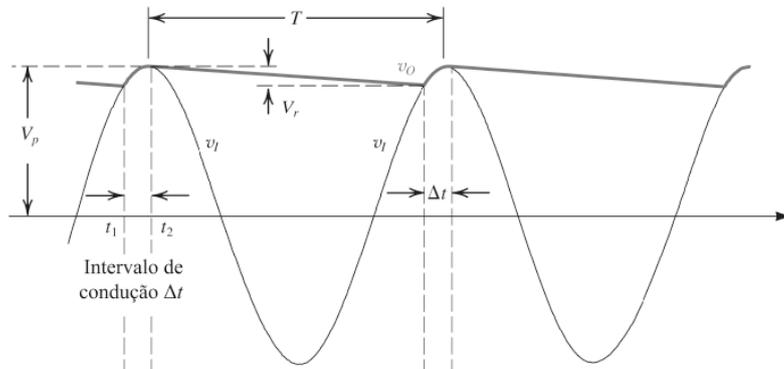
Figura 9: Retificador de Onda Completa com Filtro Capacitivo.



Fonte: Próprio Autor (2023).

Supondo que o diodo é ideal. Para uma entrada senoidal, o capacitor carrega até o valor de pico da entrada  $V_p$ . Então, o diodo entra em bloqueio e o capacitor descarrega através da resistência de carga  $R$ . A descarga do capacitor continuará por quase todo o ciclo, até o instante em que  $V_1$  exceda o valor da tensão no capacitor. Daí, o diodo conduz novamente, carrega o capacitor até o valor de pico de  $V_1$  e o processo se repete. Observe que, para manter a tensão de saída, sem que esta diminua significativamente durante a descarga do capacitor, escolheu-se o valor para  $C$  de modo que a constante de tempo  $CR$  seja muito maior que o intervalo de tempo de descarga SEDRA (2005). A tensão de saída pode apresentar o seguinte formato como demonstrado na figura 10 SEDRA (2005).

Figura 10: Formas de onda da tensão em um circuito retificador de pico com  $CR \gg$  Período.  
O diodo é considerado ideal.



Fonte: SEDRA. Circuitos Microeletrônicos (2005).

Segundo SEDRA (2005) para encontrar o valor da tensão de ripple, será utilizado a equação 1.

$$V_r = \frac{V_p}{2fCR} [V] \quad (1)$$

onde,

$f$  é a frequência [Hz].

$R$  é resistência associada ao retificador [ $\Omega$ ].

$V_p$  é a tensão de pico do sinal de entrada [V].

$C$  é a capacitância do filtro [F].

Essa equação será usada para obter o valor do capacitor do filtro, de modo que se obtém a seguinte equação.

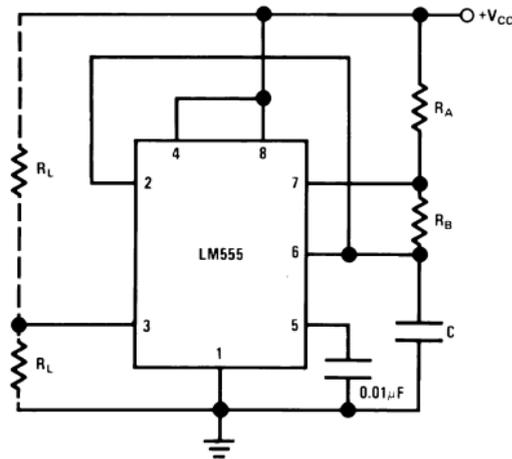
$$C = \frac{V_p}{V_r f R} \quad (2)$$

## 4.2 OSCILADOR

É um circuito integrado amplamente difundido em projetos eletrônicos devido a sua versatilidade e facilidade de uso. Para o projeto específico, o CI será usado no modo astável, pois é necessário gerar pulsos de forma contínua. Ele é composto por três blocos principais: dois comparadores de tensão (comparador 1 e comparador 2), um flip-flop RS (bistável) e um transistor de descarga (transistor de saída).

A configuração do modo astável é informada pelo próprio fabricante do CI em seu datasheet, a figura 11 mostra a configuração fornecida no datasheet do CI LM555 da Texas Instruments.

Figura 11: Configuração do CI LM555 no modo astável.

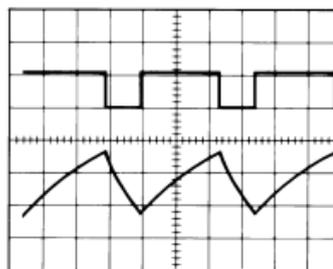


Fonte: Adaptado de LM555 Timer Texas Instruments (2015).

Na configuração astável de oscilação, a frequência de operação e o Duty Cycle são controlados por meio de componentes externos conectados ao circuito, que são dois resistores ( $R_A$  e  $R_B$ ) e um capacitor ( $C$ ). O circuito de saída é capaz de fornecer ou drenar uma corrente de até 200mA para circuitos TTL de driver, conforme especificado no LM555 Timer da Texas Instruments (2015).

Nessa configuração, o sinal de saída pode assumir dois formatos, como ilustrado na Figura 12. Na parte inferior da Figura 12, tem-se o formato de sinal em dente de serra, enquanto na parte superior tem-se o formato retangular. Para a oscilação do circuito, será utilizado o formato retangular.

Figura 12: Formas de onda de saída do oscilador astável.



Fonte: Adaptado de LM555 Timer Texas Instruments (2015).

Nessa configuração, o capacitor carrega por meio dos resistores  $R_A$  e  $R_B$ , e descarrega através do resistor  $R_B$ . Os valores de carga e descarga são equivalentes a  $1/3$  e  $2/3$  da tensão de

entrada do circuito, respectivamente. Dessa forma, é possível ajustar o Duty Cycle configurando os valores de Ra e Rb usando a Equação 3.

$$Duty\ Cycle = \frac{Rb}{Ra + 2Rb} \quad (3)$$

Onde,

Ra e Rb são as resistências utilizadas para descarga do capacitor [ $\Omega$ ].

No datasheet do componente, é possível obter os valores de tempo de carga do capacitor, conforme dado pela Equação 4, e o tempo de descarga, conforme obtido pela Equação 5.

$$Tempo\ de\ Carga = 0,693 * (Ra + Rb) * C \quad (4)$$

$$Tempo\ de\ Desarga = 0,693 * Rb * C \quad (5)$$

Onde,

C é o valor do capacitor usado para oscilação [F].

Somando as Equações 4 e 5, obtém-se o período total de oscilação (T), representado pela Equação 6.

$$T = 0,693 * (Ra + 2 * Rb) * C \quad (6)$$

Com posse da equação do período, agora é possível achar a frequência de oscilação ( $f$ ), visto que a frequência é o inverso do período. Portanto chega-se à seguinte equação para a frequência.

$$f = \frac{1,44}{(Ra + 2 * Rb) * C} \quad (7)$$

De acordo com Mizuno (1993), a frequência de oscilação do sistema precisa ser igual a 12,5 kHz para causar danos à vegetação. Agora substituindo o valor da frequência desejada e dos resistores encontrados anteriormente, será possível dimensionar o valor do capacitor (C).

Reorganizando a equação 7:

$$C = \frac{1,44}{(Ra + 2 * Rb) * f}$$

### 4.3 TRANSFORMADOR

Segundo GARCIA e ALMEIDA (2014), transformadores são dispositivos elétricos que permitem alterar os valores de tensões e correntes de um sistema sem modificar a sua frequência. Seu princípio de funcionamento consiste em um conjunto de enrolamentos acoplados por meio de fluxo magnético em comum.

Inicialmente são apresentados os dados do projeto como pode ser visto na tabela 1 e os resultados obtidos por meio da simulação no algoritmo apresentado no apêndice A.

Tabela 1: Parâmetros iniciais para o cálculo do transformador.

Parâmetro	Valor
Potência de Saída	200 W
Tensão de Entrada	12 V
Tensão de pico de Saída	3 kV
Frequência de operação	12,5 kHz
Rendimento	95%
Densidade da Corrente	4500 A/m <sup>2</sup>
Densidade de fluxo	0,20
Temperatura	75 ° C

Fonte: Próprio Autor (2023).

Aplicando os valores iniciais as equações do apêndice A obtém-se a tabela 2 com os parâmetros necessários para realizar a simulação do módulo de potência. Observa-se que com os dados sumarizados pela tabela 2 é possível realizar a montagem física do transformador, visto que seu índice de possibilidade de execução apresentou-se maior que 4, indicando que sua implementação é viável.

Tabela 2: Parâmetros dimensionados do transformador.

