



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA ELÉTRICA**



TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

TITULADO :

**ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DE UM
CIRCUITO DE GATILHAMENTO PARA O
GERADOR DE IMPULSO**

Janmil Leite Nóbrega Junior

Aluno

Professor Dr. Edson Guedes da Costa

Orientador

Campina Grande, Março de 2010

JANMIL LEITE NÓBREGA JUNIOR

ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DE UM CIRCUITO DE GATILHAMENTO PARA O GERADOR DE IMPULSO

Trabalho apresentado no Curso de Engenharia
Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande
como requisito parcial à obtenção de grau de Engenheiro Eletricista

Orientador: Prof Dr Edson Guedes da Costa

Campina Grande, Março de 2010

N337e Nóbrega Junior, Janmil Leite.

Estudo e desenvolvimento de um circuito de gatilhamento para o gerador de impulso. / Janmil Leite Nóbrega Junior. - Campina Grande - PB: [s.n], 2010.

31f.

Orientador: Professor Dr. Edson Guedes da Costa.

Trabalho de Conclusão de Curso - Monografia; (Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Campina Grande; Centro de Engenharia Elétrica e Informática.

1. Impulso - eletricidade. 2. Gerador de impulso. 3. Circuito de gatilhamento. 4. Circuito multiplicador de Marx. 5. Mecanismo de gatilhamento. 6. Descargas elétricas - controlador. 7. Impulso de alta tensão. 8. Circuitos capacitivos I. Costa, Edson Guedes da. II. Título.

CDU:621.3(043.1)

Elaboração da Ficha Catalográfica:

Johnny Rodrigues Barbosa
Bibliotecário-Documentalista
CRB-15/626

JANMIL LEITE NÓBREGA JUNIOR

ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DE UM
CIRCUITO DE GATILHAMENTO PARA O
GERADOR DE IMPULSO

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. Edson Guedes da Costa
Universidade Federal de Campina Grande

Prof. MSc. Genoilton João Carvalho Almeida
Universidade Federal de Campina Grande

Campina Grande, Março de 2010

Agradecimentos

Se hoje estou concluindo o curso de Engenharia Elétrica, isto se deve ao apoio e incentivo de várias pessoas.

Uns me acompanham desde o início, já outros tive o privilégio de conhecer ainda durante minha vida acadêmica, mas todos têm sua importância e parcela de ajuda em minha vida.

Agradeço primeiramente a Deus. Ele sempre esteve ao meu lado, me dando inteligência e me capacitando durante o curso.

Agradeço aos meus pais, Janmil e Waldenir Nóbrega, que nunca mediram esforços e sempre fizeram todos os sacrifícios para que eu pudesse estudar e crescer profissionalmente, doando sua atenção, carinho e amor incondicional.

Agradeço à minha avó, Maria da Penha Amaral, com quem aprendi a ser sempre honesto e responsável, tudo que sou e que tenho devo a ela.

Ao meu irmão, Ricardo Nóbrega, por todo companheirismo e incentivo.

À minha namorada, Luana Gomes, que me acompanha desde o início desta jornada, sempre me doando seu carinho, incentivo, companheirismo, atenção, amizade e amor.

Ao Professor Edson Guedes, de quem tive o privilégio de ser aluno durante a graduação. Sempre disposto a tirar dúvidas e orientar quando necessário.

Agradeço a todos os familiares que sempre compreenderam minha ausência.

A todos os amigos e colegas de curso que sempre me ajudaram nas horas de dúvidas.

Muito obrigado a todos os professores e funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica, por todos os ensinamentos e esforços dispensados aos alunos.

Sumário

Lista de Ilustrações	vi
Resumo	vii
Introdução	1
Capítulo I - Revisão Bibliográfica	3
1.1 Características de um Impulso de Tensão	3
1.2 Circuitos Capacitivos para a Geração de Impulso.....	5
1.3 Geração de Impulso de Alta Tensão	7
1.4 Gaps.....	8
1.5 Sistema auxiliar de centelhamento do Spark-GAP.....	10
1.6 Oscilador	11
Capítulo II - Materiais e Métodos.....	13
2.1 Materiais.....	13
2.1.1 Bobina Asfáltica.....	13
2.1.2 Fonte de Tensão	15
2.1.3 Circuito Oscilador	15
2.2 Método	16
2.2.1 Simulação.....	16
Capítulo III - Resultados.....	20
3.1 Montagem	20
Conclusão	24
Bibliografia.....	25

Lista de Ilustrações

Figura 1.1 – Tipos de Impulso de Tensão.....	3
Figura 1.2 – Parâmetros e Características de um Impulso de Tensão Padrão.....	4
Figura 1.3 – Circuitos Básicos Geradores de Impulsos.....	5
Figura 1.4 – Circuito Multiplicador de Marx.....	7
Figura 1.5 – Tipos de Centelhadores.....	9
Figura 1.6 – <i>Sphere Gap</i> com 3 eletrodos.....	10
Figura 1.7 – Representação do Circuito Oscilador em Ponte Wien.....	12
Figura 2.1 – Representação de uma Bobina.....	14
Figura 2.2 – Representação do Circuito da fonte de Alimentação.....	16
Figura 2.3 a – Representação Gráfica da Tensão sobre a carga, circuito sem o capacitor C1.....	17
Figura 2.3 b – Representação Gráfica da Tensão sobre a carga, circuito com o capacitor C1.....	17
Figura 2.4 – Representação do circuito oscilador de onda quadrada usando o CI NE555.....	18
Figura 2.5 – Representação gráfica do sinal na saída do oscilador.....	18
Figura 2.6 – Representação do circuito de ignição do gerador de impulsos.....	19
Figura 3.1 – Representação gráfica do sinal na saída do oscilador.....	20
Figura 3.2 – Foto da faísca entre o terminal de alta tensão e o terminal de referência.....	21
Figura 3.3 – Foto da montagem do experimento utilizando o circuito de ignição.....	21
Figura 3.4 – Foto do protótipo do circuito de ignição.....	22
Figura 3.4 – Foto da patola que abrigará a versão final do circuito.....	22

Resumo

A geração de tensão na forma de impulsos em laboratórios é de fundamental importância e tem como finalidade simular o efeito de sobretensões de manobra, decorrentes da abertura ou fechamento de chaves seccionadoras e disjuntores nas linhas de transmissão, e também simular o efeito das descargas atmosféricas. Esses tipos de impulsos são usados em laboratórios para avaliação da suportabilidade dielétrica dos equipamentos de potência.

O gerador de impulso do kit de alta tensão do LAT, Laboratório de Alta Tensão da UFCG, apresenta-se com o circuito de gatilhamento defeituoso, reduzindo a sua capacidade de realização de ensaios e ministração de aulas aos alunos do curso de Engenharia Elétrica.

No circuito de gatilhamento existe uma válvula amplificadora /geradora de pulso de tensão com valores de 8 a 12 kV, que serve para acionar o mecanismo de gatilhamento que tem como objetivo controlar as descargas nas esferas do circuito multiplicador de Marx, e conseqüentemente o completo controle no descarregamento do gerador de impulso sobre o objeto de teste.

Este trabalho de conclusão de curso se propõe a estudar e desenvolver um novo mecanismo de gatilhamento para o gerador de impulsos, uma vez que o sistema de geração de pulso do equipamento controlador das descargas elétricas impulsivas atualmente encontra-se defeituoso.

Introdução

A energia elétrica é largamente utilizada e muitas vezes passa despercebida na vida da população, vindo a serem reconhecidos os seus benefícios apenas quando o sistema de fornecimento falha.

A geração hidráulica de energia elétrica é feita com tensões normalmente inferiores a 20 kV. Para a transmissão de grandes blocos de energia torna-se necessário a elevação do nível da tensão e com isso reduzir as perdas. Assim, os sistemas elétricos transmitem em tensões superiores a 230 kV. A transmissão em tensão alternada é a maneira mais eficiente e barata para a transmissão de grandes pacotes de potência para distâncias não muito longas, abaixo de 1500 km, devido à facilidade na elevação e no rebaixamento do nível de tensão, utilizando apenas transformadores.

