

Efeitos e causas de harmônicas no sistema de energia elétrica

A análise aqui feita baseia-se no texto da recomendação IEEE-519 [4.1] que trata de práticas e requisitos para o controle de harmônicas no sistema elétrico de potência. No referido texto são identificadas diversas referências específicas sobre os diferentes fenômenos abordados.

1. *Efeitos de harmônicas em componentes do sistema elétrico*

O grau com que harmônicas podem ser toleradas em um sistema de alimentação depende da susceptibilidade da carga (ou da fonte de potência). Os equipamentos menos sensíveis, geralmente, são os de aquecimento (carga resistiva), para os quais a forma de onda não é relevante. Os mais sensíveis são aqueles que, em seu projeto, assumem a existência de uma alimentação senoidal como, por exemplo, equipamentos de comunicação e processamento de dados. No entanto, mesmo para as cargas de baixa susceptibilidade, a presença de harmônicas (de tensão ou de corrente) podem ser prejudiciais, produzindo maiores esforços nos componentes e isolantes.

2. **Motores e geradores**

O maior efeito dos harmônicos em máquinas rotativas (indução e síncrona) é o aumento do aquecimento devido ao aumento das perdas no ferro e no cobre. Afeta-se, assim, sua eficiência e o torque disponível. Além disso, tem-se um possível aumento do ruído audível, quando comparado com alimentação senoidal.

Outro fenômeno é a presença de harmônicos no fluxo, produzindo alterações no acionamento, como componentes de torque que atuam no sentido oposto ao da fundamental, como ocorre com o 5^o, 11^o, 17^o, etc. harmônicos. Isto significa que tanto o quinto componente, quanto o sétimo induzem uma sexta harmônica no rotor. O mesmo ocorre com outros pares de componentes.

O sobre-aquecimento que pode ser tolerado depende do tipo de rotor utilizado. Rotores bobinados são mais seriamente afetados do que os de gaiola. Os de gaiola profunda, por causa do efeito pelicular, que conduz a condução da corrente para a superfície do condutor em frequências elevadas, produzem maior elevação de temperatura do que os de gaiola convencional.

O efeito cumulativo do aumento das perdas reflete-se numa diminuição da eficiência e da vida útil da máquina. A redução na eficiência é indicada na literatura como de 5 a 10% dos valores obtidos com uma alimentação senoidal. Este fato não se aplica a máquinas projetadas para alimentação a partir de inversores, mas apenas àquelas de uso em alimentação direta da rede.

Algumas componentes harmônicas, ou pares de componentes (por exemplo, 5^a e 7^a, produzindo uma resultante de 6^a harmônica) podem estimular oscilações mecânicas em sistemas turbina-gerador ou motor-carga, devido a uma potencial excitação de ressonâncias mecânicas. Isto pode levar a problemas de industriais como, por exemplo, na produção de fios, em que a precisão no acionamento é elemento fundamental para a qualidade do produto.

3. **Transformadores**

Também neste caso tem-se um aumento nas perdas. Harmônicos na tensão aumentam as perdas ferro, enquanto harmônicos na corrente elevam as perdas cobre. A elevação das perdas cobre deve-se principalmente ao efeito pelicular, que implica numa redução da área efetivamente condutora à medida que se eleva a frequência da corrente.

Normalmente as componentes harmônicas possuem amplitude reduzida, o que colabora para não tornar esses aumentos de perdas excessivos. No entanto, podem surgir situações específicas (ressonâncias, por exemplo) em que surjam componentes de alta frequência e amplitude elevada.

Além disso o efeito das reatâncias de dispersão fica ampliado, uma vez que seu valor aumenta com a frequência.

Associada à dispersão existe ainda outro fator de perdas que se refere às correntes induzidas pelo fluxo disperso. Esta corrente manifesta-se nos enrolamentos, no núcleo, e nas peças metálicas adjacentes aos enrolamentos. Estas perdas crescem proporcionalmente ao quadrado da frequência e da corrente.

Tem-se ainda uma maior influência das capacitâncias parasitas (entre espiras e entre enrolamento) que podem realizar acoplamentos não desejados e, eventualmente, produzir ressonâncias no próprio dispositivo.

4. Cabos de alimentação

Em razão do efeito pelicular, que restringe a seção condutora para componentes de frequência elevada, também os cabos de alimentação têm um aumento de perdas devido às harmônicas de corrente. Além disso tem-se o chamado "efeito de proximidade", o qual relaciona um aumento na resistência do condutor em função do efeito dos campos magnéticos produzidos pelos demais condutores colocados nas adjacências.

A figura 4.1 mostra curvas que indicam a seção transversal e o diâmetro de condutores de cobre que devem ser utilizados para que o efeito pelicular não seja significativo (aumento menor que 1% na resistência). Note que para 3kHz o máximo diâmetro aconselhável é aproximadamente 1 ordem de grandeza menor do que para 50Hz. Ou seja, para frequências acima de 3 kHz um condutor com diâmetro maior do que 2,5 mm já começa a ser significativo em termos de efeito pelicular.

Além disso, caso os cabos sejam longos e os sistemas conectados tenham suas ressonâncias excitadas pelas componentes harmônicas, podem aparecer elevadas sobre-tensões ao longo da linha, podendo danificar o cabo.

Na figura 4.2 tem-se a resposta em frequência, para uma entrada em tensão, de um cabo de 10 km de comprimento, com parâmetros obtidos de um cabo trifásico 2 AWG, 6 kV. As curvas mostram o módulo da tensão no final do cabo, ou seja, sobre a carga (do tipo RL). Dada a característica indutiva da carga, esta comporta-se praticamente como um circuito aberto em frequências elevadas. Quando o comprimento do cabo for igual a $\frac{1}{4}$ do comprimento de onda do sinal injetado, este "circuito aberto" no final da linha reflete-se como um curto-circuito na fonte. Isto repete-se para todos os múltiplos ímpares desta frequência. As duas curvas mostradas referem-se à resposta em frequência sem e com o efeito pelicular. Nota-se que considerando este efeito tem-se uma redução na amplitude das ressonâncias, devido ao maior amortecimento apresentado pelo cabo por causa do aumento de sua resistência.

Na figura 4.3 tem-se a perfil do módulo da tensão ao longo do cabo quando o sinal de entrada apresentar-se na primeira frequência de ressonância. Observe que a sobre-tensão na carga atinge quase 4 vezes a tensão de entrada (já considerando a ação do efeito pelicular). O valor máximo não ocorre exatamente sobre a carga porque ela não é, efetivamente, um circuito aberto nesta frequência de aproximadamente 2,3 kHz.

