



Universidade Federal de Campina Grande

Centro de Engenharia Elétrica e Informática

Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

PABLO VINÍCIUS BRANDÃO ARAÚJO

**PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM DIODO PARA ALTA
TENSÃO**

Campina Grande, Paraíba
Fevereiro de 2013

PABLO VINÍCIUS BRANDÃO ARAÚJO

PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM DIODO PARA ALTA TENSÃO

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao
Departamento de Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Campina Grande
como parte dos requisitos necessários para a
obtenção do grau de Bacharel em Ciências no
Domínio da Engenharia Elétrica.*

Orientador:

Professor Dr. Edson Guedes da Costa

Campina Grande, Paraíba
Fevereiro de 2013

PABLO VINÍCIUS BRANDÃO ARAÚJO

PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM DIODO PARA ALTA TENSÃO

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao
Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade
Federal de Campina Grande como parte dos requisitos
necessários para a obtenção do grau de Bacharel em
Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.*

Aprovado em / /

Tarso Vilela Ferreira
Universidade Federal de Campina Grande
Avaliador, UFCG

Professor Dr. Edson Guedes da Costa
Universidade Federal de Campina Grande
Orientador, UFCG

Dedico este trabalho a minha família pelo incentivo e suporte, e para meus amigos que, apesar dos percalços, também foram de fundamental importância para a pessoa que sou hoje e o profissional que serei.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por ter me dado a chance de cursar e chegar ao final do tão sonhado curso de Engenharia Elétrica.

Agradeço a minha família, por todo o apoio, incentivo, orientação e broncas dadas a mim durante todo o curso, bem como em tudo que faço durante minha vida, e com a qual espero poder sempre contar.

Agradeço a meus amigos e colegas, encontrados durante a graduação, por tudo que pude aprender com eles e todo apoio com qual pude contar. Espero, também, levar a amizade de alguns por toda a vida.

Agradeço ao professor Edson Guedes, pela chance de estágio a mim concedida. Agradeço por todo o conhecimento a mim repassado, que se mostrou bem maior que o esperado, e também por todos os incentivos à pesquisa e buscas ao conhecimento.

Agradeço também à toda equipe do Laboratório de Alta Tensão, pela paciência e apoio dados, em especial Valdemir, Jalberth, Eduardo, Adriano e Chico, pois sem eles este trabalho se tornaria impossível.

*“Caráter é aquilo que você faz
quando ninguém está vendo”.*

Epícuro.

RESUMO

Neste trabalho foi feito o projeto e a construção de um diodo de alta tensão para utilização em laboratório, com características elétricas e físicas específicas. Na sua construção também foi considerada a utilização do diodo como dispositivo sobressalente do kit de alta tensão disponível no Laboratório. O autor procurou utilizar uma metodologia de construção simples e eficaz, utilizando materiais de baixo custo e fáceis de encontrar, mas que garantissem a segurança operacional. O resultado foi um equipamento robusto e que atendeu aos requisitos desejados no projeto. Foram feitos ensaios de suportabilidade de tensão, aplicando-se 70 kV de pico; medições de corrente de carregamento, para duas cargas; e determinação do *ripple* na tensão contínua de saída do circuito. Os ensaios também foram realizados em outro diodo disponível, visando comparação dos resultados. Em alguns desses ensaios o diodo construído apresentou melhores resultados que o diodo já em uso.

Palavras-chave: Diodo. Alta Tensão. Projeto. Construção.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Diodo ideal: (a) símbolo; (b) característica $i - v$ (SMITH e SEDRA, 2007).	12
Figura 2 – Relação $i - v$ para um diodo real de silício (SMITH e SEDRA, 2007).	13
Figura 3 – Circuito RC: (a) Comum; (b) Com uma chave S (ADDF, 2013).	14
Figura 4 – Circuito RC (ADDF, 2013).	15
Figura 5 – Resposta ao degrau de um circuito RC (MUNDIM, 1999).	16
Figura 6 – Carga do capacitor em um circuito RC com resposta ao degrau (MUNDIM, 1999).	17
Figura 7 – Circuito RC com resposta natural (NILSSON e RIEDEL, 1999).	18
Figura 8 – Circuito retificador (COSTA, 2012a).	19
Figura 9 – Tensão no capacitor e no transformador em um circuito retificador (COSTA, 2012a).	20
Figura 10 – Circuito de Villard (COSTA, 2012a).	21
Figura 11 – Formas de onda para o circuito de Villard (COSTA, 2012a).	21
Figura 12 – Circuito de Greinacher (COSTA, 2012a).	22
Figura 13 – Tensões em um Circuito de Greinacher (COSTA, 2012a).	22
Figura 14 – Cascata de Greinachen (COSTA, 2012a).	23
Figura 15 – Vista das placas de nylon para fixação dos resistores e diodos: (a) Visão lateral mostrando o corte feito; (b) Visão frontal das placas já encaixadas.	26
Figura 16 – Arranjo interno do diodo: (a) Visão lateral; (b) Visão frontal.	27
Figura 17 – Fotografia dos diodos e resistores fixados as placas de nylon.	27
Figura 18 – Fotografias dos contatos metálicos utilizadas: (a) Anel de fixação; (b) Tampa; (c) Rosca de acoplamento.	28
Figura 19 – (a) Fotografia da argola metálica que trava o anel de fixação; (b) Fotografia do anel de fixação preso ao tubo de PVC.	28
Figura 20 – (a) Fotografia da conexão do circuito interno à tampa; (b) Tampa parafusada ao anel de fixação.	29
Figura 21 – (a) Fotografia da rosca de acoplamento; (b) Fotografia do diodo em um circuito.	29
Figura 22 – Esquema de ligação interna do diodo.	30
Figura 23 – Circuito RC equivalente.	30
Figura 24 – Circuito para ensaio de tensão suportável no diodo (COSTA, 2012c).	32
Figura 25 – Fotografia da mesa de comando com destaque para os medidores SM e GM.	33
Figura 26 – Tensões de pico e contínua para o ensaio com tensão direta (Adaptado de: COSTA, 2012a).	33
Figura 27 - Tensões de pico e contínua para o ensaio com tensão inversa (Adaptado de: COSTA, 2012a).	34
Figura 28 – Circuito para medição do <i>ripple</i> (COSTA, 2012c).	35
Figura 29 – Forma de onda sobre a carga de 10 M Ω , com tensão aplicada de 10 kV: (a) Diodo antigo; (b) Diodo novo.	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Quantidade e valor dos resistores utilizados.....	25
Tabela 2 – Resultado do ensaio com tensão direta.....	33
Tabela 3 – Resultado do ensaio com tensão inversa.	34
Tabela 4 – Valores dos ripples com aplicação de 10 kV.....	36
Tabela 5– Valores dos ripples com aplicação de 20 kV.....	37

SUMÁRIO

1	Introdução	11
1.1	Motivação	11
1.2	Objetivos	11
2	Revisão Bibliográfica	12
2.1	Diodos	12
2.2	Circuitos RC	14
2.2.1	Resposta ao Degrau	14
2.2.2	Resposta Natural	18
2.3	Geração de Alta Tensão Contínua	19
2.3.1	Circuito Retificador	19
2.3.2	Circuitos Multiplicadores	20
3	Metodologia	24
3.1	Material	24
3.1.1	Resistores	24
3.1.2	Diodos	25
3.1.3	Estrutura Mecânica	26
3.2	Métodos	29
4	Resultados	32
4.1	Tensão Suportável	32
4.2	Determinação do <i>Ripple</i>	34
5	Conclusões	38
	Referências Bibliográficas	39
	Apêndice A – Medidas dos Terminais Metálicos	40
	Anel de fixação	40
	Tampa	41
	Rosca de Acoplamento	42

1 INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO

O uso de diodos em experimentos, ensaios e ministração de aulas é uma prática frequente no Laboratório de Alta Tensão (LAT). Mas esse uso aliado à degradação natural do componente, acaba desgastando-o e alterando suas propriedades elétricas originais. Com isso, ao longo do tempo há uma necessidade de reposição dos componentes, adquirindo-se novos. Mas essa aquisição não é tão simples, pois além de ter que ser importado, há toda uma burocracia envolvida no processo e também há certa indisponibilidade. Com isso uma solução criativa é o projeto e construção de componentes no próprio Laboratório.

1.2 OBJETIVOS

Este trabalho busca projetar e construir um diodo para utilização em alta tensão, que seja capaz de suprir a necessidade do LAT. O autor tenta criar um componente com custo baixo, valor de *ripple* aceitável e que possua tensões de isolamento e reversa altas, podendo ser utilizado no Kit de Alta Tensão (KAT) do LAT.

O diodo também deve ter suas características avaliadas quanto à corrente suportável e o efeito audível resultante do efeito corona.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O diodo projetado nesse trabalho fará parte do KAT do LAT e será utilizado em conjunto com um capacitor de 10.000 pF, para geração de alta tensão contínua. Como o diodo deve possuir uma resistência interna, ao ser utilizado com o capacitor formarão um circuito RC com um tempo de carregamento específico, determinado pelo capacitor e a resistência do diodo. Com o intuito de fornecer o embasamento teórico, nesta seção, será feita uma abordagem geral sobre diodos, circuitos RC e geração de alta tensão contínua.

2.1 DIODOS

O diodo ideal pode ser considerado como o elemento não linear mais fundamental (SMITH e SEDRA, 2007). Ele funciona como uma chave, que abre quando submetida a uma tensão negativa em relação à referência da Figura 1, impedindo a circulação de corrente (estado conhecido como reversamente polarizado); e fecha quando submetida à tensão positiva, permitindo a passagem da corrente (diretamente polarizado).

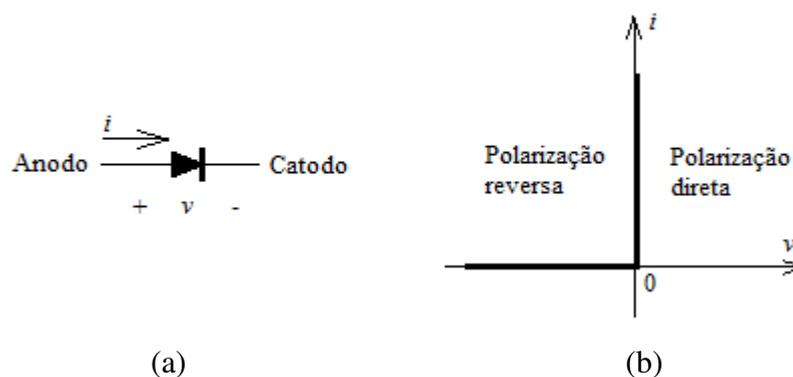


Figura 1 – Diodo ideal: (a) símbolo; (b) característica $i - v$ (SMITH e SEDRA, 2007).