Parâmetro	Valor
Potência de entrada	210,526 W
Corrente eficaz de entrada	24,811 A
Núcleo	(EE 42/21/20)
Dimensões da janela	10,30 e-6 m <sup>2</sup>
Área efetiva do núcleo	12,19 e-6 m <sup>2</sup>
Número de espiras do primário	5
Número de espiras do secundário	1250
Bitola de enrolamento primário	7 fios / AWG 18
Bitola de enrolamento secundário	1 fio / AWG 34
Índice de possibilidade de execução	5,553

Fonte: Próprio Autor (2023).

## 5 ANÁLISE TÉCNICA DO CIRCUITO

Para esta etapa, serão apresentados os aspectos técnicos da capina elétrica, incluindo o desenvolvimento do circuito e sua simulação.

Estudos na área têm comprovado a eficácia do método de eletrocussão de plantas daninhas por meio de pulsos de alta voltagem. O circuito foi projetado com base em pesquisas sobre eletroestimuladores vegetais, buscando alcançar os resultados propostos no trabalho intitulado "WeedElec: a robotic research platform for individual weed detection and selective electrical weeding" (2021) e também no estudo de Mizuno (1993).

Para garantir danos efetivos às plantas, fez-se necessário realizar o levantamento de valores específicos de tensão, frequência e tempo de duração da descarga elétrica. Esses valores estão especificados na Tabela 3.

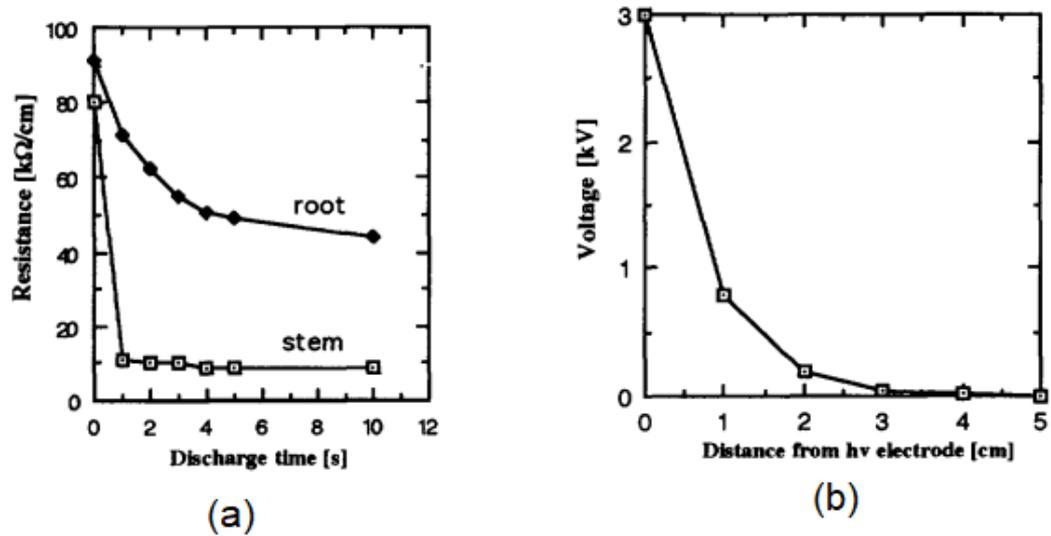
Tabela 3: Propriedades desejadas da descarga elétrica e Eletrodo.

Tensão da Descarga	3 kV
Frequência de Oscilação	12,5 kHz
Potência de Saída	200 W
Duração da Descarga	1 s
Tipo de Eletrodo	Aço inoxidável

Fonte: Próprio Autor (2023).

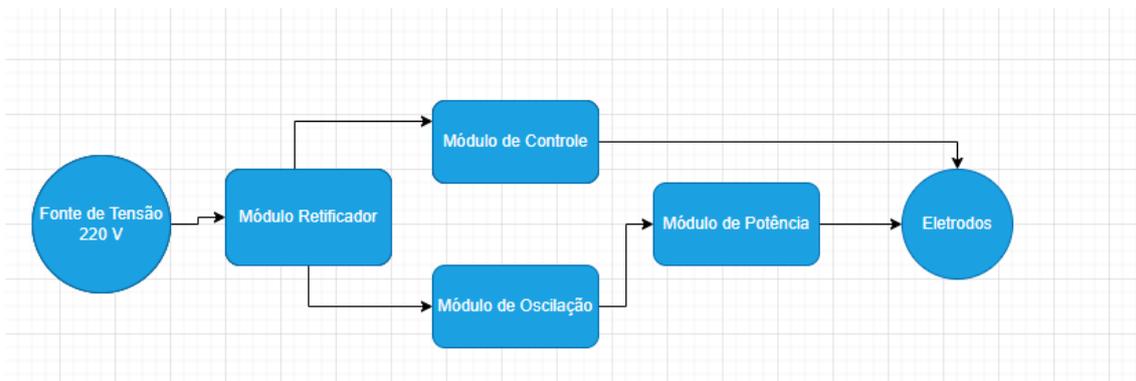
Segundo Mizuno (1993), a duração da descarga elétrica influencia na resistência da planta, como pode ser observado no gráfico (a) da Figura 13. No gráfico (b), são apresentados estudos sobre a distância entre os eletrodos de terra e os de alta tensão. Um ponto amplamente abordado no artigo é a possibilidade de fuga para a terra pelo equipamento. Para lidar com essa questão, Mizuno registrou a distribuição da tensão ao longo do condutor de aterramento do circuito, a fim de determinar a melhor distância entre os dois eletrodos.

Figura 13: Registro da variação da resistência das plantas pelo tempo da descarga elétrica (a), Distribuição da tensão através do condutor de aterramento (b).



Fonte: Adaptado de A Portable Weed Control Device using High Frequency ac Voltage Mizuno (1993).

Figura 14: Diagrama de blocos da modularização do projeto.



Fonte: Próprio Autor (2023)

Ele está dividido em 4 módulos, como é possível observar no diagrama apresentado na Figura 14. Esses módulos são os seguintes:

1. Módulo de retificação: Neste módulo, a tensão da rede elétrica é convertida em corrente contínua (DC) para alimentar os demais módulos do circuito.
2. Módulo de oscilação: Este módulo é responsável por gerar os pulsos elétricos necessários para a aplicação na capina elétrica. Ele garante a geração adequada dos pulsos de alta voltagem para danificar as plantas daninhas.

3. Módulo de controle do equipamento: Este módulo tem a função de atuar caso ocorra alguma fuga de corrente indesejada no circuito. Além disso, é responsável por desligar o equipamento quando necessário, garantindo a segurança durante a operação.
4. Módulo de potência: Neste módulo, a tensão de entrada, que é de baixa tensão, é transformada em uma tensão de média tensão de 3kV, conforme proposto por Mizuno (1993). Essa etapa é essencial para fornecer a alta voltagem necessária para a eficácia da capina elétrica.

### 5.1 MÓDULO DE RETIFICAÇÃO.

Como a maior motivação do circuito é para seu uso dentro do setor elétrico, não existe a necessidade da utilização de baterias no projeto, visto que as subestações apresentam pontos de tomada de força disponíveis para utilização.

Com isso para alimentação do circuito será utilizado um retificador de onda completa em ponte com filtro capacitivo para modular uma tensão de saída de 12 Volts para alimentar o módulo de oscilação e o de controle. Esse tipo de retificador impede a circulação de corrente negativa no circuito. A figura 9 demonstra o circuito planejado.

