



Associação Propagadora Esdeva
Centro de Ensino Superior de Juiz de Fora – CES/JF
Curso de Engenharia Elétrica
Trabalho de Conclusão de Curso – Artigo

Circuito de proteção contra sobretensão na rede de alimentação monofásica, utilizando a filosofia de proteção escalonada e alta perda por inserção na frequência de ressonância¹

PIRES, Paulo Victor Lopes²

Centro de Ensino Superior de Juiz de Fora – CES/JF

MAGRI, Luiz Paulo³

Centro de Ensino Superior de Juiz de Fora – CES/JF

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi desenvolver um circuito passivo de proteção para cargas eletrônicas sensíveis de até 500 Watts, utilizando uma filosofia de proteção escalonada, com a maior perda por inserção (até 2%). Os elementos passivos utilizados foram: centelhador (*Spark Gap*), varistor de óxido metálico (MOV), diodo de proteção (TVS), fusíveis de vidro (5 x 20), indutores em núcleo toroidal modo comum, e capacitores X. Com o avanço das tecnologias, cargas não lineares estão cada vez mais presentes em detrimento das cargas lineares, apesar dessas cargas não lineares serem indispensáveis, são as responsáveis pelo aparecimento de distúrbios transientes, conseqüentemente, afetando a qualidade de energia, portanto, torna-se necessário buscar meios para mitigar esses distúrbios, através da utilização de filtros de linha entre a rede e a carga sensível. Descargas atmosféricas e descargas eletrostáticas são as responsáveis por originar surtos elétricos em redes, afetando também a qualidade de energia, tornando indispensável a instalação de dispositivos supressores de surtos. Baixa qualidade de energia são responsáveis por comprometerem equipamentos/cargas sensíveis, acarretando prejuízos financeiros às indústrias, comércios e residências. O trabalho resultante foi parcialmente desenvolvido de maneira empírica ajustando a reatância indutiva de acordo com a temperatura (potência dissipada) da bobina do filtro, conseqüentemente, chegamos a um valor máximo de perda por inserção.

Palavras-chave: Qualidade de energia. Distúrbios elétricos. Filtros de linha. Dispositivos Supressores de Surtos.

1 Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Centro de Ensino Superior de Juiz de Fora, como requisito parcial para a conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica.

2 Graduando em Engenharia Elétrica pelo Centro de Ensino Superior de Juiz de Fora.

3 Professor do curso de Engenharia Elétrica do Centro de Ensino Superior de Juiz de Fora.

1 INTRODUÇÃO

De acordo com ARAUJO *et al.* (2018, p. 3), “a função primordial de um supressor de surtos é a manutenção da tensão de entrada de um circuito ou equipamento dentro de níveis condizentes com a suportabilidade elétricas destes”.

O objetivo do trabalho foi pesquisar formas viáveis sobre a proteção de cargas sensíveis contra distúrbios transientes através de filtros de linhas e, proteção contra surtos elétricos com os dispositivos supressores de surtos, pois os distúrbios transientes e surtos elétricos são um dos maiores responsáveis por danificarem equipamentos sensíveis (AMARAL, 2012).

Para que o objetivo do trabalho alcançasse êxito, foi feito um levantamento bibliográfico e, para o desenvolvimento e simulações de circuitos, utilizou-se dois softwares, MATLAB e Proteus.

O trabalho é constituído de 10 seções, sendo a primeira seção a introdução. A segunda seção, aborda a qualidade de energia, bem como os seus distúrbios elétricos. A terceira seção detalha a utilização de filtros de linha para proteção de cargas sensíveis contra distúrbios transientes. A quarta seção apresenta os dispositivos supressores de surtos, responsáveis por protegerem cargas sensíveis contra surtos elétricos. A quinta seção explica o objetivo da montagem de um circuito de proteção utilizando a filosofia escalonada dos supressores de surtos. A sexta seção detalha a construção de um circuito gerador de alta tensão. A sétima seção explica a montagem de um circuito gerador de impulso de alta tensão e a forma de onda do impulso de tensão. A oitava seção aborda os resultados e discussão do filtro de linha e do circuito gerador de impulso de tensão. A nona seção apresenta o circuito completo contendo os filtros de linha e os supressores de surtos. Por fim, a décima seção é a conclusão do trabalho.

2 QUALIDADE DE ENERGIA

Conforme MARTINHO (2013), o termo qualidade de energia,

[...]vem sendo associado à sustentabilidade do planeta, pois em alguns casos o problema causado por uma má qualidade de energia pode acarretar desperdício da mesma energia, o que contribui para as atuais preocupações de excesso na demanda versus escassez de energia, já que com o desperdício é necessário gerar mais para suprir essa demanda (MARTINHO 2013, p.18).

A qualidade de energia está relacionada a uma série de fatores que influenciam diretamente ou indiretamente no funcionamento e no desempenho dos equipamentos eletroeletrônicos, salientando que as anomalias de energia podem acontecer em todas as partes do sistema, desde a geração, transmissão e até dentro dos ambientes consumidores (AMARAL, 2012).

Segundo KERN (2008, p. 19), “a qualidade de energia elétrica avaliada pelas concessionárias e pelos órgãos governamentais está baseada nos valores determinados pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) [...]”.

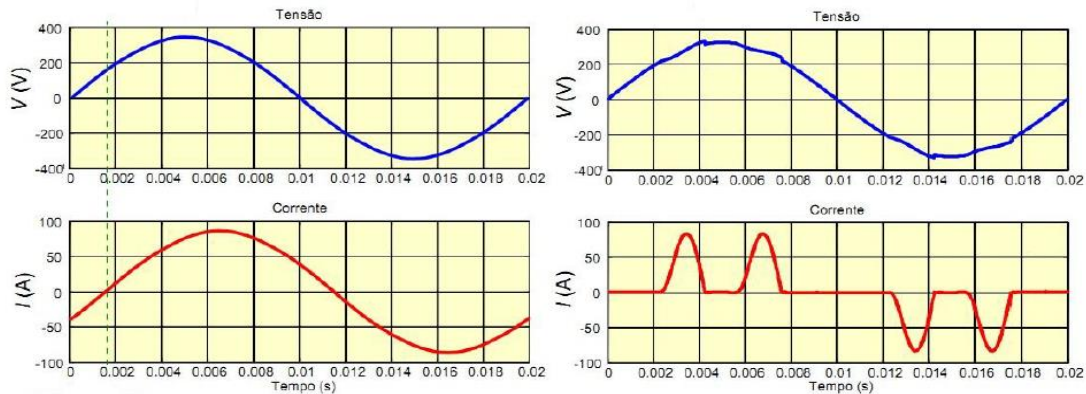
Uma energia é considerada de qualidade, quando é constituída de uma forma de onda senoidal pura e na frequência da rede (60 Hz), sem distorção na forma de onda, na amplitude e na frequência. Sabe-se que se trata de um modelo ideal, pois toda energia está acompanhada de algum distúrbio (exemplo: ruídos), desde que o distúrbio seja mínimo que não comprometa o funcionamento e o desempenho dos dispositivos eletroeletrônicos.

2.1 DISTÚRBIOS ELÉTRICOS

Conforme FRANCO (2013, p. 1), os distúrbios elétricos são caracterizados como “qualquer problema de energia manifestado na tensão, corrente ou nas variações de frequência que resulte em falha ou má operação de equipamentos de consumidores”.

Com o desenvolvimento de tecnologias, as cargas lineares foram sendo substituídas por cargas não lineares, obtendo um melhor controle das cargas e melhorando o rendimento dos equipamentos/sistemas eletroeletrônicos. Em contra partida, esses equipamentos não lineares, estão “poluindo” a rede elétrica através da geração de harmônicos e interferências eletromagnéticas – EMI, pois cargas não lineares necessitam de energia em um determinado tempo específico, consumindo corrente através de picos de corrente, conseqüentemente distorcendo a forma de onda de tensão e corrente, como pode ser vista na Figura 1 (AFONSO; MARTINS, 2004).