Quando no estado de condução (diretamente polarizado), a queda de tensão no diodo ideal é zero, independente da corrente que o atravesse. No estado de corte (reversamente polarizado) a corrente que passa por ele será zero.

Na Figura 2 é mostrada a característica $i-v$ para um diodo real de silício (modelo utilizado neste trabalho). Diferente da curva do diodo ideal podem-se destacar três

regiões: polarização direta, onde a tensão v é positiva; polarização reversa, onde a tensão v é negativa; e região de ruptura, onde a tensão v é menor que o valor da tensão de ruptura.



Figura 2 – Relação $i - v$ para um diodo real de silício (SMITH e SEDRA, 2007).

Quando submetido a uma tensão reversa superior, em módulo, a V_{rup} , o diodo passa a operar na região de ruptura, conduzindo uma corrente reversa que aumenta rapidamente com um pequeno aumento na queda de tensão. Caso a potência dissipada no diodo, quando ele atua nessa região, seja limitada pelo circuito externo a ruptura não será destrutiva. Geralmente, a potência suportável é especificada no catálogo do fabricante.

Quando se tem uma tensão negativa sobre o diodo, porém, maior que o valor de ruptura, o diodo opera inversamente polarizado e nesse estado de operação circula uma corrente muito pequena, da ordem de 1 (um) nA. Apesar de a corrente inversa, como é conhecida, crescer com o aumento da temperatura, ainda sim ela é desprezível.

Segundo Smith e Sedra (2007), na região de polarização direta ou, simplesmente, região direta, o diodo opera com uma tensão v positiva, permitindo a passagem da corrente (corrente direta), como pode ser observado na Figura 2, e essa curva é aproximada por:

$$i = I_s(e^{\frac{v}{nV_T}} - 1), \quad (1)$$

onde I_s é conhecida como corrente de saturação ou corrente de escala [A], e é diretamente proporcional a secção transversal do diodo e à temperatura (dobrando de valor a cada aumento de 5° na temperatura). A tensão V_T também depende da

temperatura, sendo chamada tensão térmica, e para utilização em temperatura ambiente (20°C), seu valor é de $25,2\text{ mV}$. A constante n tem seu valor entre 1 e 2, dependendo do material e da estrutura física do diodo.

Outro fato importante quando da operação do diodo na região de condução, é que o valor da corrente direta é desprezivelmente pequena quando a tensão sobre ele é menor que $0,5\text{ V}$. Para valores de tensão entre $0,6$ e $0,8\text{ V}$, o diodo passa a ter uma "condução plena" de corrente, o que nos leva a ter uma queda de tensão de $0,7\text{ V}$ sobre o diodo real quando ele está conduzindo.

2.2 CIRCUITOS RC

Circuito RC é um circuito elétrico composto por um resistor e um capacitor, ligados em série ou paralelo, que podem ser alimentados por uma fonte (contínua ou variável) ou pela energia armazenada no capacitor. O circuito RC possui uma resposta de primeira ordem.

2.2.1 RESPOSTA AO DEGRAU

Na resposta ao degrau, o circuito RC utiliza uma fonte de tensão, no caso, contínua, como é observado na Figura 3(a). Para fins didáticos, adicionou-se uma chave ideal S ao circuito, como é observado na Figura 3(b). Também se considerou o capacitor inicialmente descarregado.

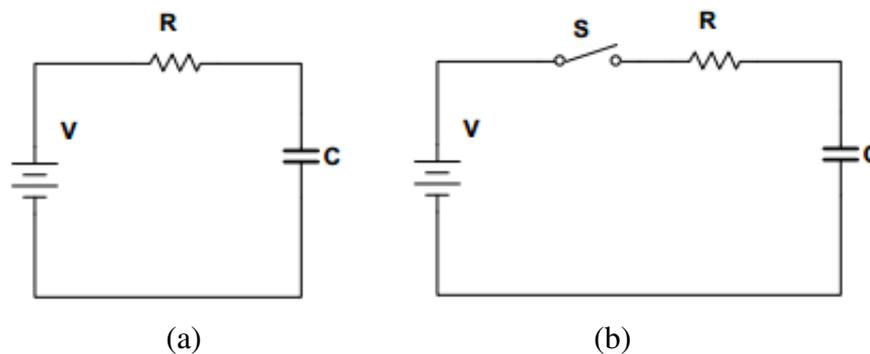


Figura 3 – Circuito RC: (a) Comum; (b) Com uma chave S (ADDF, 2013).

A partir do momento em que a chave S é fechada, uma corrente i começa a percorrer o circuito, havendo queda de tensão no resistor (V_R) e no capacitor (V_C). No momento do fechamento da chave a corrente i tem seu valor máximo, I_0 . Com o passar

do tempo, o capacitor carrega-se até V_C igualar-se a tensão da fonte, cessando a corrente. Assim, percebe-se que a corrente é função do tempo. Na Figura 4 podem-se observar as quedas de tensão no circuito.

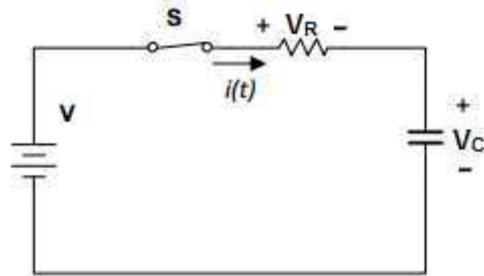


Figura 4 – Circuito RC (ADDF, 2013).

Utilizando-se a Lei de Kirchhoff para o circuito da Figura 4, tem-se a seguinte relação:

$$V = V_R + V_C, \quad (2)$$

onde as tensões no resistor e no capacitor são dadas, respectivamente, por

$$V_R = R \cdot i(t), \quad (3)$$

e

$$V_C = \frac{q(t)}{C} \quad (4)$$

sendo $q(t)$ a carga do capacitor em função do tempo [C]. Pode-se ter a carga também em função da corrente, pois tem-se:

$$i(t) = \frac{dq(t)}{dt}. \quad (5)$$

Substituindo as equações (3) e (4) em (2)

$$V = R \cdot i(t) + \frac{q(t)}{C}. \quad (6)$$

Então, como a tensão da fonte é constante, derivando a equação (6) obtém-se

$$0 = R \cdot \frac{di(t)}{dt} + \frac{1}{C} \cdot \frac{dq(t)}{dt} \quad (7)$$

Finalmente, substituindo (5) em (7) e fazendo algumas manipulações matemáticas, tem-se:

$$\frac{di(t)}{dt} = -\frac{1}{RC} \cdot i(t), \quad (8)$$

que é uma equação diferencial de primeira ordem (daí o fato de o circuito possuir resposta de primeira ordem) cuja solução é dada por

$$i = I_0 \cdot (e^{-t/\tau}) \quad (9)$$

em que $\tau = RC$ e é chamada constante de tempo do circuito [s] e I_0 é o valor da corrente no momento do fechamento da chave.

Substituindo-se o tempo por valores múltiplos de τ na Equação (9), percebe-se que a corrente decai exponencialmente para zero com o passar do tempo:

$$\underline{t = 0:} \quad i = I_0 \cdot e^0 = I_0;$$

$$\underline{t = \tau:} \quad i = I_0 \cdot e^{-1} = 0,37 \cdot I_0;$$

$$\underline{t = 2\tau:} \quad i = I_0 \cdot e^{-2} = 0,14 \cdot I_0;$$

$$\underline{t = 3\tau:} \quad i = I_0 \cdot e^{-3} = 0,05 \cdot I_0.$$

Assim, com um tempo equivalente a três constantes de tempo a corrente estará se aproximando de zero. Na Figura 5 é ilustrada a resposta do circuito ao degrau.

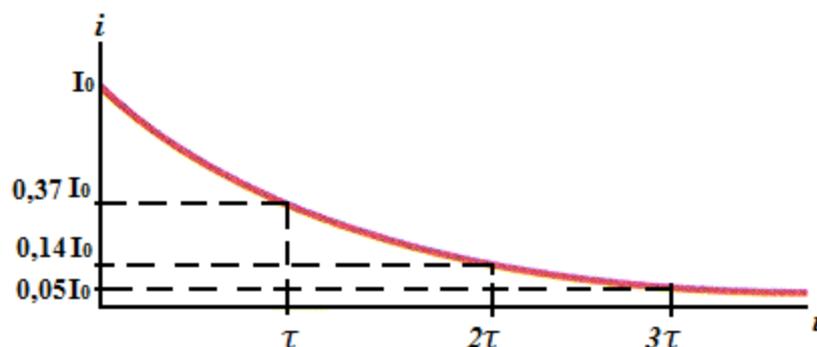


Figura 5 – Resposta ao degrau de um circuito RC (MUNDIM, 1999).

Para encontrar a relação da carga no capacitor, basta substituir (9) em (6), tendo

$$V = R \cdot I_0 \cdot \left(e^{-t/\tau} \right) + \frac{q(t)}{C}, \quad (10)$$

que após algumas manipulações matemáticas, estará da seguinte forma:

$$q = R \cdot C \cdot I_0 \left(\frac{V}{R \cdot I_0} - e^{-t/\tau} \right). \quad (11)$$

Como o capacitor não permite mudança brusca de tensão, no momento do fechamento da chave a tensão da fonte estará toda sobre o resistor, então:

$$V = R \cdot I_0. \quad (12)$$

No capacitor, a máxima carga (Q_{max}) ocorre quando a queda de tensão sobre ele é a mesma tensão V da fonte, logo:

$$Q_{max} = C \cdot V. \quad (13)$$

Por último, substituindo-se (12) e (13) em (11), tem-se:

$$q = Q_{max} \left(1 - e^{-t/\tau} \right). \quad (14)$$

Fazendo-se na Equação (14) as mesmas substituições feitas na Equação (9), trocando t por múltiplos da constante de tempo, tem-se agora a curva q versus t para o carregamento do capacitor, apresentada na Figura 6.

