

## 0.1 Efeitos da Distorção Harmônica em Equipamentos

Equipamentos elétricos que constituem um sistema qualquer necessitam de alimentação elétrica para funcionar. Entretanto, para que o equipamento entregue as funções desejadas e tenha seu funcionamento adequado, as tensões no ponto de entrada de energia devem ser conforme as especificações requeridas pelo fabricante do equipamento. Deve ser lembrado que, em geral, os dispositivos elétricos com alimentação AC são projetados e desenvolvidos admitindo-se operação sob condições de tensão e corrente sinusoidais puras [10]. Para o caso em estudo onde a tensão é alternada com frequência constante, a alimentação deve entregar estes parâmetros de maneira bem definida para atender a certos critérios de qualidade, de modo a garantir o bom funcionamento e não danificar os sistemas conectados à rede.

Com a inserção de cargas não lineares na rede, surgem distorções na forma de onda da tensão que refletem na qualidade de energia do sistema. Para o caso de aeronaves, e aplicando a série de Fourier na ondulação da tensão, espera-se que haja apenas uma componente senoidal em 400 Hz, porém, devido às cargas não lineares conectados à rede, há o aparecimento de componentes em frequências múltiplas de 400 Hz. A presença de harmônicas na rede do sistema elétrico acaba por distorcer a forma de onda senoidal tornando-a disforme e alterando seus níveis de tensão. Essa inserção de harmônicas em diferentes frequências e magnitudes causam efeitos adversos em equipamentos elétricos de modo que estes operam de maneira inapropriada. A seguir, utilizando das referências [10] e [12], serão elencados os principais efeitos da distorção harmônica em equipamentos tipicamente afetados do sistema elétrico de uma aeronave.

- i) *Equipamentos Eletrônicos*: A evolução dos sistemas em aeronaves trouxe a tendência do aumento do número de equipamentos eletroeletrônicos com a consolidação do conceito de *more electric aircraft*. Estes equipamentos consistem desde importantes cargas como computadores, controladores, *drivers* e aviônicos que estão diretamente relacionados com a aeronavegabilidade da aeronave, à sistemas menos impactantes na segurança como os sistemas de entretenimento de bordo. Sendo assim, o correto funcionamento destes equipamentos é de fundamental importância para a segurança operacional de uma aeronave. Nesse contexto, os efeitos da distorção harmônica em equipamentos podem ser de fator determinante à segurança devido às consequências negativas que estes possam apresentar.

Um dos efeitos da distorção harmônica em equipamentos eletrônicos é o mau funcionamento devido à operação baseada na detecção da passagem por zero da tensão de alimentação, ou ainda, baseado em outros aspectos da forma de onda

da tensão de entrada. Muitos equipamentos eletrônicos possuem semicondutores que operam por comutação suave pela técnica de *zero voltage switching* (ZVS) [13], onde a comutação ocorre no cruzamento da tensão de entrada por zero. Isto se deve basicamente para reduzir interferência eletromagnética e corrente de *inrush*. Com os múltiplos cruzamentos da tensão em zero devido à distorção da forma de onda, o período de comutação acaba sendo alterado, trazendo uma operação errônea do equipamento.

Equipamentos eletrônicos geralmente necessitam de fontes de energia DC como alimentação principal, exigindo assim conversores AC-DC na entrada do equipamento. A operação desses conversores utiliza o valor de pico da tensão senoidal da rede para manter os capacitores do conversor de entrada carregados e fornecendo os níveis de tensão estáveis. Dependendo do grau de distorção harmônica na rede, as tensões de pico podem ser maiores ou menores que o valor nominal, tornando esses conversores inefetivos quanto à manutenção de tensão DC especificada. Muitos equipamentos eletrônicos, como computadores, são sensíveis quanto a variação da tensão de entrada e necessitam de níveis estáveis e bem definidos para operar de maneira apropriada, sendo que a presença de harmônicas na rede pode trazer problemas no funcionamento destes equipamentos. Para contornar esse tipo de problema poderia ser incluindo um sistema de realimentação com fontes chaveadas controladas, porém isto acabaria por aumentar a complexidade e o número de componentes, o que torna o equipamento mais caro e complexo.

A comutação de chaves semicondutoras de potência produzem distorções com rápida variação de tensão na rede, a qual produzem componentes de alta frequência. Tais distorções são denominadas *notches* e são representadas na figura 1. Primeiramente, dependendo da intensidade de incidência dos *notches* podem ocorrer cruzamentos da tensão por zero que acarretariam em problemas já descritos anteriormente. Ainda, por apresentar componentes de alta frequência, a presença destes distúrbios emana radiação eletromagnética pelos cabos que são captados pela cablagem de outros sistemas. Sua presença na rede elétrica pode causar interferência em equipamentos eletrônicos digitais que, por ventura, podem induzir bits errôneos nestes equipamentos.

