



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas
Colegiado do Curso de Engenharia Elétrica



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E APLICADAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**DESENVOLVIMENTO DE UM GERADOR DE IMPULSO DE ALTA
TENSÃO EM ESCALA REDUZIDA PARA A INVESTIGAÇÃO DE
DESCARGAS ATMOSFÉRICAS**

MARCOS VINÍCIUS DOS SANTOS

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO
JOÃO MONLEVADE
MARÇO, 2017

Marcos Vinícius dos Santos

**DESENVOLVIMENTO DE UM GERADOR DE IMPULSO DE ALTA
TENSÃO EM ESCALA REDUZIDA PARA A INVESTIGAÇÃO DE
DESCARGAS ATMOSFÉRICAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção de Grau em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Felipe Eduardo Moreira Cota

João Monlevade

2017



ATA DE DEFESA

Aos 31 dias do mês de Março de 2017, às 20 horas, no bloco B deste instituto, foi realizada a defesa de monografia pelo formando Marcos Vinícius dos Santos, sendo a comissão examinadora constituída pelos professores: Felipe Eduardo Moreira Cota, Francisco Ricardo Abrantes Couy Baracho e Renan Fernandes Bastos.

O candidato apresentou a monografia intitulada: Desenvolvimento de um gerador de impulso de alta tensão em escala reduzida para a investigação de descargas atmosféricas. A comissão examinadora deliberou, por unanimidade, pela aprovação do candidato, com a nota média 9,0, de acordo com a tabela 1. Na forma regulamentar foi lavrada a presente ata que é assinada pelos membros da comissão examinadora e pelo formando.

Tabela 1 – Notas de avaliação da banca examinadora

Banca Examinadora	Nota
Felipe Eduardo Moreira Cota	9,0
Francisco Ricardo Abrantes Couy Baracho	9,0
Renan Fernandes Bastos	9,0
Média	9,0

João Monlevade, 31 de Março de 2017.

Felipe Eduardo Moreira Cota

Marcos Vinícius dos Santos

Francisco Ricardo Abrantes Couy Baracho

Renan Fernandes Bastos

S237d

Santos, Marcos Vinícius dos.

Desenvolvimento de um gerador de impulso de alta tensão em escala reduzida para a investigação de descargas atmosféricas [manuscrito] / Marcos Vinícius dos Santos. - 2017.

58f.: il.: color; tabs.

Orientador: Prof. Me. Felipe Eduardo Moreira Cota.

Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas. Departamento de Engenharia Elétrica.

1. Engenharia Elétrica. 2. Máquinas elétricas. 3. Geradores. I. Cota, Felipe Eduardo Moreira. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU: 621.313.52

Catálogo: ficha@sisbin.ufop.br



TERMO DE RESPONSABILIDADE

O texto do trabalho de conclusão de curso intitulado “Desenvolvimento de um Gerador de Impulso de Alta Tensão em Escala Reduzida para a Investigação de Descargas Atmosféricas” é de minha inteira responsabilidade. Declaro que não há utilização indevida de texto, material fotográfico ou qualquer outro material pertencente a terceiros sem a devida citação ou consentimento dos referidos autores.

João Monlevade, 14 de Abril de 2017.

Marcos Vinícius dos Santos

Marcos Vinícius dos Santos

DEDICATÓRIA

Este trabalho eu dedico primeiramente a Deus, que sem sua benção e proteção eu não poderia estar apto e capaz de realizá-lo. Dedico também a minha querida e amada Mãe, Geni Mendes, que sem o seu amor, companheirismo, dedicação e educação, eu não estaria onde estou hoje.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao amigo, professor e orientador Felipe Cota pela sugestão, incentivo na pesquisa e execução deste trabalho, bem como sua contribuição técnica.

Aos amigos Fernando Martins e Henrique Santos pelo companheirismo, que durante todo o curso estiveram comigo na realização de trabalhos, estudos para prova, diálogos e principalmente no incentivo para a execução deste trabalho.

Ao técnico de laboratório da Universidade Federal de Ouro Preto, Paulo César, pelas vezes que me permitiu realizar testes no gerador de alta tensão no laboratório da universidade.

Ao professor Listz Simões e ao aluno Jhonatan Machado, ambos do CEFET-MG – Unidade Curvelo, pela parceria na execução deste trabalho.

A todos os professores da universidade que contribuíram com os ensinamentos durante a minha graduação.

A todos os meus amigos que contribuíram direta ou indiretamente nesta minha longa trajetória dentro da universidade.

A Amanda pelo incentivo, companheirismo, apoio e dedicação.

A toda minha família, pelo amor e carinho recebido, que faz com que eu sempre tenha forças para seguir em frente.

A minha mãe Geni, por me apoiar e permitir a dedicação exclusiva aos estudos.

Finalmente agradeço a Deus por me conceder saúde e inteligência suficiente para estar onde estou hoje.

“A menos que modifiquemos a nossa maneira de pensar, não seremos capazes de resolver os problemas causados pela forma como nos acostumamos a ver o mundo”.

(Albert Einstein)

RESUMO

Os impactos gerados nos sistemas de transmissão e distribuição de energia quando submetidos às descargas atmosféricas diretas e indiretas são alguns dos principais desafios enfrentados por pesquisadores da área. Tais desafios direcionam investigações baseadas em ensaios laboratoriais e simulações que têm como objetivo a melhoria do desempenho de todo o sistema buscando aumentar a confiabilidade de operação diante da submissão da rede elétrica ao fenômeno de descargas. Dentre os efeitos negativos causados na situação evidenciada acima, pode-se citar o desligamento das linhas e queimas de equipamentos elétricos e eletrônicos conectados ao sistema.

Para a realização de estudos sobre o referido tema, é comum a utilização de ondas impulsivas de tensão normalizadas, obtidas através de geradores de impulso capazes de reproduzir uma onda com características semelhantes aos surtos reais.

O presente trabalho apresenta uma proposta inicial de um gerador de impulso de alta tensão bem como uma implementação física do mesmo. Esse gerador é utilizado para carregar um capacitor de carga que será descarregado em um circuito composto por resistores e capacitores de descarga ao ocorrer a disrupção de um *GAP* presente no modelo. O estudo e análise simulada da proposta de um circuito gerador é apresentado. Como conclusões, pode-se destacar que a construção do gerador apresentou bons resultados, perfeito funcionamento e poderá ser utilizado na Universidade Federal de Ouro Preto para outros tipos de trabalhos e em teste laboratoriais.

Palavras-chave: Gerador de Alta Tensão, Impulso Atmosférico, Impulso de Alta Tensão, Linhas de Transmissão e Distribuição, Sobretensão.

ABSTRACT

The impact caused on the transmission and distribution systems when subjected to direct and indirect lightning are some of the main challenges faced by researchers. Such challenges direct investigations based on laboratory tests and simulations that aim to improve the performance of the entire system seeking to increase the reliability of operation before the submission of the grid to discharge phenomenon. Among the negative effects on the situation highlighted above, you can mention the shutdown of lines and burnings of electrical and electronic equipment connected to the system.

For the studies on that topic, it is common to use impulsive waves of standardized voltage obtained by pulse generators capable of outputting a wave with characteristics similar to real outbreaks.

This paper presents an initial proposal for a high-voltage pulse generator as well as a physical implementation. This generator is used to charge a load capacitor that is discharged in a circuit composed of resistors and capacitors discharge to occur by disrupting a gap in this model. The study and simulation analysis of the proposal of a generator circuit is shown. As conclusions can be noted that the construction of the generator had good results, perfect operation and can be used in the Universidade Federal de Ouro Preto for other types of work and laboratory testing.

Keywords: High Voltage Generator, Pulse Atmospheric, Impulse High Voltage, Transmission and Distribution Lines, Overvoltage.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esquemático do Percurso de uma Descarga Atmosférica.....	8
Figura 2: Corrente de Descarga Mensurada na Estação do Morro do Cachimbo	8
Figura 3: Representação de uma Descarga Positiva.....	9
Figura 4: Registro de Corrente de uma Descarga Bipolar.....	10
Figura 5: Forma de Onda e Tempos Padrões para um Impulso Atmosférico	12
Figura 6: Impulso de Tensão Representado Graficamente	14
Figura 7: Circuito Gerador de Tensão de Impulso de Estágio Simples.	16
Figura 8: Esquemático Básico de um Conversor <i>flyback</i>	21
Figura 9: Esquemático do <i>driver</i> ZVS para Acionamento do <i>flyback</i>	22
Figura 10: <i>Flyback</i> Internamente	23
Figura 11: Gerador de Alta Tensão.	27
Figura 12: Gerador de Alta Tensão Operando sem Capacitor Interno	27
Figura 13: Valor de Capacitância Interna do <i>flyback</i>	28
Figura 14: Simulação do Circuito Gerador de Impulso	30
Figura 15: Simulação do Circuito Gerador de Impulso com Resistências Variadas	35
Figura 16: Simulação do Circuito Gerador de Impulso com Resistências Variadas e Foco no Tempo de Frente	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Valores para o Capacitor C_2	31
Tabela 2: Valores de Rendimento, Tempo de Frente e de Meio Valor Simulados com C_2 Fixo.....	33
Tabela 3: Valores de Rendimento, Tempo de Frente e de Meio Valor Simulados com C_2 Variável	34

LISTA DE SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

GAP – Lacuna

H.V – High Voltage

IEC – International Electrotechnical Commission

MATLAB – Matrix Laboratory

ZVS – Zero Voltage Switching

LISTA DE SÍMBOLOS

μs – Microsegundos

% - Por cento

kA – Kilo amperes

μs – Microsegundos

kV – Quilovolts

kV/cm – Quilovolts por centímetro

t_f – Tempo de Frente

t_c – Tempo de Meio Valor

$^{\circ}\text{C}$ – Graus Celsius

0_1 – Zero virtual

T_1 – Constante de tempo 1

T_2 – Constante de tempo 2

α – Letra grega alfa

C_1 – Capacitor 1

C_2 – Capacitor 2

R_1 – Resistor 1

R_2 – Resistor 2

V_0 – Tensão de entrada

N_p – Número de espiras do primário

N_s – Número de espiras do secundário

kHz – Kilo hertz

V_p – Tensão de pico

nF – Nano Faraday

pF – Pico Faraday

Ω - ômega (ohms)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Considerações Preliminares.....	1
1.2 Relevância e Motivação.....	2
1.3 Objetivo	2
1.4 Metodologia de Trabalho.....	3
1.5 Organização do Trabalho.....	3
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
3 IMPULSO DE TENSÃO	7
3.1 Descargas Atmosféricas	7
3.1.1 Principais Efeitos das Descargas Atmosféricas.....	10
3.1.2 Descargas Elétricas em Meios Gasosos	11
3.2 O Poder das Pontas	11
3.3 Padronização.....	12
3.3.1 Impulso Atmosférico	12
3.3.2 Impulso de Manobra.....	13
3.4 Principais Características do Impulso de Tensão	14
4 CIRCUITOS GERADORES DE IMPULSO DE TENSÃO	16
4.1 Modelagem do Gerador de Estágio Simples	17
4.2 Gerador de Alta Tensão.....	18
4.2.1 Fonte de Alta Tensão Contínua	19
4.2.2 Transformador de Alta Tensão	19
5 CONTRUÇÃO DO GERADOR E DIMENSIONAMENTO DOS COMPONENTES.....	24
5.1 Dimensionamento dos Componentes Necessários para Composição do Gerador	24
6 PARTE EXPERIMENTAL E SIMULADA	26
6.1 Gerador de Alta Tensão.....	26
6.2 Capacitância Interna do Gerador	28

6.3 Investigação Simulada do Circuito Gerador de Impulso Normalizado.....	29
6.3.1 Análise dos Resultados da Simulação	36
6.4 Dificuldades Encontradas na Construção da Proposta	37
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS	39
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	41

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Preliminares

O sistema de energia elétrica é composto por equipamentos e instalações que operam em conjunto para garantir a produção, transmissão e distribuição de energia elétrica, devendo ser capaz de fornecer ao consumidor final a quantidade de energia desejada seguindo alguns critérios de qualidade, como a confiabilidade e valores de tensão e frequência dentro de faixas padronizadas.

Entretanto, este sistema está sujeito a falhas que podem ter como origem sobretensões que podem atingir valores de alguns quilovolts causados por manobras ou por descargas atmosféricas, principalmente nas linhas de distribuição e transmissão. As descargas atmosféricas podem causar, por exemplo, o desligamento da linha, que irá interromper o fornecimento de energia, queima de transformadores e quebra do isolamento, ocasionando um curto circuito. Além disso, os equipamentos eletroeletrônicos dos consumidores finais também podem sofrer com esse fenômeno.