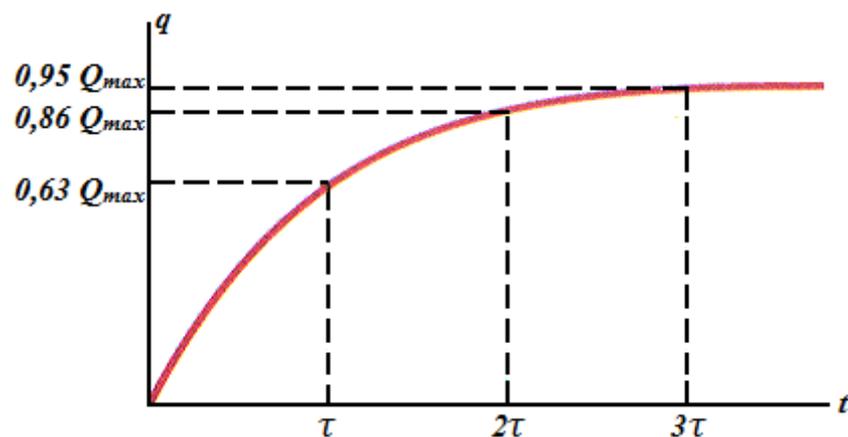


Figura 6 – Carga do capacitor em um circuito RC com resposta ao degrau (MUNDIM, 1999).

Pelo gráfico, percebe-se que após um tempo correspondente a três constantes de tempo, o capacitor estará praticamente carregado.

2.2.2 RESPOSTA NATURAL

De acordo com Alexander e Sadiku (2003) quando há desconexão repentina da fonte de um circuito RC, ele passa a apresentar uma resposta natural, ou seja, a carga armazenada anteriormente no capacitor irá alimentar o resistor, como se pode observar na Figura 7.

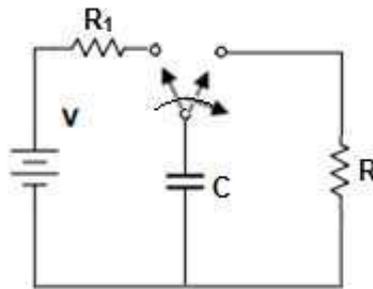


Figura 7 – Circuito RC com resposta natural (NILSSON e RIEDEL, 1999).

A análise do circuito RC à resposta natural pode ser feita através da tensão de nó. Utilizando o nó inferior como referencial, as correntes que irão percorrer os ramos do capacitor e do resistor deverão atender a Lei de Kirchhoff, logo:

$$C \frac{dv}{dt} + \frac{v}{R} = 0 \quad (15)$$

que é uma equação diferencial de primeira ordem, e assim como a Equação (8), terá uma resposta do formato da Equação (9), onde:

$$v(t) = v(0) \cdot e^{-t/RC}. \quad (16)$$

Mas, como a tensão inicial do capacitor é igual a da fonte:

$$v(0) = V = V_0, \quad (17)$$

então

$$v(t) = V_0 \cdot e^{-t/RC}. \quad (18)$$

Com a Equação (18), pode-se encontrar a corrente do circuito:

$$i(t) = \frac{v(t)}{R} = \frac{V_0}{R} e^{-t/RC} \quad (19)$$

que também pode ser dada por:

$$i(t) = I_0 \cdot e^{-t/RC}. \quad (20)$$

2.3 GERAÇÃO DE ALTA TENSÃO CONTÍNUA

Segundo Costa (2012a), a transmissão de energia elétrica em alta tensão contínua vem sendo bastante difundida, e com isso aumenta-se a importância da geração de tensão contínua em laboratório, pois neles podem ser feitos testes como o de isolamento de altas capacitâncias, avaliação de descargas, comportamento de dielétricos, etc. Ensaio e testes utilizando alta tensão contínua geralmente são mais baratos e convenientes, porém seus resultados diferem das condições normais de transmissão de corrente alternada.

Como uma das formas de gerar altas tensões contínuas é retificando a tensão alternada, nesta seção serão discutidas algumas formas de geração de tensão contínua em laboratório utilizando circuitos retificadores e multiplicadores.

2.3.1 CIRCUITO RETIFICADOR

Este circuito, também conhecido como retificador de meia onda, é o mais simples circuito retificador capaz de gerar alta tensão contínua (COSTA, 2012a). Como está mostrado na Figura 8, necessita-se apenas de um capacitor e um diodo para que haja retificação da tensão fornecida pelo transformador à carga (resistor).

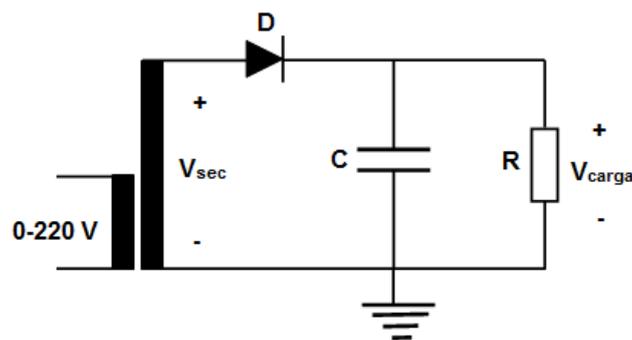


Figura 8 – Circuito retificador (COSTA, 2012a).

Durante o semiciclo positivo da tensão secundária do transformador (V_{sec}), o diodo D estará conduzindo e o capacitor será carregado até o valor de pico da tensão do secundário. Com o decaimento dessa tensão, o capacitor começa a descarregar-se e o diodo entrará em corte até que a tensão V_{sec} volte a ser maior que a tensão do capacitor (no próximo semiciclo positivo), assim, ele será novamente carregado. Esse processo pode ser visualizado na Figura 9.

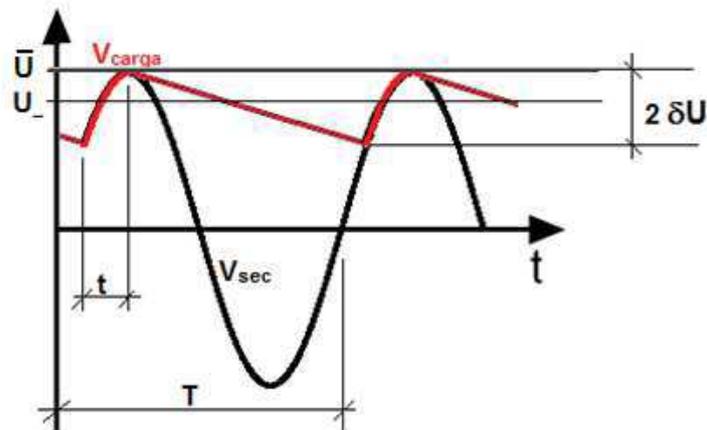


Figura 9 – Tensão no capacitor e no transformador em um circuito retificador (COSTA, 2012a).

Apesar do *ripple* ($2\delta U$) na tensão de saída, tem-se a tensão contínua U_- sobre a carga. Segundo Costa (2012a), convém observar que a curva exponencial segundo a qual o capacitor se descarrega pode ser substituída por uma reta se $t \ll T$ e $\delta U \ll U_-$. Quanto mais $R \rightarrow \infty \Omega$, mais a tensão \bar{U} será contínua, ou seja, o *ripple* será próximo de zero.

2.3.2 CIRCUITOS MULTIPLICADORES

a) Circuito de Villard

O Circuito de Villard pode ser construído a partir de um circuito retificador simples apenas trocando-se de posição o capacitor e o diodo, como é mostrado na Figura 10.

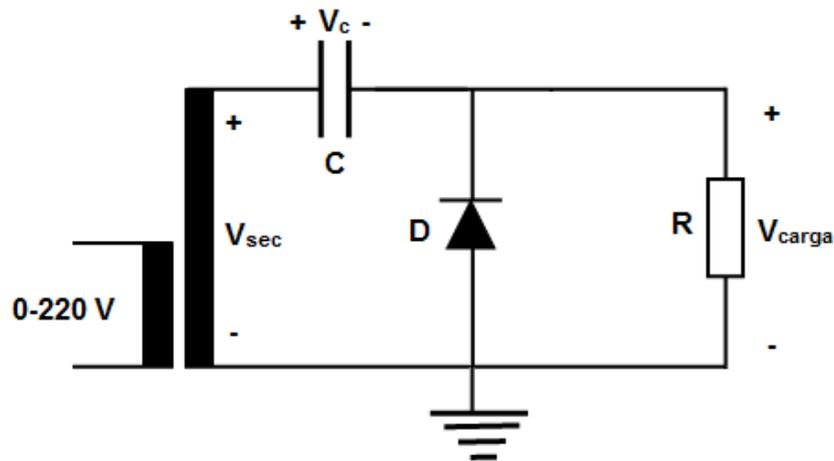


Figura 10 – Circuito de Villard (COSTA, 2012a).

Por questões didáticas, no início da análise do circuito de Villard deve-se imaginar a forma de onda da tensão do transformador (V_{sec}) iniciando-se pelo ciclo negativo. Isso fará o diodo conduzir e o capacitor carregar-se com uma tensão, em módulo, igual a tensão do transformador, mas com polaridade invertida em relação ao referencial de V_C mostrado na Figura 10. O carregamento do capacitor irá ocorrer até V_{sec} chegar ao seu máximo valor negativo. Quando a tensão no secundário do transformador começar a subir, a tensão na carga será a soma das tensões do transformador e do capacitor. Em caso de uma carga com impedância infinita, a tensão sobre ela poderá ser dobrada em relação à tensão do transformador. Na Figura 11 têm-se as formas de onda comentadas.

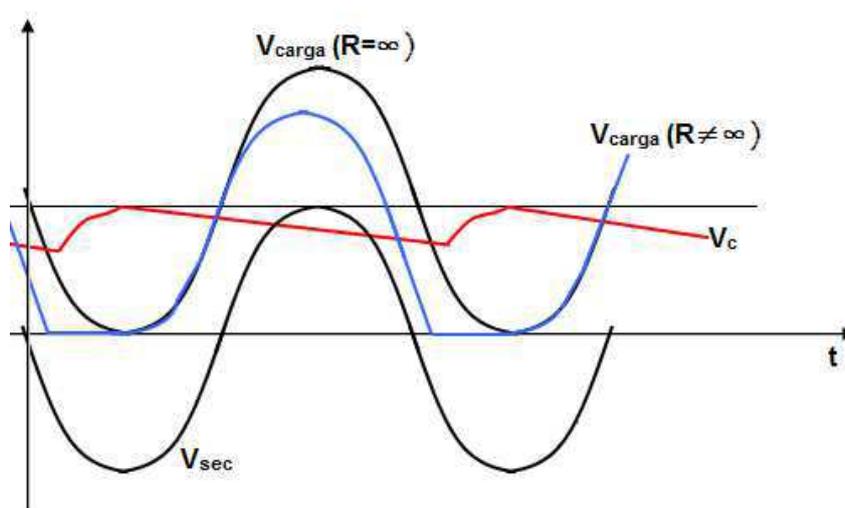


Figura 11 – Formas de onda para o circuito de Villard (COSTA, 2012a).

b) Circuito de Greinacher

De acordo com Costa (2012a), o Circuito de Greinacher é uma extensão do Circuito de Villard, onde se acrescenta mais um retificador, permitindo assim a conexão de um capacitor. Sua composição é mostrada na Figura 12.

