



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



*Utilização de Filtro Ativo para Amortecimento Harmônico em Sistema de
Distribuição de Energia*

Aluno: **Antonio de Paula Dias Queiroz** Matrícula: **20511403**
Orientador: **Cursino Brandão Jacobina**

Campina Grande/PB
Setembro de 2009



Biblioteca Setorial do CDSA. Fevereiro de 2021.

Sumé - PB

Sumário

1. Introdução.....	4
2. Utilização do Filtro Ativo	5
a) Circuito da Linha de Transmissão – Modelo 1	5
b) Circuito da Linha de Transmissão – Modelo 2	6
c) Filtro Ativo Paralelo (FAP).....	6
d) Princípio do Amortecimento Harmônico.....	7
3. Esquema de Controle.....	8
4. Ajuste de Ganho Automático.....	9
a) Conceito.....	9
b) Cálculos.....	10
5. Análise de Desempenho em Sobre Amortecimento.....	11
6. Simulações	13
a) Propagação Harmônica.....	13
7. Conclusão	15
8. Referências.....	16

Lista de Figuras

- Figura 1 – Modelo 1 da linha de distribuição de energia.
Figura 2 – Modelo 2 da linha de distribuição de energia.
Figura 3 – Circuito simplificado exemplificando o filtro ativo paralelo.
Figura 4 – Filtro ativo paralelo.
Figura 5 – Diagrama de controle do filtro ativo paralelo.
Figura 6 – Esquema do ajuste automático do ganho do controlador.
Figura 7 – Linha de transmissão a parâmetros distribuídos.
Figura 8 – Gráfico para harmônicos de quinta ordem. $Z_0 = 2 \text{ ohm}$.
Figura 9 – Gráfico para harmônicos de sétima ordem. $Z_0 = 2 \text{ ohm}$.
Figura 10 – Modelo da linha de transmissão com nove pontos de tensão.
Figura 11 – Propagação harmônica no tempo. (a) v_1 , (b) v_3 , (c) v_6 , (d) v_9 .
Figura 12 – Espectro de frequências. (a) v_1 , (b) v_3 , (c) v_6 , (d) v_9 .

1. Introdução

Este trabalho tem como objetivo a conclusão de conhecimentos adquiridos durante a graduação em Engenharia Elétrica. O cenário apresentado é um circuito de transmissão de potência, no qual é feito um estudo de compensação de harmônicos utilizando filtros ativos. Alguns modelos serão apresentados e, partir deles, estratégias de controle em malha aberta e com realimentação.

A motivação deste tema se dá ao fato de que recentemente, os problemas relacionados com harmônicos na tensão da rede têm se agravado nos sistemas industriais e de distribuição. Essa é uma situação indesejável em qualquer sistema, já que as conseqüências da presença de harmônicos afetam na qualidade da energia, nos custos com sobre dimensionamento de condutores, na interferência em sinais sensíveis, entre outros. Um dos problemas mais graves que pode ser observado é o chamado de “propagação harmônica” que contribui para a amplificação dos harmônicos de tensão em uma linha de transmissão. A propagação harmônica é causada pela ressonância harmônica entre as indutâncias de linha e os capacitores utilizados para a correção do fator de potência. Na tentativa de resolver esses problemas, tem-se feito pesquisas sobre a possível utilização de filtros ativos nos sistemas de distribuição de energia, de modo que esses filtros consigam compensar com eficiência os sinais poluentes e indesejáveis.

Nas referências [1] - [3] os autores propuseram um filtro ativo paralelo com base na detecção de tensão harmônica, que se destina a ser instalado por companhias de eletricidade. Este filtro ativo é caracterizado por se comportar como um resistor visto pelo grid para frequências harmônicas, atenuando a propagação harmônica em toda uma linha de distribuição. É partindo desses conceitos que será desenvolvido este trabalho.

É eficaz para o amortecimento harmônico instalar o filtro ativo no fim do barramento da linha [4]. Em geral, quanto maior o ganho proporcional de controle do filtro ativo, que é inversamente proporcional ao valor da resistência do resistor de amortecimento de frequências harmônicas (como mostrado em (2)), menor serão os harmônicos de tensão no barramento da instalação do filtro. Em uma linha de distribuição longa com um grande número de capacitores, no entanto, a instalação do filtro ativo com um grande ganho pode apresentar um desempenho sobre amortecido. Poderia fazer harmônicos de tensão, em um ponto qualquer intermediário, maiores do que já existiam antes da instalação do filtro ativo. Este problema pode ser resolvido através de um mecanismo que modifique o controle de modo que o filtro seja uma carga correspondente à impedância característica da linha de distribuição. A dificuldade está em saber o valor da impedância característica de um sistema de distribuição de energia real. Mesmo sendo possível, saber de antemão, o valor da impedância característica da linha não seria constante, pois o arranjo do sistema de distribuição é alterado de acordo com as condições de operação do sistema e as condições de faltas.