Para minimizar os efeitos causados pelas descargas atmosféricas são utilizados sistemas de aterramento, onde este é constantemente estudado de forma a ser aprimorado para uma melhor proteção.

Logo, se faz necessário constantes avaliações do desempenho das linhas de transmissão e distribuição de energia, transformadores, isoladores e sistemas de aterramentos diante de um surto de tensão causado por uma descarga atmosférica, seja ele direto ou indireto.

Para um estudo adequado é necessário conhecer tanto a origem como as características destes surtos para que o mesmo possa ser reproduzido de forma mais real e mais precisa possível.

De forma a se realizar ensaios e simulações próximos ao real, as características da fonte desses surtos foram normalizadas por organizações internacionais com o objetivo de tornar os resultados reprodutíveis e comparáveis independente do laboratório ou campo de teste, desde que sejam obtidos na mesma situação e condições experimentais.

O impulso atmosférico normalizado é representado por uma onda cujo seu tempo de frente (t_f) é de $1,2 \mu\text{s}$ e seu tempo de meio valor (t_c)¹ é de $50 \mu\text{s}$. Já o impulso de manobra possui um tempo de frente (t_f) de $250 \mu\text{s}$ e um tempo de meio valor (t_c) de $2500 \mu\text{s}$. O tempo de frente representa o tempo de subida da onda. Já o tempo de meio valor, é o tempo em que a onda atinge 50% do seu valor de pico em sua parte descendente.

Com essa padronização é possível à construção de equipamentos que reproduzam estes surtos com características semelhantes ao real, sendo neste trabalho implementado fisicamente uma parte deste equipamento, que é o gerador de alta tensão, e simulado uma segunda parte, que é o circuito gerador de impulso de alta tensão. Os resultados desta simulação poderão ser utilizados em trabalhos futuros.

1.2 Relevância e Motivação

Atualmente os equipamentos presentes nas linhas de transmissão e distribuição de energia elétrica e até mesmo a própria linha estão sujeitos a sobretensões causadas por impulsos de tensão de origem atmosférica ou devido a uma manobra. Essas sobretensões podem estressar, por exemplo, os transformadores e os isoladores de uma linha, essenciais para o seu funcionamento. No caso de uma falha de isolamento, por exemplo, pode ocorrer um curto circuito fase-terra ou fase-fase, o que compromete o funcionamento da linha, podendo causar um desligamento na mesma. Logo, uma avaliação do comportamento desses equipamentos frente a essas sobretensões se faz necessário para estes serem aprimorados de forma a suportar tais sobretensões, melhorando assim o seu desempenho. Para isso, testes são realizados com impulsos de tensões normalizados, que podem ser obtidos através de geradores de impulso de alta tensão, objeto desse trabalho.

1.3 Objetivo

O objetivo desse trabalho é desenvolver, em escala reduzida, um gerador de alta tensão que seja capaz de fornecer em sua saída tensões da ordem de kV, com o intuito de utilizá-lo em um circuito elétrico que gere impulsos com tempos próximos ao do impulso normalizado (1,2/50) para realização de testes e experimentos em equipamentos elétricos, como o isolamento de um transformador ou até mesmo em sistemas de aterramento,

¹ Neste trabalho foi utilizado o termo "tempo de meio valor" de acordo com a norma da ABNT. Este termo também é conhecido como tempo de meia onda ou tempo de cauda.

verificando o seu desempenho frente a ondas representativas de correntes de descargas atmosféricas.

O trabalho também tem como objetivo o estudo simulado do circuito elétrico que gera o impulso, de forma a contribuir com a análise de viabilidade da sua implementação.

1.4 Metodologia de Trabalho

Este trabalho consiste de duas etapas:

- **1ª etapa: Estudo**

Primeiramente, se faz necessário o estudo dos tipos de impulsos de tensão que se deseja implementar, de forma a conhecer suas principais características para que sejam reproduzidas em um gerador de impulso de alta tensão.

No gerador de impulso de alta tensão, é importante entender as principais características elétricas necessárias para atender a aplicação deste trabalho (tempo de frente, tempo de meia onda, tensão de saída), os riscos de se trabalhar com alta tensão, as possíveis dificuldades na implementação desse gerador, a fonte de alta tensão que o alimentará e suas vantagens e desvantagens.

- **2ª etapa: Implementação**

Nesta etapa, depois de realizadas as análises e estudos necessários, é implementado fisicamente o gerador de alta tensão e obtém-se os resultados, através de simulações no software *MATLAB*, do circuito elétrico que gera o impulso de tensão próximo ao normalizado.

1.5 Organização do Trabalho

Este trabalho, além do capítulo de introdução, apresenta mais 6 capítulos, onde no capítulo 2 é feita uma revisão bibliográfica de alguns trabalhos realizados que envolvem a construção de um gerador de impulso de tensão para determinados tipos de aplicação, como o estudo dos equipamentos de proteção em linhas telefônicas, estudo da resposta de aterramentos elétricos frente a uma descarga atmosférica e também para o estudo das consequências em equipamentos eletrônicos devido à interferência eletromagnética causada por descarga elétrica.

No capítulo 3 são abordados assuntos sobre impulsos de tensão, desde a sua origem até sua padronização, entre eles os conceitos de descargas atmosféricas e seus principais efeitos em um objeto atingido pela mesma, conceitos de impulso de tensão atmosférica e impulso de manobra normalizados e suas principais características.

No capítulo 4 são descritos conceitos sobre os geradores de impulso de alta tensão, bem como um comparativo entre o uso de diferentes fontes capazes de gerar em sua saída uma alta tensão contínua para a aplicação no trabalho. Este capítulo também contempla o funcionamento da fonte escolhida para o trabalho.

No capítulo 5 é realizada uma apresentação sobre a construção física do gerador de alta tensão e o dimensionamento dos elementos que são necessários para a implementação do circuito gerador de impulso normalizado.

O capítulo 6 descreve a parte experimental e simulada do trabalho, apresentando o funcionamento do gerador de alta tensão, bem como sua imagem física. Neste capítulo também se descreve os resultados da parte simulada e suas análises de acordo com o propósito do mesmo. Além disso, são apresentados comentários sobre as dificuldades encontradas no decorrer deste trabalho.

Por fim, no capítulo 7, descreve-se as considerações finais do trabalho e sugestões para dar continuidade ao que foi realizado até o momento.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A seguir, são apresentadas referências de trabalhos anteriores a este que aplicam o gerador de impulso de alta tensão em estudos similares.

Em uma tese escrita por Romano (1989), o autor desenvolveu um gerador de impulso de alta tensão para simulação em redes telefônicas, de forma que os resultados pudessem ser utilizados na melhoria dos equipamentos de proteção dessas redes, melhorando assim a sua confiabilidade. Esse gerador de impulso foi capaz de gerar impulsos apropriados de acordo com as características do surto desejado, com tensões de até 10 kV. Primeiramente, ele realizou um estudo teórico desse tipo de gerador, que incluía os cálculos teóricos dos parâmetros básicos nele presentes, que no caso são os resistores e capacitores, e também uma análise de seu rendimento. Posteriormente, o autor descreveu a composição do gerador como um todo, que vai desde o circuito de alimentação de energia, passando pelo circuito de disparo do gerador e, subsequentemente, o sistema de medição de impulso, até chegar ao sistema de proteção. Em seguida, ele descreve a parte experimental do seu trabalho, tendo como resultado um gerador capaz de gerar impulsos de cinco tipos diferentes, onde a diferença entre eles é o tempo de frente e meio valor, com um rendimento satisfatório. No caso do impulso atmosférico, o gerador teve um rendimento de 93,5 %, próximo do calculado que foi de 95 %. Por fim as conclusões são apresentadas, mostrando que é possível a construção de um gerador de impulso de alta tensão com aceitável qualidade técnica. Naquela época, o gerador desenvolvido pelo autor foi utilizado no Laboratório de Proteção Elétrica do Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da TELEBRÁS em Campinas - SP, apresentando bons rendimentos quanto ao propósito de sua construção.

Em uma segunda tese, escrita por Rosado (2008), o autor faz uma investigação em aterramentos elétricos visando o estudo de sua resposta frente a descargas atmosféricas. Para esse estudo, Rosado desenvolveu um gerador de impulso de alta tensão portátil, para que o mesmo pudesse ser utilizado em campo através da injeção de corrente no solo. Entretanto, sua tensão de saída é um pouco inferior aquela descrita anteriormente, na ordem de 6,6 kV, mas que para o objetivo do seu trabalho era um valor aceitável.

Posteriormente, Chen *et al.* (2015) fizeram estudos referentes aos campos eletromagnéticos causados por descargas atmosféricas e suas consequências em aparelhos eletrônicos, que podem sofrer danos devido à interferência eletromagnética. Para isso eles

implementaram um gerador de impulso de tensão que gerava um impulso com as mesmas características do impulso normalizado. No que diz respeito aos resultados do gerador de impulso, eles obtiveram um resultado mais satisfatório do que os anteriores, onde o tempo de frente encontrado foi de 1,23 μs e o tempo de meia onda foi de 51,2 μs . A construção desse gerador foi realizado em um laboratório de alta tensão.

3 IMPULSO DE TENSÃO

Em sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica, os distúrbios mais frequentes causados nas linhas são devidos a variações de tensões que excedem consideravelmente o valor de pico nominal de operação das mesmas. Essas variações de tensão podem ser causadas por descargas atmosféricas ou durante um chaveamento da linha.

As sobretensões causadas por uma descarga atmosférica pode ter uma amplitude de tensão muito alta, da ordem de 1000 kV ou mais (KUFFEL *et al.*, 2000). Assim, quando essa sobretensão alcança uma torre de suporte, normalmente metálica e conectada eletricamente ao solo, faz com que o isolador que isola o condutor da torre fique submetido a tal sobretensão, podendo romper o isolamento através da formação de um arco voltaico. Essas sobretensões também podem causar graves consequências na isolação dos transformadores de potência e outros equipamentos elétricos.

Apesar da forma de onda real de uma descarga atmosférica ter uma grande variação, fez-se necessário uma padronização da onda para que a mesma possa ser utilizada em testes laboratoriais e os resultados obtidos com os experimentos possam ser comparados com outros resultados de outros laboratórios ou de teste de campo, desde que as condições experimentais sejam semelhantes.

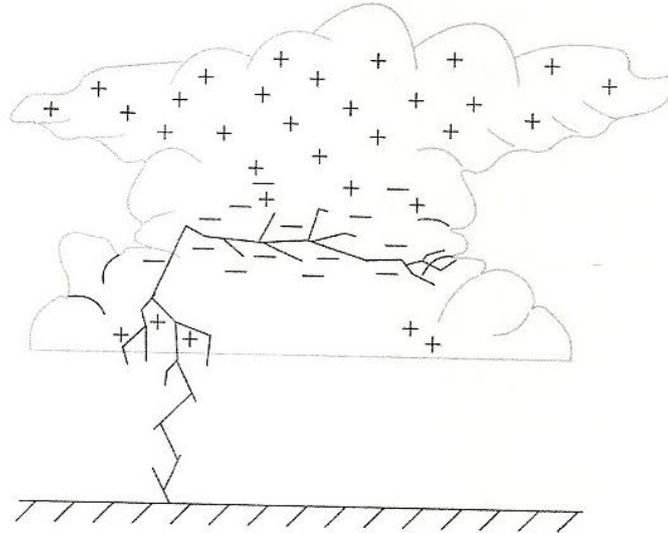
3.1 Descargas Atmosféricas

Descarga atmosférica é um fenômeno natural, popularmente conhecido como raio, e é constituída de um impulso de corrente de grande intensidade e de curta duração, que pode atingir a superfície da terra em alguns casos.

A sua formação se dá nas nuvens, que em determinadas condições atmosféricas podem se carregar eletricamente, criando assim uma diferença de potencial entre a nuvem e o solo.

Esse potencial, dependendo da sua intensidade, pode romper a rigidez dielétrica do ar, ocorrendo assim, a descarga atmosférica. Esse fenômeno, quando atinge a superfície da terra, parte da nuvem e percorre alguns quilômetros até sua ocorrência. (FIG. 1).