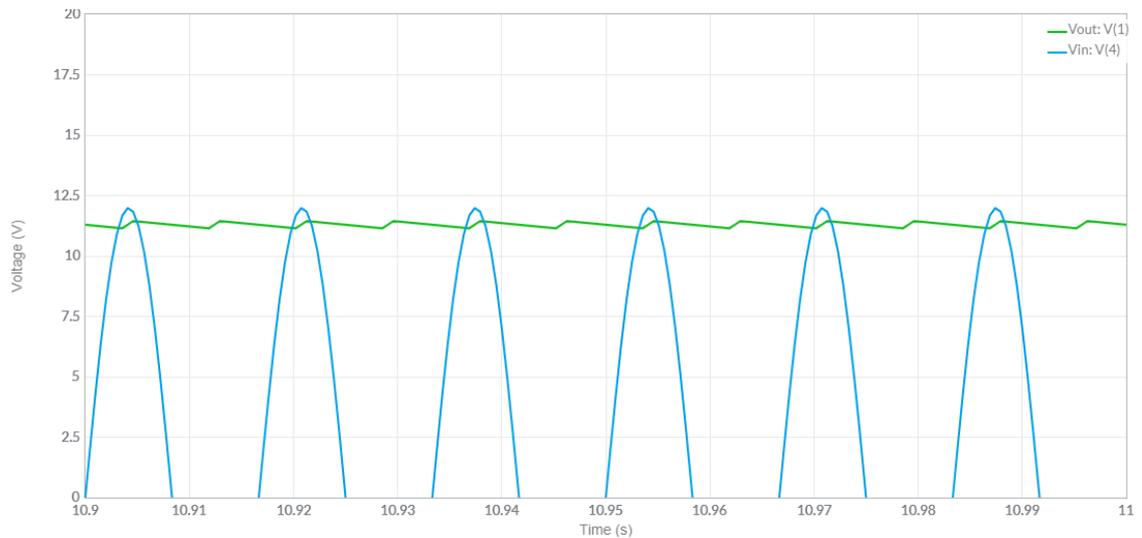
O valor de R será determinado pela potência necessária para a eletrocussão que é de 200 W, para obter esse valor foi necessário aplicar a lei de ohm na fórmula da potência, a tensão de pico como mencionado anteriormente é de 12 V, e a frequência da rede de distribuição de 60Hz, e tensão de ripple de 0,3 Volt, para que a variação não seja tão drástica, substituindo na equação 2.

$$C_{ret} = \frac{12}{0,3 * 60 * 0,72}$$

$$C_{ret} = 925,92 \text{ mF}$$

Ao simular o funcionamento do módulo de retificação obtém-se a figura 15 como resposta, onde de azul representa a tensão de entrada  $V_{in}$  após passar pelo transformador abaixador, e de verde simboliza a tensão de saída do módulo de retificação  $V_{out}$ .

Figura 15: Representação das tensões de Entrada e Saída do módulo retificador.



Fonte: Próprio Autor (2023).

A tabela 4 lista os componentes utilizados para montagem do módulo retificador, deve-se destacar que a listagem leva em consideração valores comerciais dos componentes.

Tabela 4: Componentes do módulo retificador.

Componente	Descrição	Quantidade
Transformador	Abaixador de 220 – 12 Volts (220 VA)	1
Diodo	MBR4040	4
Capacitor	925,92 mF	1

Fonte: Próprio Autor (2023).

## 5.2 MÓDULO OSCILADOR

Para o projeto será utilizado um Duty Cycle de 45%, substituindo os valores na equação tem-se.

$$0,45 = \frac{Rb}{Ra + 2Rb}$$

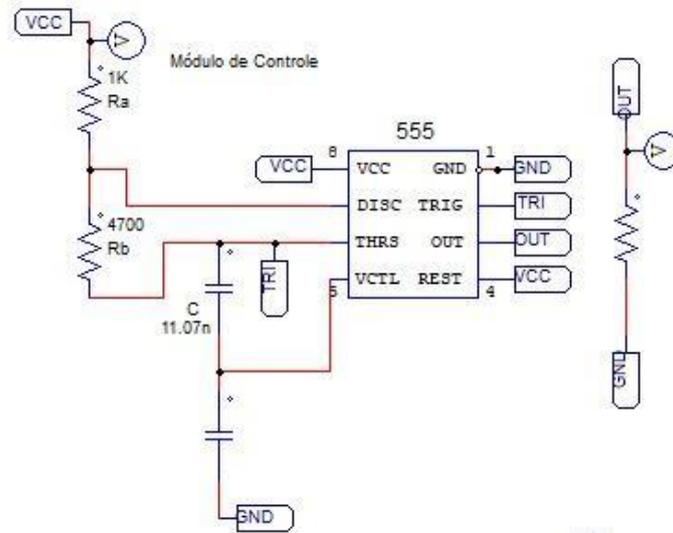
Obtém-se que os valores de Rb têm que ser iguais a 4,5 Ra, como os valores mínimos de Ra e Rb são de 1 kΩ e máximo de 100 MΩ, tem-se que para valores comerciais, Ra = 1 kΩ e Rb = 4,7 kΩ.

$$C_{osc} = \frac{1,44}{(1k + 2 * 4,7k) * 12,5k}$$

$$C_{osc} = 11,07 nF$$

Concluído o dimensionamento dos resistores  $R_a$  e  $R_b$  e do capacitor  $C$ , pode-se realizar a montagem do circuito de ligação do CI 555, como demonstrado na figura 16. Uma observação importante é que o datasheet sugere a implementação de um capacitor de  $0,01 \mu\text{F}$  a ser conectado com a fonte a fim de diminuir o ruído do pino de controle de tensão.

Figura 16: Configuração do CI 555 no modo astável para operar em uma frequência de 12,5 kHz.



Fonte: Próprio Autor (2023).

A forma de onda da saída marcada com OUT na figura acima, é a nossa saída de oscilação de 12,5 kHz, que está disponível na figura 17.

Figura 17: Saída de tensão de 12 V e 12,5 kHz.



Fonte: Próprio Autor (2023).

A tabela 5 lista os componentes utilizados para montagem do módulo Oscilação, deve-se destacar que a listagem leva em consideração valores calculados dos componentes.

Tabela 5: Componentes do módulo Oscilação.

<b>Componente</b>	<b>Descrição</b>	<b>Quantidade</b>
Oscilador	CI LM555 Texas Instruments	1
Resistores	1k $\Omega$	1
	4,7 k $\Omega$	1
Capacitores	0,01 $\mu$ F	1
	11,07 nF	1

Fonte: Próprio Autor.

### 5.3 MÓDULO DE POTÊNCIA.

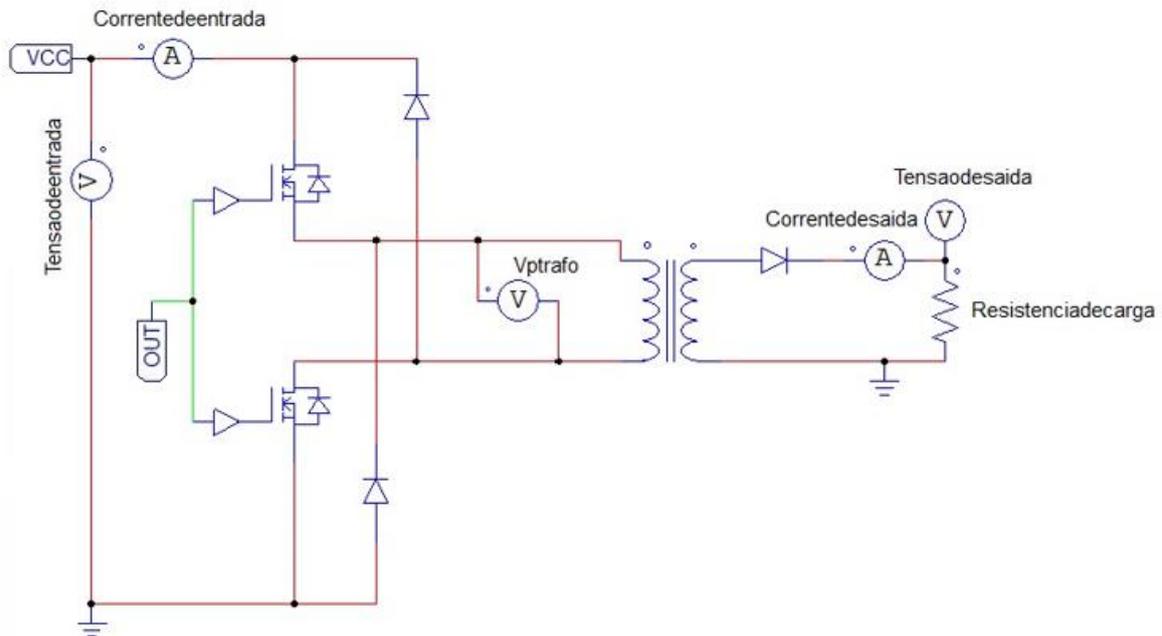
Para o módulo de potência será utilizado um transformador elevador para elevar a tensão da saída do módulo oscilador de 12 V para 3 kV, com uma corrente mínima para diminuir o risco de choque elétrico do usuário.

Esta etapa consiste em aplicar os valores que desejamos que o transformador tenha nas especificações listadas no capítulo 4.3.

O módulo de potência será alimentado pela saída do módulo oscilador para garantir que o transformador opera na frequência desejada, para isso utilizou-se o *software* PSIM para fazer a simulação, o circuito foi montado como pode ser visto na figura 18.

Adicionalmente ao transformador deve ser feito um circuito driver para garantir o correto acionamento do dispositivo para isso utilizou-se um driver conversor de motores de relutância, que consiste em um conversor de ponte assimétrica composto por 2 mosfets configurados como chave que serão acionados de acordo com a frequência do oscilador, 2 diodos que assumem um papel de regulação da corrente impedindo sua elevação e mantendo-a estável.