Figura 1: Carga linear (à esquerda) e carga não linear (à direita).



Fonte: AFONSO; MARTINS (2004, p.2).

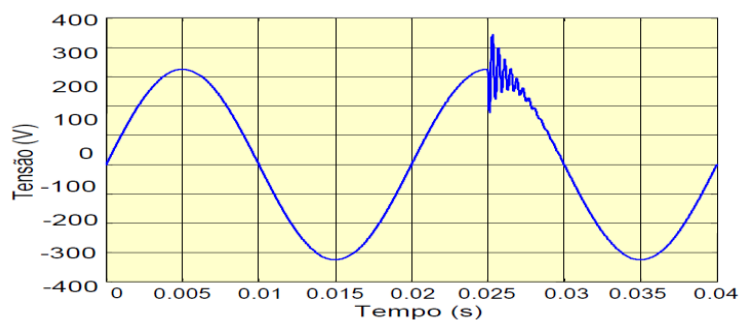
O presente trabalho trata dos distúrbios, transientes (transitórios e ruídos) e dos surtos elétricos, impedindo que esses distúrbios comprometam as cargas sensíveis, através da utilização de filtros de linha e de supressores de surtos.

As principais causas dos distúrbios transientes são as descargas atmosféricas e as energizações de banco de capacitores. E para os surtos elétricos, as principais causas são as descargas atmosféricas, descargas eletrostáticas e chaveamento de cargas elétricas capacitivas e/ou indutivas (ARAUJO *et al.*, 2018).

2.1.1 Distúrbios transientes

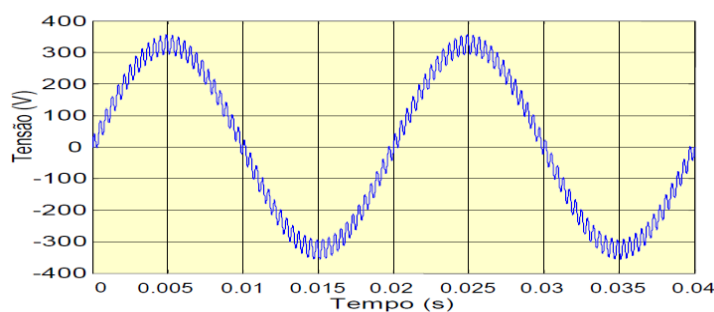
Segundo AMARAL (2012), os distúrbios transitórios (Figura 2) podem ser classificados como impulsivos ou oscilatórios,

Os impulsivos têm como característica uma variação inesperada com polaridade unidirecional, podendo afetar os circuitos de maneira a desencadear transitórios oscilatórios. Por sua vez os transitórios oscilatórios também têm como característica uma alteração repentina, mas com valores de polaridades positivos e negativos (AMARAL, 2012, p.35).

Figura 2: Transitório.

Fonte: AFONSO; MARTINS (2004, p.3).

De acordo com AMARAL (2012, p. 33), “interferências eletromagnéticas, também conhecidas como ruído ou *noise*, estão relacionadas à distorção da característica senoidal do sinal pela sobreposição de um sinal de alta frequência sobre a fundamental da rede elétrica”, Figura 3.

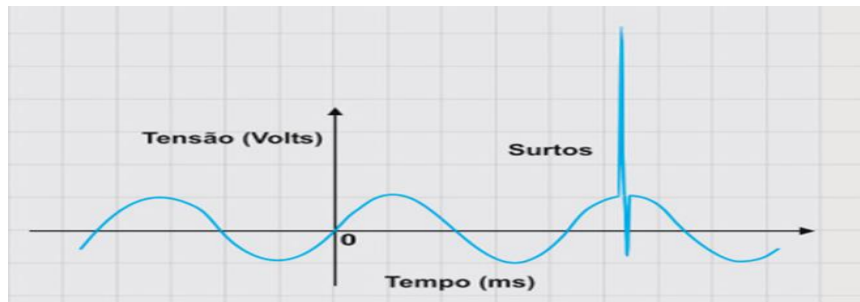
Figura 3: Ruído

Fonte: AFONSO; MARTINS (2004, p.3).

2.1.2 Surtos elétricos

Surtos elétricos podem ser de tensão (Figura 4) ou de corrente, e são caracterizados por possuírem elevadas frequências em um curto espaço de tempo.

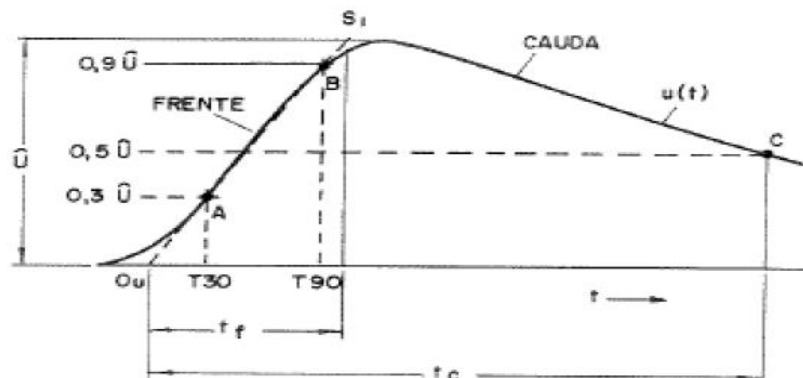
Figura 4: Surto elétrico de tensão.



Fonte: Página disponível⁴.

Os surtos elétricos, também conhecidos como impulsos atmosféricos são representados por uma onda com dois tipos de tempos, tempo de frente e tempo de meio valor (também denominada de tempo de cauda), ambos padronizados pela IEC. O tempo de frente é de $1,2 \mu\text{s}$ (tolerância de $\pm 30\%$) e tempo de cauda valor de $50 \mu\text{s}$ (tolerância de $\pm 20\%$), representada pela Figura 5. Essa forma de onda de impulso atmosférico também é conhecida como impulso 1,2/50 (ABNT, 2013).

Figura 5: Impulso Atmosférico



Fonte: ROMANO (1989, p.15).

3 DISPOSITIVOS SUPRESSORES DE TRANSIENTES – FILTRO DE LINHA

Segundo MUSSOI (2004, p. 25), “Os filtros são basicamente compostos por impedâncias interligadas (redes) e o comportamento destes circuitos depende do valor das resistências, capacitâncias e indutâncias envolvidas e da maneira como são interligadas”.

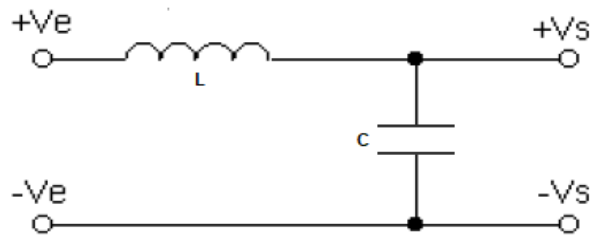
⁴ Disponível em: <<https://www.clamper.com.br/2016/12/16/o-que-e-dps-dispositivos-deprotecao-contrasurtos-eletricos/>> Acesso em: 04/12/2019.

Os filtros podem ser ativos ou passivos, estes podem ser classificados em: filtro passa-altas, filtro passa-baixas, filtro rejeita-faixa e filtro passa-faixa. O presente trabalho utiliza o filtro passivo passa-baixas.

3.1 FILTRO PASSIVO PASSA-BAIXAS LC

Abaixo encontra-se a Figura 6, de um circuito do filtro passa-baixas constituído de um indutor L e um capacitor C, entre a tensão de entrada V_e e a tensão de saída V_s .