Figura 1 - Esquemático do Percurso de uma Descarga Atmosférica

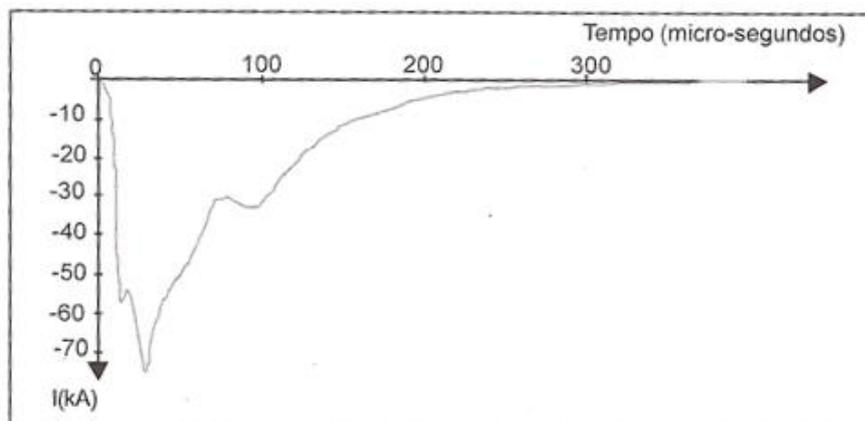


Fonte: VISACRO, 2005

Um fenômeno desse tipo pode atingir valores de pico de corrente da ordem de alguns milhares de amperes, sendo que esse valor de pico é atingido na ordem de microssegundos e conhecido como valor de pico ou de crista. Há relatos que o valor médio de uma crista de um impulso de corrente pode variar de 30 kA a 75 kA, de acordo com o local de ocorrência e o tipo de descarga.

Um registro de corrente de descarga mensurada na estação do Morro do Cachimbo (FIG. 2) mostra um valor de pico de corrente na ordem de 75 kA, atingido em alguns microssegundos, com a corrente desaparecendo após um tempo de aproximadamente 500 microssegundos.

Figura 2 - Corrente de Descarga Mensurada na Estação do Morro do Cachimbo



Fonte: VISACRO, 2005

O canal (percurso) formado pela descarga atmosférica pode atingir valores de temperaturas muito elevados devido ao fluxo de corrente que passa por ele, superiores a 3.000 °C. Esse superaquecimento traz como consequência um intenso efeito luminoso, conhecido como relâmpago, e também na rápida expansão do ar em volta do canal, ocorrendo um deslocamento no ar de uma onda sonora, conhecida como trovão.

A maior parte das descargas se origina nas nuvens de tempestades, podendo seu percurso ser estabelecido entre nuvem e solo, internamente à nuvem, entre as nuvens ou entre as nuvens e a estratosfera.

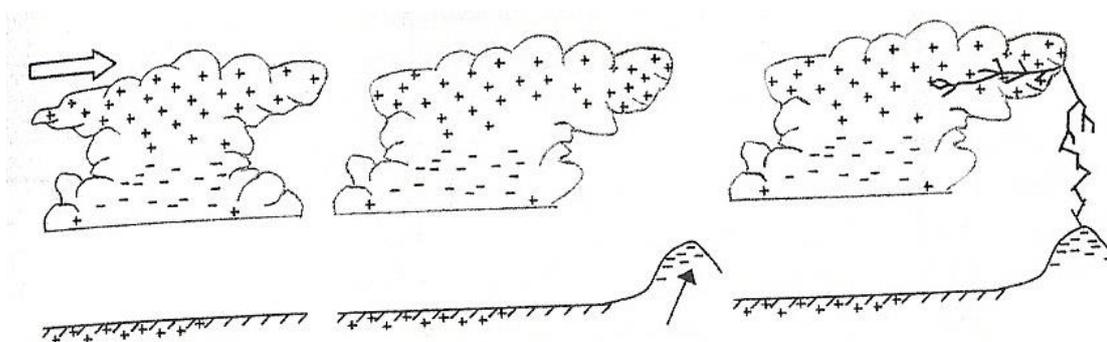
A nuvem de tempestade é constituída de cargas positivas e negativas, que são separadas através das correntes ascendentes e descendentes de ar e o contato entre partículas em suspensão e precipitação nas nuvens.

Como resultado dessa separação, as cargas elétricas se concentram na parte inferior da nuvem, induzindo sob sua sombra no solo cargas elétricas opostas com mesma intensidade, resultando em um campo elétrico na região entre a nuvem e o solo, de grande intensidade.

Quando esse campo é suficiente para romper a rigidez dielétrica do ar, ocorre o processo conhecido como descarga atmosférica.

Existem três tipos de descarga atmosférica, sendo elas a descarga positiva, negativa e a descarga bipolar. A descarga positiva tem sua formação dinâmica, pois pode ser influenciada pelos ventos fortes que fazem com que a nuvem se desloque. Ao se deslocar, as cargas positivas ficam expostas e, ao encontrar uma parte elevada como montanhas por exemplo, induzem cargas elétricas negativas podendo ocorrer a descarga elétrica. Seu processo é representado pela FIG. 3.

Figura 3 – Representação de uma Descarga Positiva

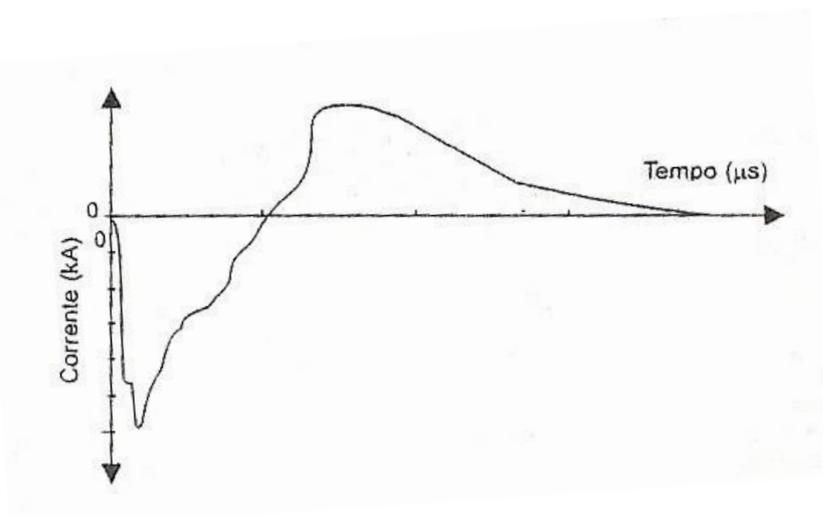


Fonte: VISACRO, 2005

A descarga negativa é a que ocorre com mais frequência e é representada pela FIG. 1. Sua formação se dá quando as cargas elétricas negativas se concentram na base da nuvem, induzindo assim cargas positivas no solo e induzindo um campo elétrico, que dependendo da intensidade é capaz de romper a rigidez dielétrica do ar, ocorrendo à descarga elétrica.

A descarga bipolar, que possui poucos registros por ser menos frequente, ocorre quando a parte superior de um canal de descarga inicialmente negativo encontra um canal que está conectado a um centro de carga positivo na nuvem, com este último se descarregando através do canal conectado a terra que originalmente era de uma descarga negativa. Ou seja, inicialmente ocorre um fluxo de cargas negativas que, ao se anular, dá origem ao fluxo de cargas positivas, ambas com formato impulsivo (FIG. 4).

Figura 4 – Registro de Corrente de uma Descarga Bipolar



Fonte: VISACRO, 2005

3.1.1 Principais Efeitos das Descargas Atmosféricas

Dentre os efeitos causados pelo fenômeno da descarga atmosférica, os piores, mas menos frequentes, são decorrentes das descargas que incidem diretamente no objeto. No caso de prédios, sistemas elétricos, seres vivos ou estruturas, os raios que ali incidem podem causar incêndio, gerar grande destruição ou até mesmo causar a morte.

De forma mais frequente, mas com menor intensidade, ocorrem os efeitos causados pelas descargas indiretas, induzidos pela ocorrência de uma descarga próxima. Pelo fato da rápida variação da corrente de descarga, esta causa distúrbios eletromagnéticos, gerando danos aos sistemas elétricos e eletrônicos (LIMA, 2014).

3.1.2 Descargas Eléctricas em Meios Gasosos

Campos eléctricos de grande intensidade desenvolvidos em um meio dieléctrico gasoso podem dar origem a uma descarga eléctrica ou centelhamento, que ocorre devido a um processo físico entre os átomos do material.

Todo meio dieléctrico possui uma rigidez dieléctrica característica, que nada mais é que a capacidade do meio em suportar um campo eléctrico sem que haja um processo disruptivo e corresponde ao máximo valor de campo eléctrico suportado pelo mesmo sem que este perca suas características isolantes. No caso do ar, foco deste trabalho, o valor da rigidez dieléctrica é de aproximadamente 30 kV/cm (VISACRO, 2005).

3.2 O Poder das Pontas

Em um corpo condutor as cargas tendem a se espalhar pela superfície do mesmo. Em um condutor esférico, as cargas se distribuem uniformemente. Por outro lado, em um condutor pontiagudo, é aplicado o conceito do poder das pontas.

O poder das pontas é uma propriedade física que diz que em corpos condutores carregados eletricamente, as cargas eléctricas tendem a se concentrar nas extremidades pontiagudas do corpo, contribuindo assim para o aumento da densidade superficial de cargas eléctricas naquela região (UNESP, 2016).

Como consequência dessa concentração, ocorre nessas extremidades a geração de um campo eléctrico de maior intensidade em relação ao restante do corpo condutor. A intensidade desse campo favorece a movimentação de cargas na extremidade do mesmo. Devido a movimentação de cargas ser facilitada, se tem uma maior probabilidade da ocorrência de uma ruptura. A concentração e intensidade do campo em algumas vezes é o suficiente para romper a rigidez dieléctrica do ar ou do meio que envolve o corpo condutor.

Essa propriedade explica o fato da ruptura do isolamento em volta de corpos eletricamente carregados se iniciar em suas pontas, o que acarreta na formação de um canal disruptivo partindo da extremidade do mesmo.

Este conceito é o utilizado na construção dos para raios, que devido ao seu formato pontiagudo, possui uma maior probabilidade de atração de descargas eléctricas.

Por fim, é um conceito de grande relevância neste trabalho, uma vez que se deseja romper a rigidez dielétrica do ar através de um *gap* (abertura), presente entre duas pontas.

3.3 Padronização

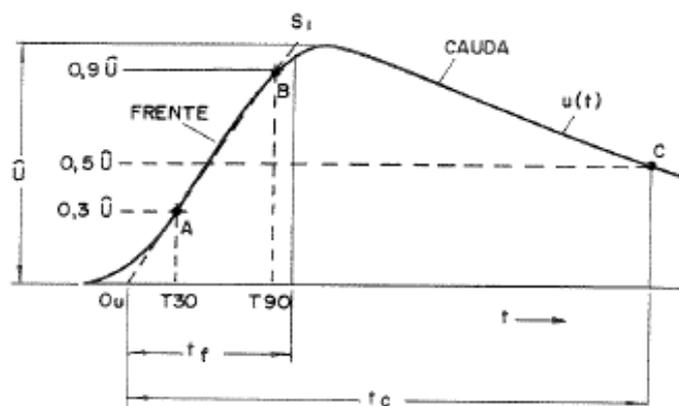
Atualmente existem diversas associações de normalização responsáveis por descrever procedimentos comuns a diversos problemas existentes, de forma que a troca de informação desses problemas seja mais eficiente, contribuindo com o desenvolvimento tecnológico.

Internacionalmente, a IEC (*International Electrotechnical Commission*) é a principal associação de normalização, que é seguida por outras associações existentes em outros países, como por exemplo no Brasil a ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas).

3.3.1 Impulso Atmosférico

Os impulsos atmosféricos são representados por uma onda com tempos de frente e meio valor padronizados pela IEC. Para o impulso atmosférico, essa onda tem seu tempo de frente (t_f) de $1,2 \mu\text{s}$, com uma tolerância de $\pm 30 \%$ e tempo até meio valor (t_c) de $50 \mu\text{s}$, com uma tolerância de $\pm 20 \%$, e é representada pela FIG. 5. Este impulso também é conhecido como impulso 1,2/50 (ABNT, 2013).

Figura 5 - Forma de Onda e Tempos Padrões para um Impulso Atmosférico



Fonte: ROMANO, 1989

O tempo de frente, um parâmetro virtual, é definido como sendo 1,67 vezes o tempo decorrido entre 30% e 90% do valor de pico do impulso, para descarga plena. Os valores 30% e 90% estão em relação a 0_1 (zero virtual), que é definido pelo ponto onde a reta AB

intercepta o eixo tempo (KUFFEL *et al.*, 2000). A constante 1,67 pode ser explicada pela relação de triângulos encontrados na FIG. 5:

$$\frac{t_f - 0V}{T90 - T30} = \frac{V - 0}{0,9V - 0,3V} \quad (1)$$

logo,

$$\frac{t_f}{T90 - T30} = \frac{1}{0,6} \quad (2)$$

finalmente,

$$t_f = 1,67(T90 - T30) \quad (3)$$

O tempo de meio valor é definido pela IEC como sendo o intervalo de tempo medido entre o zero virtual e o instante em que a onda atinge 50 % do seu valor de pico, na parte descendente.