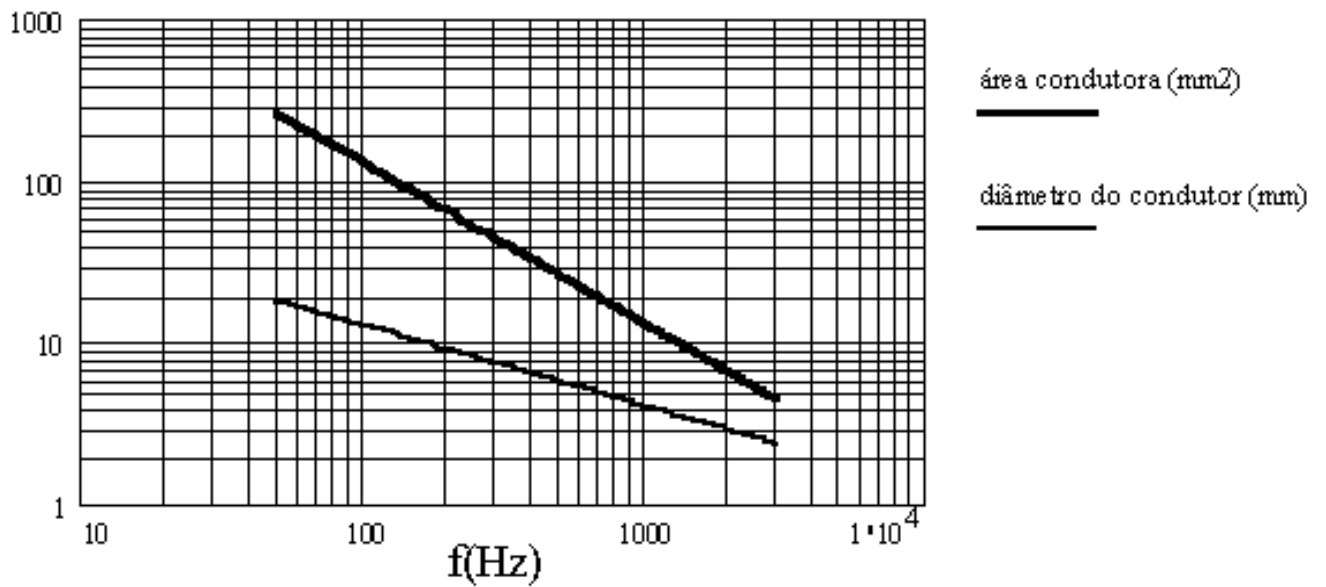


Figura 4.1 Área de seção e diâmetro de fio de cobre que deve ser usado em função da frequência da corrente para que o aumento da resistência seja menor que 1%.

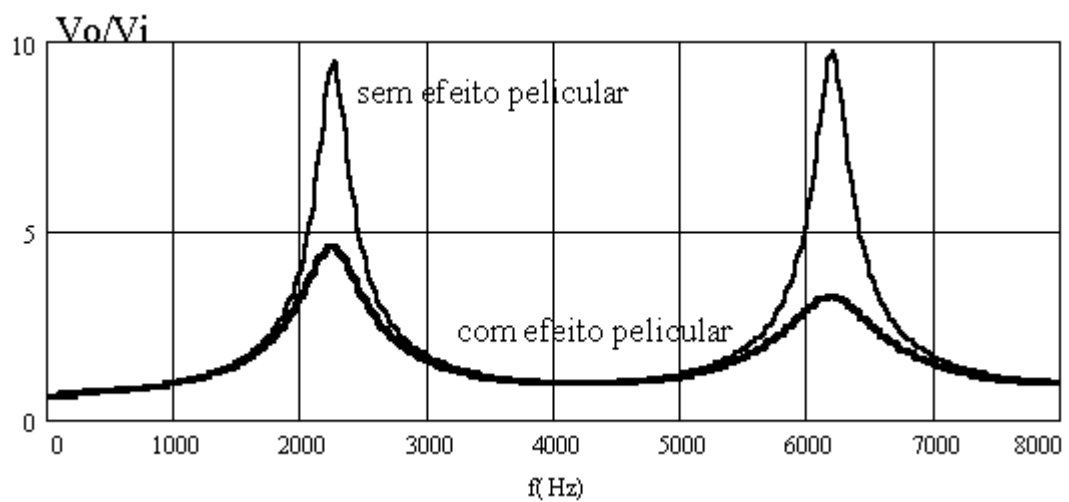


Figura 4.2 Resposta em frequência de cabo trifásico (10 km).

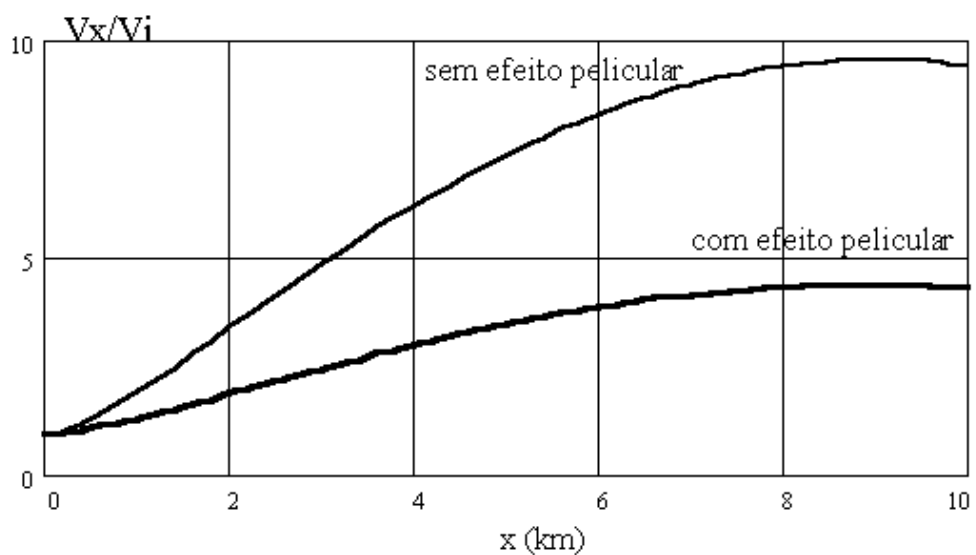


Figura 4.3 Perfil de tensão ao longo do cabo na frequência de ressonância.

