

0.1 Problemas Causados por Cargas Não Lineares na Rede

Para entender os problemas causados por cargas não lineares conectados à rede, primeiro é necessário entender o funcionamento de sistemas elétricos reais. Os circuitos elétricos compostos por elementos ideais possuem um modelo matemático estabelecido e são fundamentais para descrever as características da resposta do circuito. Entretanto, esses elementos isolados não são factíveis devido a sua natureza ideal. Porém, para a metodização da análise dos circuitos elétricos reais através de modelos matemáticos, são concebíveis a representação do funcionamento destes por elementos ideais [1]. Existem modelos mais simplificados para análises mais abrangentes ao passo que existem modelos mais complexos para análises mais específicas. A escolha dessa complexidade depende do grau de destreza que o circuito real necessita ser representado para a análise.

Os modelos reais do sistema de geração e transmissão podem ser concebidos a partir da utilização de elementos ideais e a análise matemática é então obtida para descrever a resposta desse sistema. Para o estudo descrito nesse trabalho, a concepção dos circuitos pode ser realizada utilizando o teorema de Thevenin. Segundo este teorema, qualquer par de terminais contidos em um circuito realizado com elementos lineares podem ser substituídos por uma fonte de tensão V_{th} em série com uma impedância Z_{th} [2]. Isto é válido tanto para sistema monofásicos como para sistema multifásicos, levando em conta o estudo de cada fase em separado. Apesar do sistema de geração de uma aeronave ser complexa, para efeito didático e sem perda de generalidade, pode-se considerar que este sistema é tido por elementos lineares, assim, para esse estudo pode-se modelá-la como uma fonte de tensão senoidal acoplada a uma impedância. A interpretação dessa impedância cabe ao fato de que o gerador possui reatância indutiva em seus enrolamentos e resistências nos fios que o compõe. De forma análoga, a linha de transmissão a qual leva a energia do gerador para a carga pode ser modelada da mesma maneira. Por esta ser ausente de fonte de energia, seu equivalente Thevenin é tido apenas como uma impedância composta pelas reatâncias e as resistências da linha de transmissão. A figura 1a mostra o equivalente Thevenin de um gerador típico, enquanto que a figura 1b mostra o equivalente de uma linha de transmissão qualquer.

Com isso em mente, pode-se modelar um sistema composto por cargas acopladas a um barramento alimentado por um gerador e uma linha de transmissão. Considerando a figura 2, existe um barramento com ponto de conexão em comum (PCC) com N cargas acopladas cujas correntes demandadas são denominadas i_1, i_2, \dots, i_N . A tensão no PCC é dada por V_B e é essa a tensão de alimentação no ponto de conexão das cargas. Ainda, a conexão do barramento com gerador é feita via uma linha de transmissão, e, como explicado anteriormente, nesses elementos existem não idealidades como resistências e reatâncias indutivas. Aplicando o teorema de Thevenin para modelar o gerador e a linha

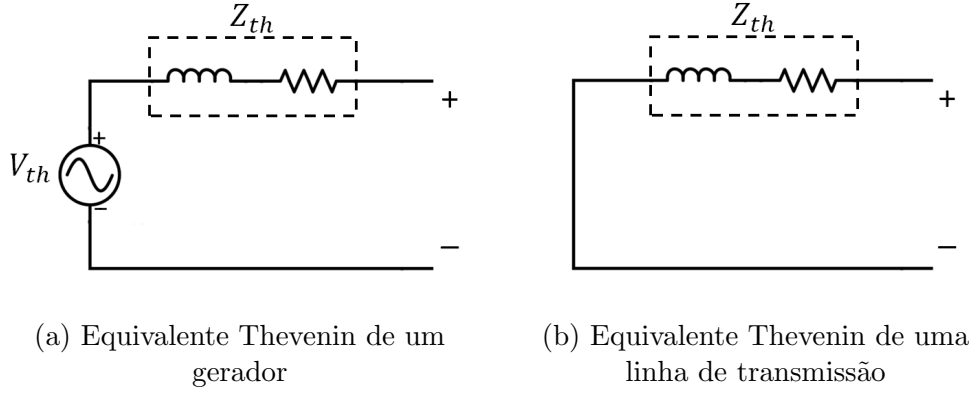


FIGURA 1 – Equivalentes Thevenin

de transmissão, tem-se que a impedância Z_{th} é composta pela composição das resistências e impedâncias de cada elemento. Para o gerador e linha de transmissão, as resistências e impedâncias são dadas por R_G , L_G e R_L , L_L , respectivamente. Já a fonte de alimentação V_S é considerada senoidal, como encontrada comumente em sistemas de geração AC