- ii) *Maquinas Rotativas*: As maquinas rotativas estão presente em diversos sistemas de uma aeronave e as criticalidades associadas ao seu funcionamento podem ser baseadas desde funções sem efeito direto na segurança operacional à funções cuja falha podem ser catastróficas. Para este ultimo caso, cita-se como exemplo os comandos de voo de aeronaves mais modernas, onde motores elétricos são utilizados juntamente com o sistema hidráulico. Deste modo, as maquinas rota-

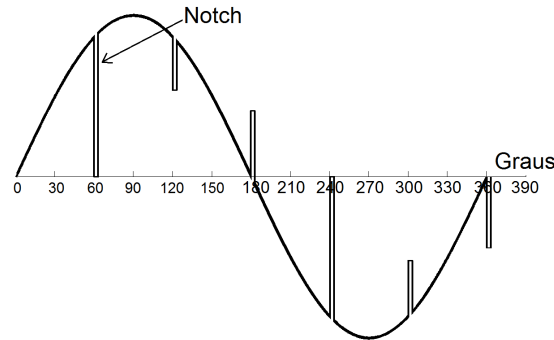


FIGURA 1 – Presença de *notch* na ondulação de tensão [14]

tivas necessitam operar satisfatoriamente para proporcionar a segurança exigida na operação da aeronave.


A operação de uma máquina rotativa alimentada por uma tensão distorcida não senoidal pode trazer sobreaquecimento, torque pulsante, desgaste dos mancais e ruído.

As perdas em um motor são associadas ao espectro de frequência da tensão de entrada do motor. Como o forma da senoide da tensão distorcida relacionada com as harmônicas de mais alta frequência da rede, tem-se que o núcleo ferromagnético e os fios que compõem o motor se sobreaquecem. Esse aumento na temperatura pode trazer diversos problemas, sendo o principal a diminuição significativa da vida útil da máquina, ocasionando o mau funcionamento antes do tempo esperado. Isso traz consequências na operação da aeronave como o aumentando a manutenção ou até a falhas durante o voo.

Os torques pulsantes que surgem com a distorção harmônica causam o desgaste dos mancais da máquina, assim como a fadiga dos componentes associados ao funcionamento do motor. Tais problemas são diretamente ligados à vida útil da máquina como já foram descritos anteriormente.


Muitos motores são controlados por circuitos eletrônicos de potência. Tais controladores, além de aumentar os níveis de distorção da rede, possuem seu funcionamento degradado pelas harmônicas presentes no sistema. Por serem circuitos eletrônicos, os efeitos nestes dispositivos já foram descritos anteriormente em equipamentos eletrônicos. Ainda, com a utilização destes tipos de controladores, seria esperado que a tensão de saída de controle fosse regulada para a correta operação das máquinas rotativas nelas conectadas. Entretanto a tensão de alimentação na entrada destes controladores podem interferir nas tensões de controle da saída, ocasionando problemas mesmo com a presença de tais controladores.


iii) *Transformadores*: Os transformadores são elementos bastante difundidos nos

sistemas elétricos de aeronaves, principalmente naquelas onde a tensão de geração é do tipo AC. Seu uso varia desde retificadores, onde existe um pré condicionamento dos níveis de tensão para valores propícios antes da conversão para níveis DC, à medidores de telemetria e sistemas de proteção. Com isso, o bom funcionamento destes elementos é de grande importância na segurança operacional de aeronaves  que seu mau funcionamento pode causar o defeito de alguns equipamentos eletrônicos ou falhar na proteção do sistema elétrico.

Os principais efeitos das componentes harmônicas nos transformadores são dados pela elevação da temperatura e, conseqüentemente, aumento da taxa de falha e diminuição da vida útil do transformador.

Analogamente às máquinas rotativas, os transformadores sofrem com os efeitos das componentes de alta frequência de tensão cujo reflexo dá-se pelo aumento das perdas do núcleo ferromagnéticos e condutores. Existe ainda a influência sobre os valores das impedâncias de magnetização e dispersão em função das componentes de frequência da tensão de entrada do transformador, a qual pode ocasionar a diminuição da eficiência devido ao fluxo de dispersão. Os efeitos das não idealidades no núcleo ferromagnético são divididos em dois tipos: perdas por histerese e perdas por corrente parasita. Em ambos os casos o efeito é diretamente relacionado com a frequência da tensão de entrada, sendo que com o aumento das componentes de frequência existe a elevação nas perdas no núcleo [15]. Já os problemas causados pelos componentes de alta frequência de corrente são o aumento da temperatura nos condutores pelo efeito pelicular e de proximidade. A decorrência desses efeitos é o incremento das perdas no transformador, a qual faz com que este eventualmente opere com elevadas temperaturas e haja uma piora na taxa de falha do transformador.