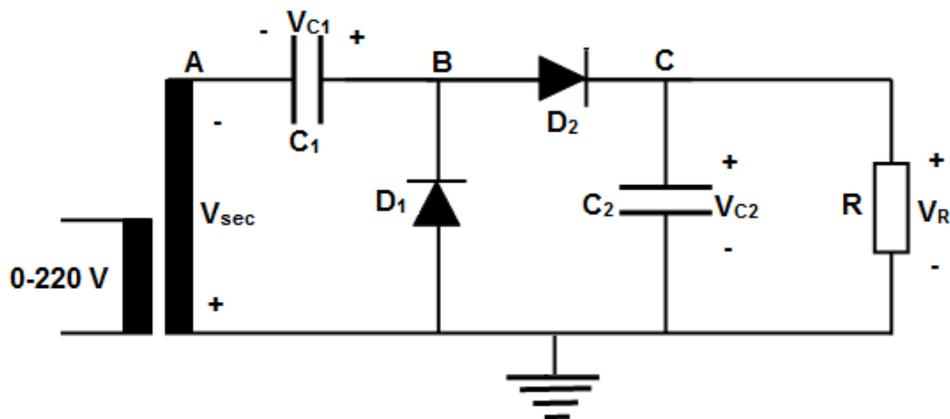


Figura 12 – Circuito de Greinacher (COSTA, 2012a).

Supondo a tensão máxima de V_{sec} como sendo U volts e novamente essa forma de onda iniciando-se pelo ciclo negativo, tem-se o funcionamento do circuito: quando V_{sec} chega a seu máximo valor negativo, o nó A terá uma tensão U , ou seja, C_1 estará carregado com a tensão do transformador e a polaridade indicada por V_{C1} . Com o crescimento de V_{sec} para zero e depois pra U , o potencial do nó B irá crescer para $2U$. Nesse momento, o potencial de B será maior que o de C , então o capacitor C_1 irá descarregar em C_2 , fazendo sua tensão chegar a $2U$. Com ajuda da Figura 13 pode-se compreender melhor o processo.

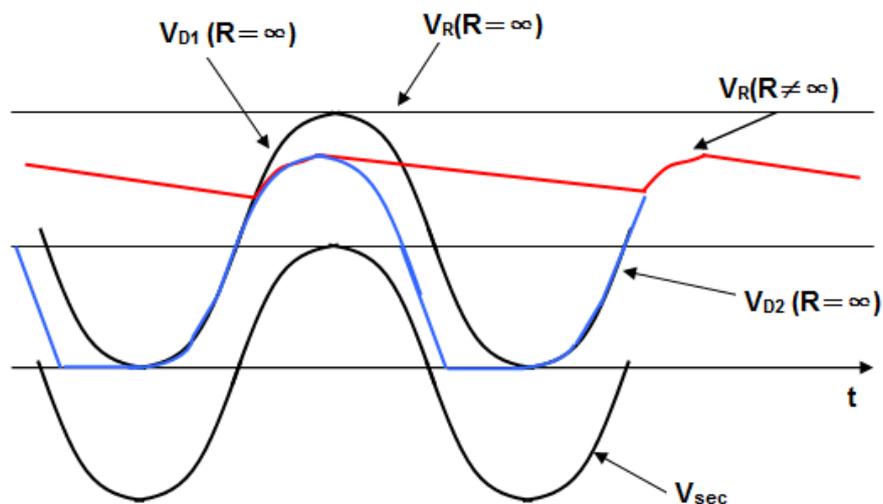


Figura 13 – Tensões em um Circuito de Greinacher (COSTA, 2012a).

c) Cascata de Greinacher

Segundo Costa (2012a), a Cascata de Greinacher é uma extensão do Circuito de Greinacher e é o mais importante arranjo para geração de altas tensões contínuas, pois com ele pode-se dobrar a tensão do transformador alimentador diversas vezes, dependendo apenas dos componentes disponíveis e de seus níveis de isolamento. A Figura 14 mostra seu circuito.

Observando a Figura 14, percebe-se que a cascata possui quatro estágios, onde cada um é composto por dois diodos e dois capacitores. O primeiro estágio nada mais é do que um Circuito de Greinacher comum, assim, o capacitor C_1 se carregará com tensão U e com o aumento da tensão V_{sec} o nó F terá tensão $2U$. Conseqüentemente, o nó D terá uma tensão fixa de $2U$.

De acordo com Kuffel, Zaengl e Kuffel (2000), através do diodo 3, a tensão no nó D será aplicada ao capacitor C_3 , que já possui carga de $2U$, ficando com potencial de $4U$. Essa tensão de $2U$ sobre C_3 irá carregar o capacitor C_4 (assim, C_4 possui $2U$ de tensão a mais que C_2 e $4U$ de potencial em relação a terra). Esse processo ocorrerá nos próximos dois estágios, fazendo com que C_2 , C_4 , C_6 e C_8 tenham respectivamente $2U$, $4U$, $6U$ e $8U$ em relação a terra.

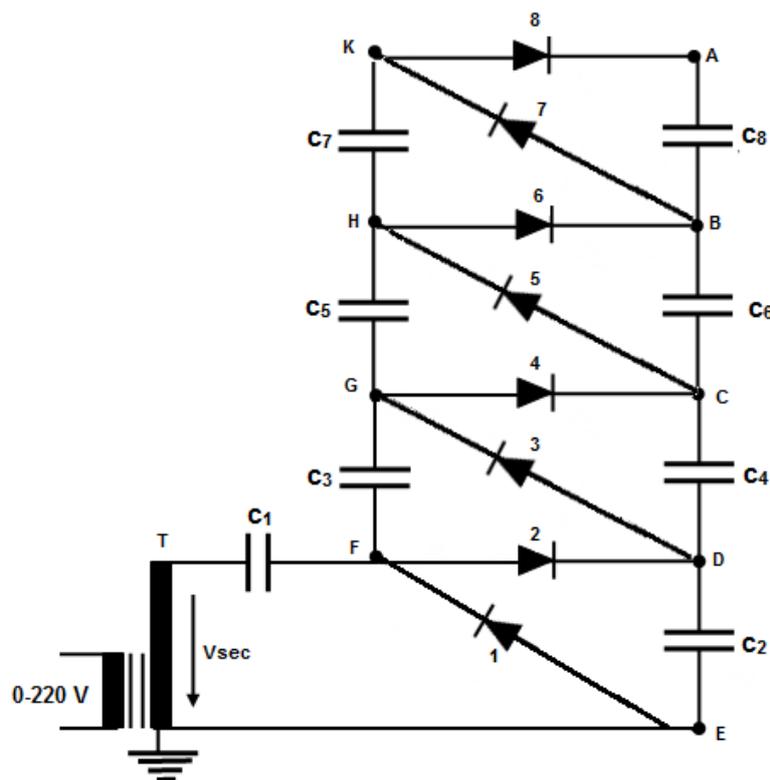


Figura 14 – Cascata de Greinachen (COSTA, 2012a).

3 METODOLOGIA

Nesta seção são mostrados os materiais e os componentes utilizados na construção do diodo e os métodos empregados. Também serão feitos os cálculos para determinação dos componentes necessários às características elétricas desejadas.

Como o diodo está sendo projetado para utilização no KAT do LAT, deve possuir o mesmo padrão físico dos componentes do Kit. Ou seja, deve ter uma forma cilíndrica, com comprimento de 58 cm e terminais de encaixe idênticos aos dos outros componentes.

Daqui em diante, quando o texto mencionar diodo estará se referindo ao diodo de alta tensão desenvolvido no trabalho; do contrário, será explicitado quando se a referir a diodo de sinal.

3.1 MATERIAL

3.1.1 RESISTORES

Os resistores foram escolhidos de forma que a soma de suas resistências dê o mais próximo possível de $1,67 \text{ M}\Omega$ (que seria o valor ideal). Outra necessidade quanto à escolha da quantidade, é que o número de resistores deve ser igual ao número de diodos de sinal, e como cada diodo de sinal suporta até 1 kV reverso, conclui-se que se deve utilizar em torno de 140 diodos para que a tensão reversa desejada seja garantida.

Dividindo-se, então, o valor da resistência necessária pelo número de resistores, deveriam ser utilizados 140 resistores de $12 \text{ k}\Omega$ cada. Mas, buscando minimizar os efeitos do campo elétrico, utilizaram-se três valores diferentes de resistências e, além dos resistores de $12 \text{ k}\Omega$, utilizou-se $10 \text{ k}\Omega$ e $15 \text{ k}\Omega$, pois foram os valores imediatamente acima e abaixo encontrados no mercado, e todos com potência de 1 W . Uma combinação encontrada para se chegar à resistência desejada com um número fixo de resistores é mostrada na Tabela 1.

Tabela 1 – Quantidade e valor dos resistores utilizados.

Resistência (k Ω)	Quantidade	Resistência equivalente (M Ω)
10	52	0,52
12	51	0,612
15	33	0,495

Com a associação em série dos resistores (alternadamente aos diodos de sinal) obtém-se uma resistência equivalente de 1,627 M Ω , que é um valor aceitável, utilizando-se 136 resistores. Nessa associação, todos os resistores de 10 k Ω foram colocados mais próximos ao anodo do diodo, em seguida foram colocados os resistores de 12 k Ω e por último os resistores de 15 k Ω , mais próximos ao catodo. Essa distribuição dos resistores foi feita para que a distribuição da tensão ocorra com menor intensidade no lado do anodo e com maior intensidade do lado do catodo, de forma que os efeitos causados pelo campo elétrico sejam melhor distribuídos.

Mas essa distribuição da tensão não será eficaz em caso de inversão da polaridade do diodo, pois ocorrendo essa inversão a tensão ficará mais acumulada no catodo, aumentando os estresses causados pelo campo elétrico nessa região (quando comparado ao caso do diodo polarizado diretamente). Quanto a isso, dever-se-ia confeccionar dois diodos: um para utilização com polarização direta e outro para utilização com polarização reversa.

3.1.2 DIODOS

Utilizando-se Centelhas (2013) as características elétricas de alguns diodos comerciais foram analisadas e o diodo de sinal escolhido é do tipo 1N4007, utilizado para retificadores de uso geral, capaz de suportar uma tensão inversa máxima de 1 kV. Por ele pode passar normalmente uma corrente direta de até 1 A, sem danificá-lo. A corrente de fuga reversa é de 5 μ A, a temperatura de 25°C, podendo chegar a 50 μ A em 100°C.