Figura 6: Circuito de um filtro passivo passa-baixa LC.



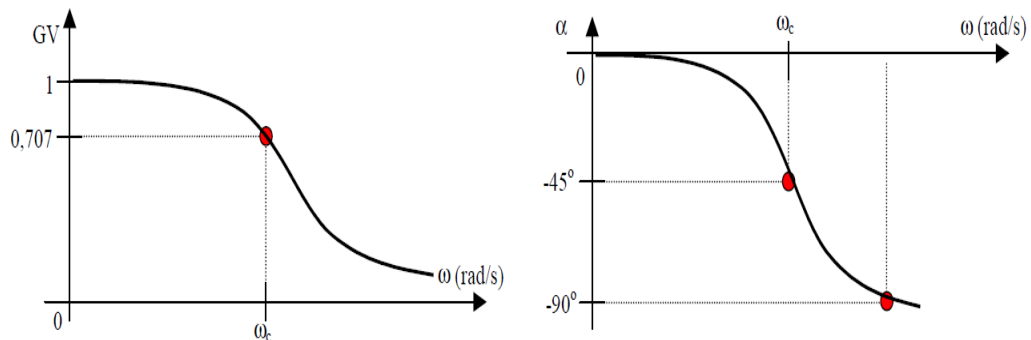
Fonte: Adaptado, MUSSOI (2004, p.27).

O circuito do filtro passivo passa-baixas LC acima, funciona da seguinte maneira:

- **Sinais de baixa frequência:** o indutor L apresentará baixa reatância em relação a reatância do capacitor C, ou seja, $X_L \ll X_C$, a reatância indutiva tenderá a se comportar como um curto-circuito, ao contrário da reatância capacitiva que tende a se comportar como um circuito aberto, portanto, o sinal de baixa frequência “passará” pelo circuito filtro LC (MUSSOI, 2004).
- **Sinais de alta frequência:** o indutor L apresentará alta reatância em relação a reatância do capacitor, ou seja, $X_L \gg X_C$, a reatância indutiva tenderá a se comportar como um circuito aberto, e a reatância capacitiva tenderá a se comportar como um curto-circuito, portanto, o sinal de alta frequência será “impedido” de passar pelo circuito filtro LC (MUSSOI, 2004).

Abaixo encontra-se o Diagrama de Bode do filtro passivo passa-baixas LC (Figura7), gráfico GV (Ganho de Tensão) *versus* frequência angular ω (rad/s) e, gráfico α (Fase) *versus* frequência angular ω (rad/s) .

Figura 7: Diagrama de Bode.



Fonte: MUSSOI (2004, p.30).

De acordo com o gráfico (Figura 7), a partir da frequência de corte ω_c , o sinal é “atenuado” (70% da tensão, 50% da potência ou -3dB), pois o GV tende a zero para maiores frequências, portanto, entre 0 e ω_c , o sinal “passará” no circuito filtro passivo passa-baixa LC. A equação da frequência de corte (também conhecida como frequência de ressonância, pois o filtro é LC) é representada por;

$$\omega_c = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad \text{ou} \quad f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1)$$

4 DISPOSITIVOS SUPRESSORES DE SURTOS

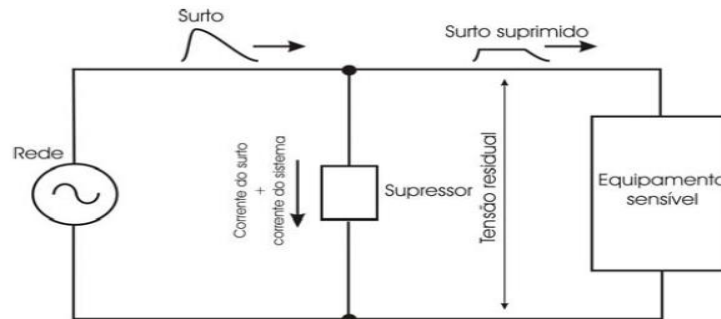
Os dispositivos mais utilizados para proteção contra surtos elétricos são os varistores, os centelhadores e os diodos de proteção. Esses dispositivos devem possuir impedância mínima para o perfeito funcionamento durante a ocorrência de surtos, permitindo a passagem de corrente (energia) em excesso, para a terra, conseqüentemente, essa energia em excesso será desviada, antes de atingir os sistemas de cargas sensíveis, protegendo-os.

Dispositivos supressores de surtos não eliminam totalmente a energia de surto, mas o suficiente para não comprometer sistemas sensíveis. A energia de surto não eliminada é conhecida como “energia residual” e, deverá estar a um nível compatível com a suportabilidade do sistema de carga sensível a ser protegido (ARAUJO *et al.*, 2018).

Conforme ARAUJO *et al.* (2018, p. 4), “A corrente que circulará em um supressor no momento de um surto será maior quanto menor for a impedância de

surto deste dispositivo”. A Figura 8 ilustra a tensão residual e a corrente de surto de um supressor.

Figura 8: Tensão residual e corrente de surto.

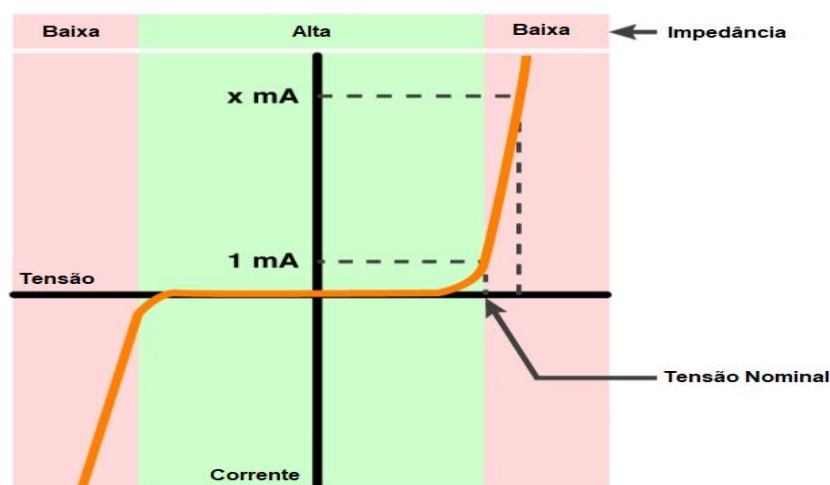


Fonte: ARAUJO *et al.* (2018, p.4).

4.1 VARISTORES

Os varistores também são conhecidos como MOV (*Metal-Oxide Varistor*) ou SIOV (*Siemens metal-Oxide Varistor*), não obedecem a Lei de Ohm, pois suas características são não lineares de tensão versus corrente (Figura 9). Os varistores mais comuns encontrados no mercado são de *Oxido de Zinco*, de fácil utilização e preço acessível. Sua operação é muito rápida, da ordem de nanossegundos e a capacidade máxima de operação é até 80 kA (ARAUJO *et al.*, 2018).

Figura 9: Característica não linear de tensão versus corrente de um varistor.



Fonte: Adaptado, KEMET Electronics Corporation

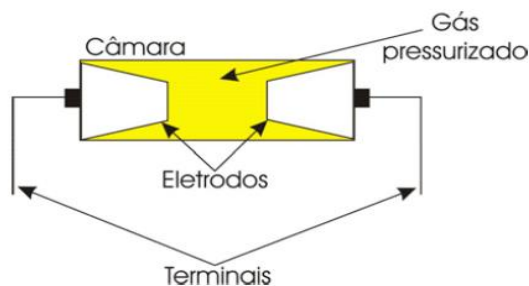
De acordo com a Figura 9, observa-se que o princípio de funcionamento do varistor, baseia-se no fato de que, quando o surto de tensão ultrapassa o valor de tensão nominal, reduzindo a impedância e, permitindo a passagem da corrente do surto, conseqüentemente o varistor protege sistema de cargas sensíveis.