- iv) *Relés*: Relés são amplamente utilizados em sistemas de **proteção** de circuitos elétricos. Os comandos de comutação de um relé são feitos pelos controladores  do sistema de **proteção** a qual comanda a abertura ou fechamento do dispositivo de acordo com os limites de corrente que atravessa um ramo do circuito. Por ser um equipamento atuante na **segurança** dos circuitos elétricos de uma aeronave, seu funcionamento **dever** estar livres de erros e funcionamentos inadvertidos.

**De forma geral, o comportamento do relé não é interferido sob condições de componentes harmônicas, entretanto para ramos cuja corrente de falha apresenta um valor baixo, os efeitos podem ser significativos. Deste modo,**  tem-se que o principal efeito das componentes harmônicas em relés é o funcionamento inadvertido de comutação, ou seja, pode haver casos em que o relé deixa de atuar quando comandado ou atue quando não há comandado algum. Ainda, outro fator a ser considerado é que esse comportamento é algo imprevisível e independente de

fabricante. Uma mesma fabricante pode apresentar relés de mesmo modelo que apresentam comportamento diferente em condições de distorção harmônica.

Existem outros efeitos negativos quanto à correta operação de circuitos elétricos sob condições de distorção harmônica. Este problema possui profundos estudos nas áreas de geração e distribuição de energia e em sistemas elétricos industriais. Contudo para o estudo em questão, foram listadas apenas as mais significantes quando se refere à segurança operacional de aeronaves.

## Referências Bibliográficas

- [1] BABIKIAN, R.; LUKACHKO, S. P.; WAITZ, I. A. The historical fuel efficiency characteristics of regional aircraft from technological, operational, and cost perspectives. *Journal of Air Transport Management*, Elsevier, v. 8, n. 6, p. 389–400, 2002.
- [2] MOIR, I. More-electric aircraft-system considerations. In: *IEE Colloquium on Electrical Machines and Systems for the More Electric Aircraft*. Londres: IET, 1999.
- [3] ABDEL-HAFEZ, A.; FORSYTH, A. A review of more-electric aircraft. In: *13th International Conference on Aerospace Science & Aviation Technology (ASAT-13)*. Cairo: Military Technical College, 2009.
- [4] ABDEL-HAFEZ, A. *Recent Advances in Aircraft Technology*. Arábia Saudita: INTECH, 2012. Cap. Power Generation and Distribution System for a More Electric Aircraft-A Review.
- [5] KARIMI, K. J. *Future Aircraft Power Systems - Integration Challenges*. [S.l.]: The Boeing Company, 2007.
- [6] SRIMOOLANATHAN, B. *Aircraft Electrical Power Systems - Charged with Opportunities*. 2008. Acessado em 29/03/2015. Disponível em: <<https://www.frost.com/sublib/display-market-insight.do?id=150507057>>.
- [7] CIDADE, G. *Eletricidade e Eletrônica Aplicada à Biociências*. Disponível em: <<http://fisbio.biof.ufrj.br/restrito/bmb353/>>.
- [8] ALEXANDER, C. K.; SADIKU, M. N. O. *Fundamentals of of Electric Circuits*. 3. ed. [S.l.]: McGraw-Hill Higher Education, 2005.
- [9] DECKMANN, S. M.; POMILIO, J. A. *Avaliação da Qualidade da Energia Elétrica*. 2010. Disponível em: <<http://www.dsce.fee.unicamp.br/antenor/pdf/qualidade/b5.pdf>>.
- [10] KASSICK, E. V. *Harmônicas em Sistemas Industriais de Baixa Tensão*. Florianópolis, Abril 2010. Instituto de Eletrônica de Potência. Universidade Federal de Santa Catarina.

- [11] MUSSOI, F. L.; ESPERANÇA, C. *Resposta em frequência: Filtros passivos*. 2. ed. Florianópolis, 2004. Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina.
- [12] WAGNER, V. et al. Effects of harmonics on equipment. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, v. 8, n. 2, p. 672–680, 1993.
- [13] POMILIO, J. A. *Conversores com Outras Técnicas de Comutação Suave*. 2014. Acessado em 28/05/2015. Disponível em: <<http://www.dsce.fee.unicamp.br/antenor/pdf/CAP5.pdf>>.
- [14] AUTOMATION, R. *Eliminating Voltage Notching on the Distributions System*. Acessado em 29/05/2015. Disponível em: <<http://www.ab.com/support/abdrives/documentation/techpapers/notch.htm>>.
- [15] FITZGERALD, A.; KINGSLEY, C.; UMANS, S. *Máquinas Elétricas - Com Introdução à Eletrônica de Potência*. 6. ed. [S.l.]: McGraw-Hill, 2006.