Para montagem do circuito interno do diodo foi feito um arranjo série ligando-se os diodos de sinal alternadamente com os resistores. Como foram utilizados 136 resistores, conseqüentemente, também foram utilizados 136 diodos de sinal.

3.1.3 ESTRUTURA MECÂNICA

Buscando manter o padrão físico dos outros elementos do Kit de Alta Tensão, utilizou-se como invólucro para os componentes do diodo, um cano de PVC (utilizado em instalações hidráulicas) com comprimento de 58 cm, diâmetro interno de 97,7 mm e 7 mm de espessura.

Os diodos de sinal foram soldados alternadamente aos resistores (ver Figura 22) formando um circuito com cerca de 8 m de comprimento, que será o circuito interno do diodo de alta tensão. A soldagem foi feita utilizando-se solda branca.

Para que esse circuito pudesse ser colocado no interior do cano de PVC, utilizaram-se duas placas flexíveis de nylon de 530 mm x 93 mm, com um corte de aproximadamente 3 mm de espessura no centro de cada placa (o corte foi feito para as placas encaixarem-se uma na outra), como é mostrado na Figura 15(a). As placas devem ser encaixadas perpendicularmente uma a outra. Na Figura 15(b), tem-se uma visão frontal das placas após serem encaixadas.

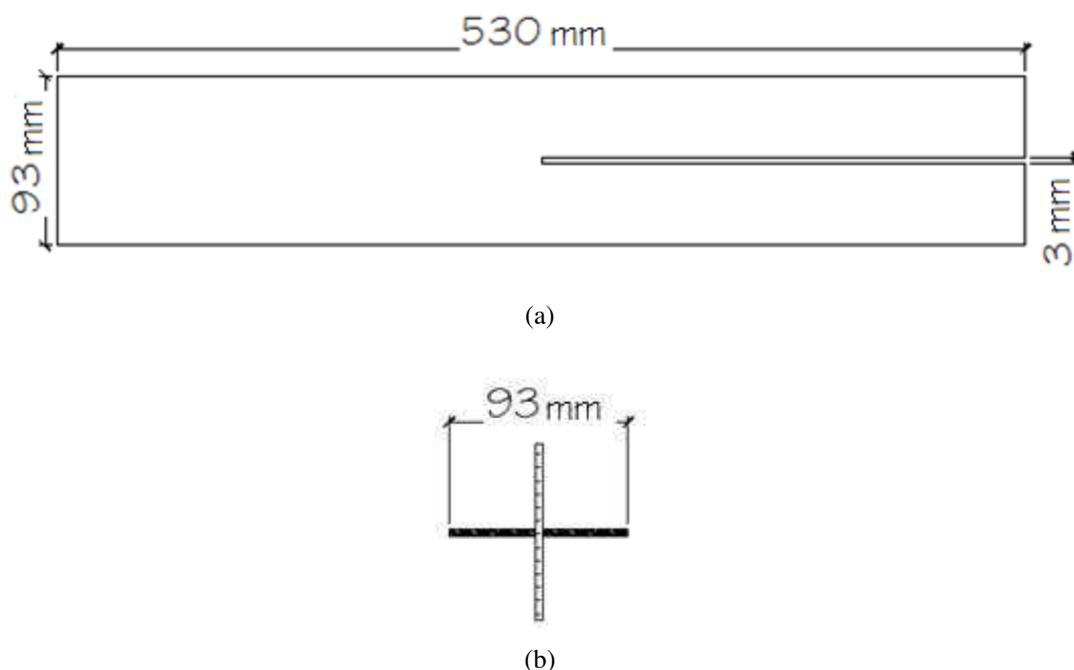


Figura 15 – Vista das placas de nylon para fixação dos resistores e diodos: (a) Visão lateral mostrando o corte feito; (b) Visão frontal das placas já encaixadas.

Devido seu tamanho, o circuito interno foi fixado de forma helicoidal à estrutura formada com as placas. Considerando que a rigidez dielétrica do ar, em campos uniformes, é de aproximadamente 28 kV/cm, utilizou-se de um espaçamento de 5 mm de uma volta para outra. Na Figura 16 tem-se o arranjo a ser montado e na Figura 17 uma fotografia do arranjo pronto.

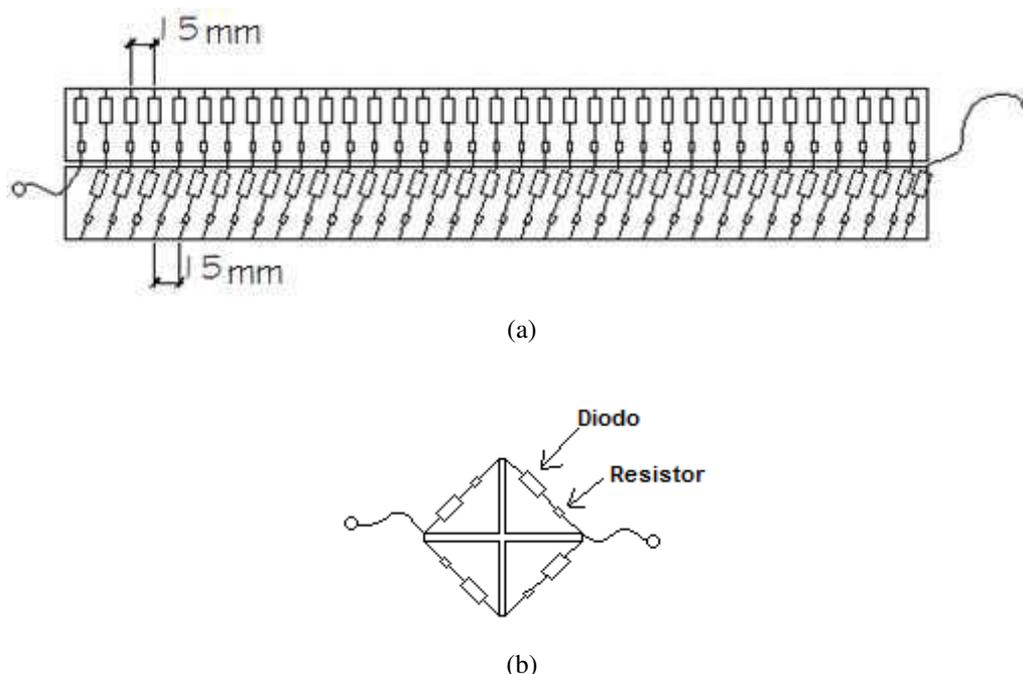


Figura 16 – Arranjo interno do diodo: (a) Visão lateral; (b) Visão frontal.

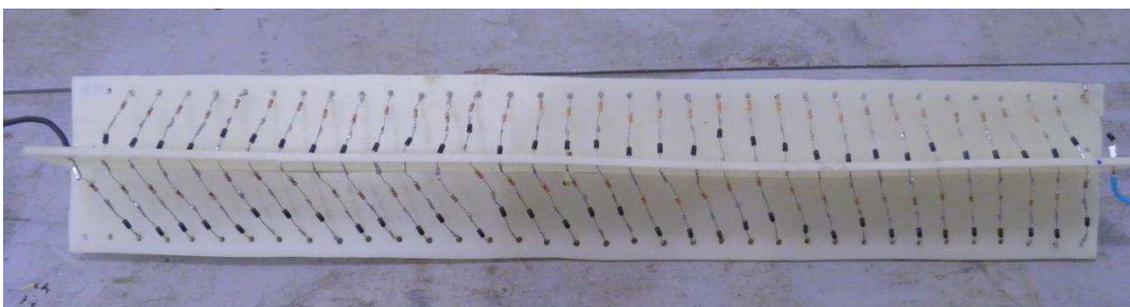


Figura 17 – Fotografia dos diodos e resistores fixados as placas de nylon.

Para fixação das placas de nylon no interior do tubo foram utilizados terminais metálicos que servirão tanto para fazer o contato elétrico como para fechar o diodo. Os terminais foram reproduzidos a partir dos componentes já disponíveis no Kit e foram utilizados três tipos de terminais, mostrados na Figura 18.

Para melhor entendimento, os terminais mostrados na Figura 18(a), (b) e (c) serão chamados, respectivamente, de anel de fixação, tampa e rosca de acoplamento. Seus desenhos com as respectivas medidas são mostrados no Apêndice A.

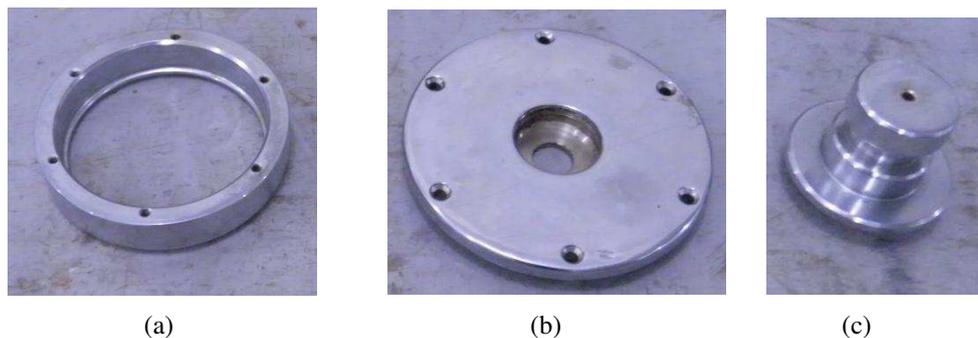


Figura 18 – Fotografias dos contatos metálicos utilizadas: (a) Anel de fixação; (b) Tampa; (c) Rosca de acoplamento.

Em cada extremidade do tubo de PVC foi feita uma ranhura para encaixe de uma argola metálica (mostrada na Figura 19(a)) que serve para travar o anel de fixação. Assim, a argola é presa ao tubo por meio da ranhura e trava o anel de fixação, como se observa na Figura 19(b) (na fotografia não é possível visualizar a argola metálica, pois ela prende-se ao tubo por baixo do anel de fixação).



Figura 19 – (a) Fotografia da argola metálica que trava o anel de fixação; (b) Fotografia do anel de fixação preso ao tubo de PVC.

Depois de colocar as placas dentro do tubo o circuito interno foi ligado eletricamente às tampas, que serão parafusadas aos anéis de fixação para fechar o diodo. Na Figura 20(a) é mostrada uma fotografia dessa ligação em uma das extremidades. Na Figura 20(b) é mostrada uma fotografia da tampa já parafusada ao anel de fixação.