Os varistores são considerados excelentes componentes para proteção contra surtos elétricos em redes elétricas de corrente alternada e corrente contínua, exceto em rede de sistema de comunicação, pois os varistores possuem alta capacitância e corrente de escoamento (ARAUJO *et al.*, 2018).

4.2 CENTELHADORES A GÁS

Os centelhadores a gás, também conhecidos como *Spark Gap*, possuem uma pequena câmara, contendo um gás pressurizado, normalmente possuem dois eletrodos (caso possuam três eletrodos, um deles é o terminal terra), como pode ser visto na Figura 10 e 11.

Figura 10: Representação de um centelhador de dois eletrodos.



Fonte: Adaptado, ARAUJO *et al.* (2018, p.9).

Figura 11: Representação de um centelhador de três eletrodos.



Fonte: Autor.

O princípio de funcionamento é basicamente o mesmo do varistor, ou seja, quando o surto de tensão ultrapassa o valor de tensão nominal, a rigidez dielétrica do gás pressurizado é rompida, permitindo a passagem de corrente do surto, protegendo as cargas sensíveis. O tempo de operação é mais lento (da ordem de microssegundos) em relação ao varistores, mas a capacidade máxima de operação é maior, até 100 kA. Os centelhadores possuem baixa capacitância e não possuem corrente de escoamento, portanto, são ideais para proteção em redes de comunicação (ARAUJO *et al.*, 2018).

4.3 DIODOS DE PROTEÇÃO

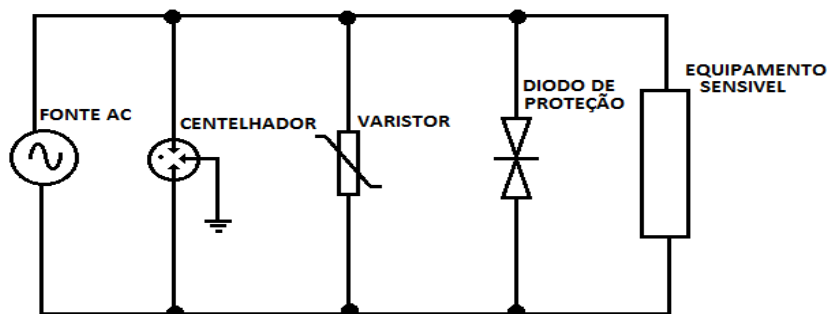
Os diodos de proteção são variantes do diodo Zener, projetados para proteção de cargas sensíveis contra surtos elétricos. Podem ser unidirecionais ou bidirecionais, o tempo de operação é muito rápido (da ordem de dezenas a nano-segundos) e, a tensão nominal situa-se entre 2 e 200 V. Para melhor eficiência da utilização dos diodos de proteção, devemos coloca-los em série com o resistor, pois este limitará a corrente de surto (ARAUJO *et al.*, 2018).

5 PROTEÇÃO ESCALONADA

Buscando por uma proteção eficiente de cargas sensíveis contra surtos elétricos, adotou-se a filosofia de proteção escalonada, utilizando os dispositivos supressores de surtos em ordem decrescente de tensão nominal (pois a tensão de operação escolhida do centelhador é maior que a do varistor, e este por sua vez, maior que a do diodo de proteção).

Próxima fonte de rede de alimentação monofásica, utiliza-se o centelhador e, próximo a carga sensível, coloca-se o diodo de proteção, o varistor ficará entre o centelhador e o diodo de proteção, como pode-se observar a Figura 12.

Figura 12: Proteção escalonada.

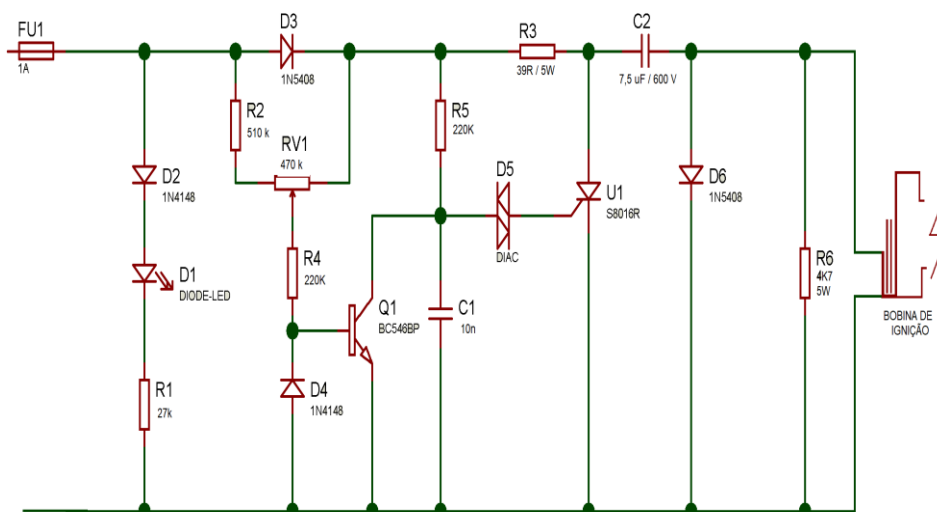


Fonte: Autor.

6 GERADOR DE ALTA TENSÃO CONTÍNUA

Para a construção/montagem e simulação (através do software MATLAB e Proteus) de um gerador de alta tensão contínua, pesquisou-se os possíveis circuitos desse gerador. Encontrado o circuito (Figura 13), fez-se algumas adaptações (substituição do SCR BT138 por BT151, o DIAC BR100 por DB3) com o objetivo de simplificar a montagem do circuito e estar de acordo com o presente trabalho, pois o gerador de alta tensão contínua alimentará o gerador de impulso de alta tensão, feito o circuito no software Proteus, construiu-se o gerador (Figura 14).

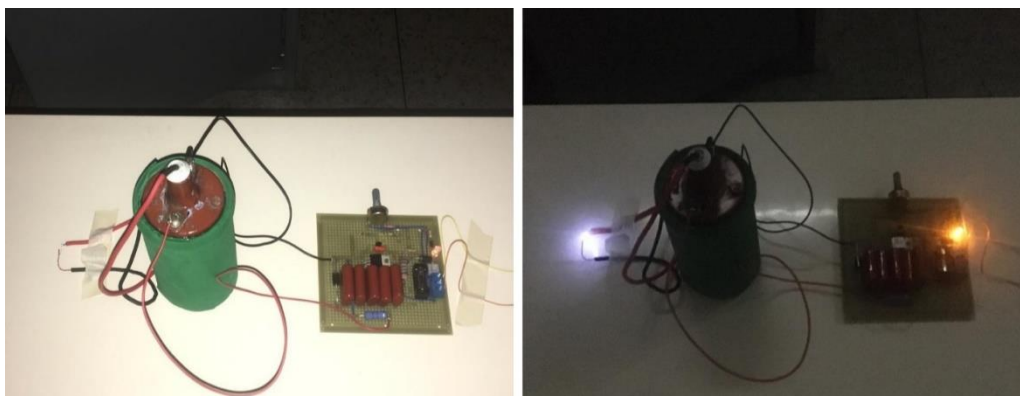
Figura 13: Gerador de alta tensão contínua.



Fonte: Adaptado página disponível⁵.

⁵ Disponível em: <<http://4u-electronics.blogspot.com/2011/05/high-voltage-pulsegenerator-electronic.html>> Acesso em: 04/12/2019.

Figura 14: Gerador de alta tensão.