3.3.2 Impulso de Manobra

Semelhantemente aos impulsos atmosféricos, o impulso de manobra também é representado por uma onda com respectivos tempos de frente e meio valor, tempos estes padronizados pela IEC.

Estes impulsos ocorrem devido a manobras ou chaveamentos realizados no sistema elétrico durante uma manutenção ou religamento das linhas de transmissão trifásicas, podendo a sobretensão atingir amplitudes de até 4 vezes mais que a nominal (LIMA, 2014).

Para o impulso de manobra, essa onda tem seu tempo de frente de 250 μ s, com uma tolerância de ± 20 %, e tempo até meio valor de 2500 μ s, com uma tolerância de ± 60 %. Este impulso também é conhecido como impulso 250/2500 (ABNT, 2013).

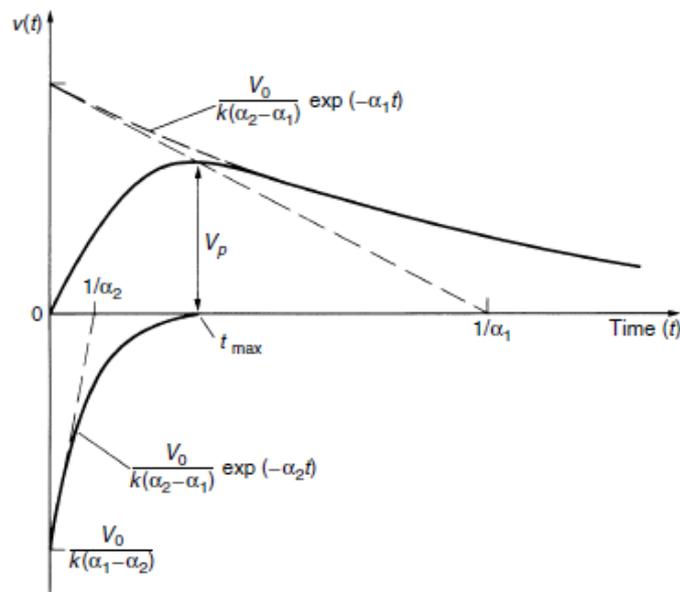
3.4 Principais Características do Impulso de Tensão

Um impulso de tensão normalizado pode ser definido pela diferença entre duas funções exponenciais de constante de tempo $T1$ e $T2$ (KUFFEL *et al.*, 2000), sendo que a equação que o representa é dada por:

$$u(t) = k(e^{-\alpha_1 t} - e^{-\alpha_2 t}) \quad (4)$$

onde $T1 = 1/\alpha_1$ e $T2 = 1/\alpha_2$, sendo que α_1 e α_2 são as frequências de suas respectivas exponenciais. Pela FIG. 6, observa-se duas exponenciais com o respectivo impulso resultante.

Figura 6 - Impulso de Tensão Representado Graficamente



Fonte: KUFFEL *et al.*, 2000.

Com essas representações, gráfica e matemática, é possível identificar importantes características do impulso de tensão real, tais como a inclinação da frente, amplitude e inclinação da cauda. Entretanto, outras características deixam de ser observadas, tais como a lenta variação da tensão próximo ao instante inicial do impulso (ROMANO, 1989). Esse tipo de impulso de tensão pode ser obtido através de um gerador de impulso, que será explicado

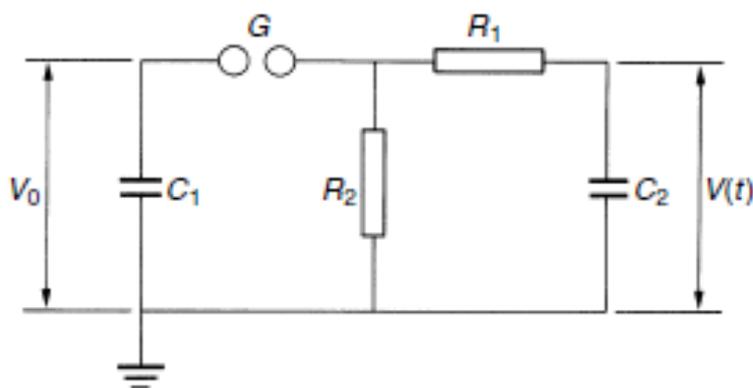
posteriormente, e é conhecido como impulso do tipo dupla exponencial, justamente pelo fato de sua formação se dar através da soma de duas funções exponenciais.

4 CIRCUITOS GERADORES DE IMPULSO DE TENSÃO

Para a geração de uma tensão de impulso, circuitos simples podem ser implementados para obter a forma de onda desejada. No caso da tensão de impulso do tipo dupla exponencial, que tem um rápido aumento e um lento decaimento em relação ao tempo de subida, com um circuito contendo um capacitor de carga e um capacitor de descarga associados a resistores, têm-se uma forma de onda próxima à desejada.

Têm-se dois tipos de geradores de tensão de impulso mais comuns: circuitos geradores de estágio simples e circuitos geradores de múltiplos estágios. Neste trabalho, será utilizado o conceito do gerador de estágio simples (FIG. 7).

Figura 7 - Circuito Gerador de Tensão de Impulso de Estágio Simples



Fonte: KUFFEL *et al.*, 2000.

Nesse gerador de estágio simples, o capacitor C_1 é carregado por uma fonte de alimentação de alta tensão contínua até que o *gap* G seja rompido, criando assim um arco voltaico. Esse *gap* funciona como um limitante de tensão e até mesmo como um sensor de tensão, pois a distância do *gap* está diretamente ligada à rigidez dielétrica do ar, que só será rompido com uma tensão suficiente.

Ao ser rompido, o *gap* permite que o capacitor de carga C_1 descarregue a sua energia armazenada no restante do circuito, responsável pela forma de onda desejada. O capacitor C_2 , ao ocorrer o rompimento do *gap*, será carregado até que o nível de tensão se iguale à do capacitor C_1 . Neste momento, a crista ou o valor de pico do impulso é atingido e este intervalo entre a origem e o pico é conhecido como frente de onda.

A partir do pico, como os capacitores estão com um mesmo nível de tensão, começa então a descarga dos mesmos, e essa descarga corresponde à cauda do impulso, onde o ponto nessa cauda que corresponde a 50 % do valor de pico é conhecido como tempo de meio valor.

O resistor R_1 é responsável pelo controle do tempo de frente e também por amortecer o circuito. Já o resistor R_2 é responsável pelo controle do tempo de meio valor, consequência da descarga dos capacitores.

4.1 Modelagem do Gerador de Estágio Simples

Para o projeto do circuito da FIG. 7, faz-se necessário não apenas entender o funcionamento do circuito como também estabelecer relações para os valores dos elementos nele presentes, pois não se pode pegar valores aleatórios. Essas relações não só estão ligadas com os elementos entre si, mas também com as constantes de tempo, visto que um impulso de tensão é formado pela superposição de duas funções exponenciais. Essas constantes de tempo são relacionadas de acordo com as características da forma de onda desejada.

De início, é necessário encontrar a função de transferência do sistema, onde a saída é a tensão entre os terminais do capacitor C_2 (FIG. 7), decorrente da tensão de entrada V_0 com a qual o capacitor C_1 é carregado. Para isso, pode-se usar a transformada de Laplace aplicada em circuitos elétricos, que facilita a resolução do problema com a transformação de um conjunto de equações diferenciais em equações algébricas.

Em um primeiro instante, utilizando a transformada de Laplace encontramos a tensão de saída em função da entrada, dada pela expressão

$$V(s) = \frac{V_0(s)}{k} \cdot \frac{1}{(s^2 + as + b)} \quad (5)$$

com os valores de k , a e b

$$k = R_1 C_2 \quad (6)$$

$$a = \left(\frac{1}{R_1 C_1} + \frac{1}{R_1 C_2} + \frac{1}{R_2 C_1} \right) \quad (7)$$

$$b = \left(\frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2} \right) \quad (8)$$

Logo, com o auxílio da tabela de transformadas de Laplace, tem-se que a tensão de saída $V(t)$ é dada por:

$$V(t) = \frac{V_0}{k} \cdot \frac{1}{(\alpha_2 - \alpha_1)} \cdot [e^{-\alpha_1 t} - e^{-\alpha_2 t}] \quad (9)$$

sendo que α_1 e α_2 são as raízes da equação de 2º grau $s^2 + as + b = 0$

$$\alpha_1, \alpha_2 = \frac{a}{2} \mp \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 - b} \quad (10)$$

Pela eq.(9) pode-se comprovar a teoria apresentada anteriormente, que diz que o impulso de tensão é a superposição de duas funções exponenciais de diferentes constantes de tempo, onde a raiz negativa leva a uma constante de tempo $1/\alpha_1$ maior que a constante de tempo $1/\alpha_2$, consequência da raiz positiva.

4.2 Gerador de Alta Tensão

Geradores de alta tensão são, geralmente, utilizados para ensaios em laboratórios. Estes ensaios são realizados em diversos equipamentos tais como transformador, capacitor, buchas de isolamento, cabos, etc. e servem para verificar o isolamento destes equipamentos quando estes são submetidos a altas tensões, confirmando assim, a confiabilidade do seu isolamento.

Os valores e o tipo de tensão de ensaio aplicados ao equipamento em teste sempre são maiores que as nominais, porém, essas características são descritas por normas ou recomendações, diminuindo assim a liberdade de escolha do valor e tipo de tensão que se quer aplicar durante o teste.

Os ensaios podem ser do tipo tensão suportável, que é quando se deseja ensaiar a isolação de um objeto para obter a tensão que o mesmo suporta, ou descarga disruptiva, que é o ensaio onde se deseja obter o valor de tensão em que ocorrerá uma falha na isolação do objeto sob ensaio, ocorrendo assim um curto circuito.

Neste trabalho, o objeto sob ensaio é o *gap* presente entre duas pontas, no qual deve ser rompida a rigidez dielétrica do ar para a formação de um arco voltaico.

4.2.1 Fonte de Alta Tensão Contínua

Para carregar o capacitor C_1 (FIG. 7), é necessária uma fonte de alta tensão contínua, que basicamente é constituída de um transformador de alta tensão. A tensão no primário do transformador deve ser controlada de forma que se tenha em sua saída valores variáveis de tensão, as quais devem ser aplicadas sucessivamente no capacitor em intervalos de tempos iguais até que se ocorra a disrupção. Para isso, é utilizado uma chave semicondutora na entrada do transformador, onde a alteração da frequência de comutação resulta na alteração da tensão de entrada e conseqüentemente, da tensão de saída.

4.2.2 Transformador de Alta Tensão

Um transformador de alta tensão, no caso em questão, é um equipamento elétrico capaz de fornecer em sua saída um alto valor de tensão quando esta é comparada com o valor da tensão de entrada. Essa transformação se dá através da relação de espiras entre o primário e o secundário do transformador.

Para a realização deste trabalho, foram pesquisados diversos tipos de fontes capazes de fornecer em sua saída altas tensões. Estas fontes poderiam ser um transformador presente em micro-ondas, um transformador que está presente em cercas eletrificadas, um transformador *flyback* (utilizado em televisões com tubo de imagem) ou uma bobina de ignição (que é utilizada em automóveis).

Analisando a relação custo benefício de todos esses equipamentos, optou-se pela utilização do *flyback*, por ter um custo menor e fornecer em sua saída valores de tensão maiores quando comparados aos valores das outras opções.

Os transformadores de cerca elétrica e de micro-ondas, por exemplo, fornecem em suas saídas valores baixos, da ordem de 2 kV, o que seria pouco para o objetivo deste trabalho. No caso da bobina de ignição têm-se valores mais altos de tensões de saída em relação ao *flyback*, da ordem de 45 kV; porém, são bobinas que precisam de um circuito

eletrônico mais complexo para o seu correto funcionamento, o que as tornam inviáveis para este tipo de trabalho.

O *flyback* é, na verdade, um conversor isolado, capaz de abaixar ou elevar a tensão. A diferença dele para um transformador é que ele opera em corrente contínua, enquanto o transformador opera em corrente alternada. Este tipo de conversor é formado por um elemento magnético que se assemelha ao enrolamento primário de um transformador com dois enrolamentos. Em um transformador de dois enrolamentos, se pelo secundário percorre uma corrente senoidal, pelo primário também percorre uma corrente senoidal, com a condição de que uma carga esteja conectada ao mesmo. Já no *flyback*, em um primeiro momento, quando uma corrente não senoidal percorre o elemento magnético primário, nenhuma corrente circula pelo elemento magnético secundário. Em um segundo momento, ocorre o contrário, onde pelo elemento secundário circula uma corrente não senoidal e pelo elemento primário não circula nenhuma corrente. Apesar do seu funcionamento não ser igual ao de um transformador de dois enrolamentos, o *flyback* pode ser considerado como um transformador, pois nele ocorre o processo de conversão eletromagnético da energia. (GUEDES, 2013).