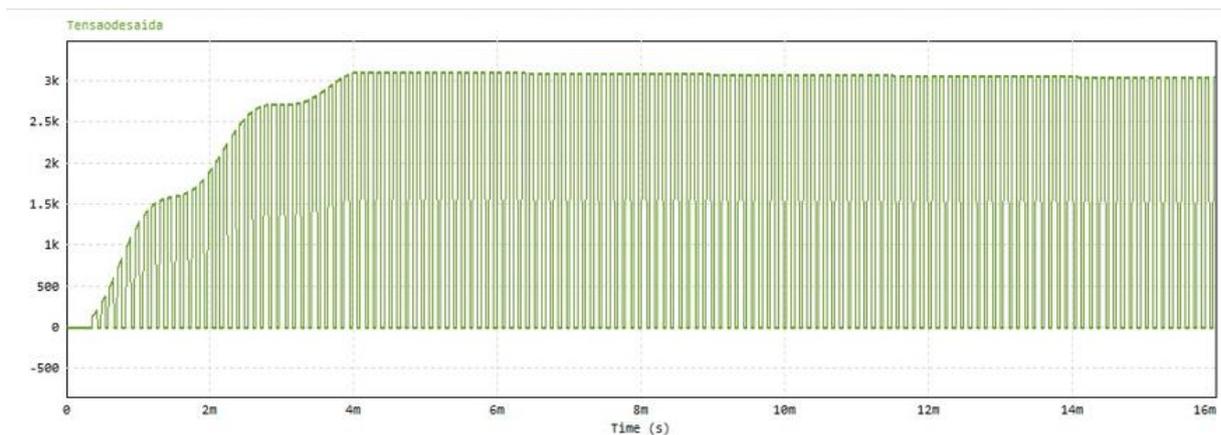
Figura 18: Montagem do circuito do módulo de potência no software PSIM.



Fonte: Próprio Autor (2023).

Um ponto a ser destacado é que para a simulação inicial utilizou-se o modelo de transformador ideal do *software* que considera apenas os valores dos números de espiras, considerou  $N_p$  com o valor de 5 e  $N_s$  igual a 1250. A figura 19 mostra os valores de saída do módulo de potência.

Figura 19: Valores de saída do módulo de potência.



Fonte: Próprio Autor (2023).

A partir do gráfico pode-se perceber que a saída do transformador realmente foi dimensionada da maneira correta pois obteve-se os resultados esperados.

## 5.4 MÓDULO DE CONTROLE

O módulo de controle está subdividido em duas partes a primeira responsável pelo acionamento do módulo de potência através de um botão switch liga e desliga, a outra parte está relacionada com a proteção do circuito utilizando sensores para detectar a corrente que flui pelo condutor de aterramento e desligando o módulo de potência quando a leitura destes valores indicar um alto valor de corrente fluindo pelo solo.

Para montagem da simulação deste módulo será usado um Arduino Uno como mostrado na figura 20, que apresenta uma grande gama de periféricos capazes de auxiliar nas leituras de tensão e corrente do sistema, além de ser uma plataforma Open Source de fácil acesso.

Figura 20: Arduino UNO R3.



Fonte: Arduino (2023).

Além do Arduino será utilizado o sensor de corrente alternada SCT-013 mostrado na figura 21, e periféricos eletrônicos como capacitores e resistores.

Figura 21: Sensor de Corrente Alternada SCT-013.



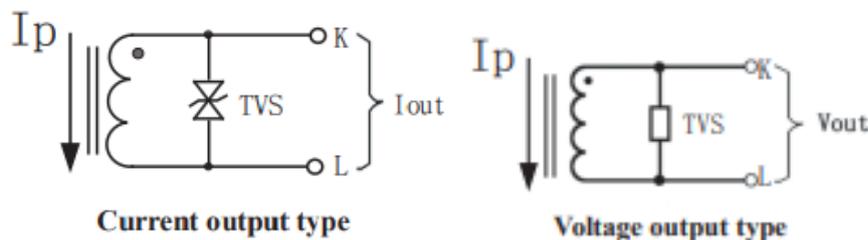
Fonte: YHDC Split core current transformer (2023).

O sensor SCT-013 realiza suas leituras por indução semelhante a um alicate amperímetro, e tem como princípio de funcionamento as leis de Ampère e Faraday, isso por que ambos os equipamentos comparados são oriundos dos Transformadores de Corrente (TC).

Os TCs são equipamentos muito difundidos em sistemas elétricos de potência para realizar as leituras de corrente do sistema. E são constituídos por um conjunto de enrolamentos que irão envolver o condutor que receberá a medição, esse estilo de medição é muito vantajoso, pois além de tornar compacto os sensores ainda possibilita um índice maior de segurança, já que não há necessidade de ligá-lo em série com o circuito.

Pode-se classificar os TCs de acordo com o seu tipo de núcleo sendo eles núcleo dividido (*Split-core*) ou Núcleo Sólido (*Solid-core*), o modelo que foi utilizado é do tipo Split-core, no datasheet do componente presente no Anexo A é demonstrado seus componentes internos como pode ser visto na figura 22.

Figura 22: Representação dos circuitos internos do sensor SCT-013.



Fonte: YHDC *Split core current transformer* (2023).

É importante destacar que o sensor apresenta dois tipos de sinais de saída dependem apenas da conversão dos valores de corrente lido pelos enrolamentos do sensor e onde o sinal de saída é na forma de tensão, a tabela 6 demonstra os diferentes modelos do sensor com seus limites de leitura de corrente do sistema bem como os limites das saídas do sensor.

Tabela 6: Valores dos modelos do sensor de corrente SCT-013.

Modelo	SCT-013-000	SCT-013-005	SCT-013-010	SCT-013-015	SCT-013-020
Corrente de Entrada	0-100 A	0-5 A	0-10 A	0- 15 A	0-20 A
Tipo de Saída	0-50 mA	0-1 V	0-1 V	0-1 V	0-1 V
Modelo	SCT-013-025	SCT-013-030	SCT-013-050	SCT-013-060	SCT-013-000V
Corrente de Entrada	0-25 A	0-30 A	0- 50 A	0-60 A	0-100 A
Tipo de Saída	0-1 V				

Fonte: Adaptado de YHDC *Split core current transformer* (2023).

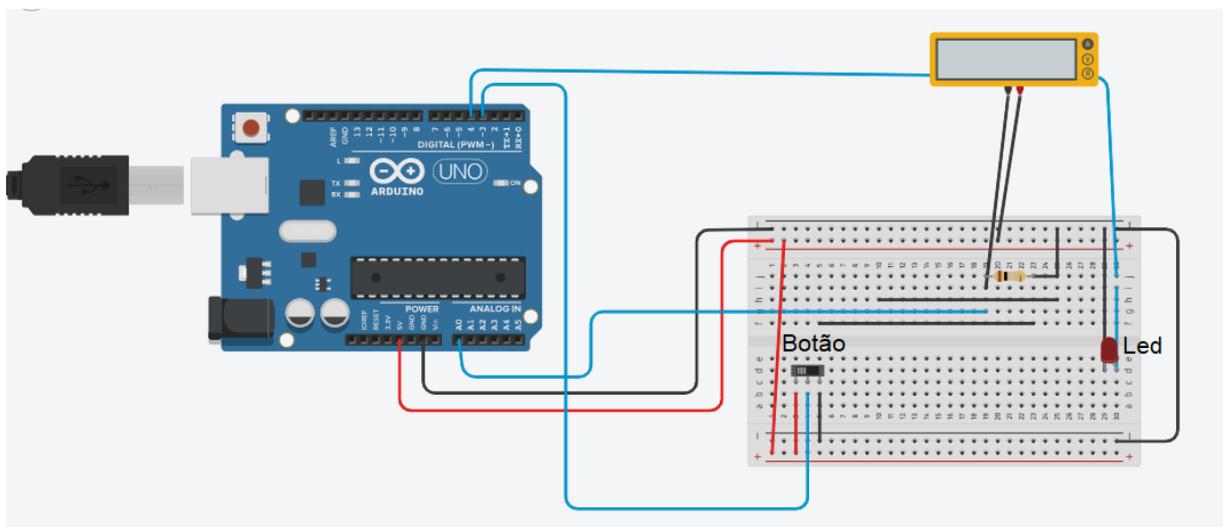
### 5.4.1 Montagem do circuito do módulo de proteção

Para a montagem do circuito foi utilizado o *software* EasyEDA para montar o esquema elétrico de ligação do sensor com o Arduino UNO apresentado na figura 24. Foi escolhido o modelo SCT-013-0005, visto que nosso sistema é projetado para uma corrente de 700mA de pico a pico, a tabela 5 mostra os valores de máximos e mínimos de entrada e saída.