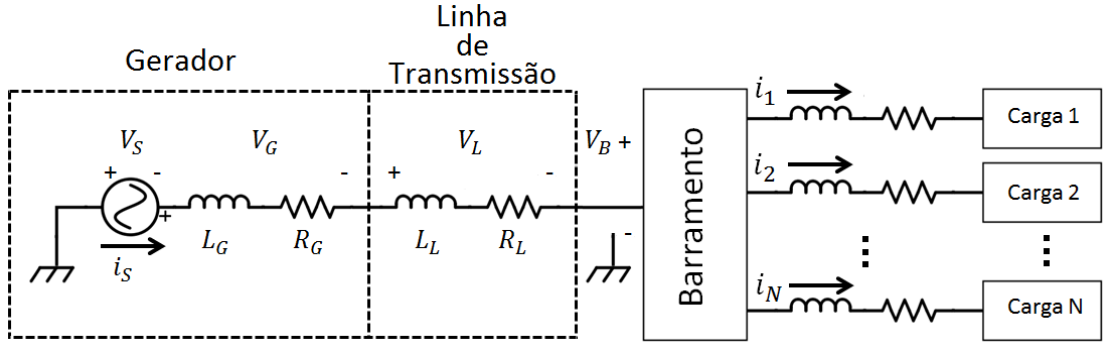


FIGURA 2 – Circuito real monofásico

Analisando o circuito da figura 2 e utilizando as leis de Kirchoff, tem-se que corrente provida pela fonte é dada segundo a equação 1.

$$i_S = i_1 + i_2 + \dots + i_N \quad (1)$$

Ainda de acordo com a lei de Ohm generalizada, as quedas de tensões nas impedâncias Z_G e Z_L , as quais advém da composição das reatâncias e resistências do gerador e da linha de transmissão são dadas por V_G e V_L , as quais são definidas segundo as equações 2 e 3.

$$V_G = Z_G \cdot i_S \quad (2)$$

$$V_L = Z_L \cdot i_S \quad (3)$$

Para definir-se o nível de tensão que é obtido no barramento no PCC, deve-se aplicar a lei de Kirchoff, a qual define-se V_B segundo a equação 4.

$$V_B = V_S - (V_G + V_L) = V_S - (Z_G + Z_L) \cdot i_S \quad (4)$$

Segundo a equação 4, o valor de tensão no barramento é dependente da corrente proveniente da fonte de tensão i_S , a qual, segundo a equação 1, é definida pela composição de correntes requeridas pelas cargas conectadas no PCC. Desse modo, pelo fato da existência das não idealidades intrínsecas dos elementos do circuito, há um vínculo entre a tensão disponível no barramento com as correntes exigida pelas cargas.

Para uma primeira análise, considerando as cargas 1, 2 , ..., N caracterizadas por elementos lineares, as quedas de tensões V_G e V_L são definidas por funções senoidais e o valor observado em V_B é tido como senoidal pura com certa atenuação e defasagem se comparada com a tensão V_S . Esse tipo de problema pode ser recorrente em alguns sistemas com altas cargas lineares conectadas, todavia este problema pode ser facilmente contornado aumentando o valor de V_S até que V_B atinja um valor especificado. Esse processo é comumente realizado de maneira automática pela introdução de uma malha de controle simples a qual controla o valor da tensão na saída do gerador de modo a suprir um nível de tensão específico no barramento.