Para distâncias superiores a 1500 km, torna-se mais eficiente e vantajoso financeiramente a utilização da transmissão em alta tensão contínua, pois, com esta topologia utiliza-se um número menor de condutores, apenas dois, o de polaridade positiva e o neutro, podendo até mesmo utilizar-se apenas um condutor se a terra for usada como retorno, diferente da tensão alternada que precisa de três condutores para transmissão do sistema trifásico, no qual as três fases são defasadas de 120° entre elas. Tecnicamente, a transmissão em tensão contínua permite o transporte de volumes maiores de potência com menores perdas. Uma grande desvantagem da Alta Tensão Contínua é a necessidade de um sistema conversor caro, formado por vários tiristores de potência com a finalidade de transformá-la numa tensão alternada com frequência de 60 Hz, compatível com o sistema adotado no Brasil, para só então poder ser utilizada pelos usuários.

Além da tensão de operação em regime contínuo, os sistemas elétricos estão sujeitos a sobretensões internas e externas. As sobretensões internas são caracterizadas pelas sobretensões na frequência industrial e pelos surtos de manobra ou de chaveamento. As sobretensões externas são caracterizadas pelas sobretensões atmosféricas. Assim, todo sistema elétrico necessita de um sistema de proteção e isolamento que o tornem seguro para a população e para os equipamentos que o utilizam. Ensaio em laboratório com geradores

de Impulso de alta tensão permitem a simulação do efeito das sobretensões de manobra e de descargas atmosféricas assim como permite verificar o comportamento de equipamentos ou de isolamentos, possibilitando a partir dos ensaios, o desenvolvimento de equipamentos adequados e de sistemas de proteção eficientes.

O Laboratório de Alta Tensão, do Departamento de Engenharia Elétrica da UFCG, dispõe de um kit gerador de impulso que tem a finalidade de testar a suportabilidade dielétrica de alguns materiais. O kit também é largamente utilizado nas aulas de Laboratório de Materiais Elétricos, de Técnicas de Alta tensão e de Técnicas Experimentais de Alta tensão, esta em nível de Pós-Graduação. Há algum tempo o kit gerador não é mais usado para ensaios de impulsos atmosféricos e de manobra, pois o seu sistema de gatilhamento encontra-se defeituoso, reduzindo assim a possibilidade de ministração de aulas e realização de experimentos pelos alunos de engenharia elétrica.

Com o objetivo de possibilitar a retomada das atividades normais do kit gerador de impulso, este trabalho de conclusão de curso se propõe a estudar e desenvolver um novo sistema de gatilhamento.

O Capítulo I deste trabalho trata-se de uma revisão bibliográfica, onde serão apresentadas as características e os parâmetros que definem um impulso de tensão assim como o circuito básico usado para sua geração. Será também apresentado neste capítulo o circuito multiplicador de Marx, configuração semelhante à montagem encontrada atualmente no laboratório de alta tensão da UFCG e utilizado para a obtenção de valores mais elevados de tensão. Finalizando este capítulo, será apresentado o método e o circuito de ignição que dá início às descargas, levando à obtenção do impulso.

No Capítulo II serão apresentados todos os materiais e os métodos utilizados durante o estudo. Será apresentado o novo circuito de ignição desenvolvido para o kit gerador de impulsos e todas as etapas desde a sua idealização, passando pela simulação, compra do material até sua montagem.

No Capítulo III serão analisados os resultados das simulações mencionadas no capítulo anterior, assim como os resultados dos testes efetuados após a montagem do circuito no laboratório.

Capítulo I

Revisão Bibliográfica

As tensões de impulso são utilizadas em ensaios de alta tensão para simular descargas atmosféricas nos equipamentos e teste de suportabilidade dielétrica, além de servir também para a simulação de sobretensões de manobra. Os impulsos são normalmente gerados pela descarga de capacitores de alta tensão através do chaveamento de *spark-gaps* (esferas centelhadoras). Entende-se com *gap* o espaçamento entre dois eletrodos, mas muitas vezes usa-se nos textos *gaps* quando se aborda sobre o conjunto eletrodo e espaçamento.

1.1 CARACTERÍSTICAS DE UM IMPULSO DE TENSÃO

Um impulso unipolar é chamado *impulso de tensão*; na Figura 1.1 são apresentados três importantes exemplos de impulsos de tensão e suas respectivas características. A dependência do tempo, assim como a duração do impulso de tensão, depende primordialmente do método de geração.

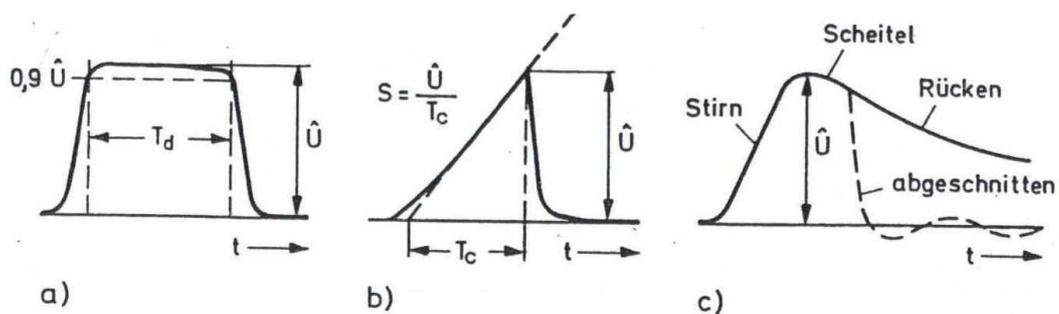


Figura 1.1 – Tipos de Impulso de Tensão.

Para experimentos básicos, são usados geralmente impulsos de tensão retangulares, os quais atingem rapidamente os valores de pico e se mantêm quase constantes, Figura 1.1a. Outro tipo de tensão de impulso é o dente de serra, que se caracteriza por possuir uma elevação de tensão linear até o ponto máximo e é descrita por S , Figura 1.1b.

O impulso de tensão exponencial utilizado na realização de testes caracteriza-se pela elevação rápida ao valor de pico \hat{U} e em seguida o valor da tensão baixa rapidamente para zero. Pode haver uma queda de tensão no circuito durante o impulso, levando a um afundamento da tensão e interrompendo o impulso. Essa interrupção pode ocorrer na frente da onda, no pico ou na cauda do impulso de tensão. O fenômeno dos transientes induzidos são os principais responsáveis pelas oscilações indicadas na Figura 1.1c.

Na natureza, para uma descarga atmosférica atingir seu valor de pico é necessário um tempo da ordem de $1 \mu\text{s}$. As tensões geradas em laboratórios para simular as descargas atmosféricas são chamadas impulso de tensão atmosférica e são bem caracterizadas em termos de sua forma de onda. Outro tipo de sobretensão são as chamadas sobretensões de manobra e ocorrem em consequência do chaveamento de disjuntores ou chaves seccionadoras na rede de alta tensão. O tempo necessário para atingir o seu valor de pico varia entre 100 e $400 \mu\text{s}$, ($250 \pm 60\%$). A sobretensão de manobra possui a mesma forma de onda da sobretensão atmosférica sendo que com um tempo mais longo de duração.