Com isso é possível dimensionar os eletrônicos periféricos utilizados na montagem, como o Arduino realiza as leituras em formato de tensão não será necessário utilizar um resistor de carga.

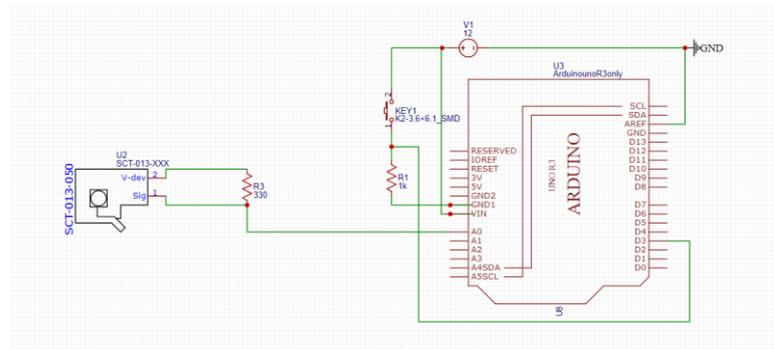
Agora pode-se montar o circuito de controle, será utilizado o *software* TinkerCAD da Autodesk para a montagem, por ser um software gratuito ele possui algumas limitações como uma biblioteca limitada de componentes, por isso em alguns casos foi utilizado algumas representações para substituir o sensor de corrente e elementos do módulo de controle. A figura 23 representa o circuito utilizado.

Figura 23: Circuito utilizado para simular o módulo de controle do sistema.



Fonte: Próprio Autor(2023).

Figura 24: Esquema elétrico de ligação do sensor no arduino.



Fonte: Próprio Autor (2023).

O led representa o módulo de potência que será comandado através de um relé, o resistor de 330  $\Omega$  representa o sensor de corrente indutivo que lê o valor da corrente que passa pelo condutor de aterramento, e o botão será o comando físico para ligar e desligar a máquina, ele é responsável pela ligação do módulo de potência.

Como o sensor SCT-013-005, realiza as leituras em valores de tensão é necessário aplicar a lei de Ohm para obter o valor da corrente. O cálculo foi implementado no código apresentado no apêndice B.

O botão serve para ligar o módulo de potência mandando um sinal para o relé que só é efetivamente ativado quando o sensor de corrente está com leituras abaixo de 1 A para garantir a segurança do operador da máquina, caso seja menor ele ativa os pulsos que como especificado no capítulo 4 tem duração de 1 s, passado esse tempo ele bloqueia o módulo de potência por 5 segundos e depois executa esse ciclo em loop até que o estado do botão sofra alguma alteração, a tabela 7 mostra as variáveis e a ativação do circuito.

O código de implementação desse sistema de controle está disponível no apêndice B, com seus devidos comentários.

Tabela 7: Condições para a ativação do módulo de potência.

Valor da Corrente	Estado Botão	0	1
<1		Desligado	Ligado
>=1		Desligado	Desligado

Fonte: Próprio Autor (2023).



A figura 26 demonstra o pleno funcionamento do sensor, o monitor serial apresenta as leituras do botão que está em nível lógico alto como apresentado na figura 26, indicando seu acionamento e o valor de corrente de 50 mA, e como pode ser identificado na imagem, o led que representa o módulo de potência agora está aceso indicando a alimentação do módulo de potência.

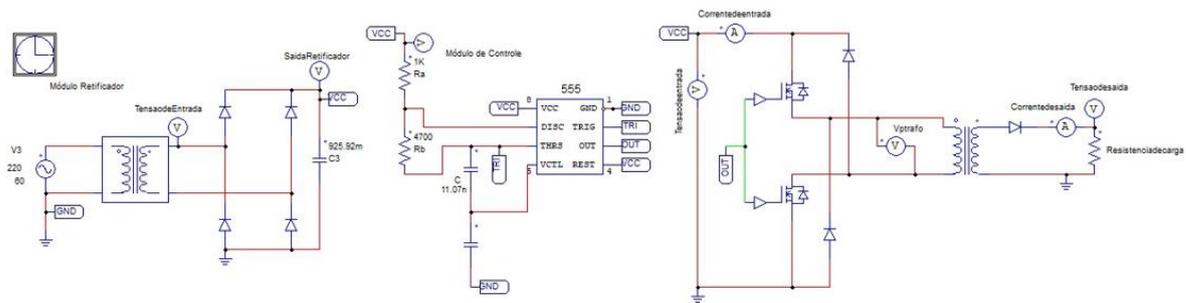
Com isso, constata-se que o módulo de controle foi implementado de maneira correta, pois impede a operação do equipamento quando a corrente que passa pelo solo está muito alta, impedindo que o circuito continue injetando uma tensão na terra, diminuindo eventuais riscos ao usuário.

## 6 SIMULAÇÃO E DISCUSSÕES

Para a simulação, foi utilizado o *software* PSIM na versão estudantil, devido à sua poderosa capacidade de simulação tanto para circuitos digitais quanto para circuitos relacionados à eletrônica de potência.

Na simulação do circuito, seguiu-se a modularização descrita no capítulo 5, a fim de gerar partes intercambiáveis no circuito para futuras melhorias. Assim, os módulos são identificados com etiquetas de identificação. A figura 27 mostra o circuito utilizado para a simulação.

Figura 27: Montagem do circuito completo de eletrocussão vegetal no software PSIM.



Fonte: Próprio Autor (2023).

Dado que o circuito é extenso e possui frequências diferentes em alguns pontos, será necessário trabalhar com dois períodos de tempo para analisá-lo.

A tensão de entrada e o módulo retificador apresentam a mesma frequência, que é igual à da rede de distribuição, com um valor de 60 Hz. Para verificar o comportamento real, optou-se por visualizar quatro períodos, o que equivale a 0,667 s.

Por outro lado, o módulo de oscilação e o módulo de potência apresentam uma frequência final de 12,5 kHz, que é a frequência utilizada no processo de eletrocussão vegetal. Com uma frequência mais elevada, será necessário visualizar uma quantidade maior de períodos para analisar seu comportamento. Portanto, será utilizado um valor de 100 períodos, equivalente a 0,008 s. A tabela 8 indica o agrupamento dos valores de frequência de cada módulo, o período e o seu período de análise.

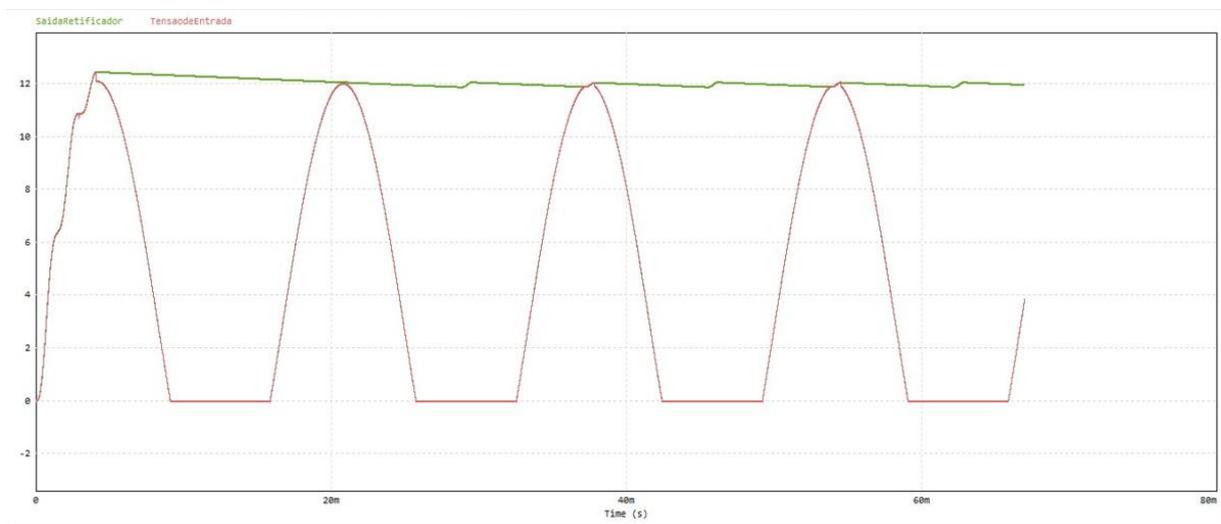
Tabela 8: Valores de frequência e período por módulo.