A implementação de cargas não lineares conectados à rede exige uma abordagem diferente, sendo que essa consideração pode ter dois efeitos peculiares: primeiramente em um sistema onde as impedâncias de linhas e do gerador podem ser desconsideradas, a ondulação distorcida da corrente traz influências sobre onde esta passa, como transformadores, condutores e fusíveis [3], todavia esta não afeta a tensão do barramento V_B . Contudo esses efeitos podem ser mitigados caso haja a consideração dos mesmos em projetos de um sistema elétrico. Agora, considerando os efeitos das não idealidades da linha e do gerador, como por exemplo suas respectivas reatâncias e resistências, a equação 4 possui todas as variáveis diferentes de zero e conseqüentemente a tensão do barramento V_B é afetada em função da forma de onda de i_S . Isto posto, são introduzidos na tensão do barramento a distorção harmônica, a qual é definida por componentes senoidais com a frequência igual a um múltiplo da frequência fundamental (f_0) da forma de onda da tensão V_B [4]. Desse modo, há uma distorção na tensão do barramento cuja forma de onda não apresenta mais um formato senoidal, onde muitas vezes é requerida para alimentar determinadas cargas. A mitigação das distorções na forma de onda possui uma abordagem diferente se comparado com o caso em que cargas lineares são conectadas ao barramento, a qual dá-se utilizando filtros casados com as frequências harmônicas, por conversores com correção de fator de potência ou filtros ativos [5].

Para exemplificar o problema posto, considera-se um sistema como descrito pela

figura 2, e que a composição das correntes das cargas necessita uma corrente do gerador i_S cuja forma é definida segundo a figura 3.

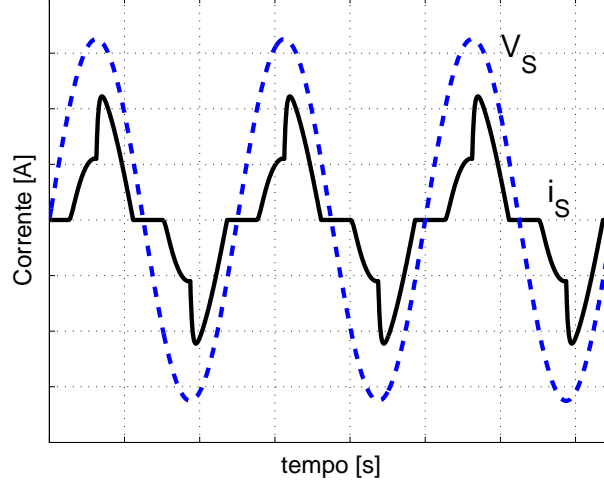


FIGURA 3 – Corrente do gerador para o barramento

Segundo a lei de Ohm generalizada, as quedas de tensão nas reatâncias e resistências do gerador e da linha de transmissão são estabelecidas segundo as equações 2 e 3, e aplicando a corrente i_S da figura 3 tem-se que a forma de onda da tensão $V_G + V_L$ é representada pela figura 4.

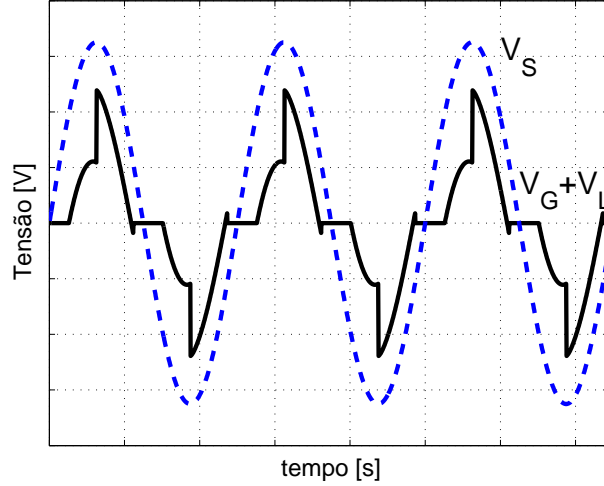


FIGURA 4 – Queda de tensão em $V_G + V_L$

Como descrito anteriormente, a tensão no barramento pode ser sumarizada pela expressão 4 a qual é dependente dos valores encontrados na forma de onda definidas pela figura 4. Seguindo essas expressões, tem-se que a forma de onda encontrada no barramento, para este exemplo, é dada pela figura 5. Aqui pode-se claramente observar que a tensão no barramento é periódica não senoidal.