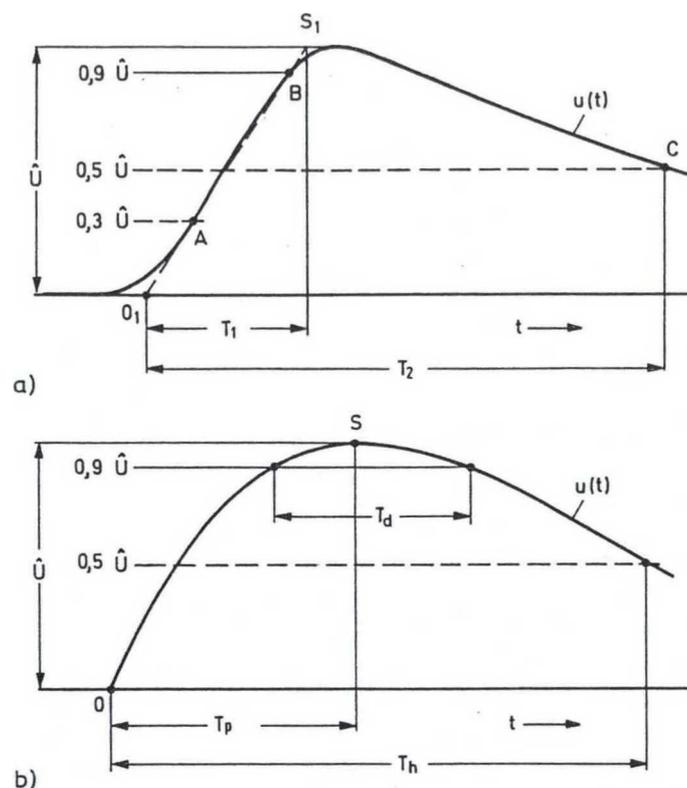


Figura 1.2 – Parâmetros e Características de um impulso de tensão padrão.

Nos impulsos gerados em laboratório a forma de onda da tensão é determinada pelos parâmetros tempo de frente e tempo de cauda, como mostrado na Figura 1.2.

Na forma de onda que representa o impulso de tensão atmosférica, Figura 1.2a, é difícil medir o ponto exato de início das descargas elétricas, primeiramente por se tratar de um efeito rápido para os instrumentos de medição e em segundo lugar por haver bastantes oscilações de tensão na origem do processo. Foi estabelecido então um método para a realização dessa medição: é traçada então uma reta auxiliar entre os pontos A e B que representam 30% e 90% da tensão de pico, respectivamente, seu prolongamento permite encontrar os pontos O_1 e S_1 , usados como marcação inicial do tempo T_1 , tempo de frente. Os pontos O_1 e C limitam a marcação do tempo T_2 , tempo de cauda. Em geral, para impulso de tensão atmosférica é usada a forma 1,2/50, que significa; $T_1 = 1,2 \mu s \pm 30\%$ e $T_2 = 50 \mu s \pm 20\%$.

A forma de onda que representa impulso de tensão de manobra, Figura 1.2b, não apresenta dificuldade para a determinação da origem, logo se utiliza como início da marcação do tempo o próprio 0 (Zero) e o valor de pico verdadeiro, o ponto S. Para testes usando este tipo de impulso é usada a forma 250/2500, que corresponde à $T_p = 250 \mu s \pm 20\%$, tempo de crista, e $T_h = 2500 \mu s \pm 60\%$, tempo de cauda. Ainda no impulso de manobra, percebe-se que há um parâmetro chamado T_d , este valor representa todo o tempo em que a onda permaneceu com um valor acima de 90% da tensão de pico total.

1.2 CIRCUITOS CAPACITIVOS PARA A GERAÇÃO DE IMPULSO

A Figura 1.3 mostra os dois circuitos básicos mais importantes, usados para a geração de impulso de tensão.

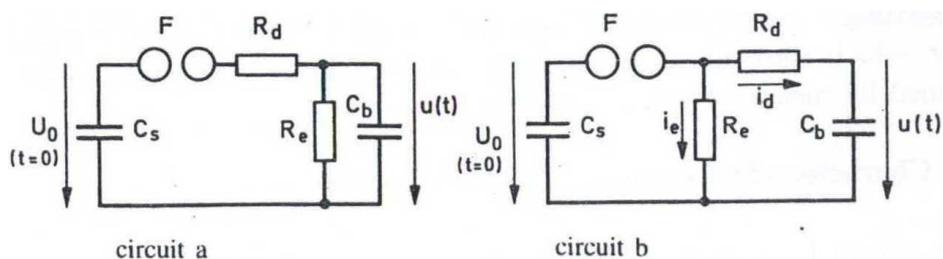


Figura 1.3 – Circuitos básicos geradores de impulsos.

O capacitor C_s é carregado diretamente com a tensão U_0 e então descarregado pela ignição do *spark gap* F . O impulso de tensão desejado aparece através do capacitor C_b . Os circuitos a e b, Figura 1.3, diferem entre eles apenas no posicionamento do resistor R_e .

Assim, como o posicionamento relativo dos resistores, o valor dos componentes também determina a forma da curva do impulso de tensão. O curto tempo de frente requer um rápido carregamento de C_b para o valor de pico \hat{U} , o longo tempo de cauda, requer um lento descarregamento, isto é obtido usando $R_e \gg R_d$. Imediatamente após a ignição do *spark gap* F em $t = 0$, quase toda tensão U_0 aparece através da combinação série de R_d e C_b em ambos os circuitos. Quanto menor o valor da expressão $R_d C_b$, mais rápida é a velocidade com que a tensão $u(t)$ atinge o valor de pico.

O valor de pico \hat{U} , em $C_s + C_b$, não pode ser maior que o valor total determinado pela distribuição inicial $U_0 C_s$. Calcula-se, portanto o fator η :

$$\eta = \frac{\hat{U}}{U_0} \leq \frac{C_s}{C_s + C_b} \quad (1)$$

Para se obter um valor de pico mais elevado para a tensão \hat{U} , atribui-se $C_s \gg C_b$. A queda exponencial na cauda do impulso de tensão pode então ocorrer com o tempo constante $C_s \cdot (R_d + R_c)$ no circuito a, e no circuito b com o tempo $C_s \cdot R_c$. A energia do impulso durante a descarga é então determinada por:

$$W = \frac{1}{2} \cdot C_s \cdot U_0^2 \quad (2)$$

Se a maior carga de tensão possível for substituída por U_0 na expressão (2), obtém-se a máxima energia de impulso como uma importante característica de parâmetro do gerador de impulso de tensão.

Na explicação anterior foi assumido que em $t = 0$ o capacitor C_s era carregado para o nível U_0 de tensão. U_0 é o valor da tensão de carregamento no momento em que há a ignição do *spark gap* F no circuito, seja por si mesmo ou por meio de uma descarga auxiliar. Assim, para a operação de auto-ignição, o aumento no valor de pico da tensão de impulso \hat{U} só pode ser conseguido

através do aumento do espaçamento de F. O simples aumento da tensão direta aplicada ao resistor de carga resultaria apenas num carregando mais rápido de C_s para o valor U_0 , e o *spark gap* F fechando espontaneamente o circuito em intervalos curtos de tempo. Portanto, a taxa de impulso aumentaria, mas não a amplitude do impulso de tensão gerado.

1.3 GERAÇÃO DE IMPULSO DE ALTA TENSÃO

Um impulso de alta tensão é obtido através da utilização do circuito multiplicador proposto por E. Marx, em 1923. No circuito de Max, vários capacitores idênticos são carregados em paralelo e depois descarregados em série, obtendo-se, desta forma, uma tensão total múltipla da tensão de carregamento. O fator de multiplicação é o número de estágios.

Pode-se entender facilmente o mecanismo do circuito de Marx com a ajuda da Figura 1.4, que apresenta um total de três estágios. Os capacitores de estágio C'_s , são carregados para o nível da tensão de carga U'_0 , via o resistor de em paralelo R'_L .