Divisão do circuito	Valor de frequência	Período	Período de Visualização
Tensão de Entrada	60 Hz	0,0167 s	0,667 s
Módulo Retificador	60 Hz	0,0167 s	0,667 s
Módulo Oscilador	12,5 kHz	0,00008 s	0,008 s
Módulo Potência	12,5 kHz	0,00008 s	0,008 s

Fonte: Próprio Autor (2023).

Com essa divisão a análise dos gráficos ficará mais fácil. A primeira análise que se fará é a da relação entre a tensão de saída e a saída do retificador. Como esperado nos cálculos realizados no capítulo 5.1 tem-se a figura 28.

Figura 28: Formas de onda da tensão de entrada e saída do retificador no software PSIM.



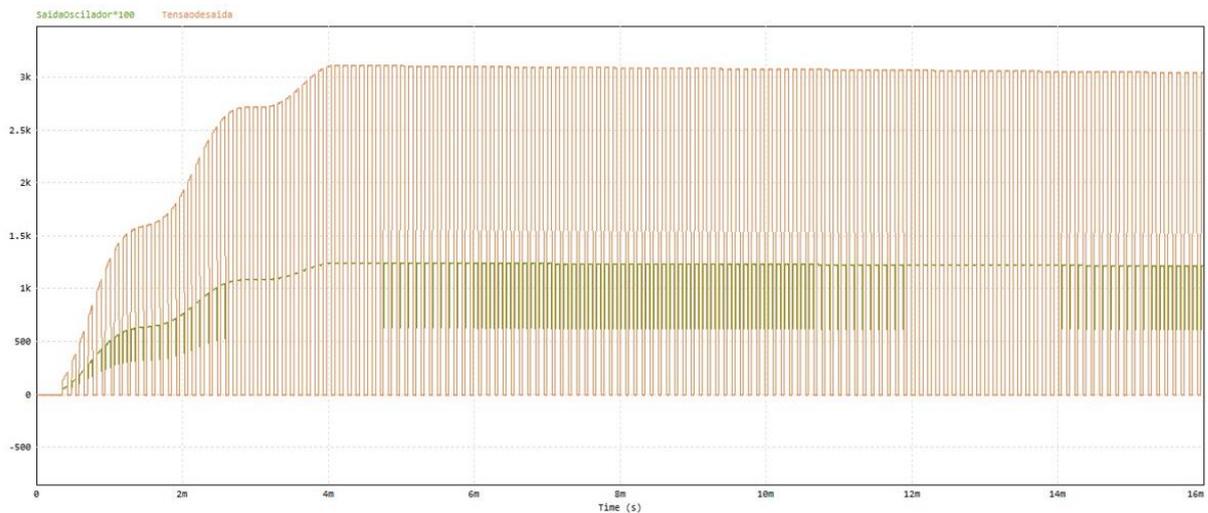
Fonte: Próprio Autor (2023).

Com base nesses resultados, pode-se concluir que o módulo retificador está funcionando de acordo com o projeto. O dimensionamento do capacitor apresentou uma variação pequena entre os sinais, mantendo-se em torno de 0,5 volts. Isso é benéfico para o módulo oscilador, pois variações muito grandes na tensão de entrada podem levar ao seu mau funcionamento ou até mesmo à queima do circuito integrado.

Na segunda análise, será feita a comparação entre as saídas do módulo oscilador e do módulo de potência, com foco no valor da tensão da carga. A carga foi dimensionada para a

simulação, levando em consideração a figura 16 (a), onde foi considerado um tempo de descarga de 1 segundo, resultando em uma resistência de aproximadamente 100 k $\Omega$ . A figura 29 apresenta a comparação entre os dois valores de saída.

Figura 29: Formas de onda da tensão de saída do módulo oscilador e saída do módulo de potência no software PSIM.



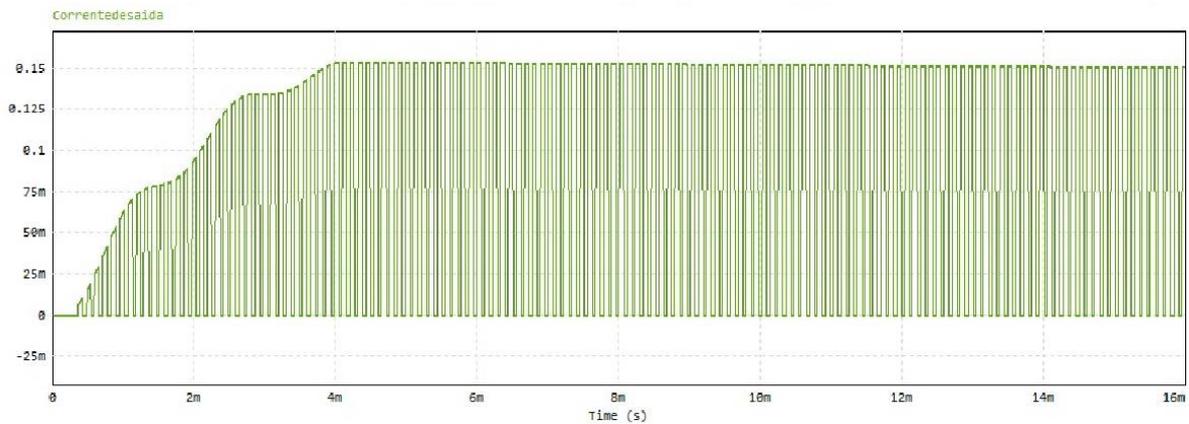
Fonte: Próprio Autor (2023).

No diagrama, a linha verde representa a tensão de saída do módulo oscilador. Para facilitar a comparação, essa tensão foi multiplicada por 100 na representação, devido à grande diferença em relação aos valores de saída do transformador.

Ao analisar os gráficos, pode-se observar que os valores de tensão do módulo de oscilação apresentam nos primeiros 3 ms, um aumento gradual. Isso ocorre devido à natureza do retificador, que inicia seu funcionamento com o início da onda senoidal da tensão de entrada. Outro aspecto importante a mencionar é que foi utilizado um modelo simplificado do transformador durante a simulação.

Devido ao uso do transformador ideal, e o baixo valor da corrente do primário do transformador, a forma de onda da corrente de saída pode ser observada na figura 30

Figura 30: Formas de onda da corrente de saída do módulo de potência no software PSIM.



Fonte: Próprio Autor (2023).

Pode-se observar na figura 29 que a tensão de saída do sistema de potência apresenta uma tensão retificada, com valor de pico de 3 kV, e está assim de acordo com o projeto inicial.

Com base nos resultados de simulação apresentados, pode-se concluir que o sistema proposto para eletrocussão de plantas por alta tensão pode ser implementado com componentes e materiais disponíveis no mercado.

## 7 CONCLUSÃO

Quando comparado aos métodos mais utilizados no mercado, a eletrocussão de plantas apresenta várias vantagens. Em comparação com a capina química, não causa danos permanentes ao solo, pois é aplicada entre as folhas e o caule da planta. Além disso, reduz os trâmites burocráticos relacionados ao uso de herbicidas em locais urbanos, o que muitas vezes prejudica a manutenção preditiva.

Em relação à capina mecânica, a eletrocussão de plantas oferece maior periodicidade em suas aplicações, o que resulta em redução dos custos de mão de obra e remoção de materiais. Isso facilita as atividades de manutenção preditiva em subestações.

Portanto, a utilização da eletrocussão como método sustentável de eliminação de plantas tem grandes chances de crescer no mercado de eliminação de ervas daninhas. As simulações e a aplicação em um protótipo mostraram que sua implementação pode ser considerada relativamente fácil. Além disso, os benefícios mencionados anteriormente, como menor impacto ambiental, redução de trâmites burocráticos e maior periodicidade de aplicação em comparação com métodos como a capina química e a capina mecânica, tornam a eletrocussão uma opção atraente.

Como sugestão para trabalhos futuros, além do desenvolvimento de um protótipo funcional e testes de campo para analisar a viabilidade de construção, deve se considerar uma mudança no módulo retificador.

Para o módulo de retificação uma alternativa seria utilizar o retificador próprio das subestações usado normalmente para alimentar os serviços auxiliares da subestação.