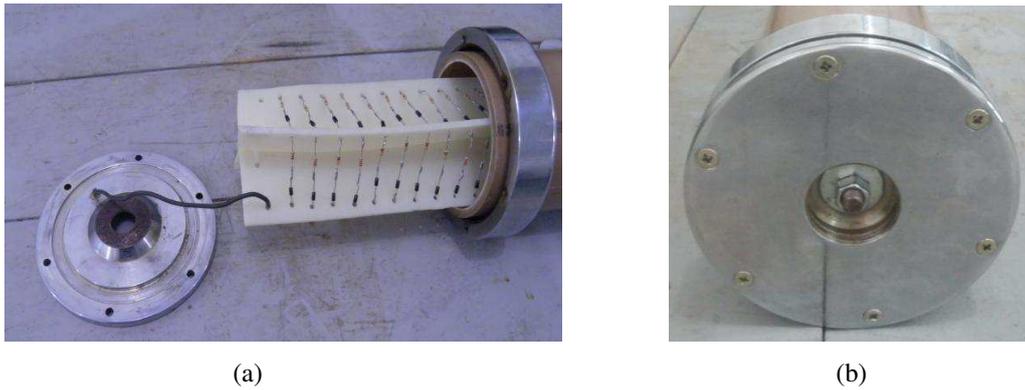


Figura 20 – (a) Fotografia da conexão do circuito interno à tampa; (b) Tampa parafusada ao anel de fixação.

Por último, a rosca de acoplamento deve ser rosqueada ao orifício da tampa, como é mostrado na Figura 21(a). A rosca servirá para que o diodo possa ser encaixado nos outros equipamentos do Kit, como se percebe na Figura 21(b). Com isso, o diodo está finalmente pronto para ser testado.

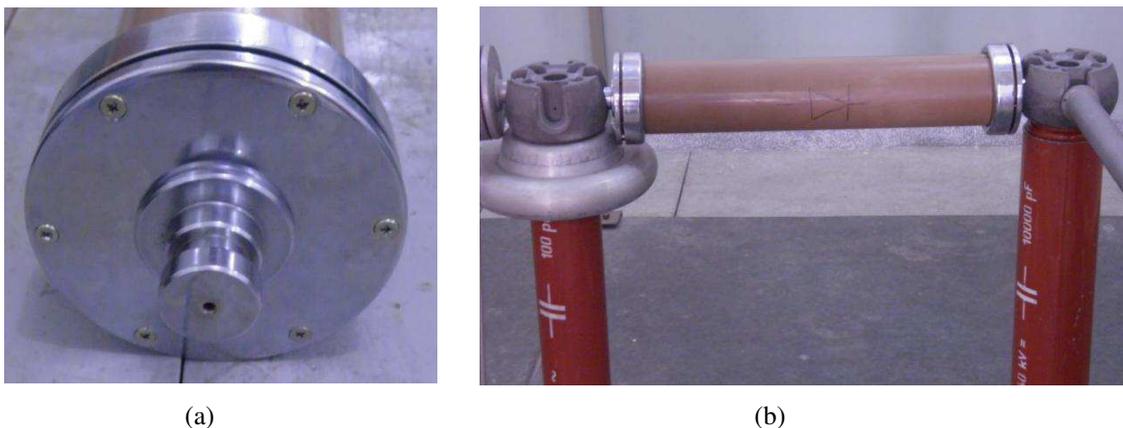


Figura 21 – (a) Fotografia da rosca de acoplamento; (b) Fotografia do diodo em um circuito.

3.2 MÉTODOS

O diodo projetado será utilizado em conjunto com um transformador (tensão eficaz de 100 kV) e um capacitor de 10.000 pF que deve ser carregado em 50 ms, para que o *ripple* formado não seja muito grande. Para isso, o diodo deve possuir uma resistência interna, formando um circuito RC. Além disso, a resistência do diodo também serve como limitação da corrente do circuito, protegendo a fonte, e para distribuir o potencial elétrico de forma mais uniforme.

O diodo de alta tensão foi construído utilizando-se diodos de sinal e resistores ligados em série (como é mostrado na Figura 22), de modo que os diodos de sinal sejam capazes de suportar a tensão reversa e os resistores dissipem a potência.

Como o diodo deve suportar uma tensão reversa igual à tensão gerada pelo transformador do Kit (140 kV, valor máximo) os diodos de sinal serão utilizados para dividir as solicitações elétricas da tensão entre si. Portanto, como cada diodo de sinal suporta uma tensão reversa de até 1 kV, devem ser utilizados 140 diodos (mais a frente, será definido o valor exato).

Admitindo-se o capacitor carregado com 95% de sua carga máxima (como mostrado na Seção 2.2), será preciso um tempo de carregamento equivalente a três constantes de tempo do circuito. Assim,

$$3 \cdot \tau = 50 \cdot 10^{-3}, \quad (21)$$

sendo $\tau=RC$ e o capacitor tendo seu valor definido, a resistência equivalente do diodo deve ser:

$$R = 1,67 \text{ M}\Omega.$$

Para se chegar a esse valor, deve-se utilizar uma associação série de resistores (que devem possuir valores de resistência o mais próximo possível para que a potência seja dissipada uniformemente) e diodos de sinal, como é mostrado na Figura 22.

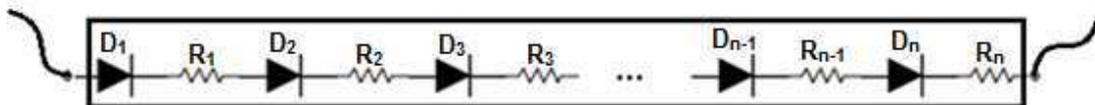


Figura 22 – Esquema de ligação interna do diodo.

O diodo irá formar, junto com o capacitor e o transformador, um circuito equivalente a um circuito RC, como é mostrado na Figura 23.

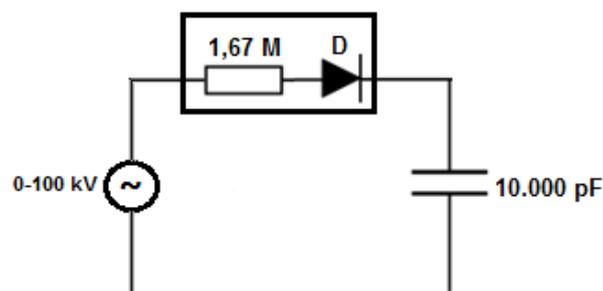


Figura 23 – Circuito RC equivalente.

Com o circuito mostrado na Figura 23, pode-se calcular a corrente máxima que do circuito. Para isso, primeiro deve-se encontrar a reatância do capacitor

$$X_c = \frac{1}{\omega C} = 265 \text{ k}\Omega. \quad (22)$$

A impedância complexa, portanto, será:

$$Z = 1,67 \cdot 10^6 + j \cdot 265 \cdot 10^3, \quad (23)$$

cujo módulo é dado por:

$$|Z| = 1,69 \text{ M}\Omega. \quad (24)$$

Assim, a corrente máxima é

$$I_{max} = \frac{100 \text{ kV}}{|Z|} = 59,1 \text{ mA}. \quad (25)$$

4 RESULTADOS

A fim de verificar a suportabilidade de tensão do diodo e avaliar seu desempenho, foram realizados três ensaios de tensão aplicada. Em dois deles foram aplicadas tensões alternadas positivas e negativas, para determinar a tensão reversa suportável e no último ensaio, determinou-se o *ripple* na tensão de saída do retificador.

4.1 TENSÃO SUPORTÁVEL

Para verificar a máxima tensão suportável pelo diodo, montou-se o circuito mostrado na Figura 24, aplicando uma tensão alternada sobre ele e medindo a tensão contínua na saída do circuito. Para medição da tensão na entrada foi utilizado um divisor capacitivo. Esse divisor possui um medidor SM (ver Figura 25) que por sua vez estava defeituoso. Para contornar o defeito, foi ligado um osciloscópio a saída SM, acessível na mesa de comando mostrada na Figura 25. Com o divisor resistivo mediu-se, em GM, a tensão contínua de saída. Os resultados do ensaio são dados na Tabela 2.

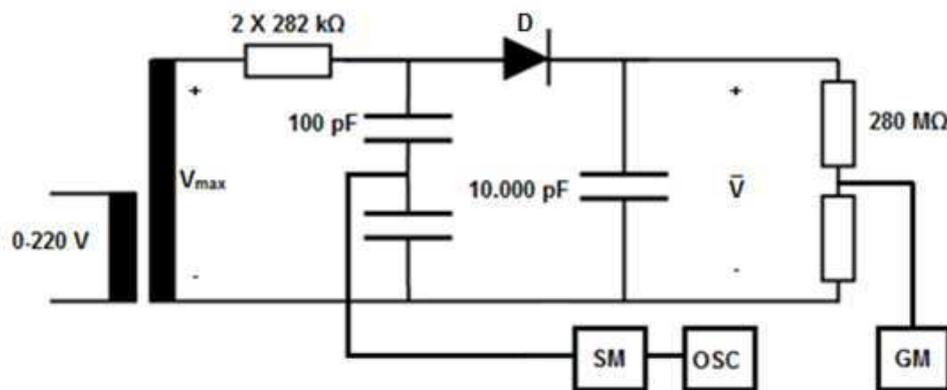


Figura 24 – Circuito para ensaio de tensão suportável no diodo (COSTA, 2012c).

Também foram feitos os cálculos das tensões contínuas esperadas (V_{esp}) considerando-se a resistência interna do diodo. Com as tensões V_{esp} e \bar{V} os erros percentuais das tensões de saída do circuito em relação às respectivas tensões esperadas foram calculados e estão mostrados nas tabelas.



Figura 25 – Fotografia da mesa de comando com destaque para os medidores SM e GM.

Tabela 2 – Resultado do ensaio com tensão direta.

Tensão aplicada (alternada)		V_{esp} (kV)	Tensão medida (contínua)	Erro (%)
V_{RMS} (kV)	V_{max} (kV)		\bar{V} (kV)	
10,0	14,1	14,0	12,0	14,4
20,0	28,2	28,0	24,0	14,4
30,0	42,4	42,2	36,0	14,6
40,0	56,5	56,0	48,0	14,6
50,0	70,7	70,3	62,0	11,8

A Figura 26 ilustra o resultado do ensaio para uma tensão aplicada eficaz de 50 kV. Quando a tensão do transformador (V_{max}) estiver no semiciclo negativo, o diodo estará em corte, logo, durante este semiciclo o diodo será submetido a uma tensão máxima $V_{\text{sup,max}}$. No momento em que a tensão do transformador está em seu máximo negativo, a tensão $V_{\text{sup,max}}$ será aproximadamente 130 kV, ou seja, a máxima tensão inversa medida sobre o diodo foi de 130 kV.