Na figura 4.4 tem-se a resposta no tempo de uma linha de 40 km (não incluindo o efeito pelicular), para uma entrada senoidal (50Hz), na qual existe uma componente de 1% da harmônica que coincide com a frequência de ressonância do sistema (11ª). Observe como esta componente aparece amplificada sobre a carga.

À medida que aumenta o comprimento do cabo a ressonância se dá em frequência mais baixa, aumentando a possibilidade de amplificar os harmônicos mais comuns do sistema.

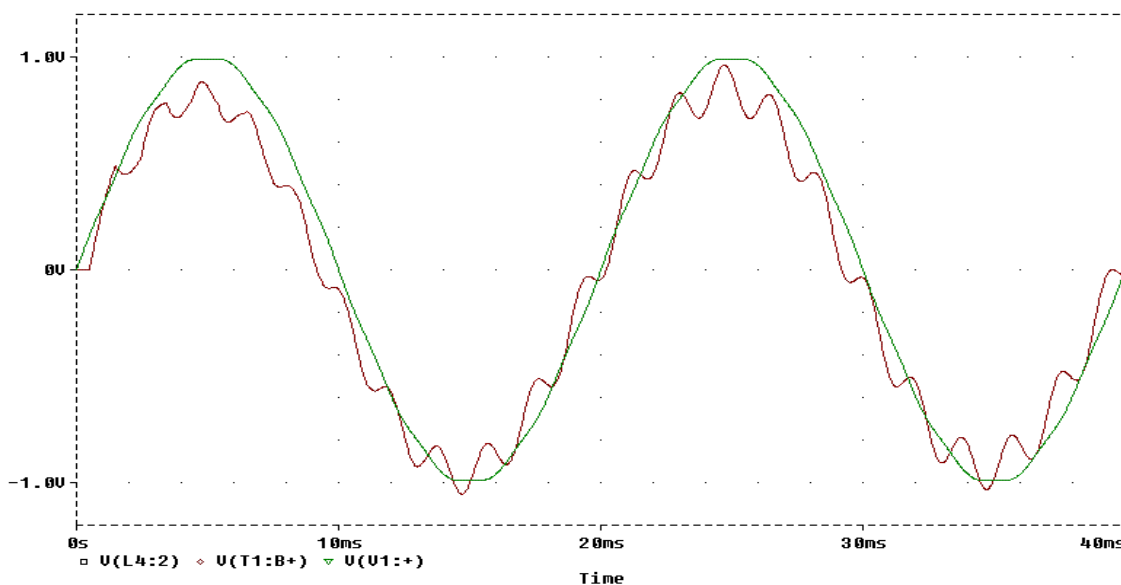


Figura 4.4 Resposta no tempo de cabo de transmissão a uma entrada com componente na frequência de ressonância.

5. Capacitores

O maior problema aqui é a possibilidade de ocorrência de ressonâncias (excitadas pelas harmônicas), podendo produzir níveis excessivos de corrente e/ou de tensão. Além disso, como a reatância capacitiva diminui com a frequência, tem-se um aumento nas correntes relativas às harmônicas presentes na tensão.

As correntes de alta frequência, que encontrarão um caminho de menor impedância pelos capacitores, elevarão as suas perdas ôhmicas. O decorrente aumento no aquecimento do dispositivo encurta a vida útil do capacitor.

A figura 4.5 mostra um exemplo de correção do fator de potência de uma carga e que leva à ocorrência de ressonância no sistema. Na figura 4.6 são mostradas as figuras relativas à tensão e às correntes da fonte nos diferentes circuitos.

Considere o circuito (a), no qual é alimentada uma carga do tipo RL, apresentando um baixo fator de potência. No circuito (b), é inserido um capacitor que corrige o fator de potência, como se observa pela forma da corrente mostrada na figura 4.6 (intermediária). Suponhamos que o sistema de alimentação possua uma reatância indutiva, a qual interage com o capacitor e produz uma ressonância série (que conduz a um curto-circuito na frequência de sintonia). Caso a tensão de alimentação possua uma componente nesta frequência, esta harmônica será amplificada. Isto é

observado na figura 4.6 (inferior), considerando a presença de uma componente de tensão de 5ª harmônica, com 3% de amplitude. Observe a notável amplificação na corrente, o que poderia produzir importantes efeitos sobre o sistema.

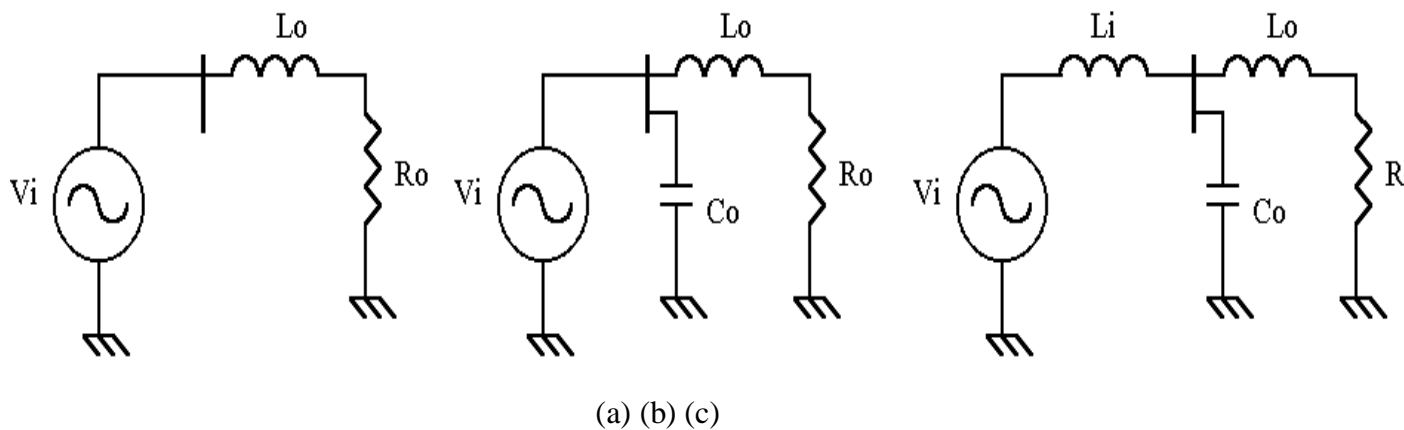


Figura 4.5 Circuitos equivalentes para análise de ressonância da linha com capacitor de correção do fator de potência.

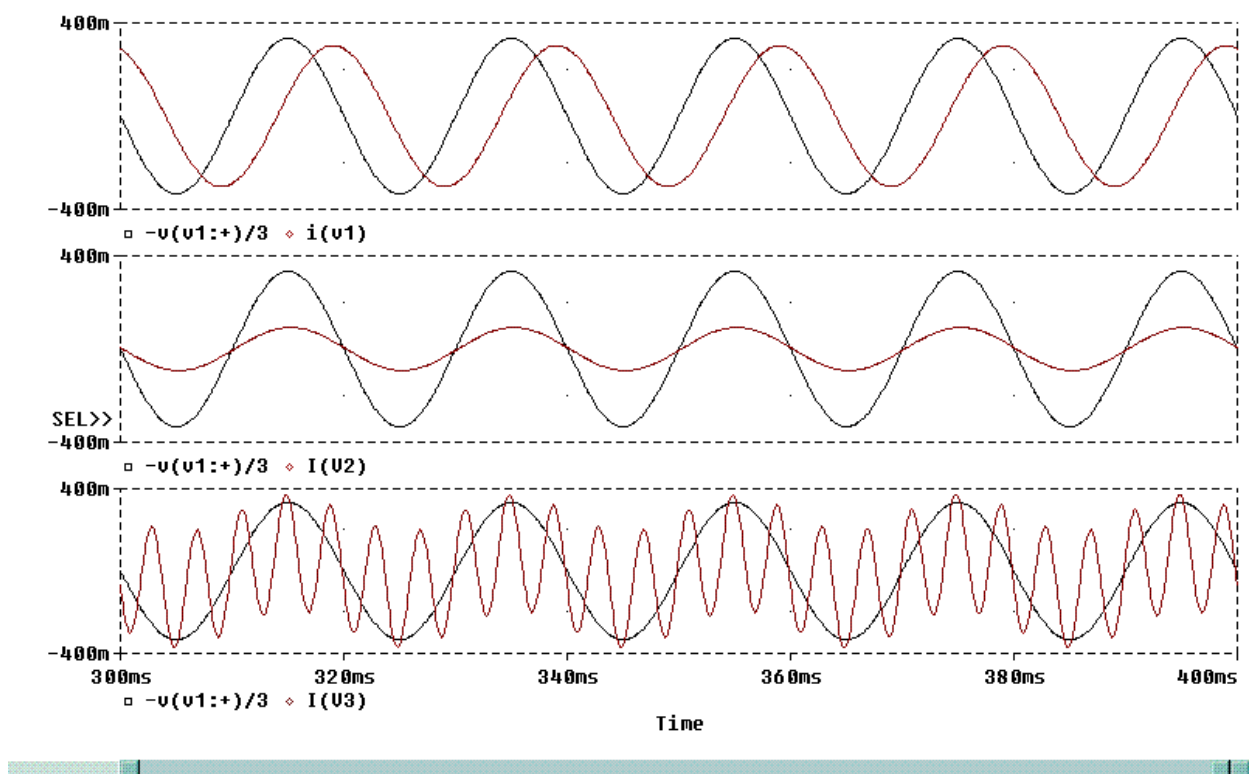


Figura 4.6 Formas de onda relativas aos circuitos da figura 4.5: (a) - superior; (b) - intermediário; (c) - inferior.

6. Equipamentos eletrônicos

Alguns equipamentos podem ser muito sensíveis a distorções na forma de onda de tensão. Por exemplo, se um aparelho utiliza os cruzamento com o zero (ou outros aspectos da onda de tensão)

para realizar alguma ação, distorções na forma de onda podem alterar, ou mesmo inviabilizar, seu funcionamento.

Caso as harmônicas penetrem na alimentação do equipamento por meio de acoplamentos indutivos e capacitivos (que se tornam mais efetivos com a aumento da frequência), eles podem também alterar o bom funcionamento do aparelho.

7. **Aparelhos de medição**

Aparelhos de medição e instrumentação em geral são afetados por harmônicas, especialmente se ocorrerem ressonâncias que afetam a grandeza medida.

Dispositivos com discos de indução, como os medidores de energia, são sensíveis a componentes harmônicas, podendo apresentar erros positivos ou negativos, dependendo do tipo de medidor e da harmônica presente. Em geral a distorção deve ser elevada (>20%) para produzir erro significativo.

8. **Relés de proteção e fusíveis**

Um aumento da corrente eficaz devida a harmônicas sempre provocará um maior aquecimento dos dispositivos pelos quais circula a corrente, podendo ocasionar uma redução em sua vida útil e, eventualmente, sua operação inadequada.

Em termos dos relés de proteção não é possível definir completamente as respostas devido à variedade de distorções possíveis e aos diferentes tipos de dispositivos existentes.

A referência [4.2] é um estudo no qual se afirma que os relés de proteção geralmente não respondem a qualquer parâmetro identificável, tais como valores eficazes da grandeza de interesse ou a amplitude de sua componente fundamental. O desempenho de um relé considerando uma faixa de frequências de entrada não é uma indicação de como aquele componente responderá a uma onda distorcida contendo aquelas mesmas componentes espectrais. Relés com múltiplas entradas são ainda mais imprevisíveis.

2. *Causas de distorção harmônica*

Serão apresentados a seguir equipamentos e fenômenos que produzem contaminação harmônica no sistema elétrico. Quando se fizer referência ao termo ideal, significa que está sendo desconsiderada os efeitos indutivos do sistema de alimentação, ou seja, considera-se a alimentação feita a partir de uma fonte ideal.

1. **Conversores**

Serão vistos aqui alguns casos típicos de componentes harmônicas produzidas por conversores eletrônicos de potência, tais como retificadores e controladores CA.

Formas de onda em conversores ideais

A figura 4.7 mostra um retificador a diodos alimentando uma carga do tipo RL, ou seja, que tende a consumir uma corrente constante, caso sua constante de tempo seja muito maior do que o período da rede.

Na figuras 4.8 tem-se a forma de tensão de saída do retificador, numa situação ideal. Supondo uma corrente constante, sem ondulação sendo consumida pela carga, a forma de onda da corrente na entrada do retificador é mostrada na figura 4.9.

As amplitudes das componentes harmônicas deste sinal seguem a equação (4.1)

$$I_h = \frac{1}{h}$$

$$h = k \cdot q \pm 1 \quad (4.1)$$

onde:

h é a ordem harmônica;

k é qualquer inteiro positivo;

q é o número de pulsos do circuito retificador (6, no exemplo).

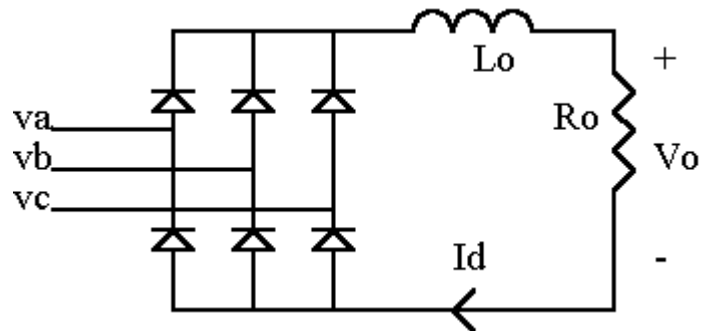


Figura 4.7 Circuito retificador trifásico, com carga RL.

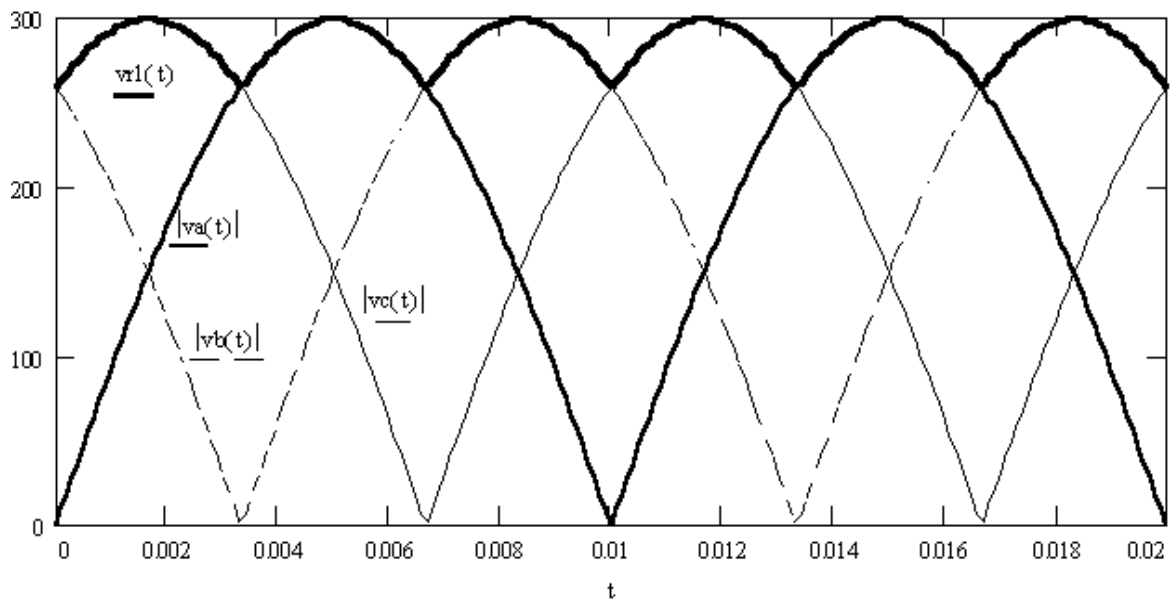


Figura 4.8 Tensão de saída de retificador ideal.

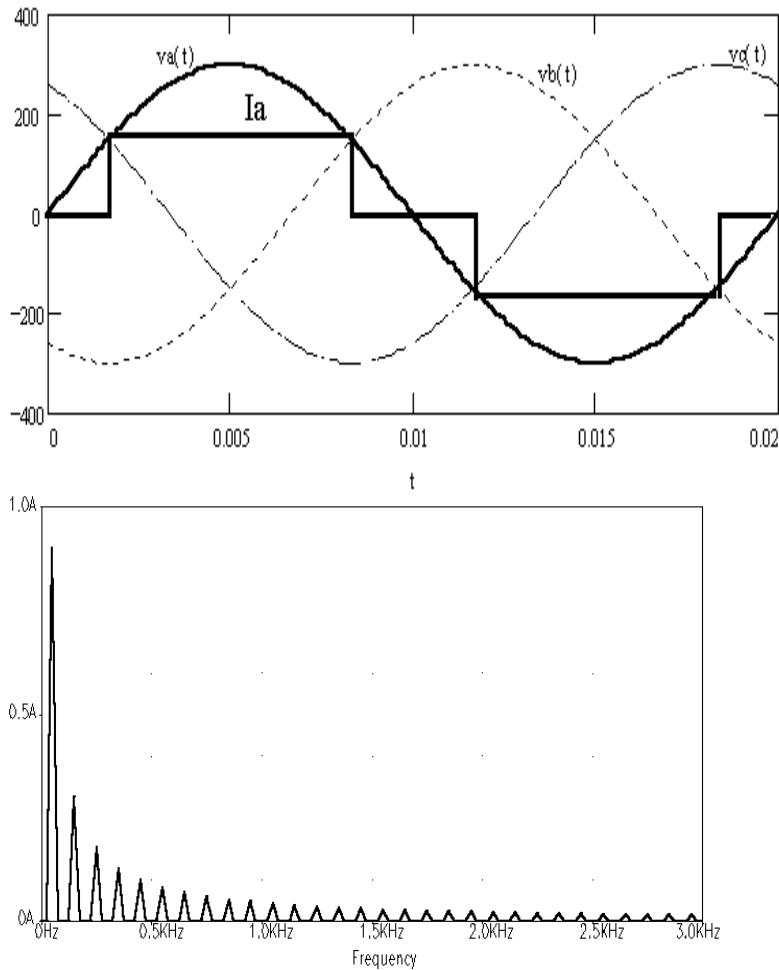


Figura 4.9 Tensões e corrente de entrada com carga indutiva ideal e espectro da corrente.

1. A comutação

Uma forma de corrente retangular como a suposta na figura 4.9 pressupõe a não existência de indutâncias em seu caminho, ou então uma fonte de tensão infinita, que garante a presença de tensão qualquer que seja a derivada da corrente.

Na presença de indutâncias, como mostrado na figura 4.10, no entanto, a transferência de corrente de uma fase para outra não pode ser instantânea. Ao invés disso, existe um intervalo no qual estarão em condução o diodo que está entrando e aquele que está em processo de desligamento. Isto configura um curto-circuito na entrada do retificador. A duração deste curto-circuito depende de quão rapidamente se dá o crescimento da corrente pela fase que está entrando em condução, ou seja, da diferença de tensão entre as fases que estão envolvidas na comutação.

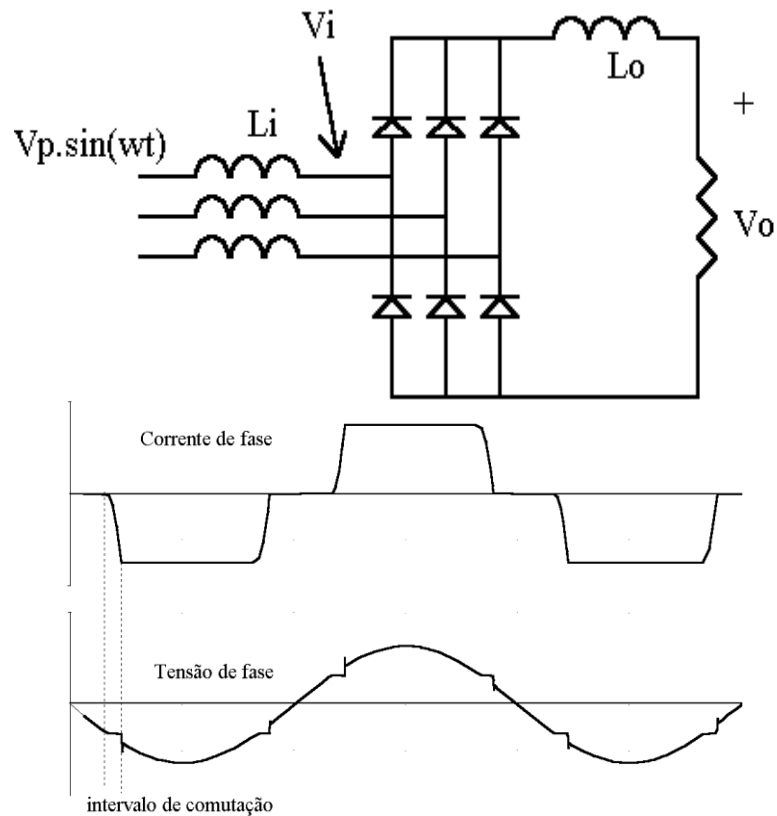


Figura 4.10 Topologia de retificador trifásico, não-controlado, com carga indutiva . Formas de onda típicas, indicando o fenômeno da comutação.

A figura 4.11 mostra um resultado experimental relativo a um retificador deste tipo. Neste caso a corrente não é plana, mas apresenta uma ondulação determinada pelo filtro indutivo do lado CC. Mesmo neste caso pode-se notar que as transições da corrente de entrada não são instantâneas e que durante as transições, nota-se uma perturbação na tensão na entrada do retificador. O valor instantâneo desta tensão é a média das tensões das fases que estão comutando, supondo iguais as indutâncias da linha. Este "afundamento" da tensão é chamado de "notching".

Como se nota, a distorção na tensão ocorre devido à distorção na corrente associada à reatância da linha.

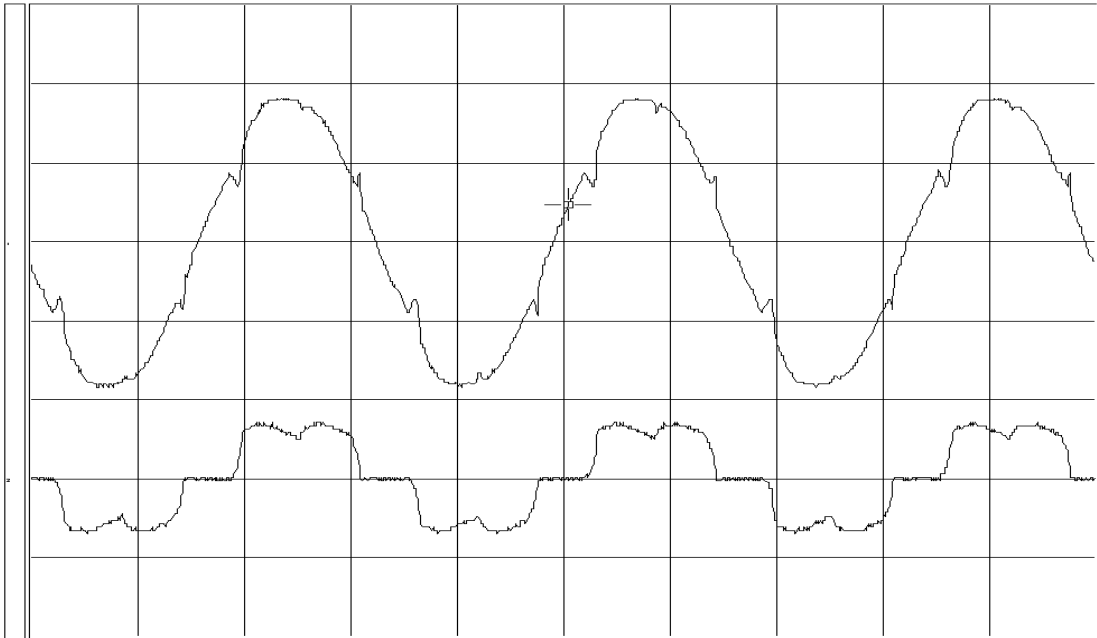


Figura 4.11 Distorção na tensão devido ao fenômeno de comutação.

2. Reator controlado a tiristores (RCT)

A figura 4.12 mostra o circuito de um RCT, elemento utilizado para fazer controle de tensão no sistema elétrico. Isto é feito pela síntese de uma reatância equivalente, que varia entre 0 e L , em função do intervalo de condução do par de tiristores. A forma de onda da corrente, bem como seu espectro estão mostrados na figura 4.13. Observe a presença de harmônicos ímpares. À medida que o intervalo de condução se reduz aumenta a THD da corrente.