## REFERÊNCIAS

- ABDELGHAFOR, Florent et al. WeedElec: a robotic research platform for individual weed detection and selective electrical weeding. In: Precision agriculture'21. Wageningen Academic Publishers, 2021. p. 1184-1190.
- CARLINI, Alex Joaquim; PEDROSO, Caique Di Carli Souza. Desenvolvimento de protótipo para processo de capina ecológico. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
- CHAPMAN, Stephen J. Fundamentos de máquinas elétricas. [Digite o Local da Editora]: Grupo A, 2013. E-book. ISBN 9788580552072. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788580552072/>. Acesso em: 14 jun. 2023.
- DE OLIVEIRA, M. F.; COUTINHO FILHO, S. de A. Eletrocussão de plantas: capina elétrica. 2018.
- FISHER, H.H. Conceito de erva daninha. In: RODRIGUES, J. J do V.; WILLIAM, R.D. coord. Controle de ervas daninhas. Viçosa:UFV,1973a, p.5-10.
- GARCIA, Gilvan A.; ALMEIDA, José Luiz Antunes de. Sistemas Eletroeletrônicos - Dispositivos e Aplicações. [Digite o Local da Editora]: Editora Saraiva, 2014. E-book. ISBN 9788536520339. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788536520339/>. Acesso em: 15 mai. 2023.
- KRISHNAN, Ramu. Switched reluctance motor drives: modeling, simulation, analysis, design, and applications. CRC press, 2017.
- LYSAKOV, A. A. et al. Development of a Weeding Robot with Tubular Linear Electric Motors. In: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, 2021. p. 012063.
- MIZUNO, A. et al. A portable weed control device using high frequency AC voltage. In: Conference Record of the 1993 IEEE Industry Applications Conference Twenty-Eighth IAS Annual Meeting. IEEE, 1993. p. 2000-2003.

MIZUNO, Akira; TENMA, Takamasa; YAMANO, Nobuaki. Destruction of weeds by pulsed high voltage discharges. In: Conference Record of the 1990 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting. IEEE, 1990. p. 720-727.

P. C. Sen. Principles of Electric Machines and Power Electronics. John Wiley & Sons, Inc. 2nd. 1997.

RIBEIRO, Dayane Santos; DA SILVA PEREIRA, Tatiana. O agrotóxico nosso de cada dia. VITTALLE-Revista de Ciências da Saúde, v. 28, p. 14-26, 2016.

SEDRA, Adel S.; SMITH, Kenneth C.; Tony Chan Carusone; et al. Circuitos Microeletrônicos. [Digite o Local da Editora]: Grupo GEN, 2023. E-book. ISBN 9788521638391. Disponível em:

<https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521638391/>. Acesso em: 15 mai. 2023.

SILVA, Rogério Diogne de Souza. Contextualização do setor elétrico brasileiro e o planejamento da infraestrutura no longo prazo. 2020.

UMANS, Stephen D. Máquinas elétricas de Fitzgerald e Kingsley. [Digite o Local da Editora]: Grupo A, 2014. E-book. ISBN 9788580553741. Disponível em:

<https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788580553741/>. Acesso em: 15 mai. 2023.

## ANEXO A – DATASHEET SENSOR SCT -013

### Split core current transformer



**Model: SCT-013****Rated input current: 5A/100A**

**Characteristics:** Opening size: 13mm\*13mm,  
 Non-linearity±3% (10%—120% of rated input current)  
 1m leading wire, standard Φ3.5 three core plug output.  
 Current output type and voltage output type (voltage output type built-in sampling resistor)

**Purpose:** Used for current measurement, monitor and protection for AC motor, lighting equipment, air compressor etc

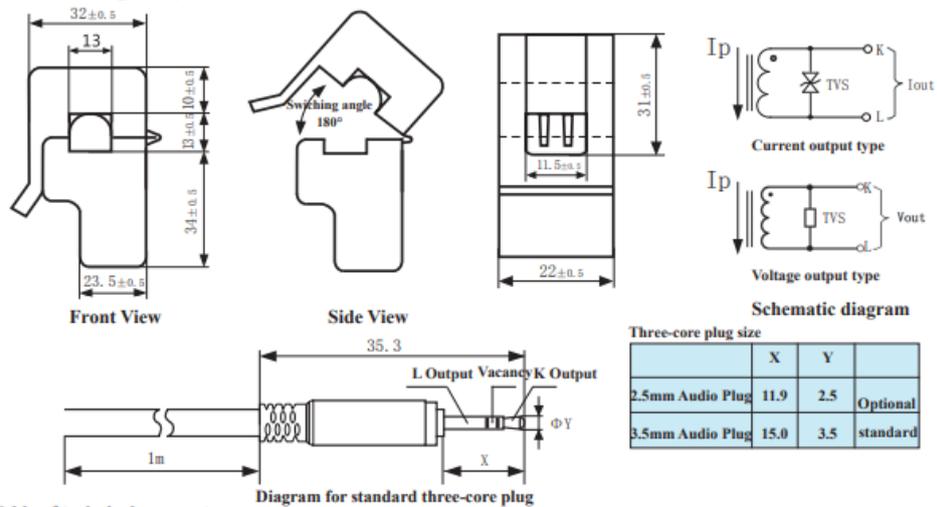
**Core material:** ferrite

**Mechanical strength:** the number of switching is not less than 1000 times(test at 25°C)

**Safety index:** Dielectric strength(between shell and output)1000V AC/1min  
 Fire resistance property: In accordance with UL94-Vo  
 Work temperature: -25°C~+70°C



**Outline size diagram: (in mm)**



**Three-core plug size**

	X	Y	
2.5mm Audio Plug	11.9	2.5	Optional
3.5mm Audio Plug	15.0	3.5	standard

**Table of technical parameter:**

<b>Model</b>	SCT-013-000	SCT-013-005	SCT-013-010	SCT-013-015	SCT-013-020
<b>Input current</b>	0-100A	0-5A	0-10A	0-15A	0-20A
<b>Output type</b>	0-50mA	0-1V	0-1V	0-1V	0-1V
<b>Model</b>	SCT-013-025	SCT-013-030	SCT-013-050	SCT-013-060	SCT-013-000V
<b>Input current</b>	0-25A	0-30A	0-50A	0-60A	0-100A
<b>Output type</b>	0-1V	0-1V	0-1V	0-1V	0-1V

※ Output type: voltage output type built-in sampling resistor, current output type built-in protective diode.

## APÊNDICE A – ALGORITMO PARA DIMENSIONAMENTO E PARÂMETRIZAÇÃO DO TRANSFORMADOR DO MÓDULO DE POTÊNCIA.

### PLANILHA DE TRANSFORMADOR

#### Constantes:

$$\mu_0 := 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \quad (\text{permeabilidade do espaço livre - SI})$$

$$\text{Temp} := 75 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (\text{temperatura para calculo da resistividade do cobre})$$

$$\rho := 1.724 \cdot (1 + 0.0042 \cdot (\text{Temp} - 20)) \cdot 10^{-8} \quad \rho = 2.122 \cdot 10^{-8} \quad [\Omega \cdot \text{m}] \quad (\text{resistividade do cobre})$$

#### Especificações do Projeto

$$P_o := 200 \quad V_{in} := 12 \quad [\text{V}]$$

$$V_{out} := 3000$$

$$f_s := 12500$$

#### Considerações de Projeto

$$D_{max} := 0.50 \quad \eta := 0.95$$

#### Cálculos Iniciais

$$P_{in} := \frac{P_o}{\eta} \quad P_{in} = 210.526 \quad (\text{potência de entrada}) \quad [\text{W}]$$

$$I_{Pef} := \frac{P_{in}}{V_{in} \cdot \sqrt{D_{max}}} \quad I_{Pef} = 24.811 \quad (\text{corrente de pico de entrada}) \quad [\text{A}]$$

$$I_{Sef} := I_{Pef} \cdot \frac{V_{in}}{V_{out}} \quad I_{Sef} = 0.099 \quad (\text{corrente eficaz de entrada}) \quad [\text{A}]$$

#### Especificação do Núcleo

$$\text{Critérios: } J := 450 \cdot 10^4 \quad (\text{densidade de corrente } [\text{A}/\text{m}^2])$$

$$B_{max} := 0.20 \quad (\text{densidade de fluxo } [\text{Tesla}])$$

#### (EE42/21/20)

$$A_w := 10 \cdot 30 \cdot 10^{-6} \quad [\text{m}^2] \quad (\text{produto das dimensoes 1 lado da janela})$$

$$A_e := 12 \cdot 19 \cdot 10^{-6} \quad [\text{m}^2] \quad (\text{Area efetiva do núcleo})$$

$$A_e \cdot A_w = 6.84 \cdot 10^{-8} \quad [\text{m}^4]$$

#### Número de Espiras do Primário

$$N_p := \frac{D_{max} \cdot V_{in}}{2 \cdot f_s \cdot A_e \cdot B_{max}} \quad N_p = 5.263 \quad N_p := \text{floor}(N_p) \quad N_p = 5$$

#### Número de Espiras do Secundário

$$N_s := N_p \cdot \frac{V_{out}}{V_{in}} \quad N_s = 1.25 \cdot 10^3 \quad N_s := \text{floor}(N_s) \quad N_s = 1.25 \cdot 10^3$$