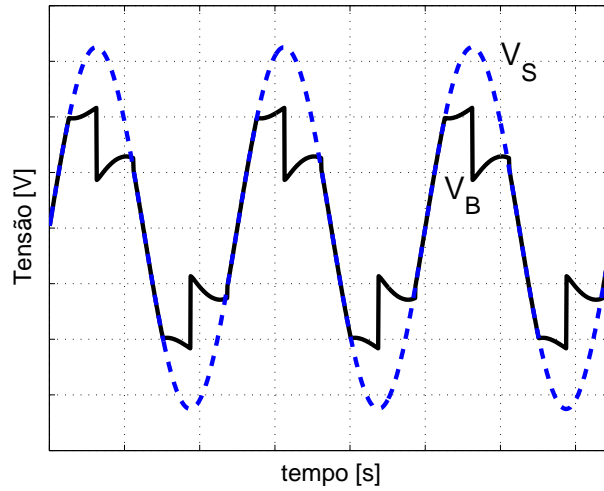


FIGURA 5 – Tensão V_B comparativamente à tensão V_S

O aspecto senoidal na tensão do barramento é perdido mas o valor da frequência fundamental é mantido. Aplicando a série de Fourier em V_B , é observado o aparecimento das harmônicas nas frequências múltiplas de f_0 . Para o exemplo descrito anteriormente, a série de Fourier de V_B é representada na figura 6.

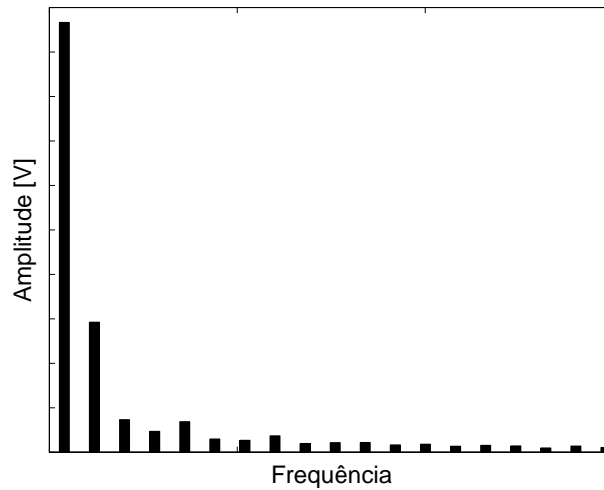


FIGURA 6 – Transformada de Fourier da tensão V_B

Com o equacionamento e o exemplo descrito anteriormente fica claro que os efeitos de cargas não lineares possuem grande influência na qualidade de energia de um sistema elétrico. Entende-se que a qualidade de energia é degradada pela injeção de harmônicas nas tensões do sistema, visto que a presença de harmônicas distorce a forma de onda e as componentes de alta frequências podem trazer efeitos indesejáveis em equipamentos conectados na rede.

0.2 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 [5]. 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 no 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 e no modo em que estes operam. A seguir, utilizando das referências [5] e [3], 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, as quais 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) [6], onde a comutação ocorre no cruzamento da tensão de entrada por zero. Isto se deve basicamente para reduzir interferência eletromagnética e corrente de *inrush* [7]. 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 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 7. 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-

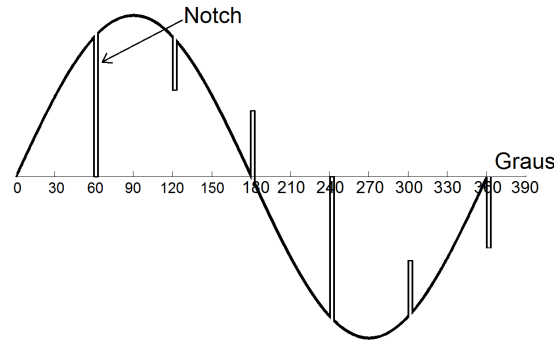


FIGURA 7 – Presença de *notch* na ondulação de tensão [8]

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 a forma da senoide da tensão distorcida é 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 aumento da 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 visto 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 [9]. 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.

0.3 Guias de Recomendação

Aeronaves civis necessitam de certificado de tipo para ter autorização de voar no espaço aéreo. Ainda, com o intuito de aumentar a integração de aeronaves civis com militares, além de melhorar os níveis de segurança operacional destas, há uma tendência de exigência de certificação civil para aeronaves militares pelas forças aéreas. Além do mais, estas aeronaves possuem exigências de cumprimento de normas e requisitos específicos para aumentar os níveis de segurança no cumprimento das possíveis missões designadas a elas.