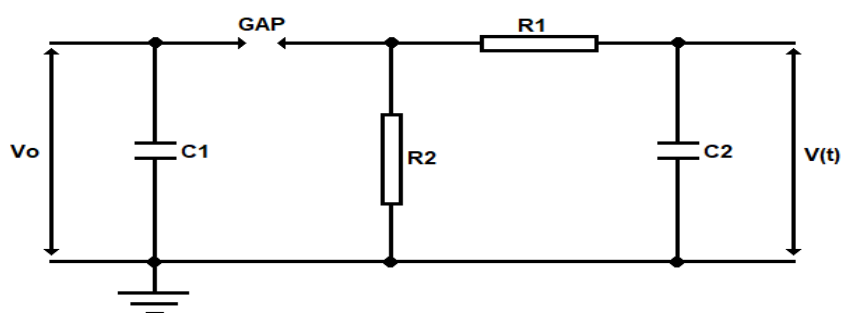


Fonte: Autor.

7 GERADOR DE IMPULSO DE ALTA TENSÃO

Para obter a forma de onda impulso de tensão $1,2 \mu s/50 \mu s$ através do gerador de impulso de alta tensão, há um modelo de circuito (Figura 15) com este objetivo, ou seja, tempo de frente de $1,2 \mu s$ e, tempo de cauda de $50 \mu s$. O circuito é constituído de dois capacitores, dois resistores e um GAP.

Figura 15: Gerador de impulso de alta tensão.



Fonte: Autor.

O princípio de funcionamento do circuito do gerador de impulso de tensão é:

- O gerador de alta tensão contínua fornecerá uma alta tensão contínua V_0 ao gerador de impulso. A tensão de entrada V_0 será responsável por carregar o capacitor C_1 até o rompimento da rigidez dielétrica entre as pontas do GAP, através da formação de um arco voltaico. Segundo VISACRO (2005), a rigidez dielétrica do ar nas condições normais é 30 kV/cm ;

- Quando ocorre a formação do arco voltaico entre as pontas do *GAP*, o capacitor *C1* começará a se descarregar e o capacitor *C2* carregará, até o ponto que o nível de tensão entre o *C1* e o *C2* igualem-se, ponto conhecido como pico de onda e, o tempo entre a formação do arco voltaico entre o *GAP* e o pico de onda, é conhecido como tempo de frente de onda;
- Após o pico de onda, ambos os capacitores *C1* e *C2* descarregam-se, ocorrendo a formação da cauda de onda, conhecida como tempo de cauda (ou tempo de meio valor). Os resistores *R1* e *R2* servem para controlar o tempo de frente e o tempo de cauda, respetivamente.

Segundo KUFFEL *et al.* (2000), para fins de dimensionamento dos capacitores e dos resistores, bem como o rendimento, segue-se as equações abaixo,

$$\eta = \frac{V_P}{V_o} = \frac{1}{1+(C2/C1)} \quad (2)$$

$$R1 = \frac{1}{2C2} \left[\left(\frac{1}{\alpha_1} - \frac{1}{\alpha_2} \right) - \sqrt{\left(\left(\frac{1}{\alpha_1} - \frac{1}{\alpha_2} \right)^2 - \frac{4(C1+C2)}{\alpha_1\alpha_2C1} \right)} \right] \quad (3)$$

$$R2 = \frac{1}{2(C1+C2)} \left[\left(\frac{1}{\alpha_1} - \frac{1}{\alpha_2} \right) + \sqrt{\left(\left(\frac{1}{\alpha_1} - \frac{1}{\alpha_2} \right)^2 - \frac{4(C1+C2)}{\alpha_1\alpha_2C1} \right)} \right] \quad (4)$$

De acordo com o KUFFEL *et al.* (2000), para um impulso de onda de tensão com tempo de frente $1,2 \mu s$ e tempo de cauda $50 \mu s$, o valor da constante de tempo $\frac{1}{\alpha_1}$ é $68,2 \mu s$ e o valor da constante de tempo $\frac{1}{\alpha_2}$ é $0,405 \mu s$.

Segundo DOS SANTOS, quando se fala em rendimento de um processo,

deseja-se que esse seja sempre o máximo possível, o que quer dizer que não deseja perdas na relação saída/tensão, 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 (DOS SANTOS, 2017, p.29).

O valor do capacitor *C1* é o valor da capacitância do gerador de alta tensão, responsável por fornecer tensão ao gerador de impulso. A partir do valor de *C1*, e

considerando o rendimento $\eta = 95\%$, pois este foi o rendimento do gerador de impulso construído por ROMANO (1989), determina-se o valor do capacitor C_2 .

8 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Avalia-se a viabilidade de eficiência do circuito de proteção contra distúrbios transientes, através do software Proteus e, se o circuito do gerador de impulso de alta tensão, através do software MATLAB, gera a forma de onda de impulso de tensão em consonância com a norma IEC ABNT.

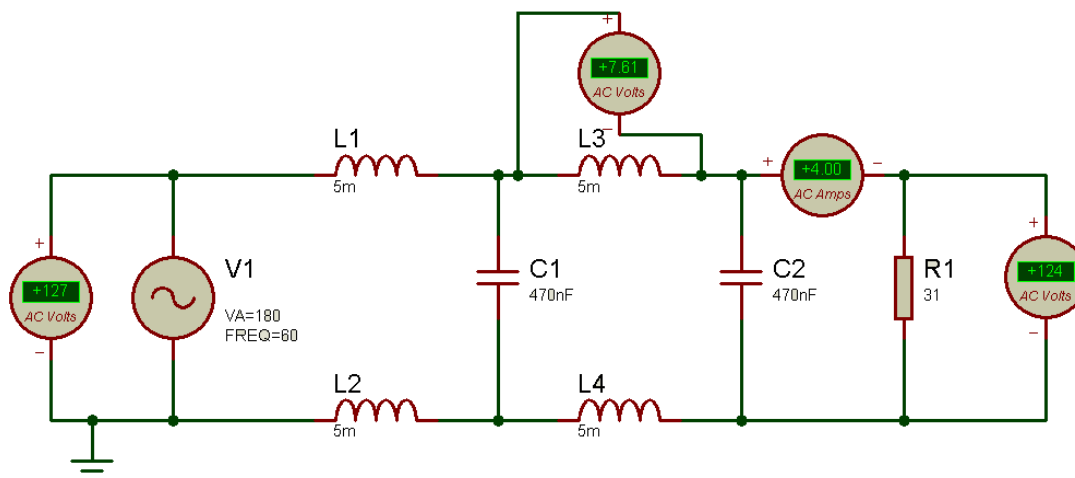
8.1 FILTRO PASSIVO PASSA-BAIXA LC

Construiu-se o circuito com auxílio do software Proteus, como o objetivo de determinar o valor da indutância dos indutores inseridos no circuito filtro passa-baixa LC, pois o valor da capacitância adotado foi de 470 nF (valor de laboratório), para proteção de um sistema de carga sensível de 500 Watt (valor arbitrário, equivalente a carga máxima de um computador).

Além de determinar o valor da indutância, o filtro passa-baixa LC deveria ter uma perda por inserção de 2% (valor definido experimentalmente, baseado na temperatura máxima de trabalho) na frequência de ressonância, entre a fonte monofásica (127 V / 60 Hz) e a carga sensível de 31 Ω (valor obtido através da relação, carga = tensão / potência), portanto, a tensão de saída será de 124,46 V.

Determinado o valor da indutância (5 mH), simulou-se o circuito (Figura 16) e percebeu-se que a potência gerada pelo indutor foi da ordem de 30,44 Watts (produto entre a tensão de 7,61 V gerada pelo indutor e uma corrente de 4,00 A), potência muito alta para o indutor, pois o sobreaquecerá, portanto, inviável.