Pela FIG. 8 pode-se observar o esquema básico de um *flyback*, onde a relação entre a tensão de saída e a tensão de entrada é dada pela eq.(11),

$$V_{out} = \frac{N_s}{N_p} \cdot \frac{DV_{in}}{1 - D} \quad (11)$$

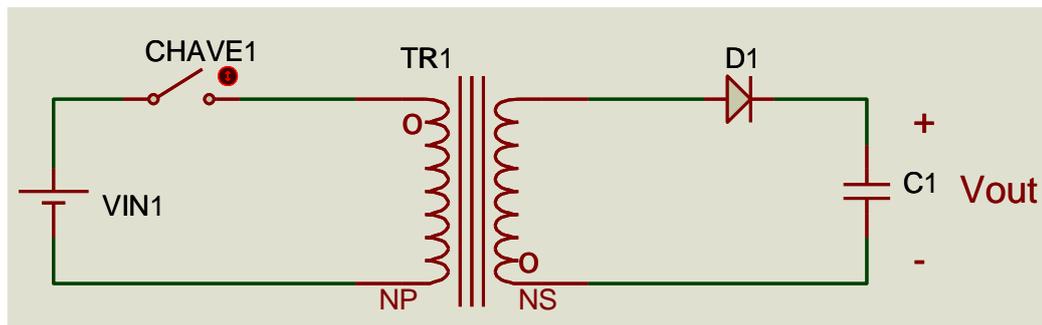
em que N_p e N_s representam o número de enrolamentos do primário e secundário respectivamente e D é o ciclo de trabalho ou *Duty Cycle*.

O ciclo de trabalho, ou *Duty Cycle*, é o tempo em que um sistema está em estado ligado ou em nível lógico 1. No caso deste trabalho, este ciclo pode ser alterado de acordo com o valor de capacitância utilizada no *driver* de acionamento (FIG. 9), ou seja, quanto maior a capacitância, maior a energia que o capacitor irá armazenar, fazendo com que o sistema permaneça ligado por um período de tempo maior. É importante ressaltar que esse *driver* de acionamento é um circuito ressonante. Por isso, não é qualquer valor de capacitância que fará com que ele funcione de forma correta.

A razão N_s/N_p é fundamental, pois é ela quem determina se a tensão de saída será maior ou menor que a tensão de entrada.

Por ser um transformador compacto, o *flyback* necessita de operar em altas frequências, da ordem de kHz. Logo, se faz necessário a utilização de Mosfet's para realizar tal função, pois este semiconductor, além de operar em altas frequências, também suporta altas tensões.

Figura 8 - Esquemático Básico de um Conversor *flyback*

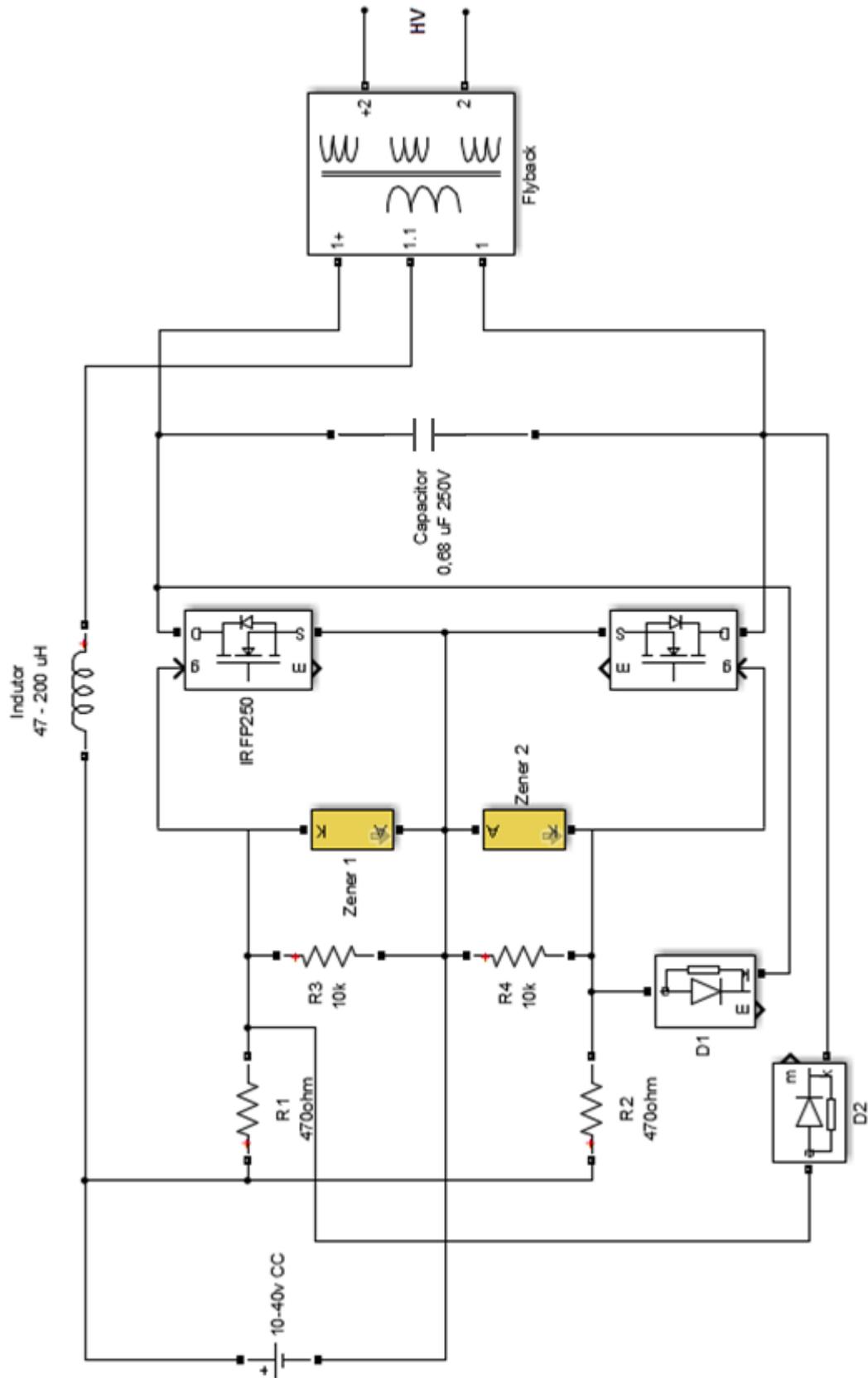


Fonte: Adaptado de NUNES, 2015.

Para o acionamento do *flyback* é utilizado um driver desenvolvido por Vladimiro Mazzilli, que é popular na área da alta tensão. Esse drive utiliza uma técnica conhecida como ZVS (*Zero Voltage Switching*) e tem como principal vantagem ser um circuito de simples construção, além do fato de que os componentes que o compõem serem encontrados facilmente no mercado.

Com o auxílio desse drive, pode-se conseguir na saída do *flyback* tensões bastante elevadas, da ordem de kV, dependendo da tensão de entrada (BOGIN, 2012). Na FIG. 9 está representado o drive, bem como os valores dos componentes necessários para sua construção, e os números 1+, 1.1 e 1 representam os pontos de uma espira composta por 10 voltas de fio enrolados no núcleo de ferrite do *flyback*, onde o ponto 1.1 representa o centro da espira.

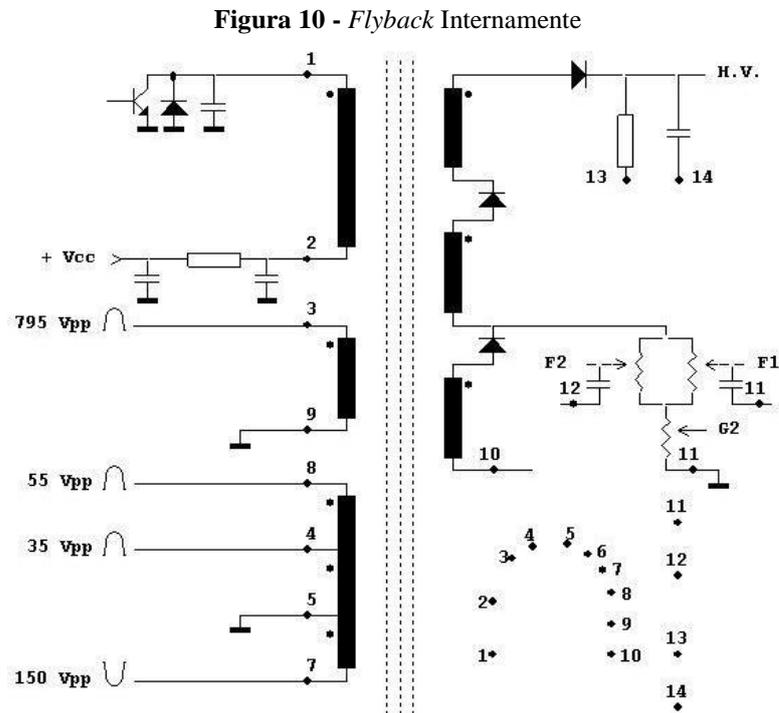
Figura 9 - Esquemático do *driver* ZVS para Acionamento do *flyback*



Fonte: Adaptado de BOGIN, 2012.

Adotado esse tipo de drive para acionamento do *flyback*, basta aplicar a saída do mesmo, representado na FIG. 10 por H.V (do inglês *High Voltage* - alta tensão), no circuito da FIG. 7, onde V_0 será a alta tensão.

Internamente, o *flyback* possui um capacitor em paralelo com a sua saída, que pode ser utilizado como um parâmetro inicial para o circuito da FIG. 7, sendo C_1 substituído pelo mesmo. Na FIG. 10, está representado o diagrama interno de um *flyback*.



Fonte: CALDEIRA, 2015

5 CONTRUÇÃO DO GERADOR E DIMENSIONAMENTO DOS COMPONENTES

A proposta inicial deste trabalho é estudar o funcionamento detalhado de um gerador de alta tensão, bem como suas viabilidades de implementação e os equipamentos disponíveis no mercado para essa finalidade, contribuindo assim para uma futura implementação do circuito que será responsável por gerar um impulso de tensão com frente de onda de aproximadamente 1,2 μs e tempo de meio valor de 50 μs .

Em um primeiro momento, a implementação do gerador se fez viável, uma vez que já existem trabalhos realizados com o mesmo objetivo e que funcionam. Na implementação, será de grande importância a preocupação quanto à segurança de quem irá operar o aparelho, devendo o gerador ser isolado para que suas partes vivas não estejam sujeitas a um contato acidental, o que pode causar graves consequências.

Quanto ao circuito responsável pela obtenção de um impulso de tensão com as características necessárias, existe certo grau de dificuldade referente aos componentes elétricos necessários para a implementação do mesmo, pois são componentes que devem suportar altas tensões. No mercado, esses componentes não são encontrados facilmente e, quando são, possuem um alto custo.

Em trabalhos realizados anteriormente, como Romano (1989), Basar *et al.* (2010), Braz (2011) e Chen *et al.* (2015), os testes com esse tipo de circuito são feitos em laboratórios de alta tensão, com componentes de alta potência e de grandes dimensões, mas isso devido aos valores de tensão com que são realizados os testes, que são na ordem de centenas de kV.

5.1 Dimensionamento dos Componentes Necessários para Composição do Gerador

De acordo com KUFFEL *et al.* (2000), a eficiência de um gerador de impulso de alta tensão, como o descrito anteriormente, pode ser dado pela relação entre a tensão de saída e a tensão de entrada, resultando na eq.(12).

$$\eta = \frac{V_p}{V_0} = \frac{1}{1 + (C_2/C_1)} \quad (12)$$

onde V_p é a tensão de pico da saída e V_0 é a tensão de entrada.

Pela eq.(12) vê-se que quanto menor a relação C_2/C_1 , melhor será o rendimento desse gerador.

Para a construção do circuito da FIG. 7, faz-se necessário o dimensionamento dos elementos que o compõe, sendo eles capacitores e resistores. Em geral, o valor do capacitor C_1 , que é o capacitor de carga, é determinado pelo próprio capacitor presente no gerador, que no caso desse trabalho, é o que está presente internamente no *flyback*. Mensurado este valor, encontra-se o valor de C_2 de acordo com a eq.(12) de forma a se ter uma boa eficiência do gerador, desde que o valor de capacitância seja um valor consistente com os disponíveis no mercado.