Paulo
Serra
corp.citar

Com o objetivo de auxiliar no desenvolvimento e padronizar procedimentos de projeto, processos de manufatura, manutenção, e testes de qualificação, há certos documentos que são usualmente utilizados com o intuito de guiar o desenvolvimento e especificar requisitos de segurança e operação. Contudo, esses documentos não são necessariamente requisitos de certificação para qualificar as aeronaves perante os órgãos reguladores. Todavia, o cumprimento dessas normas é de papel fundamental para facilitação na aquisição do certificado de tipo da aeronave.

Na indústria aeronáutica, existem vários órgão que instituem e publicam documentos com recomendações e padronizações de modo a auxiliar o desenvolvimento de aeronaves mais seguras. Alguns órgãos reguladores publicam alguns desses documentos, como o FAA (*Federal Aviation Administration*) que tem publicado o AC's (*Advisory Circular*). Ainda, existe o departamento de defesa dos Estados Unidos (DoD - *Department of Defence*) com as MIL-STD's (*Military Standard*). Outros órgãos não relacionados com agentes governamentais que instituem recomendações de práticas aeronáuticas são o SAE (*Society of Automotive Engineering*) e o RTCA (*Radio Technical Commission for Aeronautics*), onde este ultimo possui as DO's. Tais documentos, diferentemente das FAR's (*Federal Aviation Regulation*), não são requisitos diretos para obtenção de certificado de tipo, porém a realização destas trazem padronizações que facilitam a obtenção da certificação de tipo das aeronaves.

Com relação ao projeto e desenvolvimento de sistemas elétricos de aeronaves, existem vários documentos que buscam a definição e padronização dos elementos e das características esperadas constituintes do sistema elétrico. Com relação à qualidade de energia da aeronave, os dois principais documentos são a MIL-STD 704 e a DO-160 (*Section 16*) que definem limites e parâmetros que asseguram o bom funcionamento do sistema elétrico.

0.3.1 MIL-STD 704 - *Aircraft Electric Power Characteristics*

0.3.2 DO-160 - *Environmental Conditions and Test Procedures for Airborne Equipment - Section 16: Power input*

0.4 Métodos de Atenuação de Harmônicas

Existem métodos bem concebidos na literatura com relação à metodologias para mitigar o problema da utilização de cargas não lineares em sistemas senoidais. Pode-se encontrar, basicamente, três abordagens para eliminar as harmônicas de mais alta frequência, e assim, manter a qualidade de energia dentro de níveis aceitáveis para propiciar segurança operacional de uma aeronave. Tais sistemas serão descritos brevemente a seguir, e a escolha da utilização de filtros ativos em aplicação aeronáutica será melhor elucidada.

0.4.1 Filtros Passivos

Filtros passivos são circuitos dotados de componentes elétricos passivos lineares, como indutores, capacitores e resistores, concebido com objetivo de obter uma função de transferência cujo comportamento típico é atenuar componentes de frequências senoidais específicas. Os filtros são basicamente compostos por impedâncias interligadas e o comportamento destes circuitos depende do valor e da disposição dos elementos lineares envolvidos [10, 5].

Conceitualmente, pode-se considerar a concepção de filtros ideais e reais. De maneira simplificada, os filtros ideais são tais que em determinadas frequências a atenuação é nula e em outras é infinita, ou seja, as amplitudes dos componentes do espectro não se altera em determinadas frequências mas em outras são levadas a zero, respectivamente. Tais filtros não são realizáveis e na prática são utilizados filtros reais. Esses filtros não possuem uma atenuação infinita, e a diminuição das respectivas amplitudes em função da frequência é dada segundo a ordem do filtro. De maneira geral, a ordem do filtro é dada

de acordo com o número de elementos armazenadores de energia concebidos no circuito. Assim, para que o filtro real tenha o mesmo comportamento que o ideal haveria de ter ordem infinita, o que o torna inconcebível.

Por definição, a frequência de corte (f_c) dos filtros reais é definida segundo qual a potência do sinal de saída é tida como a metade da potência do sinal de entrada, ainda, esta definição pode ser estendida como a frequência a qual a razão dos sinais de saída e entrada é tida como $\sqrt{2}$, ou mais, que nessa frequência a atenuação do sinal seja de 3 decibéis.