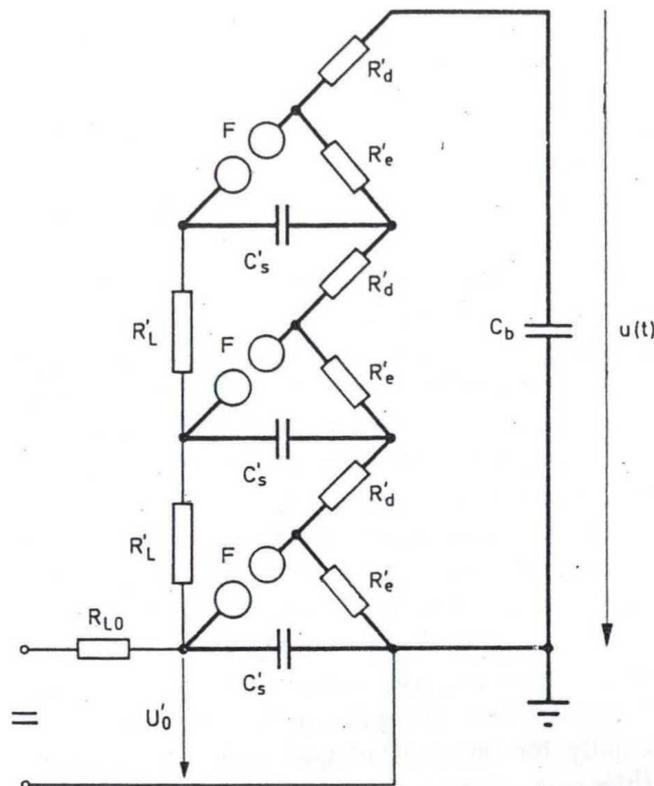


Figura 1.4 – Circuito Multiplicador de Marx.

Quando todos os *spark gap* F centelham, os capacitores C'_s se conectam em série, carregando o capacitor C_b pela conexão série dos resistores de amortecimento R'_d ; finalmente, todos os capacitores C'_s e C_b se descarregam pelos resistores R'_e e R'_d . Para que tudo isso ocorra dessa forma, é necessário que $R'_e \gg R'_d$.

Para a operação do circuito de Marx é essencial que todos os *spark gap* F centelhem simultaneamente. Isto é obtido configurando um espaçamento de abertura ligeiramente menor para o primeiro *spark gap* e provocando-o com uma descarga auxiliar. Esta descarga auxiliar é fornecida por um circuito de gatilhamento externo ao circuito multiplicador de Marx e tem o objetivo de fornecer um pulso de tensão num valor tal que garanta a ruptura nos gaps, este valor é da ordem de 10 a 12 kV.

1.4 SPARK-GAPS (CENTELHADORES)

Os spark-gaps são elementos típicos de alta tensão e são utilizados como chaves dependentes do tempo ou dependentes da tensão. Eles possuem uma elevada resistência entre seus eletrodos, que é o caminho estabelecido para a condução e não uma desvantagem nos circuitos de alta tensão. O spark-gap é geralmente separado por um meio gasoso, atualmente se utiliza bastante o ar atmosférico seco, contudo, e sua utilização em líquidos ou sólidos é usada apenas em casos raros.

1.4.1 TIPOS DE CENTELHADORES

Os centelhadores com dependência de tensão podem ser empregados como equipamentos de proteção na prevenção de sobretensões excessivas em circuitos geradores de impulso ou em sistemas de medição. Na Figura 1.5 podem-se ver alguns tipos de centelhadores.

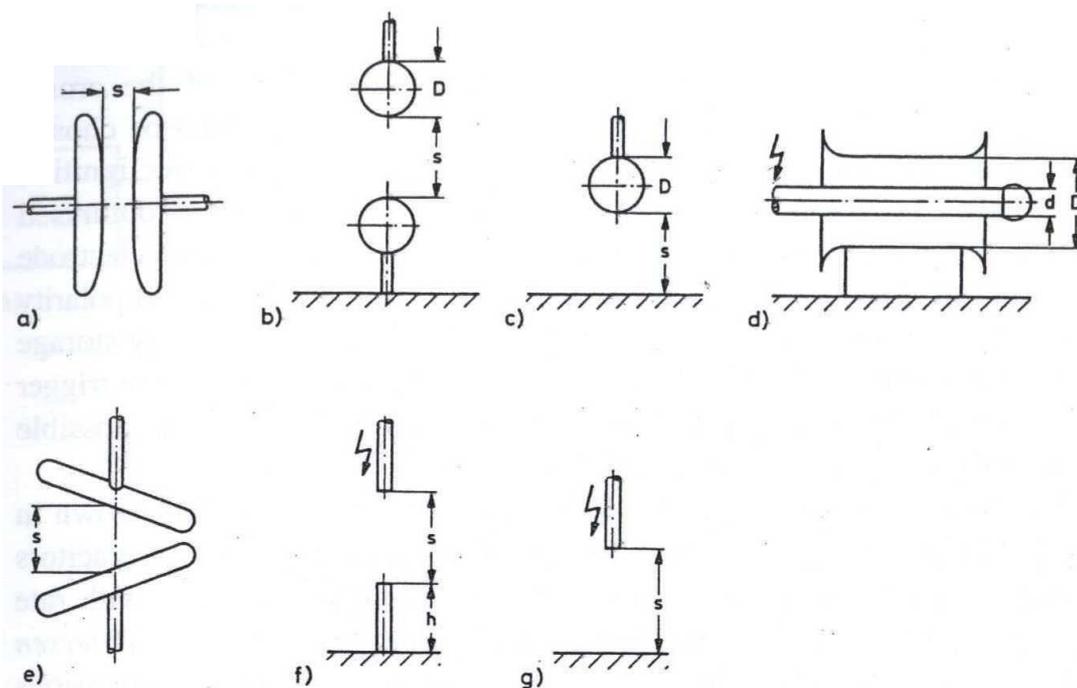


Figura 1.5 – Tipos de centelhadores.

O centelhador plano-plano, Figura 1.5a, com perfil Rogowski pode ser usado para determinar a tensão de ruptura em um campo homogêneo, mostrando-se adequado para o estudo do mecanismo de ruptura.

A transição entre o campo homogêneo e não-homogêneo pode ser verificada com a configuração do *sphere gap*, Figura 1.5b, ou com a configuração esfera-plano, Figura 1.5c, variando apenas o parâmetro s . Por esta razão, a configuração também é usada em experimentos básicos de física.

O campo elétrico do centelhador coaxial cilíndrico, Figura 1.5d, pode ser calculado com precisão e os efeitos do campo de borda são eliminados ou mitigados graças à utilização de anéis equalizadores. Este tipo de centelhador é usado em particular nos estudos de descargas parciais em cabos; isto tem grande importância prática no que diz respeito às descargas corona nas linhas de transmissão.

A configuração dos cilindros cruzados, Figura 1.5e, é também adequada como centelhador de medição, pois existe uma relação quase linear entre a tensão de ruptura e o espaçamento para grandes valores de s/d , o que não ocorre no caso da esfera.

Os centelhadores tipo bastão têm formato de haste e representam um protótipo de uma configuração não-homogênea. O comportamento da

configuração haste-haste, Figura 1.5f, e da configuração haste-plano, Figura 1.5g, corresponde exatamente na prática aos arranjos utilizados em laboratórios de alta tensão. Os *Rod-gaps* são usados como centelhadores de medição para tensões direta, podendo também ser usado para medição alternada e de tensão de impulso atmosférico.

1.5 SISTEMA AUXILIAR DE CENTELHAMENTO DO SPARK-GAP

Como foi mencionado anteriormente, precisa-se garantir que as descargas dos capacitores C'_s ocorram simultaneamente sobre o capacitor C_b para se obter o efeito esperado, a multiplicação da tensão de entrada U'_0 .

A intensidade e a falta de homogeneidade do campo elétrico nos centelhadores podem interferir no seu centelhamento, adiantando-o ou retardando-o. Para corrigir este efeito, basta alterá-los para serem dependentes do tempo, isto é obtido através da inserção de um eletrodo auxiliar e do chaveamento de um pulso de tensão.

O eletrodo auxiliar é inserido em um dos eletrodos principais, e então é disparado o pulso de tensão de no mínimo 10 kV no instante desejado, dando início imediatamente às descargas entre nos demais eletrodos principais.

Na Figura 1.6 é mostrada a configuração após a inserção do eletrodo auxiliar. O pulso de tensão auxiliar é aplicado ao terminal 4 no intuito de garantir que ocorra o centelhamento dos *sphere gaps* principais no instante desejado.