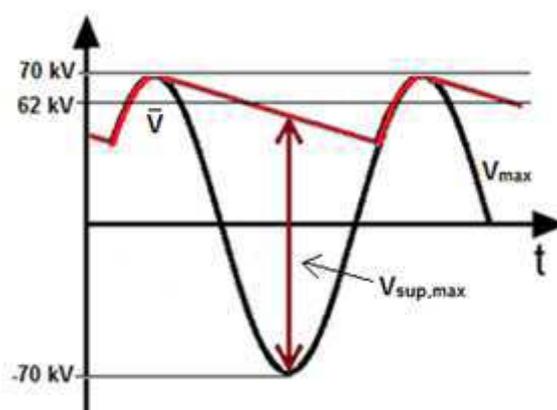


Figura 26 – Tensões de pico e contínua para o ensaio com tensão direta (Adaptado de: COSTA, 2012a).

Invertendo-se a posição do diodo no circuito da Figura 24 e refazendo o ensaio, têm-se os resultados mostrados na Tabela 3. Desse modo, o diodo será submetido a sua máxima tensão quando a tensão do transformador estiver em seu semiciclo positivo. Refazendo a curva da Figura 26 para o ensaio com o diodo invertido, a tensão inversa máxima aplicada será negativa ($V_{sup,min}$), como mostrado na Figura 27.

Tabela 3 – Resultado do ensaio com tensão inversa.

Tensão aplicada (alternada)		$-V_{esp}$ (kV)	Tensão medida (contínua)	Erro (%)
V_{RMS} (kV)	V_{max} (kV)		$-\bar{V}$ (kV)	
10,0	14,1	14,0	12,0	14,4
20,0	28,2	28,0	24,0	14,4
30,0	42,4	42,2	36,0	14,6
40,0	56,5	56,0	48,0	14,6
50,0	70,7	70,3	62,0	11,8

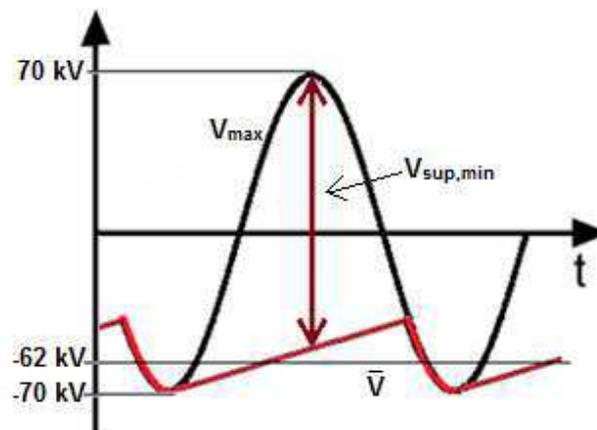


Figura 27 - Tensões de pico e contínua para o ensaio com tensão inversa (Adaptado de: COSTA, 2012a).

Analogamente a análise feita para a curva da Figura 26, conclui-se que a tensão máxima reversa aplicada ao diodo foi de -130 kV.

4.2 DETERMINAÇÃO DO RIPPLE

Para determinação do *ripple* (δ) na tensão de saída, montou-se o circuito da Figura 28, onde foram utilizadas duas resistências como carga: $10\text{ M}\Omega$ e $\infty\ \Omega$ (terminais

abertos). Em cada carga aplicaram-se duas tensões contínuas (10 e 20 kV), medidas na saída do divisor resistivo, GM. Com um osciloscópio ligado a saída SM, do divisor capacitivo, adquiriram-se as formas de onda na carga, pois com essas formas de onda pode-se determinar o valor do *ripple*.

Como meio de comparação, o mesmo ensaio também foi realizado com um diodo já disponível no Kit de Alta Tensão. Nos resultados a seguir o diodo projetado será denominado "diodo novo" (DN), enquanto o diodo já utilizado no Kit será chamado "diodo antigo" (DA).

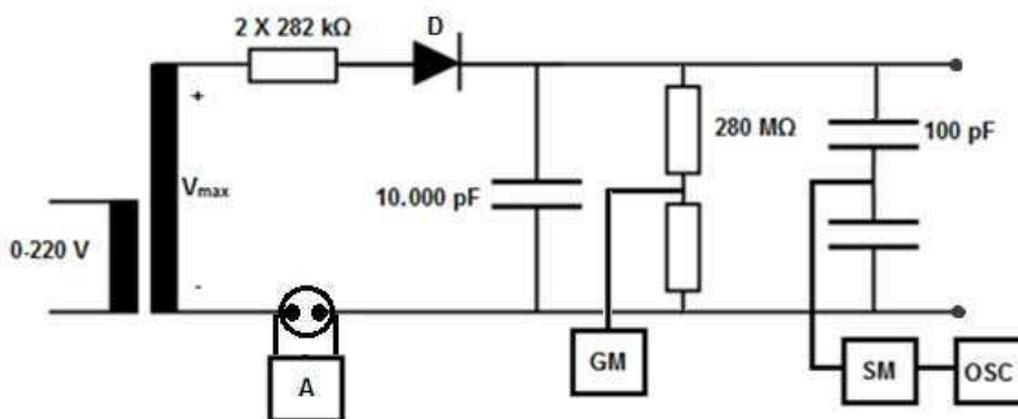
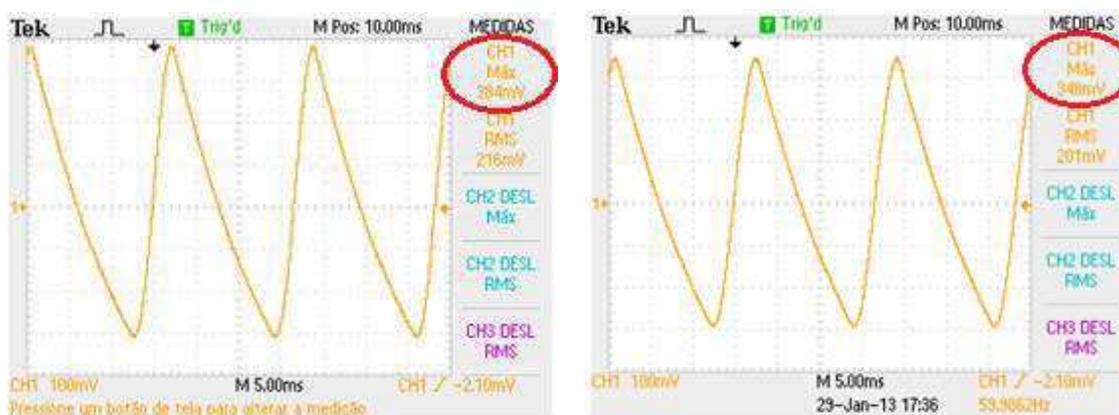


Figura 28 – Circuito para medição do *ripple* (COSTA, 2012c).

O valor do *ripple* é obtido através da forma de onda adquirida no osciloscópio, pois ela mostra a variação da tensão c.c. na carga. Como foram adquiridas muitas formas de onda, serão mostradas apenas as curvas referentes à tensão de 10 kV com carga de 10 MΩ, para os dois diodo (Figura 29). Os outros valores dos *ripples* são dados diretamente na Tabela 4.



(a)

(b)

Figura 29 – Forma de onda sobre a carga de 10 MΩ, com tensão aplicada de 10 kV: (a) Diodo antigo; (b) Diodo novo.

Na figura anterior, os valores circulados em vermelho representam o valor do *ripple* para cada diodo ensaiado, porém, o valor está atenuado da relação do divisor capacitivo, que é de 1917,63. Assim, os valores destacados devem ser multiplicados pelo fator de atenuação para que se tenha o valor real do *ripple*. Na Tabela 4 são dados todos os valores reais dos *ripples* para as duas cargas utilizadas.

Para medição da corrente foi utilizado um microamperímetro A (Figura 28) ligado em paralelo a um centelhador. O centelhador funcionará como proteção, não permitindo que o instrumento seja submetido a altas tensões.

Tabela 4 – Valores dos ripples com aplicação de 10 kV.

	Diodo antigo		Diodo novo	
	I (μA)	δ (V)	I (μA)	δ (V)
10 MΩ	975,0	736,4	1000,0	667,4
∞ Ω	37,0	56,0	37,0	38,4

Pelos dados da tabela percebe-se que com o aumento da impedância da carga, o *ripple* tende a diminuir consideravelmente, confirmando o que foi dito na Seção 2.3.1. Para o diodo novo, tem-se a tensão do *ripple* em porcentagem da tensão contínua na carga.

- R = 10 MΩ: $\delta_{\%} = \frac{667,4 V}{10 kV} \cdot 100\% = 6,67\%$
- R = ∞ Ω: $\delta_{\%} = \frac{38,4 V}{10 kV} \cdot 100\% = 0,38\%$

Mudando a tensão aplicada para 20 kV, tem-se o valor real do *ripple* e da corrente, para cada carga, mostrados na Tabela 5.

Tabela 5– Valores dos ripples com aplicação de 20 kV.

	Diodo antigo		Diodo novo	
	I (μA)	δ (V)	I (μA)	δ (V)
10 MΩ	1405,0	1442,1	1574,0	1288,6
∞ Ω	70,0	104,3	70,0	69,8

Calculando novamente o *ripple* em porcentagem da tensão contínua para a tensão aplicada de 20 kV, no diodo novo, tem-se:

- R = 10 MΩ: $\delta_{\%} = \frac{1288,6 V}{20 kV} \cdot 100\% = 6,40\%$
- R = ∞ Ω: $\delta_{\%} = \frac{69,8 V}{20 kV} \cdot 100\% = 0,35\%$

Analisando os valores percentuais dos *ripples* para os dois ensaiados percebe-se que, com uma mesma carga, esse valor foi mantido independente da tensão aplicada. Essa proporcionalidade do *ripple* reforça a linearidade da polarização direta do diodo.

Além disso, para os dois diodos a taxa de aumento no valor absoluto do *ripple* manteve-se quando a tensão foi aumentada de 10 kV para 20 kV.

5 CONCLUSÕES

Para construção do diodo foi utilizada uma metodologia simples e eficiente, o que permitiu que ele fosse confeccionado a um baixo custo financeiro (não ultrapassando R\$ 400,00). Além disso, nos testes realizados ele apresentou tensões de isolamento e reversa altas, *ripple* (na tensão contínua) aceitável e foi capaz de suportar as correntes a quais foi submetido. Assim, conclui-se que os requisitos desejados inicialmente foram atendidos e que o componente foi construído de forma a poder ser utilizado como parte do Kit de Alta Tensão.