### Dimensionamento da Seção dos Condutores

$$\text{AreaCuP} := \frac{I_{\text{Pef}}}{J} \quad \text{AreaCuP} = 5.514 \cdot 10^{-6} \quad [\text{m}^2] \quad (\text{seção cond. primário})$$

$$\text{RCuP} := \sqrt{\frac{\text{AreaCuP}}{\pi}} \quad \text{RCuP} = 1.325 \cdot 10^{-3} \quad [\text{m}] \quad (\text{raio do condutor do primário})$$

$$\text{RCuP} := \text{RCuP} \cdot 10^2 \quad \text{RCuP} = 0.132 \quad [\text{cm}] \quad (\text{raio do condutor do primário em mm})$$

$$\text{AWG} := \text{for } r \text{ e } 1..50$$

$$r \text{ if } 2 \cdot \text{RCuP} \leq \frac{2.54}{\pi} \cdot 10^{\frac{-r}{20}} \quad \text{AWG} = 9 \quad (\text{condutor do primário em AWG})$$

$$\text{Afp\_ori} := \left[ 100 \cdot \pi \cdot \left( \frac{2.54}{2 \cdot \pi} \cdot 10^{\frac{-\text{AWG}}{20}} \right)^2 \right] \quad \text{Afp\_ori} = 6.463 \quad [\text{mm}^2] \quad (\text{area condutor do primário em mm}^2)$$

$$\text{AreaCuS} := \frac{I_{\text{Sef}}}{J} \quad \text{AreaCuS} = 2.205 \cdot 10^{-8} \quad [\text{m}^2] \quad (\text{seção cond. secundário})$$

$$\text{RCuS} := \sqrt{\frac{\text{AreaCuS}}{\pi}} \quad \text{RCuS} = 8.379 \cdot 10^{-5} \quad [\text{m}] \quad (\text{raio do condutor do secundário})$$

$$\text{RCuS} := \text{RCuS} \cdot 10^2 \quad \text{RCuS} = 8.379 \cdot 10^{-3} \quad [\text{cm}] \quad (\text{raio do condutor do secundário em mm})$$

$$\text{AWG} := \text{for } r \text{ e } 1..50$$

$$r \text{ if } 2 \cdot \text{RCuS} \leq \frac{2.54}{\pi} \cdot 10^{\frac{-r}{20}} \quad \text{AWG} = 33 \quad (\text{condutor do secundário em AWG})$$

$$\text{Afs\_ori} := \left[ 100 \cdot \pi \cdot \left( \frac{2.54}{2 \cdot \pi} \cdot 10^{\frac{-\text{AWG}}{20}} \right)^2 \right] \quad \text{Afs\_ori} = 0.026 \quad [\text{mm}^2] \quad (\text{area condutor do secundário em mm}^2)$$

### Profundidade de penetração

$$p := \frac{7.5}{\sqrt{f}} \quad p = 0.067 \quad [\text{cm}]$$

$$\text{AWG} := \text{for } r \text{ e } 1..50$$

$$r \text{ if } 2 \cdot p \leq \frac{2.54}{\pi} \cdot 10^{\frac{-r}{20}} \quad \text{AWG} = 15 \quad (\text{fio de maior bitola que pode ser usado})$$

**Dimensionamento do Enrolamento Primário (No. fios em paralelo)**

AWG := 18 (bitola que irá ser utilizada na prática)

$$A_{fl} := \left[ 100 \cdot \pi \cdot \left( \frac{2.54}{2 \cdot \pi} \cdot 10^{\frac{-AWG}{20}} \right)^2 \right] \quad A_{fl} = 0.814 \quad [\text{mm}^2] \quad (\text{Area em mm}^2 \text{ de cada fio})$$

$$A_{fl} := A_{fl} \cdot 10^{-6} \quad A_{fl} = 8.137 \cdot 10^{-7} \quad [\text{m}^2] \quad (\text{Area em m}^2 \text{ de cada fio})$$

$$N_{cp} := \frac{\text{AreaCuP}}{A_{fl}} \quad N_{cp} = 6.776 \quad N_{cp} := \text{ceil}(N_{cp}) \quad N_{cp} = 7 \quad (\text{Numero de fios em paralelo})$$

$$A_{fp\_skin} := A_{fl} \cdot N_{cp} \quad A_{fp\_skin} = 5.696 \cdot 10^{-6} \quad [\text{m}^2] \quad (\text{Area total do conjunto de fios em paralelo})$$

**Dimensionamento do Enrolamento Secundário (No. fios em paralelo)**

AWG := 34 (bitola que irá ser utilizada na prática)

$$A_{f2} := \left[ 100 \cdot \pi \cdot \left( \frac{2.54}{2 \cdot \pi} \cdot 10^{\frac{-AWG}{20}} \right)^2 \right] \quad A_{f2} = 0.02 \quad [\text{mm}^2] \quad (\text{Area em mm}^2 \text{ de cada fio})$$

$$A_{f2} := A_{f2} \cdot 10^{-6} \quad A_{f2} = 2.044 \cdot 10^{-8} \quad [\text{m}^2] \quad (\text{Area em m}^2 \text{ de cada fio})$$

$$N_{cs} := \frac{\text{AreaCuS}}{A_{f2}} \quad N_{cs} = 1.079 \quad N_{cs} := \text{floor}(N_{cs}) \quad N_{cs} = 1 \quad (\text{Numero de fios em paralelo})$$

$$A_{fs\_skin} := A_{f2} \cdot N_{cs} \quad A_{fs\_skin} = 2.044 \cdot 10^{-8} \quad [\text{m}^2] \quad (\text{Area total do conjunto de fios em paralelo})$$

**Análise da Possibilidade de Execução (confirmação do projeto realizado):**

$$A_{fs\_skin} = 2.044 \cdot 10^{-8} \quad N_s = 1.25 \cdot 10^3$$

$$A_{fo} := N_p \cdot A_{fp\_skin} + A_{fs\_skin} \cdot N_s \quad A_{fo} = 5.403 \cdot 10^{-5} \quad [\text{m}^2] \quad \text{Area de cobre dos enrolamentos}$$

$$\frac{A_w}{A_{fo}} = 5.553 \quad (\text{Transformador: Possibilidade de execução ==> deve ser maior que 4})$$

## APÊNDICE B – ALGORITMO PARA ACIONAMENTO DO MÓDULO DE CONTROLE DO PROJETO.

Neste apêndice será apresentado o código usado para a simulação do módulo de controle, ele foi desenvolvido utilizando a IDE do próprio Arduino usando a linguagem C++.

```

1 // C++ code
2 //
3 // definindo as variaveis globais do sistema
4 int let = A0;
5 int botao;
6 int resistencia = 100;
7 // o valor da resistencia usado foi apenas para variar
8 //os valores de corrente do sistema
9 float tensao;
10 float corrente;
11 unsigned long millisTarefa1 = millis();
12 unsigned long millisTarefa2 = millis();|
13
14
15 void setup()
16 {
17   Serial.begin(9600);
18   pinMode(4, OUTPUT);
19   pinMode(3, INPUT);
20
21 }
22
23 void loop(){
24 //descobrimo o valor de corrente pela lei do Ohm
25   int leitura=analogRead(let);
26   tensao = (5*leitura)/1023;
27   corrente = tensao/resistencia;
28
29 //Implementação da lógica de ligar e desligar o relé através do botão
30   botao=digitalRead(3);
31   if(botao==1){
32     pulso();}
33   else{
34     digitalWrite(4,LOW)}
35
36 // mostrando o valor de corrente para o usuário pela porta serial
37   if (corrente<1){
38     float mcorrente= corrente*1000;
39     Serial.print("Corrente = ");
40     Serial.print(mcorrente);
41     Serial.println("mA");
42     delay (300);
43   }else{
44     Serial.print("Corrente = ");
45     Serial.print(corrente);
46     Serial.println("A");
47     delay (300);}
48   Serial.print("estado botao = ");
49   Serial.println(botao);
50 }

```

```
51 //função que ativa o relé
52 void controle(){
53     if(corrente>1){
54         digitalWrite(4,LOW);
55     }else{
56         digitalWrite(4, HIGH);
57     }
58 }
59 // parametrização do tempo de descarga definido pelos parâmetros da tabela 1
60 void pulso(){
61     if((millis() - millisTarefa2) < 1000){
62         controle();
63     }else{
64         digitalWrite(4, LOW);
65     }
66     if((millis() - millisTarefa2) > 5000){
67         millisTarefa2 = millis();
68     }
69 }
```

---