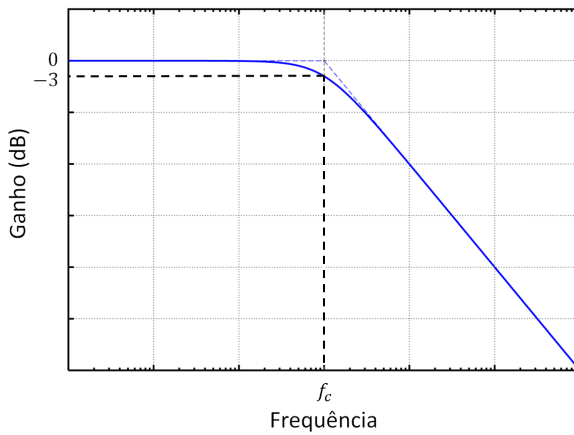
As principais topologias de filtros passivos podem ser divididos em 4 tipos:

- i) *Filtro Passa Baixa:* A concepção desse tipo de filtro age de forma a criar caminhos de alta impedância entre a entrada e saída do sistema para frequências mais elevadas que f_c [5]. Desse modo, comparativamente ao sinal da entrada, a saída possui a mesma característica de amplitude e potência para frequências menores que f_c , mas atenuam componentes do espectro cujo valor é maior que a frequência de corte, ou seja, $f > f_c$. Ainda, deve-se ter em mente que quanto maior o valor da frequência das componentes que compõem o sinal, maior a redução em suas amplitudes [10]. A resposta em módulo do sistema de um filtro passa baixa pode ser visto na figura 8a.
- ii) *Filtro Passa Alta:* Analogamente ao filtro passa baixa, os sistemas com a topologia passa alta possuem caminhos de alta impedância para componentes de baixa frequência que são aplicadas na entrada do sistema [5]. Desse modo, a saída possui um espectro com a predominância de componentes de alta frequência. Como ocorre nos filtros passa baixa, a frequência que delimita a atenuação é denominada frequência de corte, e componentes com valores mais elevados possuem ganho unitário, ou seja, não são alterados pelo sistema [10]. O espectro típico de um filtro passa alto pode ser visualizado na figura 8b.
- iii) *Filtro Passa Faixa:* Os filtros passa faixa são caracterizados por circuitos cuja resposta apresenta a passagem de sinais com frequências situadas numa faixa intermediária no espectro, atenuando as amplitude dos sinais que estão fora desse intervalo. A frequências que delimitam esta faixa são denominadas frequência de corte inferior (f_L) e frequência de corte superior (f_H) [10]. Desse modo, o comportamento do sistema caracteriza-se pela atenuação de componentes que possui frequência abaixo de f_L e acima de f_H . Outra característica fundamental dos filtros passa faixa é a largura de banda definida pela intervalo onde o sinal não é atenuado. Em termos numéricos, esse valor é definido por $f_H - f_L$. Ainda existe a frequência central f_0 ou frequência de ressonância, a qual é a média geométrica entre a frequência de corte inferior f_L e a frequência de corte superior

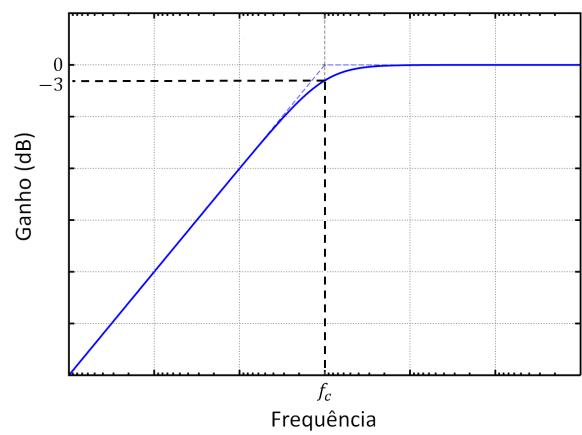
arrumar
esse
texto
que
está
porco

f_H da banda de passagem, ou seja, $f_0 = \sqrt{f_L \cdot f_H}$. O módulo da resposta em frequência típica de um filtro passa faixa é mostrada na figura 8c.