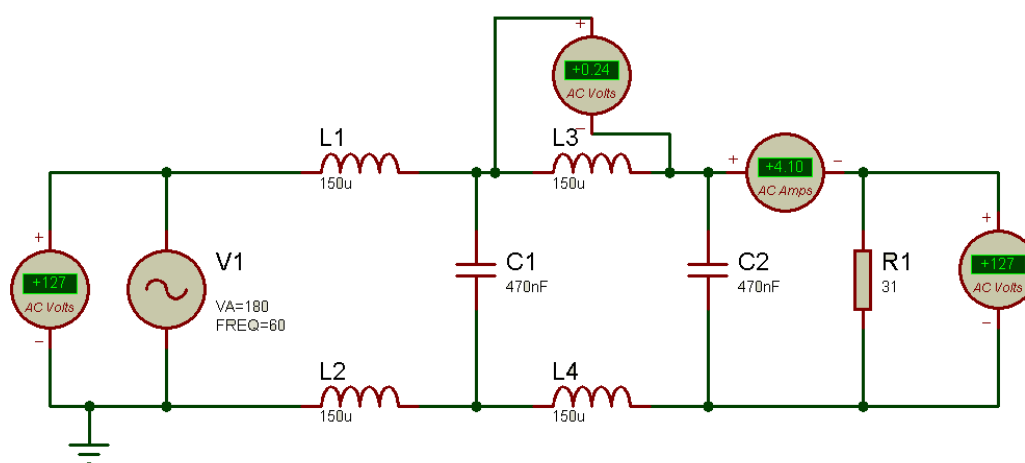
Figura 16: Circuito filtro passa-baixa no software Proteus.



Fonte: Autor.

Como a potência gerada pelo indutor foi de 30,44 Watts, tornando-o inviável, tornou-se necessário encontrar outro valor de indutância, desde que a potência gerada seja próxima de 1 Watt, ou seja, que não o sobrecarregará. Encontrou-se o valor da indutância de $150 \mu\text{H}$ como pode ser vista na Figura 17, percebe-se que a potência gerada foi de 0,984 Watt e a tensão de saída foi a mesma da tensão de entrada, ou seja, não há perdas, salientado que o circuito de ambas as Figuras (16 e 17) são ideais, pois na realidade haverão perdas, portanto, os circuitos montados foram para facilitar a análise e eficiência do filtro.

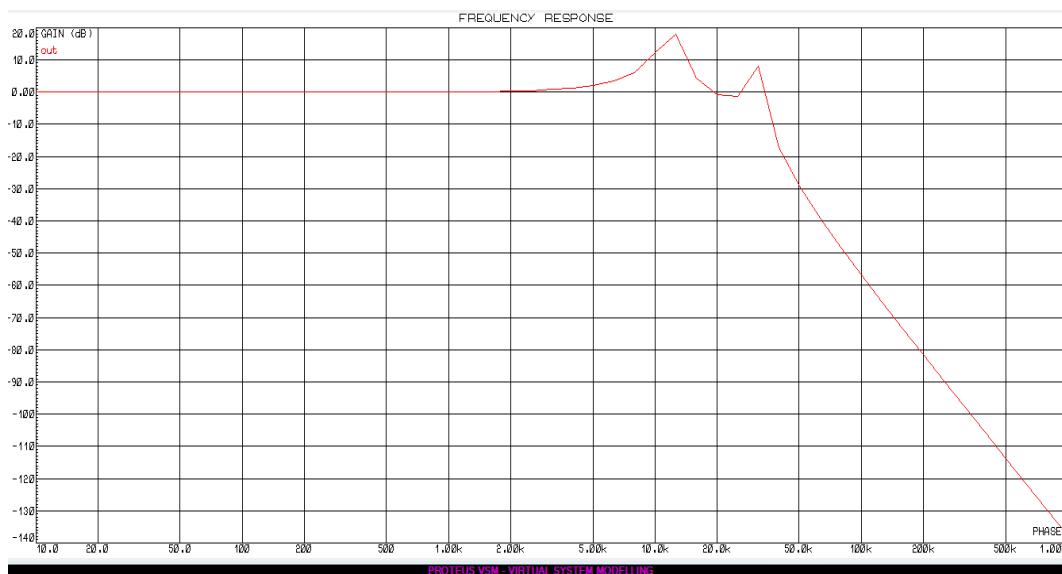
Figura 17: Circuito filtro passa-baixa no software Proteus.



Fonte: Autor.

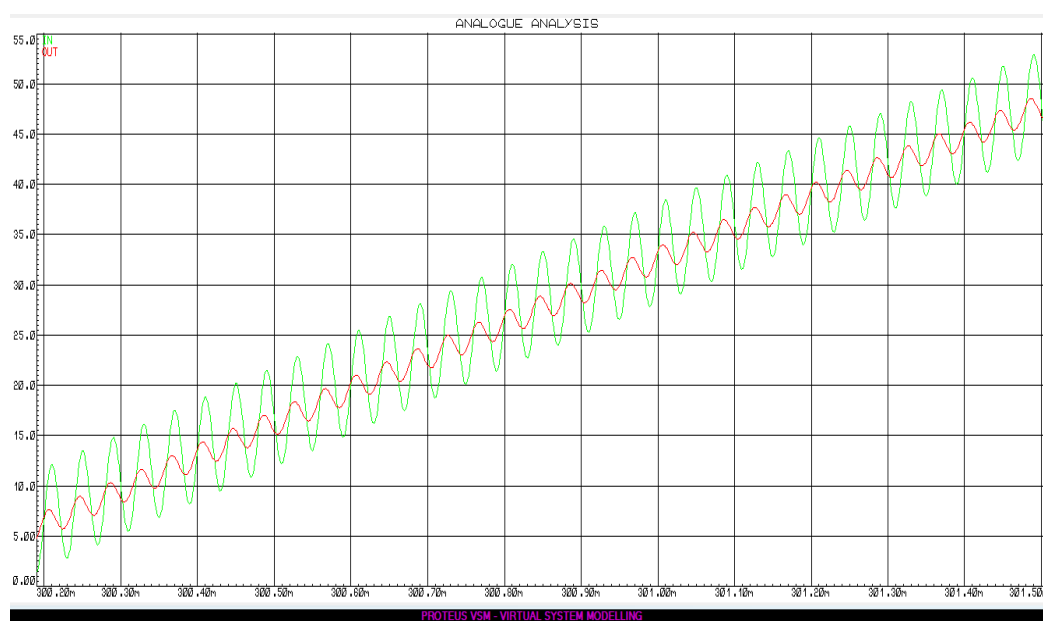
Para facilitar a análise da eficiência do filtro de linha passa-baixas do circuito construído (Figura 17). Encontra-se o diagrama de Bode, magnitude (*GAIN* dB) versus frequência na (Figura 18) e, a resposta do filtro para sinais de 25 kHz (Figura 19) e 50 kHz (Figura 20). Sabe-se que as frequências dos distúrbios transientes e surtos são da ordem de dezenas e centenas de kHz a um curtíssimo intervalo de tempo

Figura 18: Diagrama de Bode do filtro passa-baixa no software Proteus.



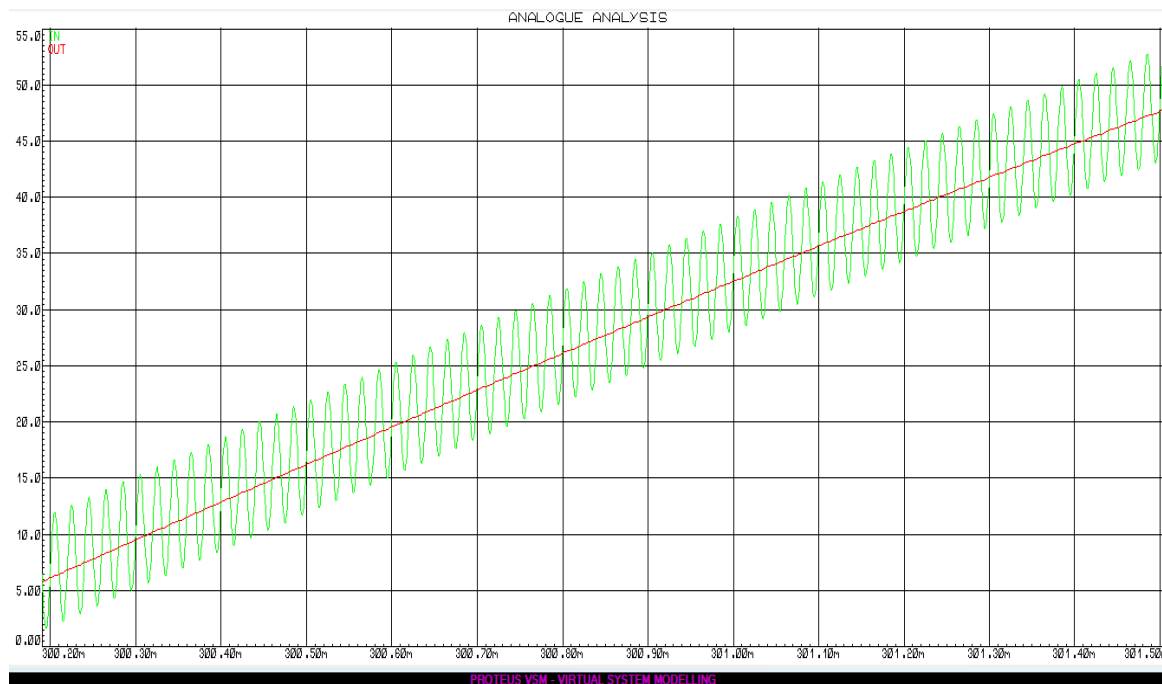
Fonte: Autor.

Figura 19: Resposta de frequência (25 kHz) do filtro passa-baixa no software Proteus. Sinal de entrada + ruídos (verde) e Sinal filtrado (vermelho).



Fonte: Autor.

Figura 20: Resposta de frequência (50 kHz) do filtro passa-baixa no software Proteus. Sinal de entrada + ruídos (verde) e Sinal filtrado (vermelho).



Fonte: Autor.

De acordo com o diagrama de bode, a partir da frequência de corte do filtro (aproximadamente 19 kHz), há um pequeno ganho de tensão (segundo pico), mas a partir de 23 kHz, começa o decaimento da curva, como pode-se observar nas curvas de resposta para a frequência de 25 kHz e 50 kHz, onde as frequências são suprimidas.

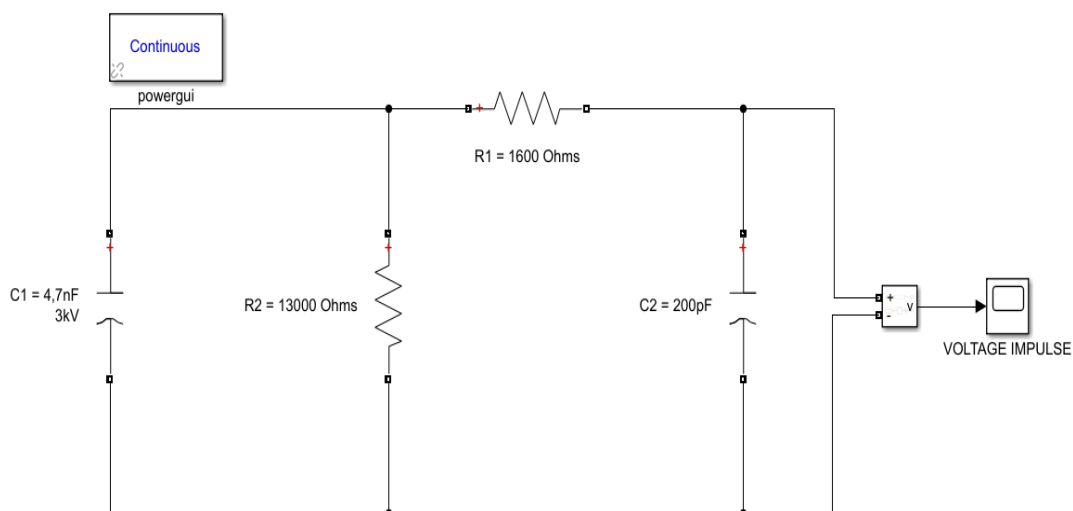
8.2 GERADOR DE IMPULSO DE ALTA TENSÃO

O gerador de alta tensão possui capacitância interna de 4,7 nF, valor obtido através de um voltímetro utilizado no laboratório de elétrica e eletrônica da instituição de ensino, Centro de Ensino Superior de Juiz de Fora – Academia. Valor utilizado no capacitor $C1$ do gerador de impulso, para uma tensão de 3 kV, pois este valor rompe a rigidez dielétrica entre as pontas do GAP a uma distância de 1mm.

A determinação dos valores $C2$, $R1$ e $R2$ foi através da implementação um código (encontra-se no apêndice A) no software MATLAB. O código representa as equações (2), (3) e (4). Encontrado os valores dos respectivos componentes, montou-se o circuito e simulou-se para análise da forma de onda de impulso de tensão obtida, a montagem e simulação do circuito foram implementada no software MATLAB.

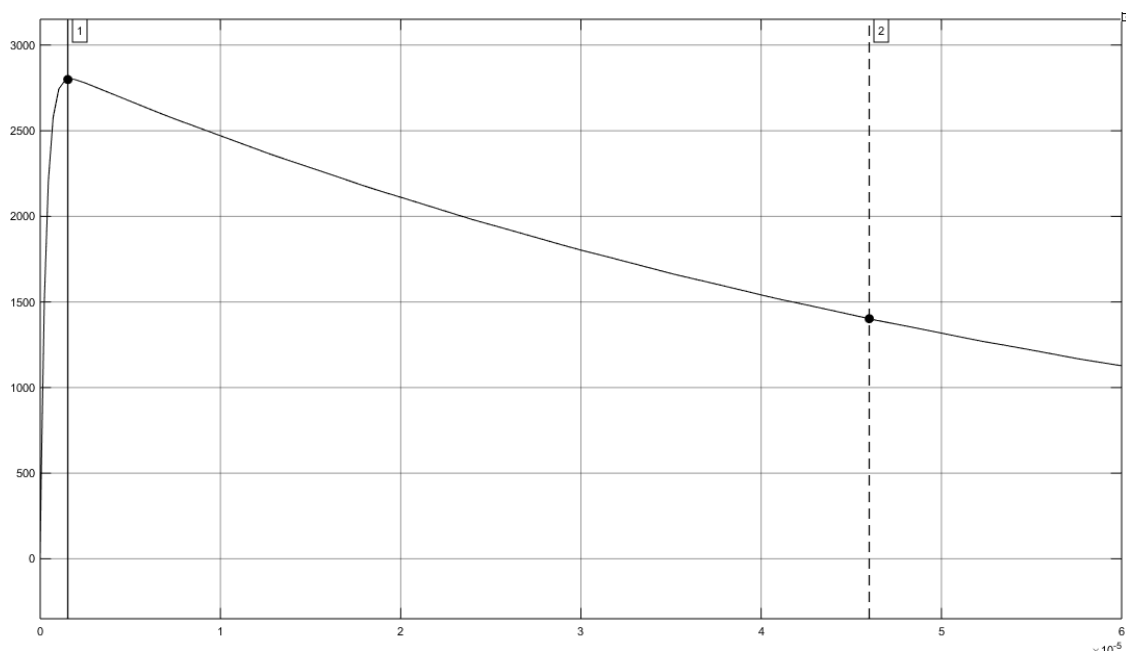
Durante a execução do código, os valores encontrados nos componentes eram valores não comerciais, portanto, tornou-se necessário encontrar os valores desses componentes de mercado, respeitando os valores toleráveis do tempo de frente e do tempo de cauda da forma de onda de impulso de tensão $1,2 \mu\text{s}/50 \mu\text{s}$ de acordo com a norma ABNT (2013). Encontra-se o circuito na (Figura 21) e a forma de onda de impulso na (Figura 22) obtida.

Figura 21: Circuito do gerador de impulso no software MATLAB.



Fonte: Autor.

Figura 22: Forma de onda impulso de tensão obtida no software MATLAB.



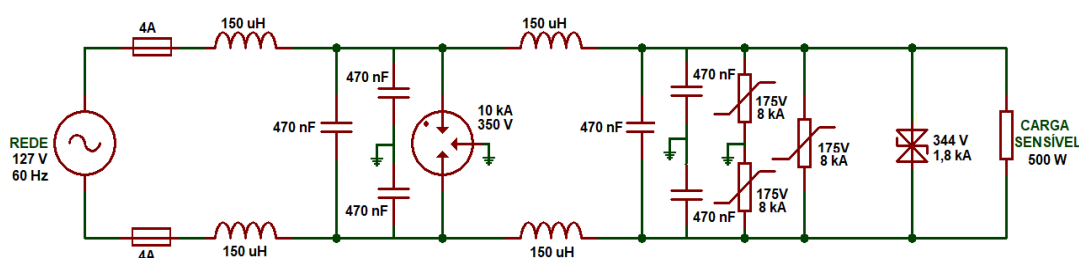
Fonte: Autor.

De acordo com o gráfico, o tempo de frente foi $1,53 \mu s$ e o tempo de cauda foi $46 \mu s$, salientado que o tempo de frente é $1,2 \mu s$ com uma tolerância de 30% e o tempo de cauda é $50 \mu s$ com uma tolerância de 20%, portanto, a forma de onda do impulso de tensão está de acordo com a norma ABNT (2013).

9 CIRCUITO DE PROTEÇÃO CONTRA TRANSIENTES E SURTOS

Encontra-se o circuito completo (Figura 23), circuito contendo os filtros passa-baixas LC, o centelhador, o varistor e o diodo de proteção, entre a rede monofásica e a carga sensível. Para que o circuito seja efetivo, precisa-se aterrará-lo.

Figura 23: Circuito de proteção.



Fonte: Autor.

10 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através de simulações dos filtros de linha passa-baixas LC pelo software Proteus, confirma-se a viabilidade do respectivo filtro, juntamente com os dispositivos supressores de surtos, para proteção de cargas sensíveis contra interferências eletromagnéticas (ruídos), distúrbios transientes e, surtos elétricos. O filtro, além de proteger as cargas sensíveis, protege a rede elétrica também, pois os distúrbios e interferências eletromagnéticas também propagam-se em sentido inverso, portanto, afirma-se a melhora na qualidade de energia.

A construção do gerador de alta tensão mostrou-se eficiente, e serviu como base para a futura construção do gerador de impulso de alta tensão. A simulação deste gerador, obteve-se uma forma de onda em acordo com a norma ABNT, com os

respectivos dimensionamentos dos componentes, capacitores e resistores, salientado que os valores dimensionados são valores dos componentes comerciais.

O presente trabalho poderá ser utilizado como fonte de consulta aos estudantes e profissionais para levar adiante a pesquisa do respectivo trabalho, bem como, aprimorá-lo.

ABSTRACT

The objective of this work was to develop a passive protection circuit for sensitive electronic loads of up to 500 Watts, using a staggered protection philosophy, with the highest insertion loss (up to 2%). The passive elements used were: spark gap, metal oxide varistor (MOV), protection diode (TVS), glass fuses (5 x 20), common mode toroidal core inductors, and capacitors X. With the advancement of technologies, nonlinear loads are increasingly present at the expense of linear loads, although these nonlinear loads are indispensable, are responsible for the appearance of transient disturbances, consequently affecting power quality, therefore, it is necessary to seek ways to mitigate these disturbances, through the use of line filters between the network and the sensitive load. Atmospheric discharges and electrostatic discharges are responsible for causing electrical surges in networks, also affecting the quality of energy, making the installation of surge suppressor devices indispensable. Low power quality is responsible for compromising sensitive equipment/loads, causing financial losses to industries, businesses and homes. The resulting work was partially developed in an empirical way adjusting the inductive reactance according to the temperature (dissipated power) of the filter coil, consequently, we reach a maximum value of loss per insertion.

Keywords: Power quality. Electrical disturbances. Line Filters. Surge Suppressor Devices.

REFERÊNCIAS

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.

AFONSO, João Luiz; MARTINS, Júlio. S. **Qualidade da energia elétrica.** Revista O Eletricista, ano 3, n. 9. Disponível em: <http://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/1920/1/Eletricista_04.pdf>. Acesso em: 03 nov. 2019.

AMARAL, Haroldo Luiz Moretti. **Interferências eletromagnéticas, transitórias e qualidade de energia: impacto nos equipamentos eletromédicos e desenvolvimento de um gerenciador de energia (Curso de Tecnologia em Sistemas Biomédicos)** - Faculdade de Tecnologia de Bauru, Bauru, 2012.

ARAUJO, Ricardo L. *et al.* **Componentes para a Supressão de Surtos Elétricos.** EMField. 2008. Disponível em: <<http://www.emfield.com.br/>>. Acesso em: 04 nov. 2019.

DOS SANTOS, Marcus Vinícius. **Desenvolvimento de um gerador de impulso de alta tensão em escala reduzida para investigação de descargas atmosféricas.** (Curso de Engenharia Elétrica) – UFOP, Ouro Preto, 2017.

FRANCO, Edgar. **Qualidade de energia – Causas, Efeitos e Soluções.** ENGECOMP TECNOLOGIA EM AUTOMAÇÃO E CONTROLE LTDA. 2013.

KERN, Fernanda Gonzaga. **Análise da qualidade de energia elétrica utilizando transformada wavelet.** Dissertação (Mestrado em Modelagem Matemática) – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, RS. 2008.

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

MARTINHO, Edson. **Distúrbios da energia elétrica: Qualidade de Energia, Conceitos, Cuidados, Soluções e Normalização.** São Paulo: Editora Érica Ltda, 2013.

MUSSOI, Fernando Luiz Rossa. **Resposta em frequência: Filtros Passivos.** Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina – Gerência Educacional de Eletrônica: Florianópolis. 2004. Disponível em: <www.peb.ufrj.br/cursos/COB781/Ref-03.pdf>. Acesso em: 05 nov. 2019.

ROMANO, Rogério Botteon. **Gerador de impulso de alta tensão para simulação em redes telefônicas.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1989. Disponível em: <<http://repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/259194>> Acesso em: 03 nov. 2019.

VISACRO, Silvério. **Descargas Atmosféricas: uma abordagem de Engenharia.** Livro. Artliber Editora Ltda, São Paulo, SP, 2005.

APÊNDICE A

Código utilizado no software MATLAB para a obtenção dos valores de C2, R1 e R2.

```
n = 0.95;
C1 = 4.7e-9;
C2 = C1*((1/n)-1)
alf1 = 1/68.2e-6;
alf2 = 1/0.405e-6;
x = (alf1^(-1) + alf2^(-1));
y = (4*(C1 + C2))/(alf1*alf2*C1);
R1 = (1/(2*C2))*(x - sqrt((x^2)-y))
R2 = (1/(2*(C1+C2)))*(x + sqrt((x^2)-y))
```