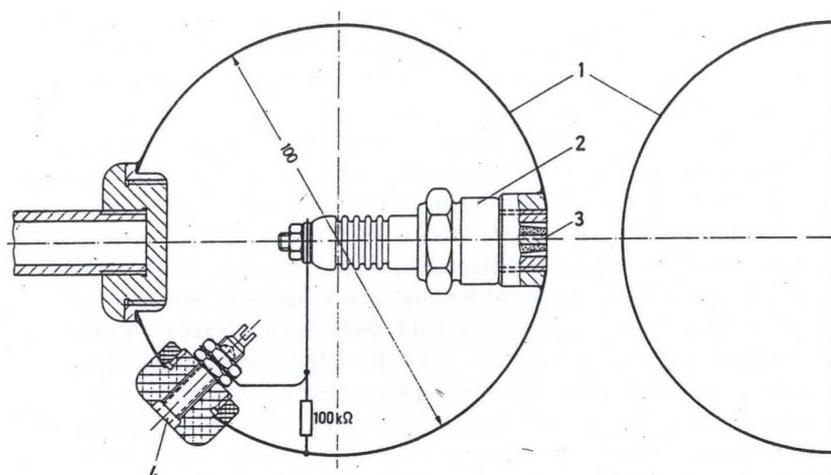


Figura 1.6 – *sphere gap* com 3 eletrodos.

1 Eletrodo Principal 2 vela 3 Eletrodo de disparo 4 Terminal de Disparo do Pulso

1.6 OSCILADORES

Um oscilador é um circuito eletrônico que produz um sinal repetitivo, na maioria das vezes uma onda senoidal ou uma onda quadrada, sem a necessidade de aplicação de um sinal externo.

O oscilador é baseado num circuito amplificador e numa malha de realimentação positiva, que induz a uma instabilidade de operação e resulta na oscilação. Para que o circuito oscilador funcione é preciso que duas condições sejam atendidas:

- O ganho do circuito fechado deve ser igual a um;
- O deslocamento total da fase do sinal no circuito deve ser de zero ou múltiplos de 2π radianos.

A existência de uma fonte regular de oscilações é essencial em qualquer instrumento de medição e em qualquer instrumento que envolva fenômenos periódicos. Por exemplo, osciladores ou geradores de ondas são usados em multímetros digitais, osciloscópios, rádios, computadores e em quase todos os periféricos de computadores.

As características requeridas a cada oscilador dependem do tipo de aplicação. Se esse oscilador é usado como fonte de pulsos regularmente espaçados, como por exemplo, o *clock* para um circuito digital, então o fator mais importante é uma rápida transição de um nível para outro. Se este oscilador é utilizado para gerar a base de tempo de um freqüencímetro, então é importante que tenha uma boa estabilidade e precisão.

A capacidade de ajuste da frequência de oscilação é fundamental num oscilador local de um dispositivo transmissor ou receptor. O controle de amplitude, estabilidade da frequência de oscilação e uma baixa distorção são, também parâmetros importantes nos geradores de ondas. Os geradores de ondas se dividem em duas categorias: osciladores sintonizados e osciladores de relaxação.

Osciladores sintonizados usam os conceitos da teoria dos sistemas. É criado um par de pólos complexos conjugados exatamente colocados no eixo

imaginário do plano complexo para garantir a instabilidade do circuito e a consequente oscilação.

Osciladores de relaxação utilizam dispositivos biestáveis tais como: interruptores, portas lógicas e *flip-flops* que repetidamente carregam e descarregam um capacitor.

Na Figura 1.7 pode-se ver um circuito básico de um oscilador senoidal em ponte Wien.

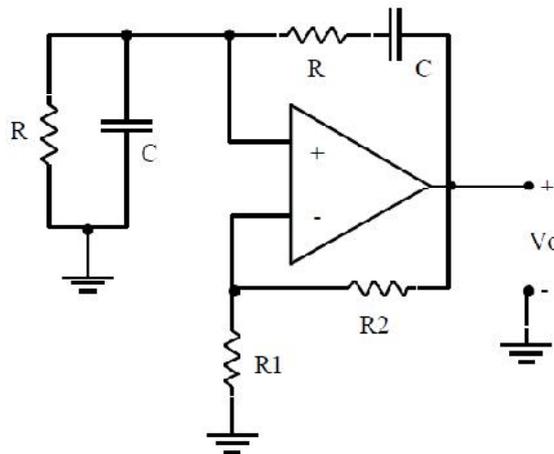


Figura 1.7 – Diagrama do oscilador em Ponte Wien.

Na Equação (3) é apresentado o ganho do circuito amplificador e na Equação (4) a frequência de oscilação.

$$A = \frac{V_0}{V_p} = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad (3)$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC} \quad (4)$$

Capítulo II

Materiais e Métodos

Finalizada a revisão bibliográfica, deu-se início às fases de simulação e montagem.

Devido à existência de inúmeros circuitos geradores de alta tensão, neste capítulo se buscou a escolha daquele que melhor se adequaria à necessidade do gerador de impulsos do kit de Alta Tensão do Departamento de Engenharia Elétrica da UFCG.

Após a análise e a simulação de vários circuitos, optou-se por um circuito que utiliza uma bobina automotiva e uma fonte de tensão CC de 12 V para a geração de alta tensão. Em toda fase de testes foi usado o protoboard, o gerador de sinais, uma fonte de tensão e um osciloscópio.

2.1 MATERIAIS UTILIZADOS

2.1.1 BOBINA GERADORA DE ALTA TENSÃO

Para se garantir o controle do centelhamento entre os *sphere gaps*, é necessária a introdução de um eletrodo auxiliar e o disparo de um pulso de tensão de pelo menos 10 kV neste eletrodo.

Para se obter tal nível de tensão, optou-se neste trabalho pela utilização de uma bobina automotiva, por ser um equipamento facilmente encontrado no mercado, de fácil manuseio e por oferecer níveis de tensão bem superiores ao mínimo sugerido.

A alta tensão é gerada a partir do chaveamento da tensão de 12 V fornecida por uma bateria, e seu uso no automóvel é necessário para se obter a faísca nas velas responsável pela queima do combustível, e conseqüentemente pelo movimento dos carros.

A bobina é na verdade um autotransformador, ou seja, trata-se de um transformador cujos enrolamentos primário e secundário apresentam um terminal em comum, Figura 2.1.

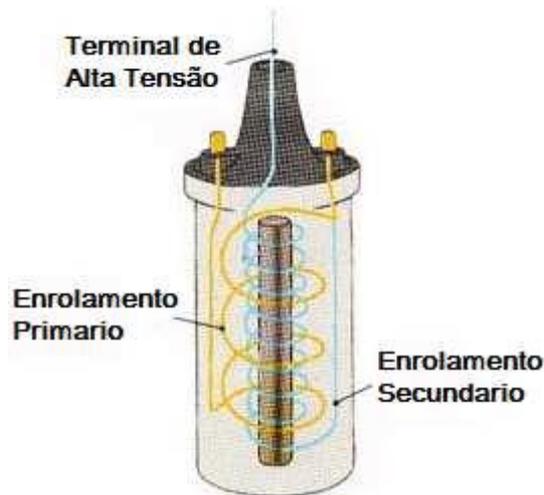


Figura 2.1 – Representação de uma Bobina.

Os dois terminais em amarelo na figura se referem ao enrolamento primário, e representam o lado de baixa tensão. Este enrolamento possui um fio mais grosso, capaz de suportar uma corrente mais elevada, entre 4 e 6 A, e possui também um número menor de espiras, entre 200 e 350 espiras dependendo do fabricante.

O terminal central corresponde à saída de alta tensão. O enrolamento de alta tensão, em azul na Figura 2.1, é feito geralmente com um fio mais fino, pois a corrente que circula é da ordem de *miliampères*, e possui milhares de espiras, entre 50.000 e 100.000 espiras dependendo do fabricante.