Encontrados os valores de capacitância, deve-se agora calcular os valores das resistências de frente e meia onda, que são R_1 e R_2 , respectivamente (FIG. 7). Essas resistências podem ser determinadas segundo KUFFEL *et al.* (2000), pela eq.(13) e pela eq.(14).

$$R_1 = \frac{1}{2C_2} \cdot \left[\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right) - \sqrt{\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right)^2 - \frac{4(C_1 + C_2)}{\alpha_1 \alpha_2 C_1}} \right] \quad (13)$$

$$R_2 = \frac{1}{2(C_1 + C_2)} \cdot \left[\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right) + \sqrt{\left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} \right)^2 - \frac{4(C_1 + C_2)}{\alpha_1 \alpha_2 C_1}} \right] \quad (14)$$

Para encontrar as constantes de tempo $1/\alpha_1$ e $1/\alpha_2$ são realizados cálculos numéricos tendo como base a eq.(9). Estes valores dependem da forma de onda que se deseja obter. Logo, segundo KUFFEL *et al.* (2000), para uma onda impulsiva de tempo de frente $1,2 \mu\text{s}$ e tempo de meio valor de $50 \mu\text{s}$, têm-se que o valor de $1/\alpha_1$ é $68,2 \mu\text{s}$ e $1/\alpha_2$ é $0,405 \mu\text{s}$.

Como os valores de tempo de frente e meio valor não são fáceis de serem encontrados na prática, valores próximos satisfazem. Também os valores de resistores e capacitores têm de serem próximos ao calculado. Os valores das constantes de tempo não serão as mesmas devido a essas adaptações, influenciando assim no resultado final.

6 PARTE EXPERIMENTAL E SIMULADA

Após um estudo teórico do gerador de alta tensão explicado no capítulo 4, neste capítulo se apresenta os detalhes da parte experimental do mesmo e a parte simulada do circuito responsável por gerar a onda de impulso normalizada.

Um dos fatores mais importantes que ajudou na viabilidade de implementação desse gerador foi o fato de que todos os componentes e materiais necessários para sua construção são encontrados no mercado nacional, com valor acessível.

6.1 Gerador de Alta Tensão

Para a construção do gerador, foram adquiridas as peças necessárias para a montagem do *driver* de acionamento do *flyback*, o *flyback* e uma caixa de acrílico para proteger o usuário de contatos acidentais com o circuito energizado.

Na FIG. 11 pode ser observado o gerador implementado fisicamente, dentro da caixa em acrílico e somente com os terminais para conexão acessíveis. Como proteção extra, além do isolamento do circuito energizado, é utilizado o aterramento, caso haja uma falha no circuito que possa vir a colocar em risco o usuário.

O terminal vermelho simbolizado pelo símbolo “+” na FIG. 11 é à saída de alta tensão do gerador. Já o terminal simbolizado por “-” é o comum ou negativo do gerador e, o terminal indicado por “CAP”, é o negativo do capacitor, como visto na FIG. 10.

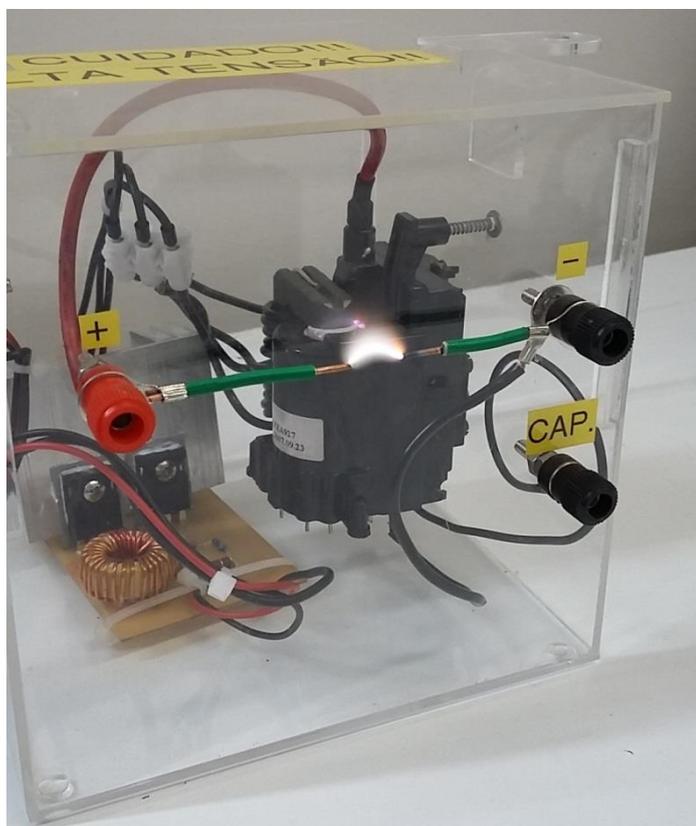
Neste gerador, caso o mesmo opere isoladamente, o capacitor interno do *flyback* faz com que ele possa trabalhar de duas formas, contínua ou pulsante. No modo contínuo, observa-se um arco elétrico de menor intensidade e o efeito corona antes do fechamento do arco. Já no modo pulsante, também se observa o efeito corona, mas com a diferença de que pouco antes do rompimento do *GAP* é possível observar centelhas entre as pontas.

Figura 11 – Gerador de Alta Tensão



Fonte: O Autor.

Figura 12 – Gerador de Alta Tensão Operando sem Capacitor Interno



Fonte: O Autor.

Na FIG. 12 pode ser observado o gerador funcionando. O *GAP* entre as duas pontas é de aproximadamente 1,1 cm e foi rompido com uma tensão de alimentação do circuito de acionamento do *flyback* de aproximadamente 30 volts, sem o capacitor interno do mesmo estar conectado.

É de grande importância a preocupação com a segurança ao operar um gerador de alta tensão, visto que o nível de tensão na saída do mesmo pode causar graves consequências a quem o está manuseando.

6.2 Capacitância Interna do Gerador

Como citado anteriormente, o *flyback* utilizado como transformador de alta tensão possui uma capacitância interna que pode ser mensurada e utilizada como ponto de partida para o dimensionamento do restante dos elementos do gerador de impulso.

Para medir essa capacitância foi utilizado o multímetro da marca FLUKE modelo 179, disponível para utilização dos alunos no laboratório de Máquinas Elétricas da Universidade Federal de Ouro Preto, campus João Monlevade, Minas Gerais.

Na FIG. 13 é possível observar a capacitância mensurada, tendo um valor de 2 nF.

Figura 13 – Valor de Capacitância Interna do *flyback*



Fonte: O Autor.

6.3 Investigação Simulada do Circuito Gerador de Impulso Normalizado

A fim de contribuir com uma futura construção física do gerador de impulso, é realizada uma investigação simulada do circuito de forma a identificar possíveis problemas e sugerir algumas soluções.

Para realizar a simulação se faz necessário encontrar os valores de C_2 , R_1 e R_2 , conforme circuito da FIG. 7, visto que o valor de C_1 já foi mensurado.

Como R_1 e R_2 são dependentes de C_1 e C_2 , em um primeiro momento deseja-se encontrar o valor de C_2 com o auxílio da eq.(12), que é a equação que determina o valor do rendimento do gerador.

Quando se fala em rendimento de um processo, deseja-se que esse seja sempre o máximo possível, o que quer dizer que não se deseja perdas na relação saída/entrada, devendo essa relação ter um resultado sempre “1” para que o processo tenha 100% de eficiência. Mas, na prática, é sabido que isso não ocorre, pois existem perdas durante o funcionamento do processo por parte dos elementos que o compõe.

Em trabalhos anteriores, o rendimento do gerador de impulso construído pelos autores teve uma média de 95% (Romano, 1989) e 87,3% (Basar *et al.*, 2010).

Logo, para a determinação de C_2 neste trabalho, foi implementado um código no software *MATLAB* que determinasse os valores para o capacitor com rendimento do gerador variando entre 85% e 99%, de forma a se encontrar o melhor rendimento com o valor de capacitância mais próxima ao disponível no mercado para então realizar a simulação mais fielmente.

Pela Tabela 01, observa-se a variação do valor para o capacitor C_2 de acordo com a variação do rendimento.

Fazendo uma análise dos valores encontrados para C_2 e os valores de capacitância disponíveis no mercado de acordo com o nível de tensão a que serão submetidos, optou-se pela continuação nos cálculos dos elementos restantes com o valor de capacitância em destaque na Tabela 01 (105 pF).

No mercado atual, tem-se disponível capacitores da ordem de 500 pF com uma tensão de 8 kV. Logo, com a associação de cinco destes capacitores em série, obtém-se uma capacitância total de 100 pF com uma tensão de 40 kV, tensão suficiente para o circuito em

questão. Daí a escolha para C_2 ser de 105 pF. No cálculo dos resistores e na simulação, será utilizado o valor real de 100 pF.

Encontrado o valor de C_2 e já conhecendo o valor de C_1 , é possível encontrar o valor do resistor de frente (R_1) e de cauda (R_2) com o auxílio das eq.13 e eq.14.

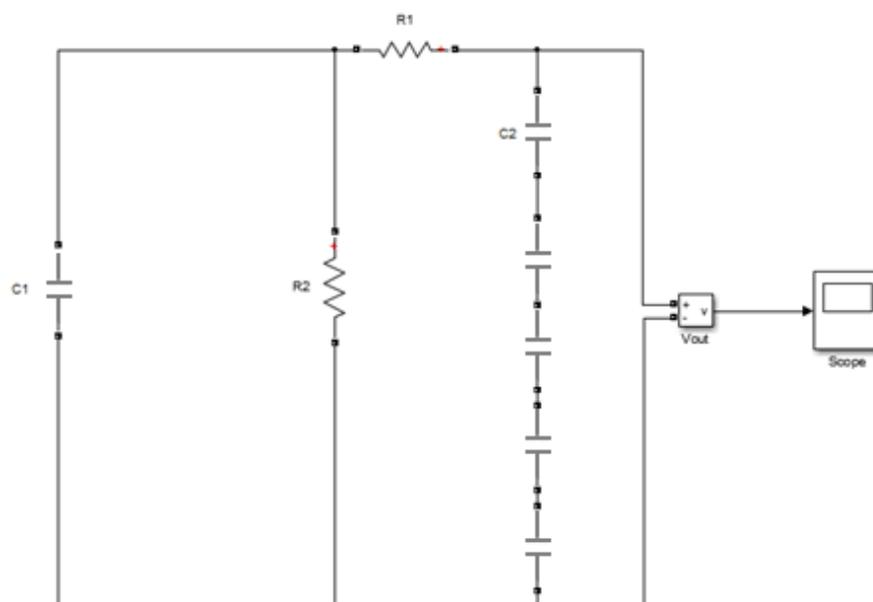
Para os resistores R_1 e R_2 , os valores calculados foram de 4.254 Ω e 32.466 Ω , respectivamente. Os cálculos foram realizados computacionalmente com o auxílio do software *MATLAB*.

No mercado, existem empresas que fabricam resistores de acordo com as especificações do cliente, inclusive específicos para esse tipo de aplicação. Logo, para os resistores não se vê problema quanto à aquisição dos mesmos com esses valores de resistência.

Na simulação, são utilizados valores de 4000 Ω e 32000 Ω para R_1 e R_2 respectivamente.

Definidos os valores de C_1 , C_2 , R_1 e R_2 , foi montado no *SIMULINK*, que é uma aplicação disponível no *MATLAB* que faz simulação e análise de sistemas dinâmicos, o circuito gerador de impulso de alta tensão, conforme mostra a FIG. 14. A topologia deste circuito foi escolhida com base no modelo que é proposto tanto por KUFFEL *et al.* (2000) como por VISACRO (2005).

Figura 14 – Simulação do Circuito Gerador de Impulso



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 01 – Valores para o Capacitor C₂

C1 (F)	C2 (F)	Razão (C1/C2)	Rendimento
2,00E-09	3,53E-10	5,67	85,0%
2,00E-09	3,39E-10	5,90	85,5%
2,00E-09	3,26E-10	6,14	86,0%
2,00E-09	3,12E-10	6,41	86,5%
2,00E-09	2,99E-10	6,69	87,0%
2,00E-09	2,86E-10	7,00	87,5%
2,00E-09	2,73E-10	7,33	88,0%
2,00E-09	2,60E-10	7,70	88,5%
2,00E-09	2,47E-10	8,09	89,0%
2,00E-09	2,35E-10	8,52	89,5%
2,00E-09	2,22E-10	9,00	90,0%
2,00E-09	2,10E-10	9,53	90,5%
2,00E-09	1,98E-10	10,11	91,0%
2,00E-09	1,86E-10	10,76	91,5%
2,00E-09	1,74E-10	11,50	92,0%
2,00E-09	1,62E-10	12,33	92,5%
2,00E-09	1,51E-10	13,29	93,0%
2,00E-09	1,39E-10	14,38	93,5%
2,00E-09	1,28E-10	15,67	94,0%
2,00E-09	1,16E-10	17,18	94,5%
2,00E-09	1,05E-10	19,00	95,0%
2,00E-09	9,42E-11	21,22	95,5%
2,00E-09	8,33E-11	24,00	96,0%
2,00E-09	7,25E-11	27,57	96,5%
2,00E-09	6,19E-11	32,33	97,0%
2,00E-09	5,13E-11	39,00	97,5%
2,00E-09	4,08E-11	49,00	98,0%
2,00E-09	3,05E-11	65,67	98,5%
2,00E-09	2,02E-11	99,00	99,0%

Fonte: Elaborado pelo autor

Nesta simulação, os capacitores estão em série de forma a se aproximar do que realmente pode ocorrer na prática, que é a associação de cinco capacitores de 500 pF cada, com uma capacitância total de 100 pF.

O voltímetro representando na FIG. 14 por “Vout” é responsável por medir a tensão em cima do capacitor C₂, que é a tensão que se deseja observar.

O bloco *SCOPE* é responsável por fazer a aquisição dos dados de leitura do voltímetro e salvá-los na *WORKSPACE* do software para que esses dados possam ser analisados.

O circuito representado pela FIG. 7 mostra que o capacitor C_1 está desconectado do restante do circuito. O mesmo permanece desconectado até que ocorra a disrupção do *GAP*, fazendo com que a energia armazenada no capacitor se descarregue no restante do circuito.

Logo, na simulação é assumida a condição após a disrupção, onde o capacitor C_1 que tem um valor de carga inicial de 30 kV é conectado com o restante do circuito através do arco que se forma entre o *GAP*. Com essa disrupção, o capacitor C_1 que antes tinha uma carga inicial, começa a se descarregar no circuito até que o arco seja cessado.

O valor de 30 kV como carga inicial em C_1 foi estimado, pois nos teste realizados com o gerador de alta tensão, ocorreu a disrupção no *GAP* de aproximadamente 1,1 cm. Como a rigidez dielétrica do ar em condições normais é de 30 kV/cm (VISACRO, 2005), a tensão no momento da disrupção seria então de aproximadamente 33 kV, explicando assim a estimativa de carga inicial.

Ao consultar as especificações de um capacitor ou resistor, sempre se tem uma informação que é de grande importância para a realização de um projeto, a tolerância. A tolerância nada mais é do que a indicação de quanto o valor de grandeza do elemento pode variar a uma temperatura padrão de 25 °C.

Para o capacitor pesquisado no mercado para este trabalho, a tolerância especificada é de $\pm 20\%$. Já para o resistor em questão, não é encontrado o valor de tolerância explicitamente nas empresas que o disponibilizam. Portanto, foi assumida uma variação de $\pm 10\%$ para o valor de resistência.

Na simulação se faz necessário contemplar essa situação, pois ao se adquirir um capacitor ou resistor, os mesmos podem vir com suas grandezas diferentes do normal, dentro do nível de tolerância aceitável. O valor de capacitância para o capacitor C_2 poderá variar então de 80 pF a 120 pF, o resistor R_1 de 3600 Ω a 4400 Ω e o resistor R_2 de 28800 Ω a 35200 Ω .

Logo, foram feitas diversas combinações na simulação para as diversas variações de capacitância e resistências, a fim de se observar o que aconteceria na prática caso houvesse alguma dessas variações.

Na Tabela 02 são mostrados valores de rendimento, tempos de frente e de meio valor encontrados na simulação para diferentes valores de R_1 e R_2 , dentro da faixa de tolerância dos mesmos com um passo de 1 %. C_1 foi fixado em 2 nF e C_2 fixado em 100 pF.

Tabela 02 – Valores de Rendimento, Tempo de Frente e de Meio Valor Simulados com C_2 Fixo.

Rendimento (%)	R1 (Ω)	R2 (Ω)	Tempo de Frente (μs) 0,84 < T_f < 1,56	Tempo de Meio Valor (μs) 40 < T_c < 60
92,44	4254	32466	1,19	49,76
92,44	4000	32000	1,13	48,96
92,44	3600	28800	1,00	44,06
92,44	3640	29120	1,02	44,55
92,44	3680	29440	1,04	45,04
92,44	3720	29760	1,05	45,52
92,44	3760	30080	1,06	46,01
92,44	3800	30400	1,07	46,50
92,44	3840	30720	1,07	46,99
92,44	3880	31040	1,10	47,49
92,44	3920	31360	1,09	47,97
92,44	3960	31680	1,12	48,46
92,44	4040	32320	1,13	49,44
92,44	4080	32640	1,15	49,93
92,44	4120	32960	1,16	50,42
92,44	4160	33280	1,17	50,91
92,44	4200	33600	1,19	51,40
92,44	4240	33920	1,19	51,89
92,44	4280	34240	1,21	52,38
92,44	4320	34560	1,21	52,87
92,44	4360	34880	1,23	53,36
92,44	4400	35200	1,24	53,85
92,67	3600	32000	1,02	48,75
92,55	3800	32000	1,07	48,85
92,33	4200	32000	1,19	49,06
92,22	4400	32000	1,24	49,15
92,19	4000	28800	1,11	44,25
92,32	4000	30400	1,12	46,61
92,55	4000	33600	1,12	51,30
92,65	4000	35200	1,13	53,64

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para ilustrar e reforçar a influência dos resistores nos tempos de frente e meio valor, foi realizada uma simulação para os valores de resistores destacados na Tabela 02. O resultado é representado pela FIG. 15 e FIG. 16. Cada curva na simulação é representada por uma cor, que por sua vez, corresponde ao resultado da alteração dos valores de resistência em destaque.

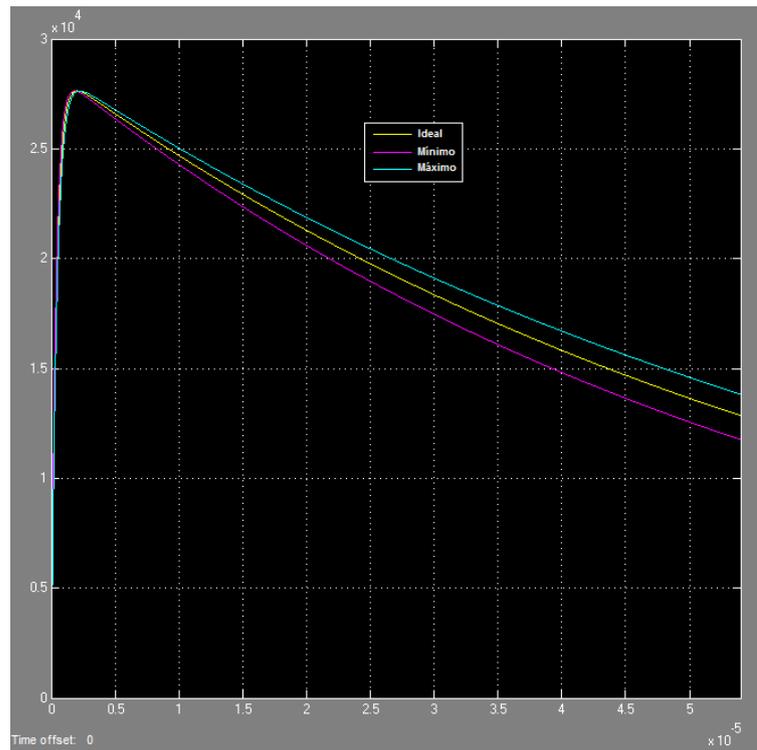
Já na Tabela 03 são mostradas as mesmas variáveis da Tabela 02, mas com algumas variações de R_1 e R_2 contemplando as possíveis combinações desses valores com o valor de capacitância C_2 também variando, de forma a se poder analisar o comportamento do circuito diante de tais situações.

Tabela 03 – Valores de Rendimento, Tempo de Frente e de Meio Valor Simulados com C_2 Variável.

Rendimento (%)	C2 (F)	R1 (Ω)	R2 (Ω)	Tempo de Frente (μs) 0,84 < Tf < 1,56	Tempo de meio valor (μs) 40 < Tc < 60
93,76	8,00E-11	3600	28800	0,83	43,30
93,96	8,00E-11	3600	32000	0,83	47,94
94,12	8,00E-11	3600	35200	0,84	52,58
93,55	8,00E-11	4000	28800	0,91	43,46
93,76	8,00E-11	4000	32000	0,92	48,11
93,94	8,00E-11	4000	35200	0,92	52,75
93,34	8,00E-11	4400	28800	1,01	43,63
93,57	8,00E-11	4400	32000	1,01	48,28
93,76	8,00E-11	4400	35200	1,01	52,92
91,18	1,20E-10	3600	28800	1,18	44,80
91,43	1,20E-10	3600	32000	1,20	49,54
91,65	1,20E-10	3600	35200	1,21	54,28
90,90	1,20E-10	4000	28800	1,31	45,03
91,18	1,20E-10	4000	32000	1,32	49,78
91,41	1,20E-10	4000	35200	1,34	54,52
90,63	1,20E-10	4400	28800	1,44	45,25
90,93	1,20E-10	4400	32000	1,44	50,00
91,18	1,20E-10	4400	35200	1,46	54,76

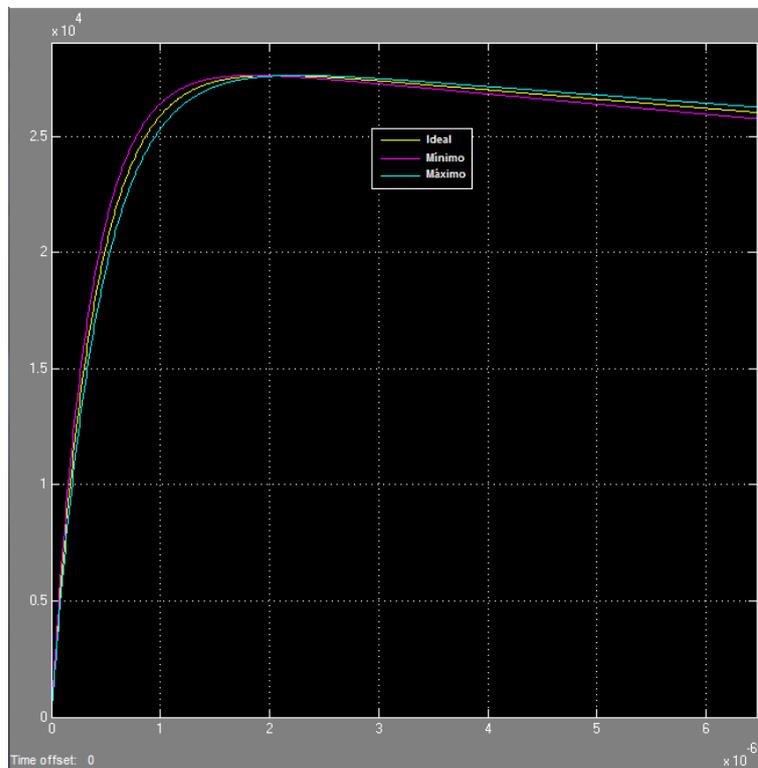
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 15– Simulação do Circuito Gerador de Impulso com Resistências Variadas



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 16 – Simulação do Circuito Gerador de Impulso com Resistências Variadas e Foco no Tempo de Frente



Fonte: Elaborado pelo autor.

6.3.1 Análise dos Resultados da Simulação

Analisando os resultados da simulação indicados na Tabela 02, observa-se que o rendimento do circuito simulado se mantém quase constante, com um valor médio de 92,43%, valor este próximo do calculado de 95 %.

O programa utilizado para realizar a simulação utiliza os elementos com as características próximas dos elementos reais, que inclui perdas. Logo, essa diferença no rendimento entre o valor calculado e o simulado se deve ao fato das perdas que podem ocorrer no capacitor.

Apesar dessa diferença, o rendimento encontrado é um valor aceitável para o circuito em questão quando comparado a resultados de trabalhos anteriores.

Já na Tabela 03, onde o circuito é simulado com os valores para o capacitor C_2 variando de acordo com as tolerâncias, houve a diferença pelo mesmo motivo, as perdas.

Outro fator que explica essa diferença é o valor de capacitância. A tensão nos terminais do capacitor é dependente também do seu valor de capacitância, de forma inversa. Devido a isso, o rendimento do circuito com o capacitor de 80 pF é maior que com o capacitor de 100 pF, que é maior do que com o de 120 pF.