Nos ensaios de tensão suportável o diodo mostrou boa isolação, suportando tensão inversa máxima de 130 kV. Os efeitos audíveis do efeito Corona não se mostraram relevantes.

Os circuitos que utilizaram o diodo construído no trabalho registraram menores valores nos ensaios para determinação do *ripple* e, independente da tensão aplicada, o *ripple* percentual (em relação a tensão de saída) manteve-se o mesmo para todos os ensaios utilizando esse diodo.

Para os dois diodos ensaiados houve uma mesma taxa de aumento no valor absoluto do *ripple* da tensão de saída quando, em um mesmo ensaio, a tensão foi aumentada de 10 kV para 20 kV.

Como se era esperado, nos ensaios em que houve medição de corrente, verificou-se que essa grandeza elétrica era determinada principalmente pela carga, e por terem sido bem pequenas, não foram capazes de danificar sua estrutura física nem alterar suas características elétricas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADDF. Associação para o Desenvolvimento do Departamento de Física. **Transitório em Circuitos**, 2013. Disponível em: <http://victoria.fis.uc.pt/ppessoais/correia/Aulas-BEBM/Regime_Transit%C3%B3rio.pdf>. Acesso em: 25 Janeiro 2013.

ALEXANDER, C. K.; SADIKU, M. N. O. **Fundamentos de Circuitos Elétricos**. Porto Alegre: Artmed® Editora SA, 2003.

CENTELHAS. **Diodos**, 2013. Disponível em: <<http://www.centelhas.com.br/biblioteca/diodos.pdf>>. Acesso em: 30 Janeiro 2013.

COSTA, E. G. D. **Apostila Geração de Alta Tensão**. Campina Grande, 2012a.

COSTA, E. G. D. **Apostila Medição de Altas Tensões**. Campina Grande, 2012b.

COSTA, E. G. D. **Guia Laboratório - Técnicas de Medição - Geração de Alta Tensão Contínua**. UFCG. Campina Grande, 2012c.

ELECTRONICA. **O diodo - Características e aplicações.**, 2007. Disponível em: <<http://www.electronica-pt.com/index.php/content/view/33/37/>>. Acesso em: 25 Janeiro 2013.

KUFFEL, E.; ZAENGL, W. S.; KUFFEL, J. **High Voltage Engineering Fundamentals**. Second Edition. ed. Oxford: Newnes, 2000.

MUNDIM, K. C. Laboratório de Ensino Virtual. **Ensino a Distância**, 1999. Disponível em: <<http://ensinoadistancia.pro.br/EaD/Eletromagnetismo/CircuitoRC/CircuitoRC.html>>. Acesso em: Janeiro 2013.

NILSSON, J. W.; RIEDEL, S. A. **Electric Circuits**. 6. ed. New Jersey: Prentice Hall, 1999.

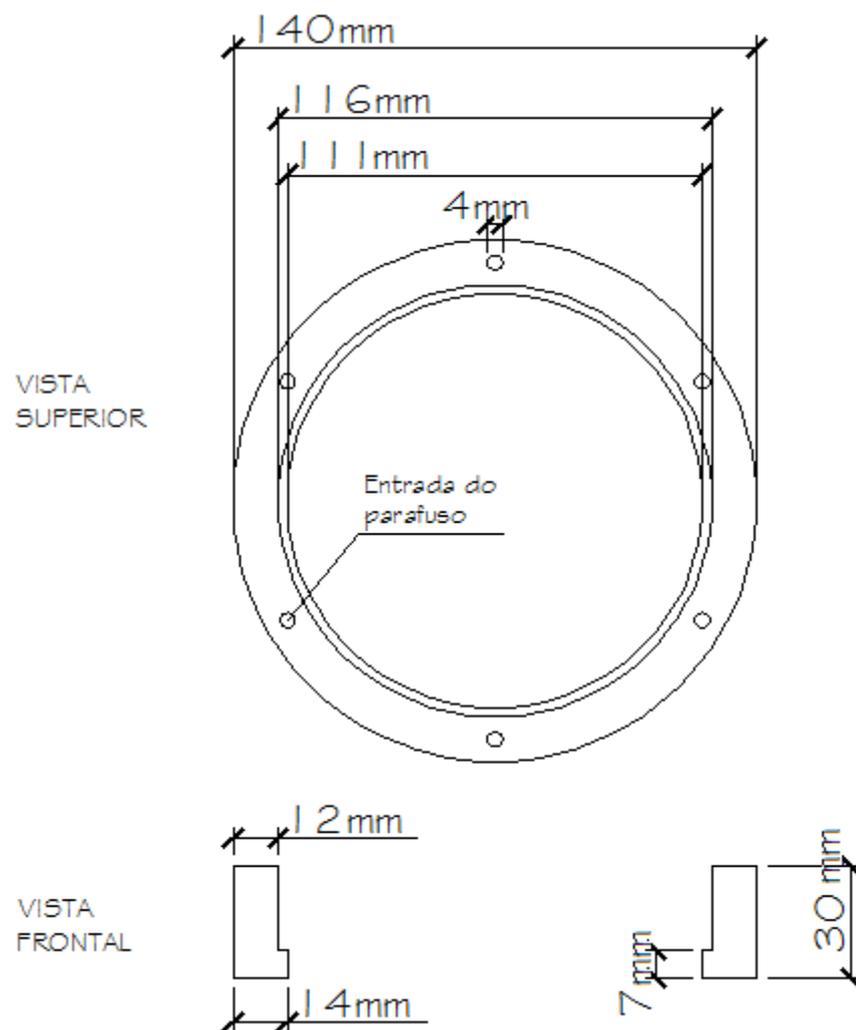
SCHWAB, A. J. **High-voltage measurement techniques**. MIT Press, v. 3, 1972.

SMITH, C. K.; SEDRA, A. S. **Microeletrônica**. 5. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2007.

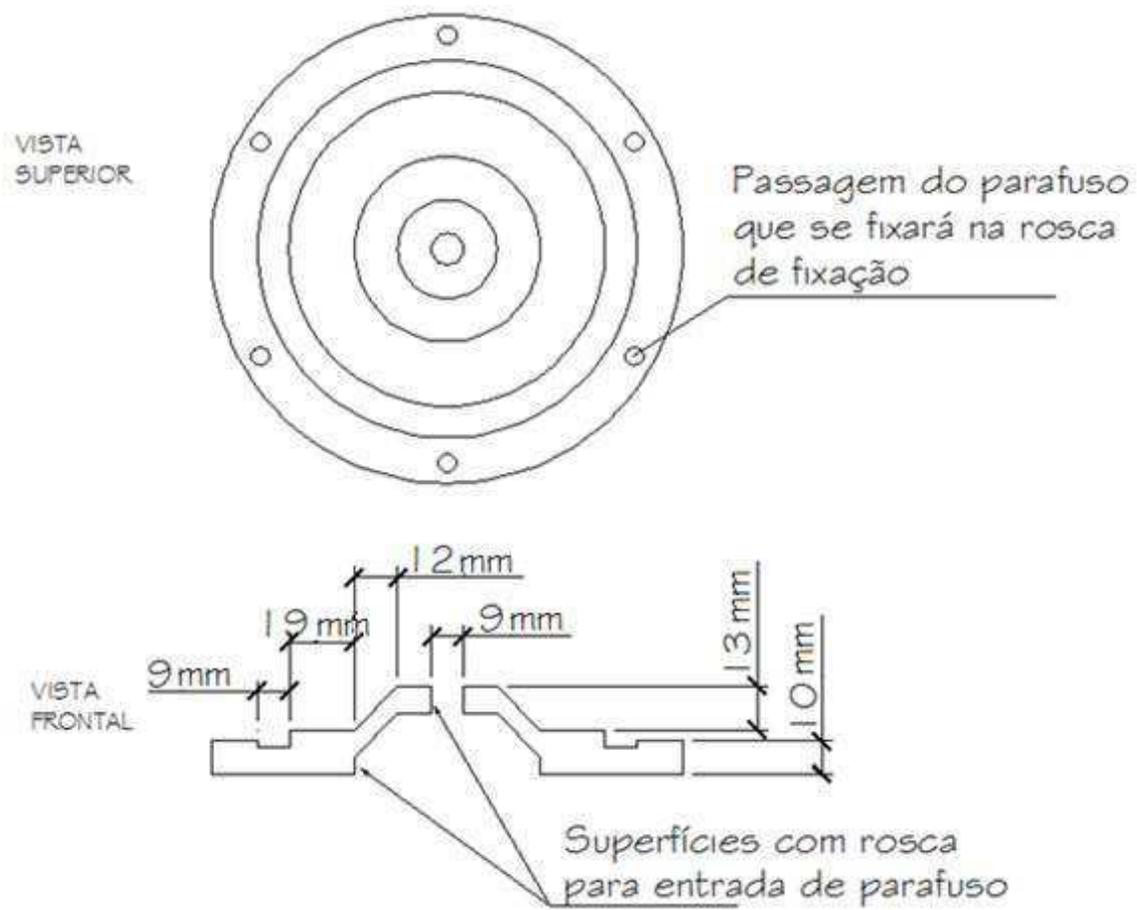
APÊNDICE A – MEDIDAS DOS TERMINAIS METÁLICOS

As vistas mostradas nesse apêndice foram desenhadas utilizando-se o *software* AutoCAD AUTODESK® 2007.

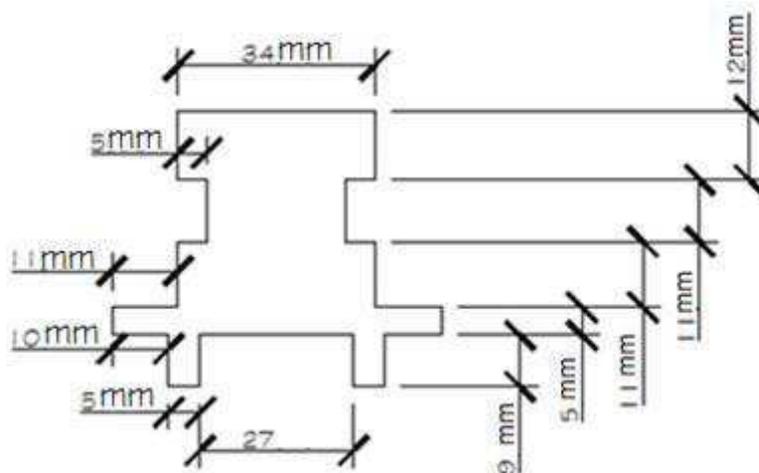
ANEL DE FIXAÇÃO



TAMPA



ROSCA DE ACOPLAMENTO

VISTA
FRONTALVISTA
SUPERIOR