A bobina funciona basicamente segundo dois princípios, o primeiro é a lei de Ampère e o segundo é a lei de Faraday.

A lei de Ampère (5) anuncia que um fio ao conduzir uma corrente elétrica variável no tempo gera um campo magnético, cujas linhas de força são perpendiculares ao sentido de circulação.

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \cdot i \quad (5)$$

A lei de Faraday (6) anuncia que campos magnéticos variáveis no tempo geram campos elétricos, o que explica o aparecimento das forças eletromotrizes induzidas.

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d\phi_B}{dt} \quad (6)$$

Sendo assim, para que a alta tensão seja induzida no secundário da bobina, é necessário que haja uma variação do campo magnético no núcleo do autotransformador, e para que haja uma variação do campo magnético é necessário primeiramente que haja uma variação da corrente no enrolamento primário. Tal variação é obtida através da abertura e do fechamento de uma chave.

2.1.2 FONTE DE TENSÃO

Para alimentar a bobina foi necessário projetar uma fonte de tensão CC de 12 V capaz de suportar uma corrente de 6 A. Primeiramente, reduziu-se a tensão da rede para o nível desejado, de 220 V para 12 V, utilizando um transformador.

Em seguida foi inserida uma ponte retificadora a quatro diodos, encarregada de fazer a retificação da tensão de 12 V alternada. Por fim, um capacitor foi inserido na saída da ponte com o objetivo de eliminar o *ripple* de saída.

O circuito da fonte que foi projetada será apresentado na seção que apresenta as simulações.

2.1.3 CIRCUITO OSCILADOR

Como foi mencionado anteriormente, é necessário o chaveamento da corrente do enrolamento primário para que haja o surgimento do campo magnético no núcleo da bobina. Para efetuar tal chaveamento, este trabalho desenvolveu um circuito oscilador baseado no CI (circuito integrado) NE555.

Optou-se pela utilização deste CI por apresentar um circuito simples para a geração de um sinal de onda quadrada que poderia, juntamente com o transistor de potência 2N3055, ser usado para chavear a corrente responsável pelo surgimento do campo magnético.

2.2 MÉTODO

2.2.1 SIMULAÇÃO

Com o objetivo de se obter alta tensão para garantir o centelhamento do eletrodo principal do circuito multiplicador de tensão mencionado no capítulo 1, e conhecidos os componentes básicos a serem utilizados para a obtenção da alta tensão; uma bobina asfáltica, uma fonte de tensão CC de 12 V e um oscilador, deu-se início à fase de simulações.

O software utilizado para a realização das simulações foi o *Multisim 10.1* da *National Instruments*.

O circuito completo pode ser dividido em três partes: a primeira consiste no circuito de alimentação, a segunda no circuito oscilador e a terceira nos equipamentos de potência, bobina e transistor. Na Figura 2.2 pode-se conferir o circuito usado para a simulação da fonte de alimentação, que contém um transformador, uma ponte retificadora de onda completa, um capacitor C1 e uma carga RL.

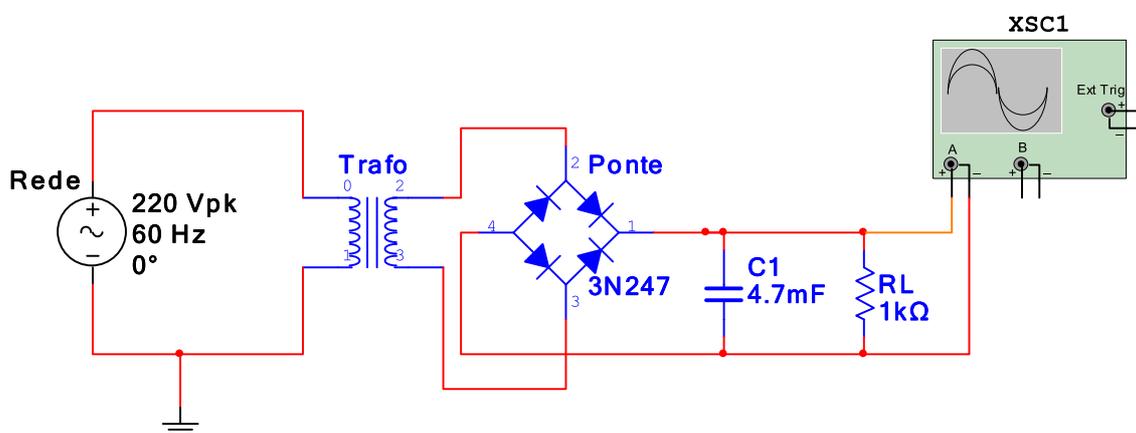


Figura 2.2 – Representação do circuito da fonte de alimentação.

Na Figura 2.3 a e b, verifica-se a representação gráfica da tensão sobre a carga RL antes e depois da inserção do capacitor C1. Sem o capacitor, percebe-se que a tensão era pulsante, variando de 0 (zero) a 12 V, com a inserção de um capacitor é que a tensão torna-se, de fato, contínua.

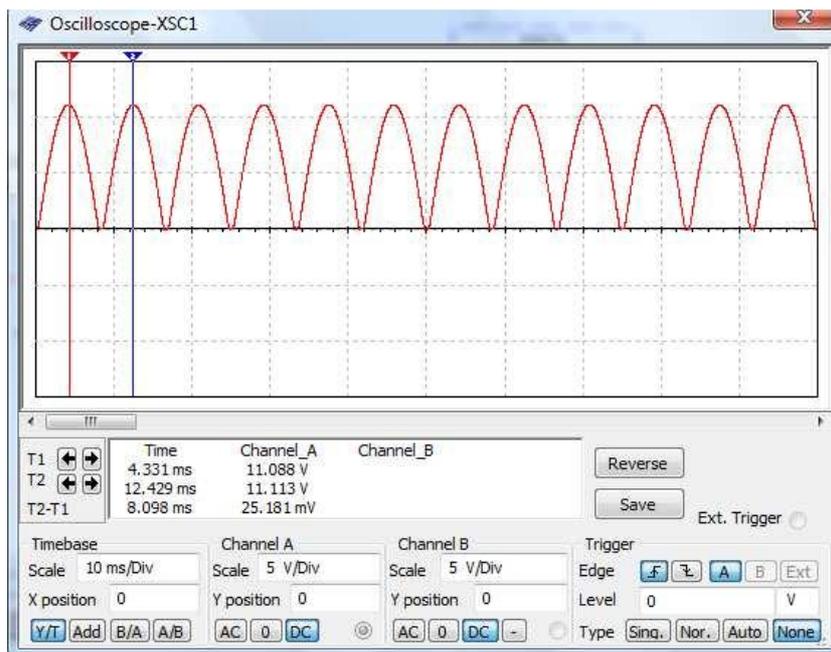


Figura 2.3 a – Representação gráfica da tensão sobre a carga, circuito sem o capacitor C1.

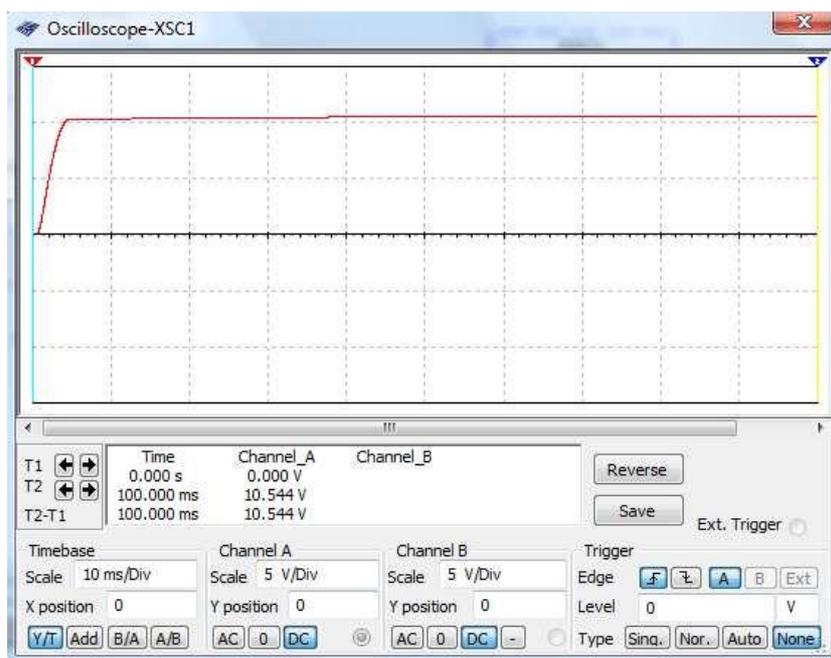


Figura 2.3 b – Representação gráfica da tensão sobre a carga, circuito com o capacitor C1

Na Figura 2.4, pode-se verificar o circuito referente ao oscilador de onda quadrada de 60 Hz, baseado no temporizador NE555. Os parâmetros, capacitância C1, e resistências R2 e R3 são ajustados para se obter a frequência desejada.

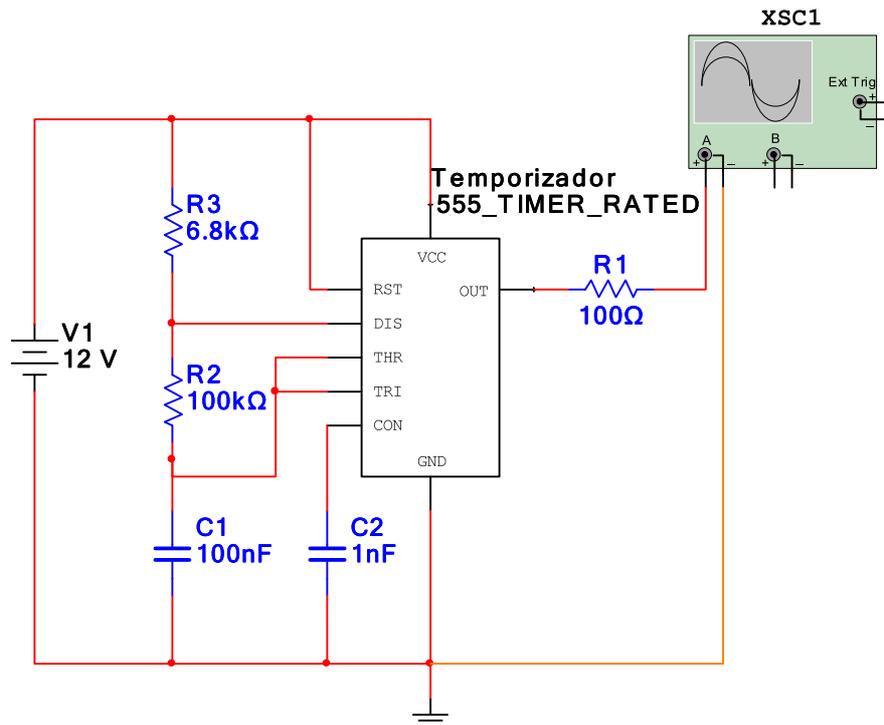


Figura 2.4 – Representação do circuito oscilador de onda quadrada usando o CI NE555.

Na Figura 2.5, a representação gráfica do sinal na saída do oscilador pode ser conferida. O sinal foi ajustado para apresentar um *duty cycle* de aproximadamente 50%. Isto significa que durante 50% do período, o sinal apresentará nível alto.

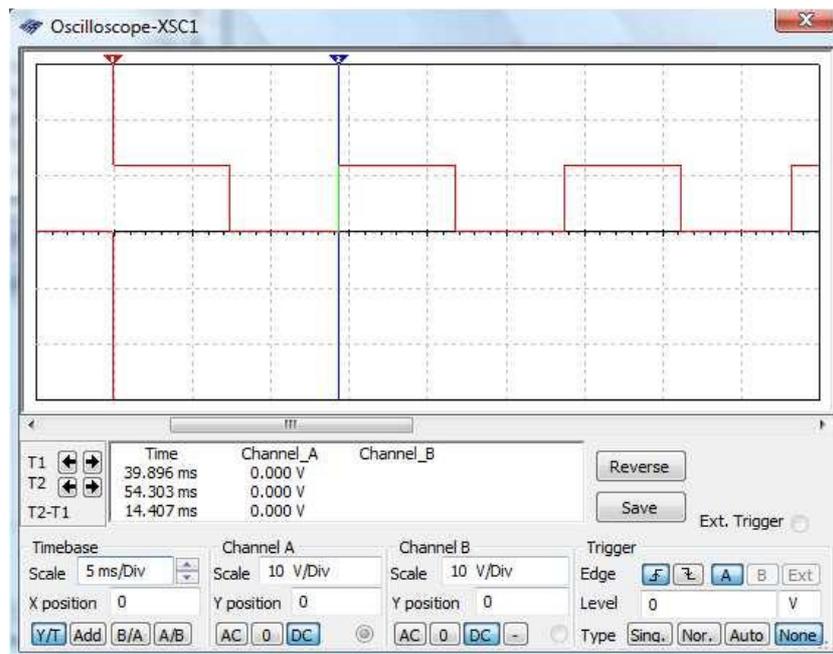


Figura 2.5 – Representação gráfica do sinal na saída do oscilador.

Na Figura 2.6, pode-se verificar a representação gráfica do circuito completo que foi projetado para a ignição do gerador de impulsos, que consiste nos dois circuitos já apresentados, adicionando o transistor de potência 2N3055, e a bobina de alta tensão, representada na simulação por um transformador.

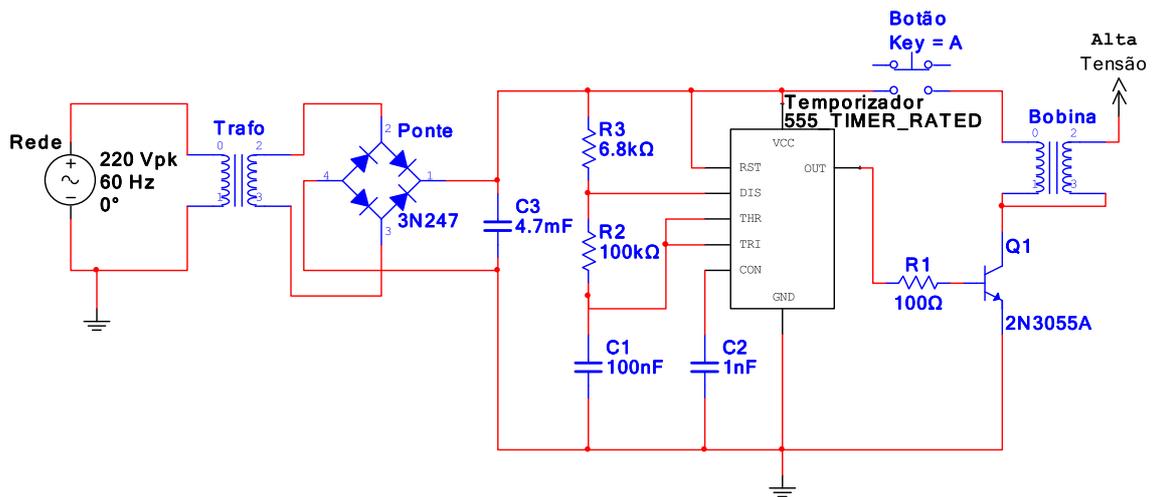


Figura 2.6 – Representação do circuito completo de ignição do gerador de impulsos

No circuito final foi inserido um botão para o operador controlar com maior precisão o tempo das descargas.

Capítulo III

Resultados e Análise

3.1 MONTAGEM

Com base no circuito simulado, iniciou-se a montagem do circuito oscilador no *protboard*. Como a fonte de alimentação do próprio circuito não havia sido ainda projetada, utilizou-se uma fonte de tensão CC de 12 V existente no laboratório. Obteve-se então o sinal de onda quadrada esperado como pode ser verificado na Figura 3.1.

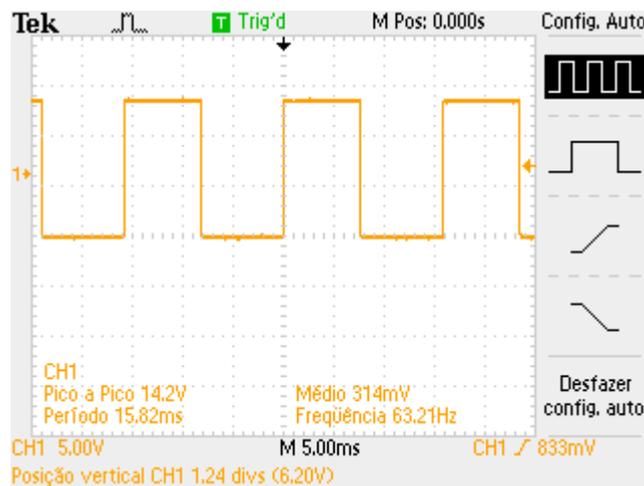


Figura 3.1 – Representação gráfica do sinal na saída do oscilador.

O próximo passo consistiu então em adicionar o transistor de potência ao circuito, ele serve como uma chave, permitindo ou não a passagem da corrente e com isso variando no tempo o campo magnético no interior da bobina.

Para efeito de teste, substituiu-se inicialmente a bobina por um resistor. Verificou-se que o sinal do temporizador NE555 estava chaveando a tensão na saída, sobre a carga. A bobina foi então colocada no lugar do resistor, mas não apresentou o resultado esperado.

Esperava-se obter faíscas ao se aproximar os terminais de alta tensão e um dos terminais do enrolamento primário. Após algumas análises e várias associações testadas no circuito oscilador, obteve-se resultado satisfatório à medida que a frequência do sinal quadrado era reduzida.

A intensidade das faíscas obtidas na bobina foi considerada ideal para o gerador de impulsos quando se chegou à frequência de 60 Hz. Este valor foi obtido empiricamente e em seguida foi refeita a simulação no *Multisim 10.1*.

Não foi realizada a medição da alta tensão de saída da bobina, mas sabendo que o ar é o meio dielétrico e conhecendo sua rigidez, 30 kV/cm, tem-se no terminal de alta tensão o valor estimado entre 15 e 20 kV, já que há centelhas para uma distância a partir de 5 à 7 mm entre os terminais como pode ser verificado na Figura 3.2, que trata-se de uma foto tirada da bobina durante um dos testes realizados.

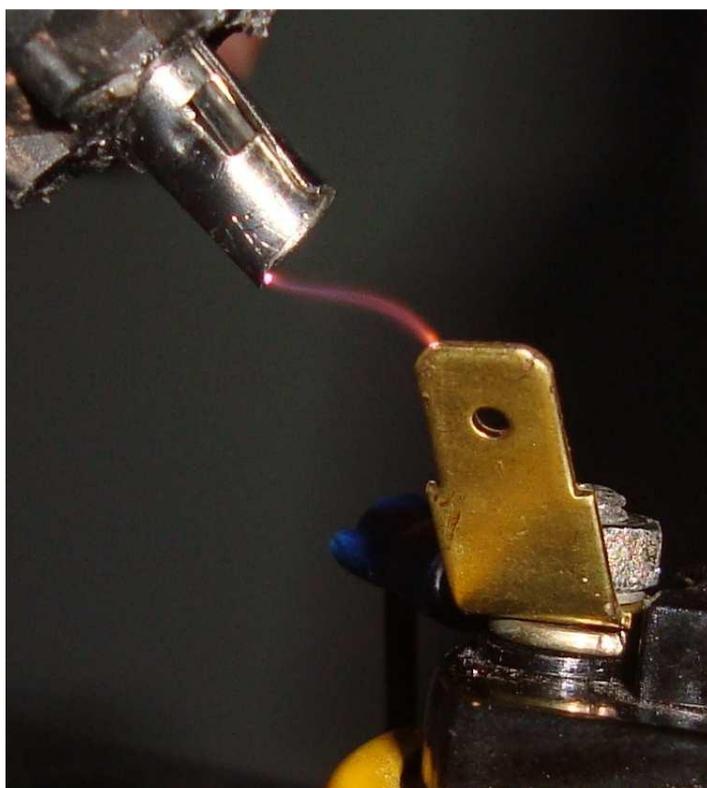


Figura 3.2 – Foto da faísca entre o terminal de alta tensão e o terminal de referência

A rigidez dielétrica de certo material é o valor limite de tensão aplicada sobre a espessura do material (kV/cm), sendo que, a partir deste valor, os átomos que compõem o material se ionizam e o material dielétrico deixa de funcionar como um isolante.

A Figura 3.3 apresenta uma foto da montagem de um dos experimentos no qual será utilizado o circuito de ignição. O teste indicado na foto foi

acompanhado pelo orientador deste trabalho, e o considerou satisfatório, uma vez que houve a descarga esperada entre os *sphere gaps*.



Figura 3.3 – Foto da montagem de um experimento utilizando o circuito de ignição.

A Figura 3.4 mostra uma foto do protótipo do circuito completo, montado numa prancheta de madeira.



Figura 3.4 – Foto do protótipo do circuito de ignição.

A versão final do circuito será montada numa caixa chamada patola, Figura 3.5, de forma que o circuito fique mais apresentável e de fácil manuseio.



Figura 3.4 – Foto da patola que abrigará a versão final do circuito.

Conclusão

O trabalho apresentado neste relatório é de grande importância não apenas por se tratar da conclusão do curso e de um requisito à obtenção de grau em Engenharia Elétrica, mas também por ter dado origem a um produto final de grande importância que será utilizado constantemente por alunos e professores durante a ministração de aulas ou em testes de equipamentos elétricos.

Durante as pesquisas deste trabalho o aluno teve a oportunidade de fortalecer vários conceitos no campo da engenharia e teve o privilégio de trabalhar nas etapas do desenvolvimento de um equipamento, os obstáculos que surgem e como superá-los.

No relatório foi apresentada a teoria para a geração de impulsos de tensão e sua respectiva importância para o estudo de novos materiais e para a análise de equipamentos em operação, assim como, a resposta do sistema de potência a problemas cotidianos como descargas atmosféricas ou sobretensões decorrentes da abertura ou fechamento de chaves.

Estudou-se também sobre a geração de alta tensão, uma vez que ela seria utilizada no sistema de gatilhamento do gerador de impulsos. A alta tensão foi gerada utilizando uma bobina automotiva, uma fonte de tensão CC de 12 V e um circuito oscilador baseado no CI NE555.

Uma versão final do circuito será confeccionada numa estrutura apresentável e que permita uma utilização segura.

Os resultados dos testes já realizados foram considerados satisfatórios. O circuito de gatilhamento desenvolvido permitiu a recuperação e o pleno funcionamento do gerador de impulso do Kit de Alta Tensão do Laboratório de Alta Tensão do curso de Engenharia Elétrica da UFCG.

Bibliografia

- Kind, D. e Feser, K., *“High-Voltage test Techniques”*, EDITORA SHANKAR’S BOOK AGENCY PVT. LTDA, 2ª Edição 1999;
- Kuffel, E. e Zaengl, W. S., *“High Voltage Engineering Fundamentals”*
- Guedes, E., *“Apostila do curso Técnicas de Alta Tensão”*, Universidade Federal de Campina Grande
- Salam, M.A., Anis, H., El-Morshedy, A. e Radwan, R. *“High Voltage Engineering, Theory and Practice”*
- Del Toro, V., *“Fundamentos de Máquinas Elétricas”*, EDITORA PRENTICE-HALL DO BRASIL LTDA, 1994;
- Boylestad, R. e Nashelsky, L., *“Dispositivos Eletrônicos e teoria de Circuitos”*, EDITORA. PRENTICE-HALL DO BRASIL LTDA, 3ª Edição 1982.