É visto que com a alteração do capacitor C_2 , os tempos de frente e meio valor também são influenciados para um mesmo valor de R_1 e R_2 . Essa influência é devido ao tempo de carga e descarga do capacitor ou constante de tempo, que se altera com a mudança na capacitância, tornando o seu carregamento mais lento ou mais rápido.

Em relação aos tempos de frente e meio valor, observa-se pela Tabela 02 e Tabela 03 que os mesmos permaneceram dentro dos limites aceitáveis em quase todas as situações, não sendo aceito apenas o tempo de frente nas condições em que R_1 tem seu valor de 3600 Ω e o capacitor C_2 80 pF, onde o tempo encontrado foi de 0,83 μ s e 0,84 μ s.

Outro ponto importante a se destacar é que os resultados do tempo de frente e meio valor comprovam a teoria explicada anteriormente, que diz que o resistor R_1 é responsável pelo tempo de frente e o resistor R_2 pelo tempo de meio valor. Esses tempos são independentes entre si, onde a alteração do valor de um dos resistores apenas será sentido pelo tempo o qual ele é responsável.

Essa situação pode ser vista em casos extremos, como por exemplo, na simulação onde R_1 e R_2 assumem seus valores máximos de tolerância de 4400Ω e 35200Ω respectivamente. Nesta, o tempo de frente encontrado foi de $1,24 \mu s$ e o de meio valor $53,85 \mu s$. No pior caso, onde R_1 e R_2 assumem seus valores inferiores de 3600Ω e 28800Ω respectivamente, o tempo de frente encontrado foi de $1 \mu s$ e o de meio valor $44,06 \mu s$.

Na FIG. 15 e FIG. 16 é ilustrado graficamente o resultado dessas alterações, onde observa-se nitidamente que o impulso com valores de resistência em sua tolerância mínima, curva na cor lilás, possui um tempo de frente e meio valor menores que o impulso com valores de resistência em sua tolerância máxima, curva na cor azul marinho, que por sua vez é maior que os tempos no caso ideal, curva na cor amarelo, reforçando a influência dos resistores em seus respectivos tempos.

Os valores descritos acima não é o desejado, mas está dentro dos limites aceitáveis pela norma.

6.4 Dificuldades Encontradas na Construção da Proposta

Durante os estudos realizados para a construção da proposta, alguns pontos importantes foram observados, como por exemplo aquecimento dos componentes que constituem o circuito, segurança para quem irá manusear, simulação e custo.

Ao ser pesquisado sobre o driver de acionamento do *flyback*, observou-se que o capacitor que o compõe tem um aquecimento considerável devido a energia reativa que o circuito necessita, podendo até mesmo inchar e estourar.

Para solucionar esse aquecimento, procurou-se utilizar capacitores de tensão de $650V$, dando preferência aos de poliéster. Capacitores eletrolíticos não poderiam ser utilizados pois sua aplicação no circuito não tem polaridade, o que causaria danos ao mesmo. Uma outra forma de minimizar este aquecimento é utilizar capacitores em paralelo, dividindo assim a energia reativa entre eles (BOGIN, 2012).

Como o circuito gera tensões elevadas, da ordem de $30kV$, é de extrema importância a preocupação com a segurança de quem irá manusear o gerador. Apesar da corrente fornecida pelo gerador ser limitada pelo mesmo a alguns miliampères, ainda sim um contato com a alta tensão poderia ser prejudicial.

Para minimizar o perigo de se trabalhar com este circuito, o mesmo foi montado em uma caixa de acrílico conforme mostrado na FIG.11. Mesmo com essa caixa de proteção,

ainda sim têm-se partes vivas do circuito, devendo o usuário ser responsável e atencioso durante sua utilização.

Na implementação da simulação, houveram dificuldades em relação a modelagem do *gap* e na manipulação dos dados coletados. Neste caso, optou-se por iniciar a simulação no momento em que o *gap* de ar é rompido, ou seja, a simulação se inicia com o capacitor de carga C_1 completamente carregado, se descarregando no restante do circuito.

Devido ao alto custo dos componentes necessários para a construção da segunda parte do gerador (capacitores e resistores) e ao curto espaço de tempo, optou-se por desenvolver o descrito neste trabalho para evitar gastos desnecessários em seu desenvolvimento, como a queima de capacitores e resistores. Para que isso não aconteça, um estudo mais a fundo se faz necessário antes de sua implementação final.

Nas pesquisas bibliográficas realizadas, a maior parte das bibliografias se referem ao desenvolvimento de geradores de grande porte. Como a proposta é construir um gerador em escala reduzida, poucas referências bibliográficas semelhantes foram encontradas. Porém, as que foram encontradas foram suficientes para o bom resultado da proposta deste trabalho.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com relação ao objetivo do trabalho, que é a construção do gerador de alta tensão e a investigação simulada do circuito gerador de impulso de alta tensão normalizado, o mesmo pôde ser alcançado conforme descrito durante o decorrer do texto.

A teoria apresentada no capítulo 5 para o cálculo dos elementos elétricos necessários para a construção do gerador (capacitor e resistores) e do rendimento do gerador pode ser considerada eficiente para a obtenção dos valores reais que os correspondem.

Com os resultados apresentados conclui-se que é possível construir um gerador de impulso com uma boa qualidade técnica que utiliza elementos encontrados no mercado nacional, onde os resultados da simulação estão próximos dos valores teóricos para valores de capacitor e resistores sem considerar a variação dos mesmos de acordo com a tolerância.

Quanto aos valores de rendimento encontrados na simulação, sem levar em conta as alterações no tempo de frente e meio valor, os mesmos são satisfatórios para este trabalho, independentemente do capacitor adquirido para a construção do gerador vir com capacitância alterada dentro da sua tolerância permitida ou não.

Os valores de tempo de frente e meio valor simulados ficaram dentro dos limites aceitáveis pela norma, com exceção do que foi explicado anteriormente. Caso se adquira para construção do gerador capacitores e estes vierem com capacitâncias diferentes, ainda assim se consegue obter os valores de tempo de frente e meio valor dentro dos limites através da aquisição dos resistores de acordo com o valor dessa capacitância.

A finalidade deste trabalho é utilizar o gerador construído em testes laboratoriais e em análises de suportabilidade de equipamentos presentes em um sistema de aterramento ou sistema elétrico em geral, pois esses sistemas estão sujeitos a tensões impulsivas com características semelhantes às do gerador objeto deste trabalho.

Desta forma, torna-se viável a comparação entre o que se observa em escala reduzida com os efeitos que ocorrem em sistemas reais. Essas comparações podem ser úteis na sugestão de melhorias destes equipamentos para que os mesmos operem de maneira confiável no local onde estão sendo utilizados e contribuindo também para a elevação da sua vida útil.

Para o autor, a importância deste trabalho está na aplicação prática dos conhecimentos adquiridos no decorrer do curso de forma a contribuir com a Universidade e seus alunos na realização de futuros estudos pertinentes ao assunto abordado.

Por fim, como proposta para trabalhos futuros, fica a implementação do circuito responsável por gerar o impulso de alta tensão normalizado, que neste trabalho foi apenas simulado, e também o sistema responsável pela medição da onda de tensão, bem como seus tempos de frente e meio valor.

É viável primeiramente adquirir os capacitores que funcionarão como o capacitor de descarga C_2 , medir suas capacitâncias individuais, medir a capacitância da associação série, refazer os cálculos para encontrar os valores de R_1 e R_2 de acordo com as eq.13 e eq.14 com o valor de capacitância série medido. Somente após a verificação dos valores de R_1 e R_2 é então aconselhável adquirir os resistores e realizar a construção do gerador. Esta verificação se faz necessária devido ao elevado custo dos componentes envolvidos na construção do gerador de impulso com onda normalizada.

Uma melhor modelagem do *GAP* do circuito também é de grande importância, pois é a partir da sua interrupção que o impulso de alta tensão começa a ser formado. Isso evitará possíveis erros na construção do gerador de impulso. Essa modelagem poderá ser implementada em blocos ou linhas de código utilizando o *SIMULINK*.

No gerador de alta tensão construído, o *GAP* está presente entre duas pontas. É interessante, conforme descrito em KUFFEL *et al.*, 2000, trocar essas pontas por esferas devidamente dimensionadas para o nível de tensão em estudo. Elas podem funcionar como um sensor de tensão e melhorar a modelagem do que se tem na realidade, que é o campo elétrico entre duas superfícies, uniformemente distribuído. Neste trabalho, o campo elétrico se concentra nas pontas do condutor, o que difere um pouco da realidade mas não atrapalha no objetivo do mesmo.

É importante destacar que este trabalho é o início de uma parceria entre o Professor Felipe Cota (UFOP- Campus João Monlevade) e o Professor Listz Simões (CEFET-MG – Unidade Curvelo) cujo objetivo é construir um gerador de impulso de alta tensão em escala reduzida para estudo dos efeitos gerados por correntes de descargas atmosféricas em equipamentos e sistemas de energia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR IEC 60060-1 – Técnicas de ensaios elétricos de alta tensão Parte 1: Definições gerais e requisitos de ensaio**. Rio de Janeiro: ABNT, 2013. 73p.

BASAR, M. F. M.; JAMALUDDIN, M. H.; ZAINUDDIN, H.; JIDIN, A.; ARAS, M.S.M. Design and development of a small scale system for harvesting the lightning stroke using the impulse voltage generator at HV lab, UTeM. **Computer and Automation Engineering (ICCAE), 2010 The 2nd International Conference on**, v. 5, p.161-165, 2010. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org.ez28.periodicos.capes.gov.br/xpls/icp.jsp?arnumber=5451490>>. Acesso em: 03 nov. 2015.

BOGIN, Jozef. **Flyback driver #3: ZVS**. 2012. Disponível em: <http://boginj.com/electronics/hv/zvs/>> Acesso em: 08 mar. 2016.

BRAZ, Celso Pereira. **Avaliação do comportamento dielétrico de isoladores de distribuição de média tensão frente a impulsos atmosféricos não normalizados**. 2011. 131 p. Tese (Doutorado - Programa de Pós-Graduação em energia) – EP / FEA / IEE / IF, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/86/86131/tde-03062011-092713/en.php>>. Acesso em: 03 nov. 2015.

CALDEIRA, J. M. **Gerador de alta tensão capaz de produzir efeito corona**. Curvelo: CEFET-MG, 2015. 25 p. (Relatório técnico).

CHEN, Y.; WAN, H.; ZHOU, X. Simulation of lightning electromagnetic fields and application to immunity testing. **IEEE transactions on electromagnetic compatibility**, v. 57, n. 4, p.709-718, 2015. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org.ez28.periodicos.capes.gov.br/xpls/icp.jsp?arnumber=7112107>>. Acesso em: 03 nov. 2015.

GUEDES, Luiz Fernando Alves. **Conversor CA.-CC. Flyback com elevado fator de potência orientado ao acionamento de leds de potência.** 2013. 259 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2013.

KUFFEL, E; KUFFEL, J; ZAENGL, W.S. **High Voltage Engineering: Fundamentals.** 2nd ed. Oxford: Newnes, 2000. 552p.

LIMA, A. M. Proteção contra sobretensão de origem atmosférica. **O Setor Elétrico**, São Paulo, jun. 2014. Disponível em: <<http://www.osetoreletrico.com.br/web/a-revista/1476-protacao-contrasobretensao-de-origem-atmosferica.html>>. Acesso em: 18 jun. 2016.

NUNES, R. R. S. **Sistema de iluminação inteligente utilizando LED de potência e comunicação sem fio.** João Monlevade: UFOP-MG, 2015. 39 p. (Relatório de iniciação científica).

ROMANO, Rogério Botteon. **Gerador de impulso de alta tensão para simulação em redes telefônicas.** 1989. 158 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1989. Disponível em: <<http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?code=vtls000048288>> Acesso em: 03 nov. 2015.

ROSADO, Gláucio Corrêa. **Investigação teórico-experimental sobre a resposta de aterramentos elétricos frente a correntes de descargas atmosféricas.** 2008. 77 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008. Disponível em: <http://www.ppgee.ufmg.br/diss_defesas_detalhes.php?aluno=354> Acesso em: 03 nov. 2015.

UNESP. **Explorando fenômenos eletrização.** Disponível em: <http://www.rc.unesp.br/showdefisica/99_Explor_Eletrizacao/Pagina%20inicial.htm>. Acesso em 19 ago. 2016.

VISACRO, S. **Descargas Atmosféricas: Uma Abordagem de Engenharia**. Livro. Artliber Editora Ltda, São Paulo, SP, 2005b.