Aqui serão mostrados alguns resultados de simulações, esses resultados apresentarão as respostas de um modelo de sistema de distribuição de energia afetado

pela propagação harmônica, quando é inserido no final do barramento um filtro ativo paralelo, primeiramente com o objetivo de zerar a tensão harmônica em algum ponto específico da linha e depois com uma estratégia de ajuste automático de ganho [4] de modo a manter os níveis de harmônicos de tensão inferiores a um nível especificado, mesmo sendo a impedância característica da linha de distribuição desconhecida.

2. Utilização do Filtro Ativo

a) Circuito da Linha de Transmissão – Modelo 1

Neste primeiro cenário será mostrada uma modelagem inicial de linha de transmissão. Esse modelo é apresentado na Fig. 1. Nele se observa a entrada da rede, as impedâncias da linha, as fontes de harmônicos nas diversas barras, a geração de tensão harmônica (este modelo visa a realização de simulações, numa linha real não existe gerador de harmônicos, eles já aparecem na tensão de geração), e o filtro ativo no final da linha. Fazendo uso do conceito da superposição, apenas a parte harmônica do circuito será detalhada, as tensões e correntes na frequência fundamental não entrarão nos cálculos.

Pode-se observar que em alguns pontos da linha foram inseridas fontes de corrente de harmônicos (I_{Ln}), estas fontes representam as correntes harmônicas produzidas por cargas que estão sendo consideradas como conhecidas nesses pontos da linha. Em cada um desses pontos existem tensões que estão “impuras” devido à disseminação dos harmônicos na rede. O seguinte questionamento é feito: é possível projetar um filtro que, a partir do conhecimento do comportamento dos harmônicos presentes, possa zerar o valor da tensão harmônica em qualquer uma das barras da linha de transmissão? A resposta é sim.

Obviamente essa é uma situação ainda ideal, pois a impedância da linha é considerada constante e igual a um valor Z conhecido, e em cada barra é conhecido o valor da fonte de corrente harmônica que modela o perfil de carga em determinada barra da linha. Adicionalmente, os parâmetros sendo variáveis com as condições de operação do sistema, a equação em malha aberta apresentada não corresponderão totalmente à realidade e a barra escolhida não terá sua tensão anulada completamente.

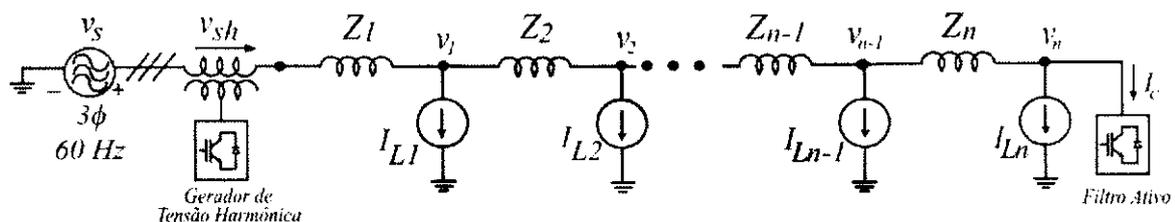


Fig. 1 – Modelo 1 da linha de distribuição de energia.

Em (1) é mostrado que, para determinadas condições de harmônicos na linha, existe uma fonte de corrente cuja parte harmônica I_c , é determinada para zerar a parte da tensão distorcida em qualquer uma das barras do sistema.

$$I_{hh} = \sum_{j=1}^M I_{Lj} + \frac{1}{N+1-M} \sum_{j=M+1}^N (N+1-j) I_{Lj} - \frac{1}{(N+1-M)Z} v_{sh} \quad (1)$$

, onde N é o número de barras da linha de transmissão, M é a barra onde se deseja zerar a tensão ($v_M = 0$), I_{Lj} é a corrente harmônica na barra j e v_{sh} é a tensão harmônica observada na entrada da rede.

Uma dificuldade desse método é que não é trivial saber os valores das fontes de correntes que representam as cargas no meio da linha, as condições são variantes, dessa forma, algum tipo de controle com realimentação melhoraria bastante a ação do filtro. Mesmo assim é interessante notar que existe realmente a possibilidade de, usando um filtro, mudar de forma conveniente as características do circuito.

b) Circuito da Linha de Transmissão – Modelo 2

Na Fig. 2 é mostrado outro modelo de linha de transmissão de potência. Nela a tensão v_s corresponde à entrada trifásica e é o modelo da tensão de alimentação provinda de uma subestação. O indutor L_1 corresponde à indutância do transformador da linha de distribuição primária na subestação, os indutores L_2 e L_3 correspondem às indutâncias da linha de transmissão. Os três capacitores C_1 , C_2 e C_3 representam os capacitores *shunt* instalados por consumidores de alta potência para a correção do fator de potência. Num cenário sem a inserção tanto das cargas quanto do filtro ativo, observa-se que a tensão harmônica no final da linha tem sua magnitude amplificada em várias vezes de acordo com a tensão harmônica presente na tensão de entrada. Esse fato ocorre devido à “propagação harmônica” resultante das associações entre os indutores e capacitores existentes na linha de transmissão.

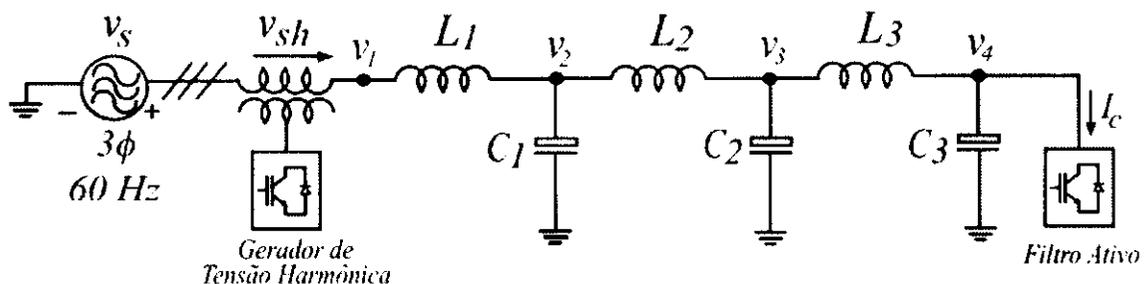


Fig. 2 – Modelo 2 da linha de distribuição de energia.

c) Filtro Ativo Paralelo (FAP)

Um modelo simplificado para o filtro em uma conexão monofásica é mostrado na Fig. 3. A corrente do compensador é injetada no circuito de modo a cancelar componentes harmônicos provindos do grid, fazendo com que o sinal na carga só possua a componente fundamental.

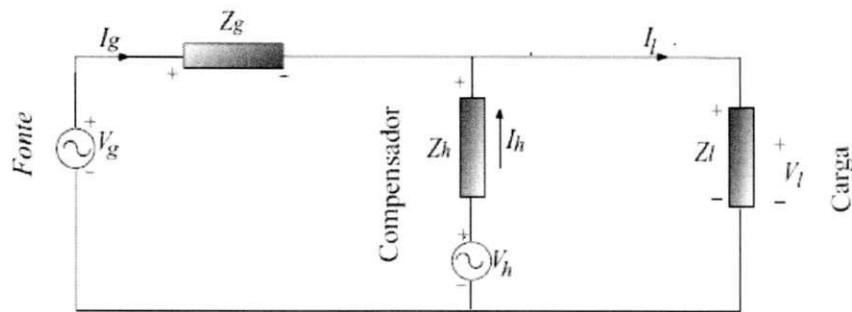


Fig.3 – Circuito simplificado exemplificando o filtro ativo paralelo.

Um circuito do filtro ativo paralelo com mais componentes é ilustrado na Fig. 4. O seu circuito de potência corresponde um inversor trifásico com seis IGBT's divididos em três braços, onde cada braço possui duas chaves que funcionam de modo complementar, um capacitor para o barramento CC e indutores e capacitores de filtragem.

Para o controle das chaves será utilizado a modulação por largura de pulso (PWM) com sinal de portadora triangular de frequência igual a 10 kHz.

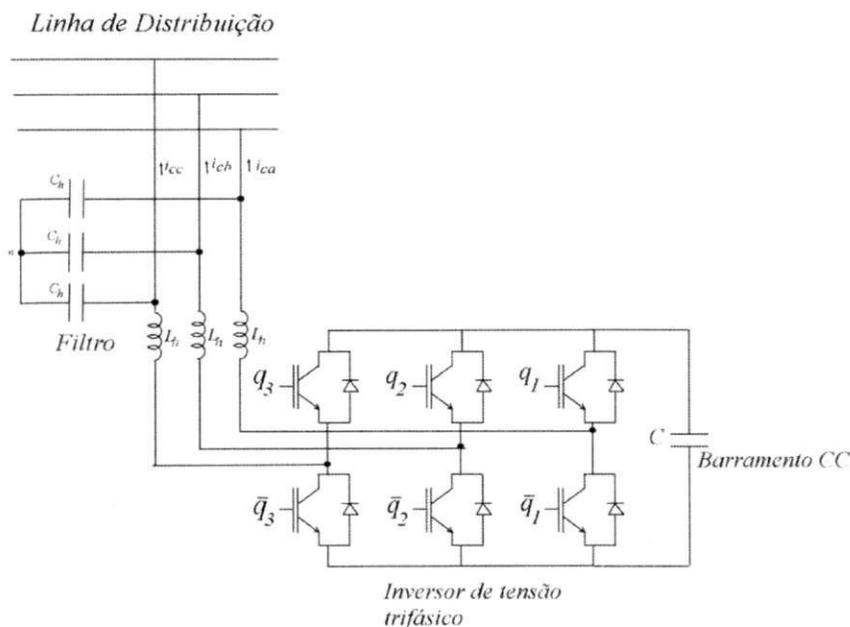


Fig. 4 – Filtro ativo paralelo.

d) Princípio do Amortecimento Harmônico

Para que ocorra o amortecimento harmônico esperado na linha de transmissão, o filtro ativo é instalado no final da linha, de modo que possa detectar as tensões neste ponto da instalação. Após a detecção, se extrai a informação da tensão harmônica v_h presente. Então v_h é amplificada pelo ganho K_v e como resultado fornece a corrente de compensação de referência como pode ser visto em (2):

$$i_c = K_v \cdot v_h \quad (2)$$

Considerando que a corrente de compensação i_c é a corrente de referência do filtro, pode-se dizer que o filtro se comporta como um resistor de amortecimento de resistência igual a $1/K_v$ [ohm] para frequências harmônicas. Dessa forma o filtro atua como um dissipador dos harmônicos provindos da ressonância harmônica da linha de transmissão.

Em termos gerais, quanto maior o ganho de controle (inversamente proporcional ao resistor de amortecimento), menor será a tensão harmônica que irá aparecer no barramento no qual o filtro está instalado. Pode ser que em algum ponto da linha de distribuição a tensão harmônica seja maior que no fim da linha mesmo com a instalação do filtro. Para que este problema seja resolvido é necessário impor um ganho ótimo para o qual $K_v = 1/Z_0$, onde Z_0 é a impedância característica da linha de transmissão.

Porém, o que ocorre é que não é possível saber exatamente o valor da impedância Z_0 num sistema de distribuição real. Ainda, mesmo que isso fosse possível, não seria um valor constante, pois num sistema de distribuição as condições de operação e de falta fariam com que o valor de Z_0 variasse. Além disso, capacitores e cargas são conectados e desconectados, não apenas por companhias elétricas, mas também por conjuntos de consumidores residenciais. Dessa forma, é necessário que o ganho de controle seja ajustado automaticamente em resposta às condições de operação do sistema de distribuição.

3. Esquema de Controle

O esquema de controle do filtro ativo pode ser observado na Fig. 5. As tensões v_a , v_b e v_c são detectadas no ponto de instalação do filtro, em seguida através de uma transformação de variáveis do tipo dq no referencial síncrono, obtém-se as tensões v_d e v_q .

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos w_s t & \text{sen} w_s t \\ -\text{sen} w_s t & \cos w_s t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (3)$$

Utilizando dois filtros passa-altas (FPA) de primeira ordem são obtidas as componentes CA \tilde{v}_d e \tilde{v}_q de v_d e v_q , respectivamente. As tensões \tilde{v}_d e \tilde{v}_q são então amplificadas pelo ganho K_v como mostrado em (2). Observe que o ganho K_v é automaticamente ajustado pelo controle que será detalhado mais adiante. As correntes de referência i_{cd}^* e i_{cq}^* são obtidas e transformadas em correntes de compensação de referência trifásicas i_{ca}^* , i_{cb}^* e i_{cc}^* para o filtro ativo. A transformação é mostrada a seguir:

$$\begin{bmatrix} i_{ca}^* \\ i_{cb}^* \\ i_{cc}^* \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \omega_s t & -\sin \omega_s t \\ \sin \omega_s t & \cos \omega_s t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{cd}^* \\ i_{cq}^* \end{bmatrix} \quad (4)$$

Em complemento, a tensão CC do capacitor v_{dc} é detectada e então comparada com a sua referência V_{dc}^* . O sinal de erro é amplificado pelo ganho K_{dc} que pode ser um controlador do tipo proporcional ou proporcional-integrativo, e gera i_{cd}^* que complementa a corrente i_{cd}^*

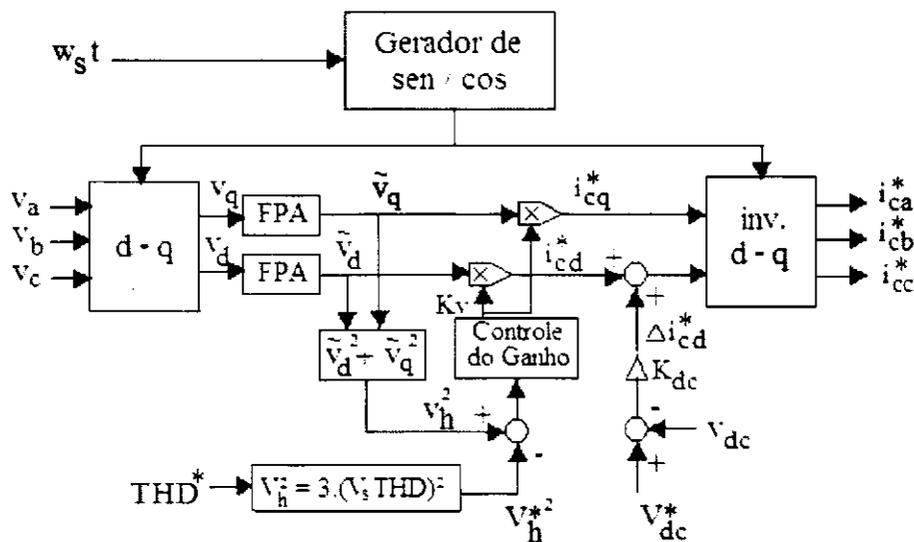


Fig. 5 – Diagrama de controle do filtro ativo paralelo.

4. Ajuste de Ganho Automático

a) Conceito

De forma sucinta serão apresentadas duas idéias principais sobre como modificar o valor do ganho K_v . A primeira é: fazer um esquema de ajuste automático do ganho K_v para compensação de tensões harmônicas na frequência de ressonância, enquanto que para os outros valores de frequência, K_v seria pequeno. Por conta da dificuldade de se saber a frequência de ressonância em sistemas de distribuição reais, tensões harmônicas individuais teriam que ser calculadas, exigindo um grande número de transformações dq diretas e inversas. A segunda é: impor um ganho comum para todas as frequências harmônicas de forma que ele seria ajustado para reduzir o valor da distorção harmônica total (THD) da tensão no final da linha em um nível inferior a um especificado. Para isso, seria necessário apenas um par de transformações dq (uma

direta e uma inversa), exigindo um menor tempo de cálculo do que o proposto com a primeira idéia. Para este trabalho foi escolhida a segunda.

Na Fig. 6 é mostrado um diagrama em blocos do esquema de ajuste automático de ganho. O esquema é composto de um detector de sinal e um contador para ajustar o ganho K_v .

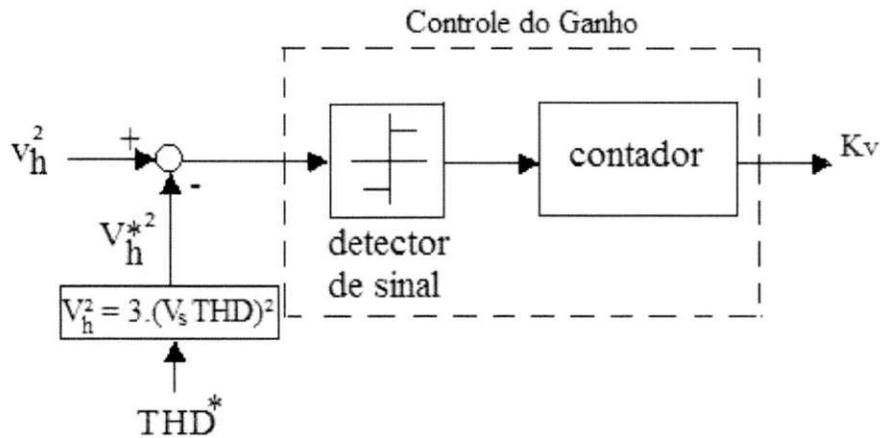


Fig. 6 – Esquema do ajuste automático do ganho do controlador.

b) Cálculos

Primeiramente, o quadrado da tensão harmônica é calculado de \tilde{v}_d e \tilde{v}_q como segue:

$$v_h^2 = \tilde{v}_d^2 + \tilde{v}_q^2 \quad (5)$$

Onde de \tilde{v}_d e \tilde{v}_q são as componentes d e q das tensões no ponto de instalação do filtro depois de passarem por um filtro passa altas.

Tem-se a seguinte relação entre V_h e o valor do THD :

$$THD = \frac{1}{V_s} \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2} = \frac{1}{\sqrt{3}V_s} \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} (\tilde{v}_d^2 + \tilde{v}_q^2)} = \frac{V_h}{\sqrt{3}V_s} \quad (6)$$

Onde V_s é o valor rms da tensão fundamental e THD é a distorção harmônica total. Como resultado V_h^2 pode ser expresso por:

$$V_h^2 = 3.(V_s THD)^2 \quad (7)$$

Como valores típicos, o THD de referência fica entre 3% e 5%. Observando a Fig. 6 mais uma vez, tem-se que o contador aumenta o valor do ganho K_v caso o valor

do *THD* no ponto de instalação do filtro seja maior que o *THD* de referência, por outro lado, o contador diminui o valor do ganho K_v , caso o valor do *THD* no ponto da instalação seja menor que o *THD* de referência. Dessa forma o filtro ativo pode reduzir a corrente de compensação e em consequência, as perdas operacionais, quando sua compensação não estiver sendo necessária.

5. Análise de Desempenho em Sobre Amortecimento

Na Fig. 7 é mostrado um modelo monofásico a parâmetros distribuídos da linha de transmissão apresentada na Fig. 2 sem carga e com o filtro ativo instalado no final da linha. Para a análise da propagação harmônica tem-se um modelo L-nominal com indutores e capacitores distribuídos numa linha de l km. A tensão v_{sh} é o valor rms da tensão harmônica da subestação, o filtro ativo é representado por um resistor de amortecimento R_{FA} ($= 1/K_v$) [ohm] para frequências harmônicas. Neste modelo, as perdas são desprezadas, ou seja, não serão inseridas as resistências nem as condutâncias do modelo da linha. Dessa forma um parâmetro denominado de Fator de Magnitude de Tensão (*VMF* ou *FMT*) é definido pela relação [4]:

$$VMF = \left| \frac{V(R_{AF}, x)}{V_{sh}} \right| = \left| \frac{R_{AF} \cosh \gamma(l-x) + Z_0 \sinh \gamma(l-x)}{R_{AF} \cosh \gamma l + Z_0 \sinh \gamma l} \right| \quad (8)$$

Onde Z_0 é a impedância característica da linha $= \sqrt{L/C}$, e γ é a constante de propagação $= j\omega\sqrt{LC}$. O comprimento de onda é $\lambda = 1/f\sqrt{LC}$.

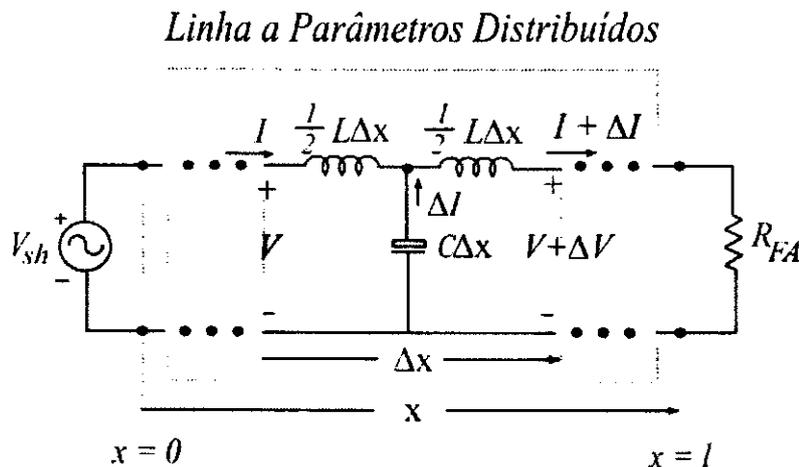


Fig. 7 – Linha de transmissão a parâmetros distribuídos.

Nas Figs. 8 e 9 são mostradas as formas de onda quando na entrada se tem harmônicos de quinta e sétima ordem, respectivamente. Para as explicações, Z_0 foi escolhido com valor igual a 2 ohm, e a linha foi escolhida como uma linha l de comprimento igual a 9 km. Dois casos são estudados: um com $l = \lambda/2$ para a frequência do quinto harmônico, e o outro com $l = 3\lambda/4$ para a frequência do sétimo harmônico.

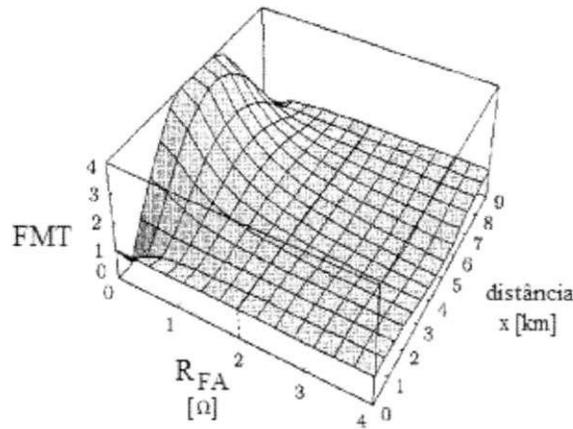


Fig. 8 – Gráfico para harmônicos de quinta ordem. $Z_0 = 2 \text{ ohm}$.

Quando R_{FA} é igual a Z_0 (ou K_v é igual a $1/Z_0$), todos os valores de VMT são unitários, tanto para a frequência do quinto como do sétimo harmônico, independente do valor da distância x . Conseqüentemente o coeficiente de reflexão é igual a zero e a taxa de onda estacionaria é igual à unidade.

Caso $R_{AF} > Z_0$ (pequeno K_v), tem-se que, para a frequência do quinto harmônico, o valor de VMT é menor que a unidade, especialmente em $x = 5 \text{ km}$. Porém, para a frequência do sétimo harmônico, o valor de VMT é maior que a unidade, a tensão em determinadas partes da linha podendo chegar a ser duas vezes maior em $x = 4$ e 9 km quando $R_{AF} = 4 \text{ ohm}$.

Por outro lado, ocorre um desempenho sobre amortecido no caso de $l = \lambda/2$ se $R_{AF} < Z_0$ (grande K_v). A propagação mais séria para o quinto harmônico aparece em $x = 5 \text{ km}$.

De toda forma, pode-se notar que é extremamente interessante que R_{AF} seja escolhido o mais próximo possível de Z_0 .

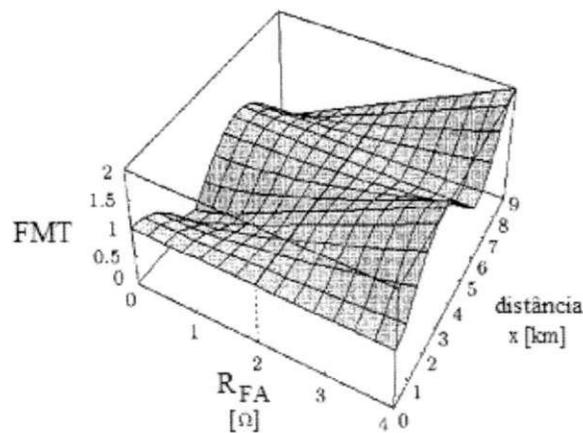


Fig. 9 – Gráfico para harmônicos de sétima ordem. $Z_0 = 2 \text{ ohm}$.

6. Simulações

a) Propagação Harmônica

Observe a Fig. 10, este é um modelo da linha que foi usado para a realização das simulações. Nela existem nove pontos onde pode se observar como a tensão progride por toda linha. Na entrada um gerador de harmônicos introduz dois sinais harmônicos de quinta e sétima ordem com amplitudes iguais a 6% da tensão da fundamental.

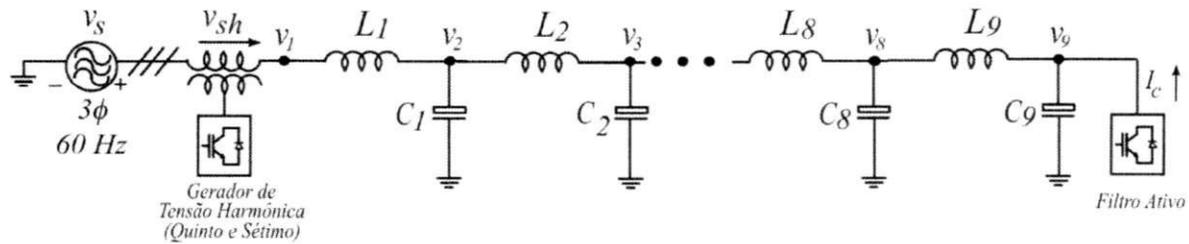


Fig. 10 – Modelo da linha de transmissão com nove pontos de tensão.

Como resultado foi observado os sinais v_1, v_2, v_5, v_9 , no tempo (Fig. 11) e seus espectros de frequência (Fig. 12) sem a inserção do filtro ativo. A propagação harmônica pode ser vista à medida que o sinal de tensão se afasta da geração.

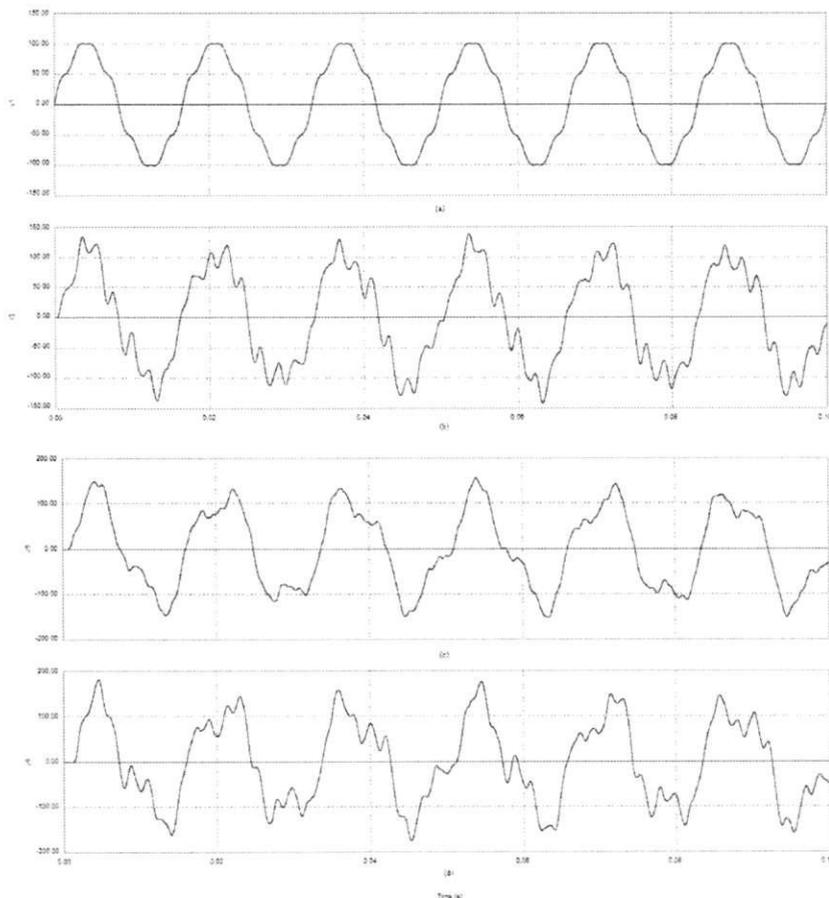


Fig.11 – Propagação harmônica no tempo. (a) v_1 , (b) v_3 , (c) v_6 , (d) v_9 .

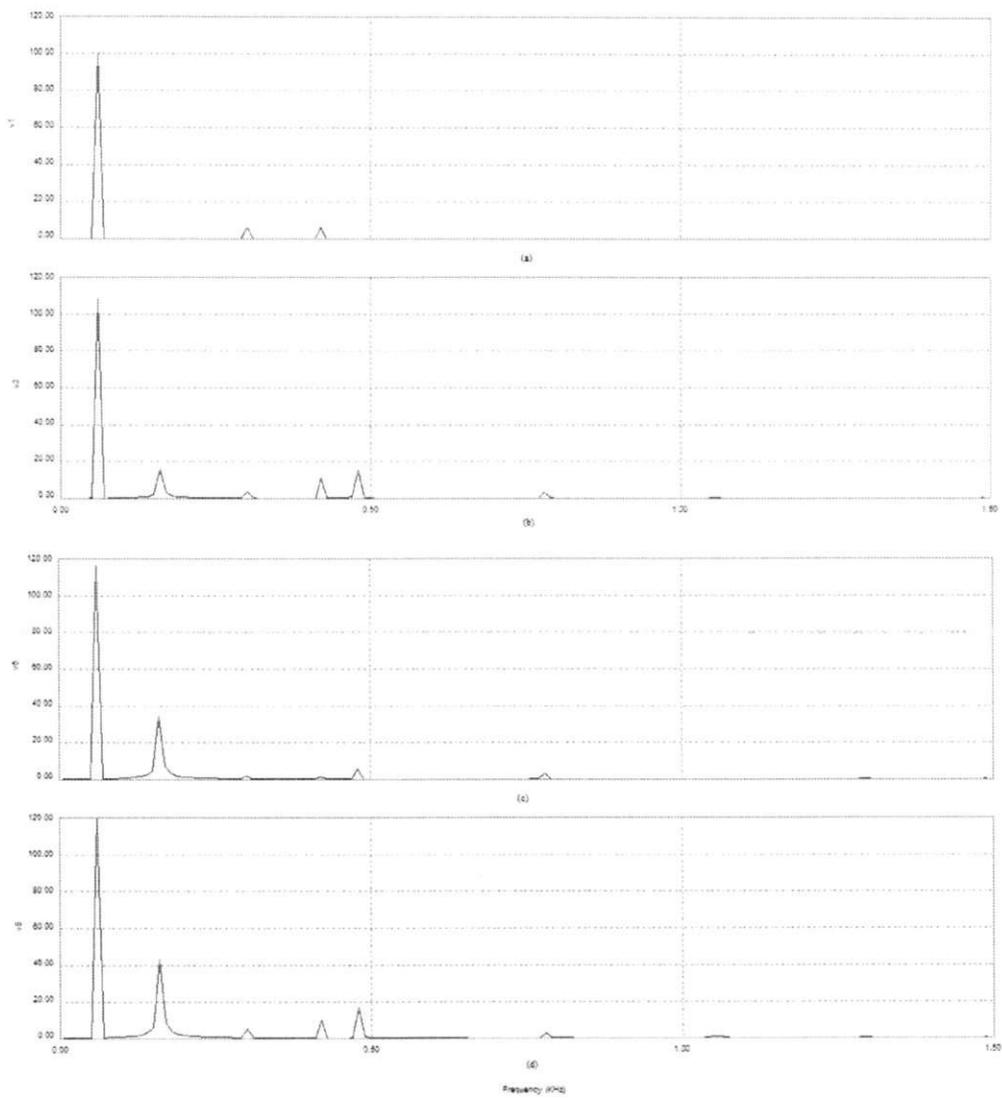


Fig.12 – Espectro de freqüências. (a) v_1 , (b) v_3 , (c) v_6 , (d) v_9 .

7. Conclusão

Este trabalho discutiu o desempenho de um sistema de distribuição de energia quando um filtro ativo paralelo é utilizado no barramento final desse sistema com o propósito de amortecer os harmônicos provindos da geração. Essa estratégia foi validada através de simulações no PSIM e MATLAB. O primeiro modelo da linha teve alguns aspectos ideais, mas ajudou bastante na introdução dos conceitos e motivou à continuidade do estudo passando de um controle em malha aberta para um controle de ajuste de ganho automático.

Aqui, foram abordados diversos conceitos adquiridos durante o curso de graduação em Engenharia Elétrica. Em uma visão geral, pôde ser mostrada a modelagem de linhas de transmissão aprendida na disciplina Ondas e Linhas e suas aplicações em sistemas de potência vistas em Análise de Sistemas Elétricos. Também foram mostradas aplicações dos Filtros Ativos, o filtro paralelo em destaque, estudado na disciplina Conversores Estáticos e Eletromecânicos, bem como os componentes de um filtro ativo visto em Eletrônica de Potência. Estratégias de controle foram bem abordadas em Acionamentos Elétricos. Por fim a disciplina Controle Analógico na qual foram dados os primeiros passos do aprendizado das técnicas de controle moderno para diversos sistemas e também à familiarização com os blocos e diagramas de controle, essenciais para a realização desses estudos. Em complemento, disciplinas fundamentais como Circuitos Elétricos I e II ajudaram no entendimento dos circuitos apresentados e na apresentação de algumas equações, Cálculo Numérico juntamente com Introdução e Técnicas de Programação estiveram presentes na utilização de métodos numéricos em ambientes de programação para realização das simulações dos circuitos elétricos. Análise de Sinais e Sistemas onde a teoria sobre as transformadas de Fourier na obtenção dos harmônicos de sinais periódicos também foi fundamental para a conclusão deste trabalho.

8. Referências

- [1] H. Akagi, "Control strategy and site selection of a shunt active filter for damping of harmonic propagation in power distribution systems," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 12, pp. 354–363, Feb. 1997.
- [2] H. Akagi, H. Fujita, and K. Wada, "A shunt active filter based on voltage detection for harmonic termination of a radial power distribution line," *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, vol. 35, pp. 638–645, May/June 1999.
- [3] K. Wada, H. Fujita, and H. Akagi, "Considerations of a shunt active filter based on voltage detection for installation on a long distribution feeder," in *Proc. Conf. IEEE-IAS Annu. Meeting*, 2001, pp. 157–163.
- [4] H. Akagi, H. Fujita, S. Ogasawara, and P. Jintakosonwit, "Implementation and Performance of Automatic Gain Adjustment in a Shunt Active Filter for Harmonic Damping Throughout a Power Distribution System", in *IEEE Trans. on power electronics*, vol. 17, no. 3, May 2002.