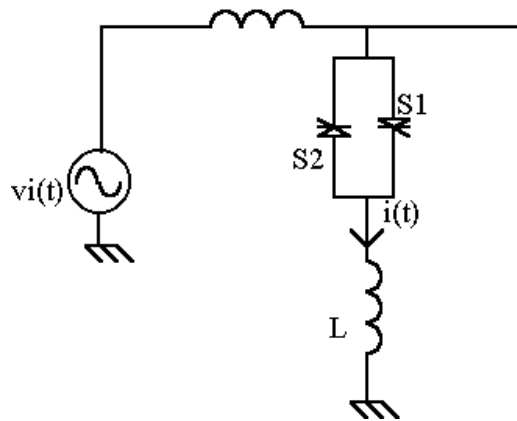


Figura 4.12 Diagrama elétrico de RCT.

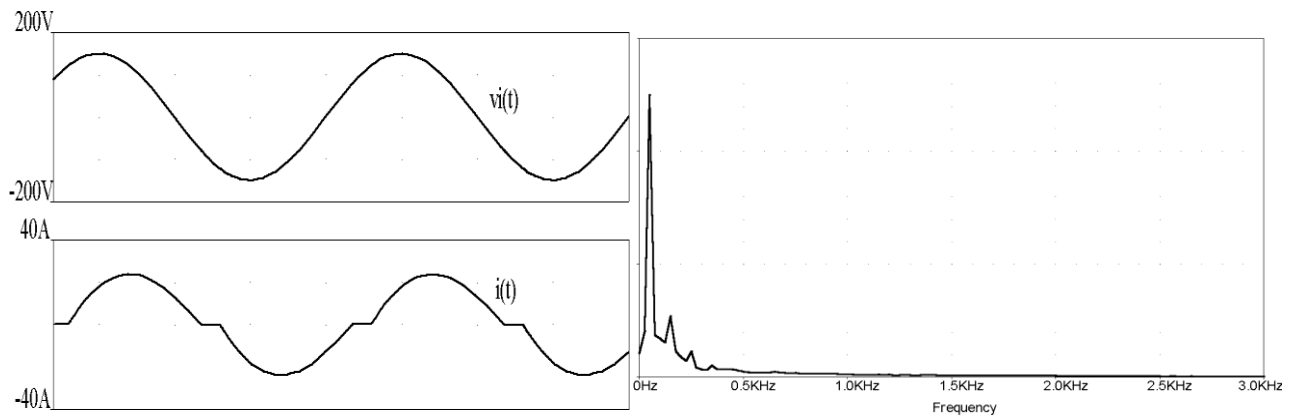


Figura 4.13 Formas de onda e espectro da corrente em RCT.

A corrente obedece à seguinte expressão:

$$i(t) = \frac{V_i}{\omega L} \cdot [\cos(\alpha) - \cos(\omega t)] \quad (4.2)$$

α é o ângulo de disparo do SCR, medido a partir do cruzamento da tensão com o zero. V_i é o valor de pico da tensão.

As componentes harmônicas (valor eficaz) são dadas pela equação (4.3), existindo para todas as componentes ímpares. A figura 4.14 mostra o comportamento de algumas harmônicas em função do ângulo α . Note que a terceira componente pode atingir quase 14% do valor da fundamental.

$$I_h = \frac{4}{\pi} \frac{V_i}{\sqrt{2}\omega L} \left[\frac{\sin((h+1)\cdot\alpha)}{2(h+1)} + \frac{\sin((h-1)\cdot\alpha)}{2(h-1)} - \cos(\alpha) \cdot \frac{\sin(h\cdot\alpha)}{h} \right] \quad (4.3)$$

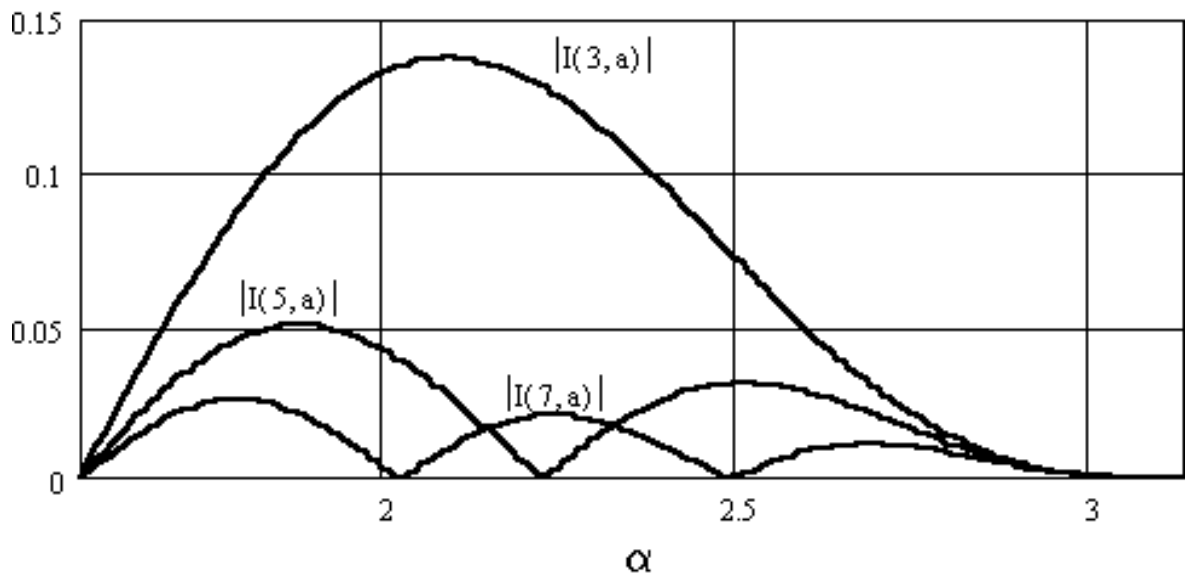


Figura 4.14 Variação do valor eficaz de cada componente harmônica em relação à fundamental.

3. Forno de arco

As harmônicas produzidas por um forno de arco, usado na produção de aço, são imprevisíveis devida à variação aleatória do arco. A corrente do arco é não-periódica e sua análise revela um espectro contínuo, incluindo harmônicas de ordem inteira e fracionária. Entretanto, medições indicam que harmônicas inteiras entre a 2ª e a 7ª predominam sobre as demais, sendo que sua amplitude decai com a ordem.

Quando o forno atua no refino do material, a forma de onda se torna simétrica, desaparecendo as harmônicas pares. Na fase de fusão, tipicamente, as componentes harmônicas apresentam amplitude de até 8% da fundamental, enquanto no refino valores típicos são em torno de 2%.

4. Retificadores com filtro capacitivo

Conforme já foi visto, a grande parte dos equipamentos eletrônicos possuem um estágio de entrada constituído por um retificador monofásico com filtro capacitivo. este tipo de circuito produz na rede correntes de forma impulsiva, centrados aproximadamente no pico da onda senoidal. O circuito está mostrado na figura 4.15. Na figura 4.16 tem-se formas de onda da tensão e da corrente, obtidas por simulação, bem como o espectro da corrente. Nota-se a grande amplitude das harmônicas, produzindo, certamente, uma elevada THD.

Situação semelhante ocorre com entrada trifásica, quando são observados 2 impulsos de corrente em cada semi-ciclo, como mostra a figura 4.17. Nota-se, mais uma vez, a significativa distorção que pode ocorrer na forma da tensão devido à queda de tensão que ocorre na reatância da linha.

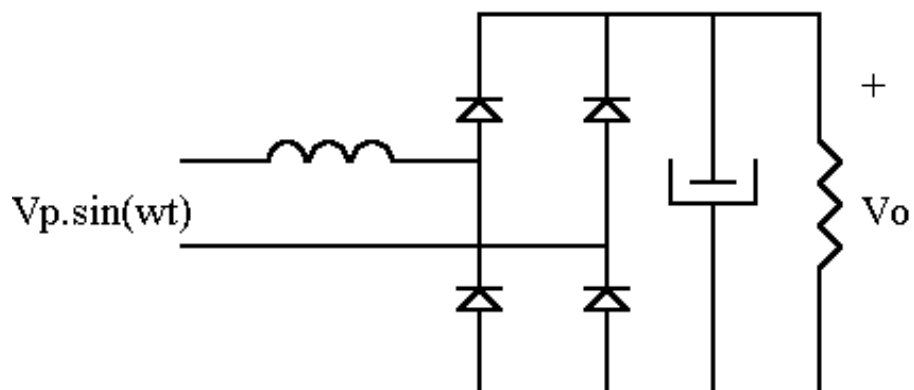
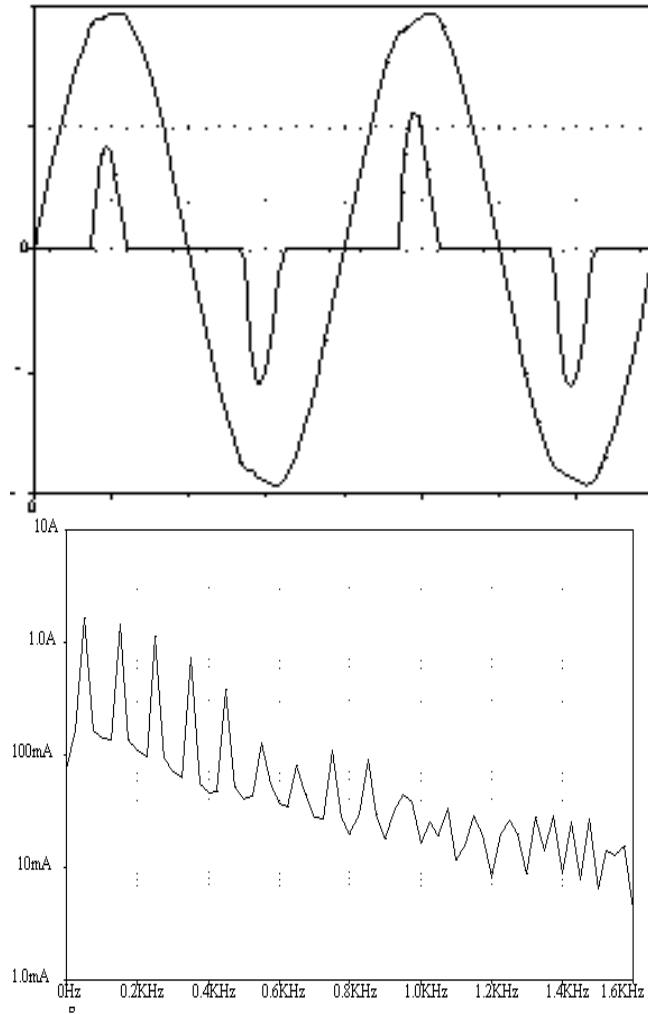


Figura 4.15 Retificador monofásico com filtro capacitivo.



(a) (b)

Figura 4.16 (a) Corrente de entrada e tensão de alimentação de retificador alimentando filtro capacitivo. (b) Espectro da corrente.

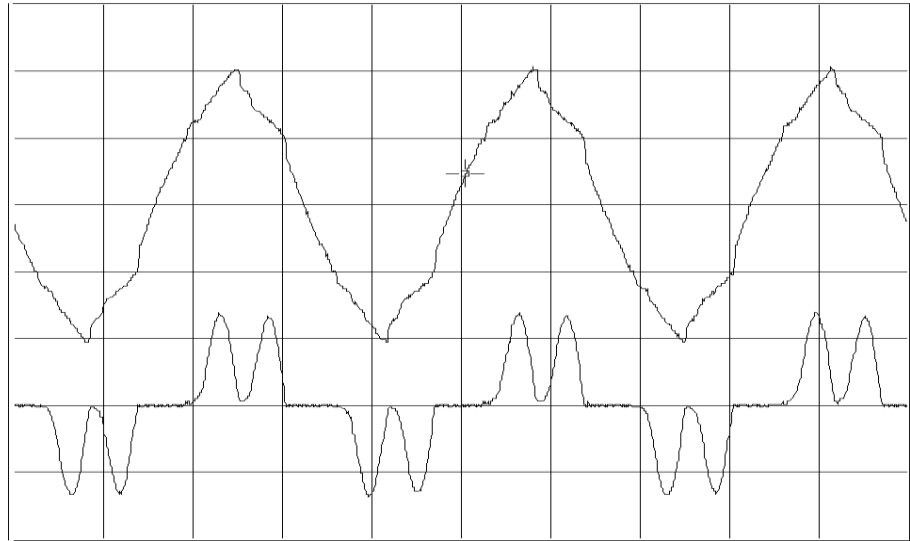


Figura 4.17 Tensão na entrada (superior) e corrente de linha (inferior) em retificador trifásico com filtro capacitivo.

3. *Referências bibliográficas*

[4.1] "IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems." Project IEEE-519. October 1991.

[4.2] "Sine-wave Distortions in Power Systems and the Impact on Protective Relaying." Report prepared by the Power System Relaying Committee of the IEEE Power Engineering Society. Novembro 1982.