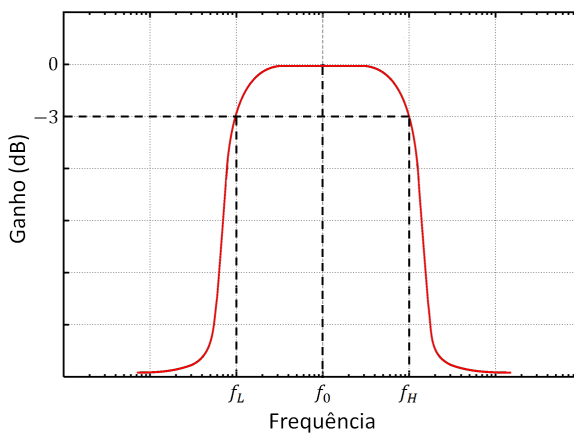
- iv) *Filtro Rejeita Faixa*: Ao contrário do filtro passa faixa, este tipo de filtro é definido por atenuar componentes cujas frequências estão contidos em um determinado intervalo, enquanto as amplitudes das componentes fora deste não são alteradas. Analogamente ao passa faixa, existe a frequência de corte inferior e superior definidas por f_L e f_H , respectivamente [10]. As componentes com valores de frequência menores que f_L e maiores que f_H são mantidas iguais ao sinal de entrada, ao passo que os componentes contidos dentro do intervalo $f_L - f_H$ possuem as amplitudes atenuadas. O espectro de frequência desse tipo de filtro pode ser visto na figura 8d.



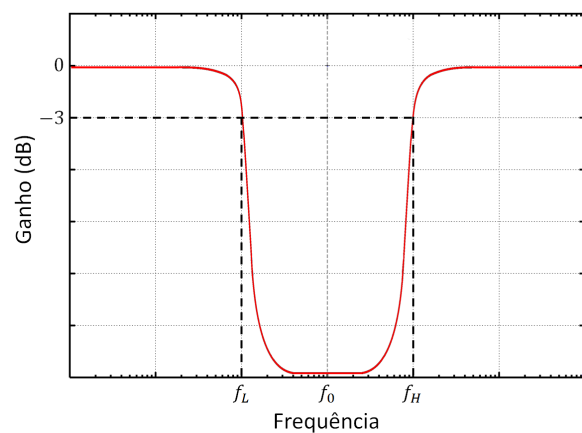
(a) Resposta em frequência de um filtro passa baixa



(b) Resposta em frequência de um filtro passa alta



(c) Resposta em frequência de um filtro passa faixa



(d) Resposta em frequência de um filtro rejeita faixa

FIGURA 8 – Ganho em função da frequência de filtros passivos típicos

Para o problema de atenuar as harmônicas de mais alta frequência que a fundamental, a utilização de filtros passa baixa é mais adequada, pois são os componentes

harmônicos que acabam por degradar a qualidade de energia do sistema elétrico.

0.4.2 Conversores com Correção de Fator de Potência

0.4.3 Filtros Ativos

Referências Bibliográficas

- [1] CIDADE, G. *Eletricidade e Eletrônica Aplicada à Biociências*. Disponível em: <<http://fisbio.biof.ufrj.br/restrito/bmb353/>>.
- [2] ALEXANDER, C. K.; SADIKU, M. N. O. *Fundamentals of of Electric Circuits*. 3. ed. [S.l.]: McGraw-Hill Higher Education, 2005.
- [3] WAGNER, V. et al. Effects of harmonics on equipment. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, v. 8, n. 2, p. 672–680, 1993.
- [4] 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>>.
- [5] KASSICK, E. V. *Harmônicas em Sistemas Industriais de Baixa Tensão*. Florianópolis, Abril 2010. Instituto de Eletrônica de Potência. Universidade Federal de Santa Catarina.
- [6] 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>>.
- [7] MANOUSAKA, E. *DC-DC Buck Converter with Inrush Current Limiter*. Dissertação (Mestrado) — Faculty of Applied Sciences, Lorentzweg, 2013.
- [8] 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>>.
- [9] FITZGERALD, A.; KINGSLEY, C.; UMANS, S. *Máquinas Elétricas - Com Introdução à Eletrônica de Potência*. 6. ed. [S.l.]: McGraw-Hill, 2006.
- [10] MUSSOI, F. L.; ESPERANÇA, C. *Resposta em frequência: Filtros passivos*. 2. ed. Florianópolis, 2004. Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina.