

1 Qualidade de Energia em Aeronaves

O mercado da aviação tem passado por uma mudança nos preceitos de desenvolvimento de sistemas que vão desde a utilização de novas tecnologias embarcadas até a mudança na concepção de operação da aeronave. A elevação na precificação do combustível e o aumento na participação deste fator nos custos operacionais fazem com que a eficiência e o baixa utilização de energia por passageiro por quilômetro, atrelado às baixas emissões de gases que aumentam o efeito estufa, sejam itens cruciais para tornar uma aeronave competitiva no mercado de aviação [1]. Para atender a esse requisito de mercado no que tange a eficiência, uma série de fatores vem sendo alvo de estudos para melhorar a consumo de combustível. Pode-se enumerar alguns destes fatores como: melhor eficiência aerodinâmica; otimização estrutural; maior eficiência do motor; melhor aproveitamento no uso de energia pelos sistemas [1]. Essa tendência vem ocorrendo de maneira natural como evolução do mercado pela demanda de aeronaves mais eficientes e competitivas. Nesse contexto há o conceito de *More Electric Aircraft* (MEA) e, como o próprio nome diz, essa concepção baseia-se em aeronaves cuja filosofia de projeto contempla o uso abundante de sistemas alimentados eletricamente com o objetivo de aumentar a eficiência e confiabilidade [2].

As aeronaves comumente possuem sistemas hidráulicos, pneumáticos e elétricos que passam a receber suas potências diretamente do eixo do motor da aeronave. Essa transferência de energia dá-se por caixas de engrenagens que condicionam a velocidade do eixo e o torque de modo a impulsionar bombas hidráulicas e geradores elétricos. Ainda há o sistema pneumático que possui como fonte de energia o sangramento de ar comprimido do motor [3]. Tais sistemas são imprescindíveis para o funcionamento operacional da aeronave visto que equipamentos que provém a aeronavegabilidade e o conforto de cabine utilizam de tais sistemas. Essa topologia de projeto, contemplando a utilização destes sistemas, é comumente utilizada nas aeronaves comerciais e militares em geral.

O conceito de MEA não é exatamente novo, esse tema vem sendo estudado por décadas e a ideia de contemplar uma aeronave com a substituição de sistemas que necessitam de energia do motor por aqueles movidos por eletricidade está bem estabelecido [4]. Devido à falta de tecnologias de condicionamento de energia elétrica para utilização na indústria aeroespacial, seja pela baixa capacidade potência, seja pelo volume e peso excessivos, os conceitos de utilização abundante do sistema elétrico está sendo objeto de estudos para quando as tecnologias de conversão e geração de alta capacidade estiverem melhor estabelecidas. Desse modo, os sistemas hidráulicos e pneumáticos continuam sendo utilizados de maneira convencional [4, 3]. Contudo, o desenvolvimento de

novas tecnologias nas áreas de eletrônica de potência, como semicondutores que aguentam maiores capacidade de tensão e corrente, e na área de geração de energia elétrica, como geradores com maior eficiência, com maiores capacidades e densidade de energia por peso específico, vem tornando possível a implementação de sistemas elétricos que substituem parcialmente ou totalmente os sistemas hidráulicos ou pneumáticos. Isso pode ser visto nos mais recentes desenvolvimentos de aeronaves, como por exemplo o Boeing 787, onde a redução da emissão de CO₂ é 20% menor se comparado com o Boeing 767 [5]. O ganho não se dá apenas na redução do consumo de combustível e emissão de gases pela queima de combustíveis fósseis, mas há também a redução de peso e volume de sistemas, aumento de segurança, melhora na confiabilidade e manutenibilidade [2, 3, 5].

1.1 Tendência de Aumento da Capacidade de Geração Elétrica em Aeronaves

Seguindo a tendência de aumentar a quantidade de sistemas elétricos para melhorar a eficiência em aeronaves, a geração desse tipo de energia teve de acompanhar a demanda de carga de modo a suprir o aumento vertiginoso de potência elétrica requerida. Com o avanço tecnológico nas áreas de geração e distribuição, o aumento de demanda de potência pode ser atendido pelo sistema elétrico, e ainda, seguindo os critérios impostos pelo projeto nos quesitos de peso, confiabilidade e eficiência. Com esse aumento na capacidade de geração e distribuição, cada vez mais os sistemas vêm sendo substituídos por sistemas elétricos cujas funções substituem o emprego dos sistemas hidráulicos e pneumáticos. Segundo [6], o aumento da capacidade de geração de energia aumentará significativamente com a troca de sistemas que possuem equivalentes movidos pela energia elétrica. Esse aumento está acontecendo no cenário atual no mercado de aviação e esta tendência pode ser vista na figura 1.1. Ainda, elencando os dados da capacidade de geração segundo o critério da data de lançamento das aeronaves, pode-se notar que a capacidade de geração ao longo do tempo vem crescendo exponencialmente, como é demonstrado na figura 1.2.

Nesse contexto, futuro da aviação segue uma tendência de utilizar uma gama ainda maior de sistemas dependentes de energia elétrica. Isso reflete em um menor gasto de energia necessária por passageiro por quilometro voado e a tendência futura é que todos os sistemas da aeronave seja inteiramente elétricos [5], como mostra a figura 1.3. A intensa utilização de energia elétrica não é feita nas aeronaves atuais pelo simples fato de ainda não haver um desenvolvimento tecnológico suficientemente avançado que propicie tal tendência. Limitações nas áreas de armazenamento de energia, engenharia de materiais, eletrônica de potência, entre outros, fazem com que as aeronaves sejam projetadas com a

Dá de en-cher mais lin-guça pelas refe-

ren-cias Abde-lha-fez2009, Ab-del2012

falar de ge-ração em fre-quen-cia variá-vel

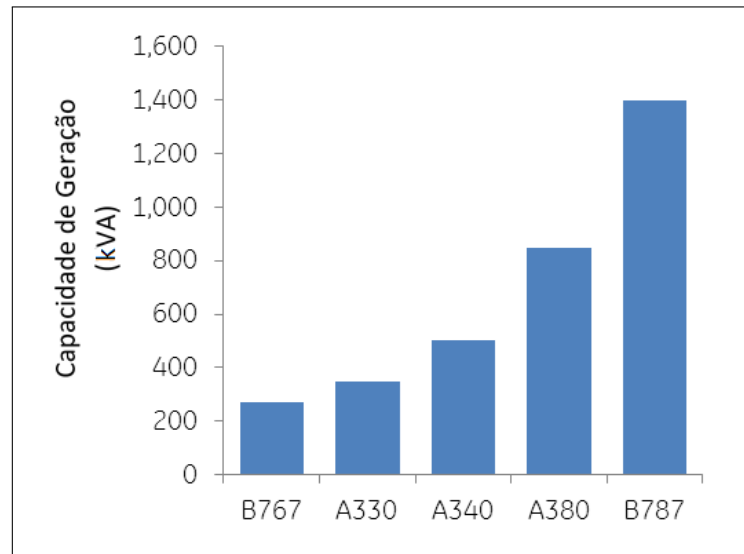


FIGURA 1.1 – Aumento capacidade de geração de aeronaves [6]

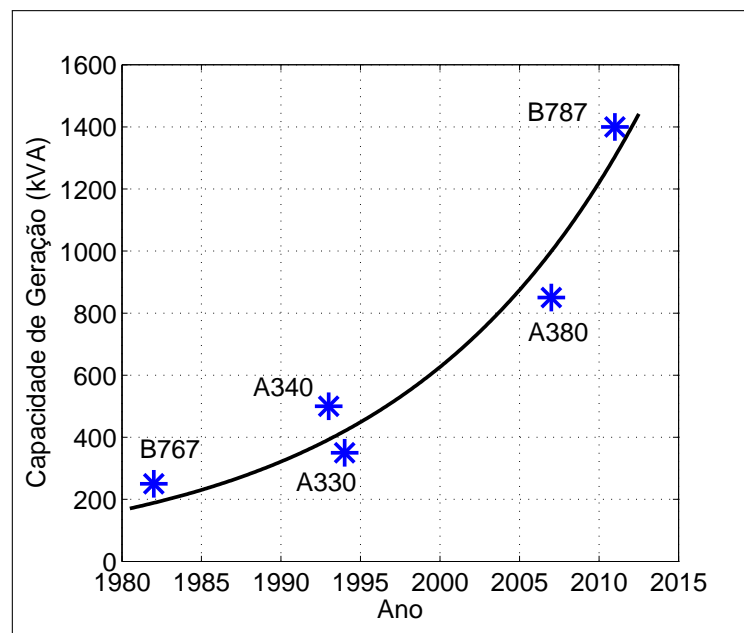


FIGURA 1.2 – Aumento da capacidade de geração ao longo dos anos

utilização de sistemas que dependam de arquiteturas convencionais.

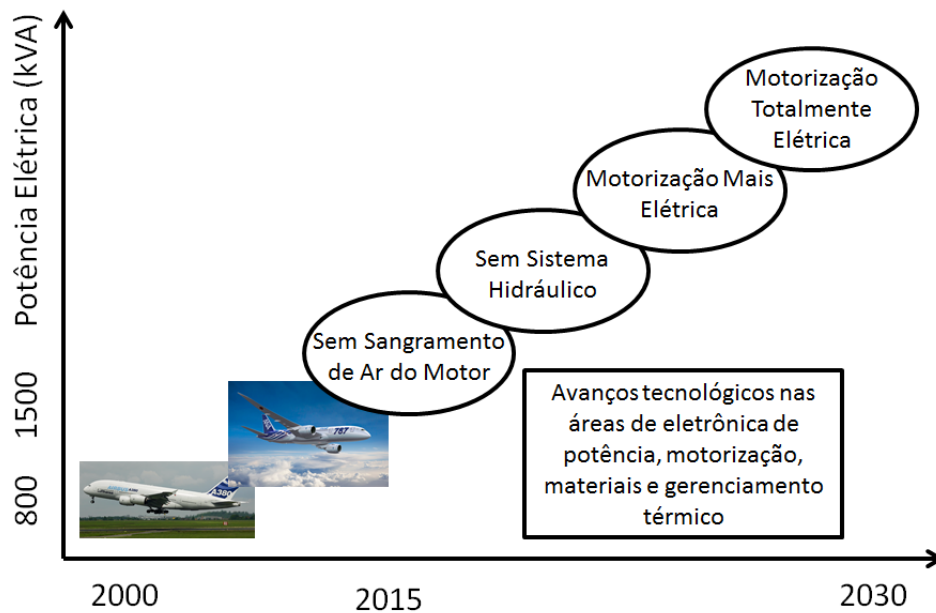


FIGURA 1.3 – Tendência futura para o mercado de aviação [5]

1.1.1 Tipos de Geradores e Sistemas de Distribuição

1.2 Análise de Cargas Elétricas em Aeronaves

Assim, o uso de conversores para alimentar cargas não lineares vem poluindo a rede

o uso de cargas não lineares suja a rede, degradando a qualidade de energia

1.2.1 Atuadores Eletrohidrostáticos

1.3 Problemas Causados por Cargas Não Lineares na Rede

7 pá-
ginas

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,

Cargas
linea-
res e
não
linea-
res
(KA-
SICK
2010

esses elementos isolados não são factíveis para análises reais devido as não idealidade encontradas nestas respostas. Porém, para a metodização da análise dos circuitos elétricos reais através de modelos matemáticos, são concebíveis a representação do funcionamento destes por elementos ideais [7]. 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 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 podem ser realizados 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} [8]. Isto é valido 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 que é composta pelas reatâncias e as resistências da linha de transmissão. A figura 1.4a mostra o equivalente Thevenin de um gerador típico, enquanto que a figura 1.4b mostra o equivalente de uma linha de transmissão qualquer.

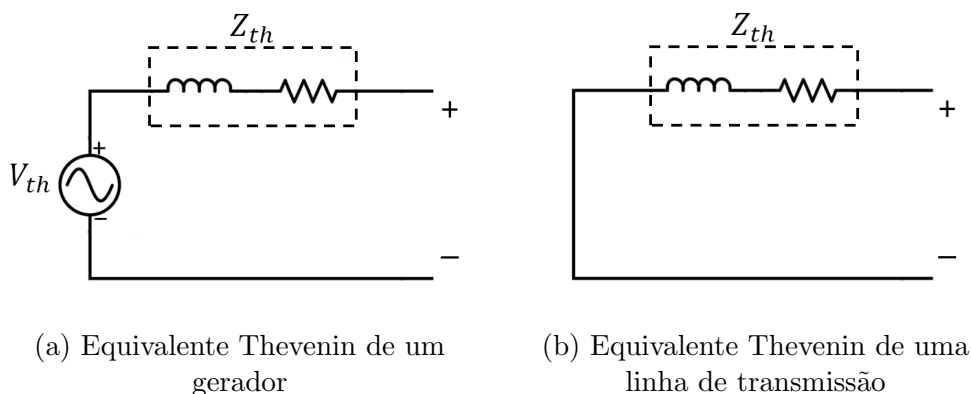


FIGURA 1.4 – Equivalentes Thevenin

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

explicar
os cir-
cuitos
ideais
e os
reais

figura 1.5, 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 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

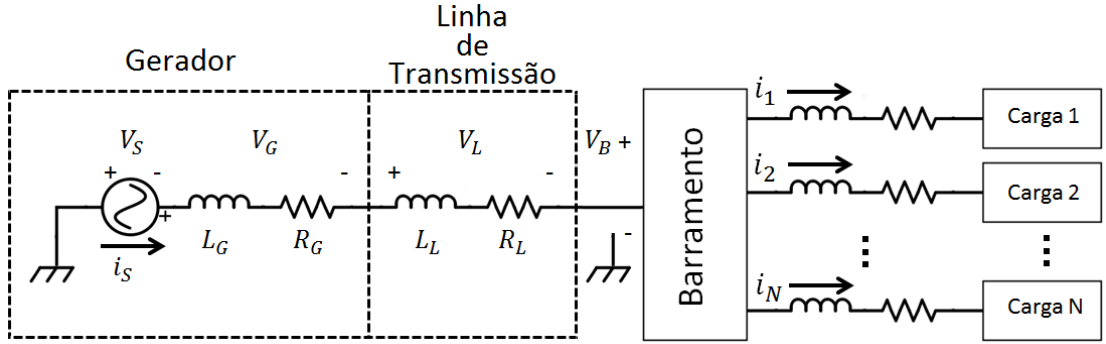


FIGURA 1.5 – Circuito real monofásico

Analisando o circuito da figura 1.5 e utilizando as leis de Kirchhoff, tem-se que corrente provida pela fonte é dada segundo a equação 1.1.

$$i_S = i_1 + i_2 + \dots + i_N \quad (1.1)$$

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 respectivamente, são dadas por V_G e V_L , as quais são definidas segundo as equações 1.2 e 1.3.

$$V_G = Z_G \cdot i_S \quad (1.2)$$

$$V_L = Z_L \cdot i_S \quad (1.3)$$

Para definir-se o nível de tensão que é obtido no barramento no PCC, deve-se aplicar a lei de Kirchhoff, a qual define-se V_B segundo a equação 1.4.

$$V_B = V_S - (V_G + V_L) = V_S - (Z_G + Z_L) \cdot i_S \quad (1.4)$$

Segundo a equação 1.4, o valor de tensão no barramento é dependente da corrente proveniente da fonte de tensão i_S , a qual, segundo a equação 1.1, é considerada 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 a conexão de 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. Agora, considerando as cargas ligadas ao barramento sendo não lineares, ou seja, que a forma da onda da corrente demandada não seja uma função linear senoidal com a mesma frequência que a tensão da fonte de alimentação, a composição das correntes demandantes de cada elemento geram uma corrente requerente da fonte de geração i_S cujo aspecto é também não linear. Isso cria um problema além, pois torna a tensão do barramento V_B com aspecto não senoidal em razão das quedas de tensão V_G e V_L não senoidais. 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 [9]. Desse modo, há uma distorção na tensão do barramento a qual não apresenta mais um formato senoidal, onde é muitas vezes 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 [10].

Para exemplificar, considera-se um sistema como descrito pela figura 1.5, e que a composição das correntes das cargas necessitam uma corrente do gerador i_S cuja forma é definida segundo a figura 1.6.

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 1.2 e 1.3, e aplicando a corrente i_S da figura 1.6 tem-se que a forma de onda da tensão $V_G + V_L$ é representada pela figura 1.7.

Como descrito anteriormente, a tensão no barramento pode ser sumarizada pela expressão 1.4 a qual é dependente dos valores encontrados na forma de onda definidas pela figura 1.7. Seguindo essas expressões, tem-se que o a forma de onda encontrada no

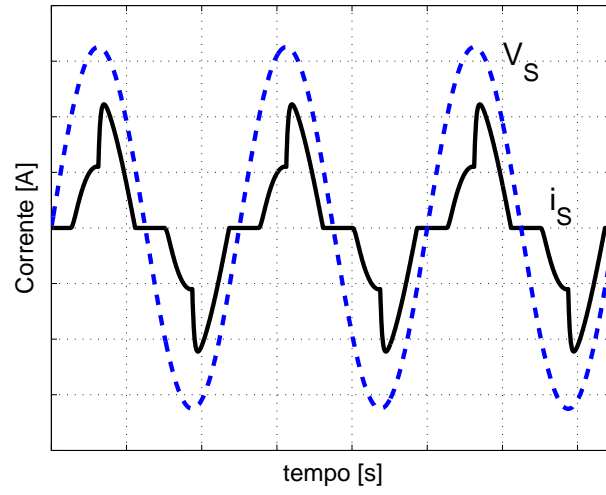


FIGURA 1.6 – Corrente do gerador para o barramento

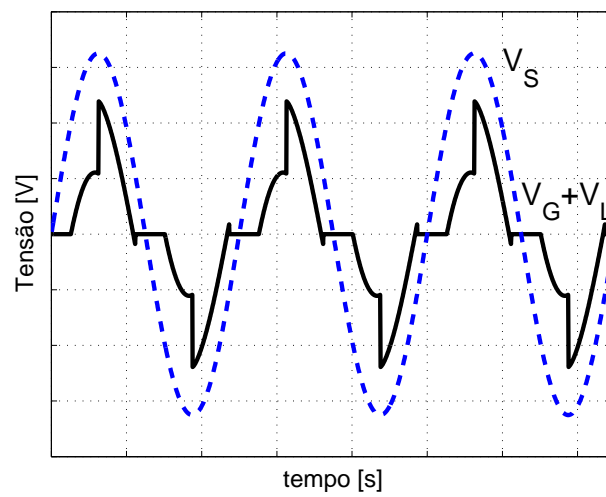


FIGURA 1.7 – Queda de tensão em $V_G + V_L$

barramento, para este exemplo, é dada pela figura 1.8. Aqui pode-se claramente observar que a tensão no barramento é periódica não senoidal.

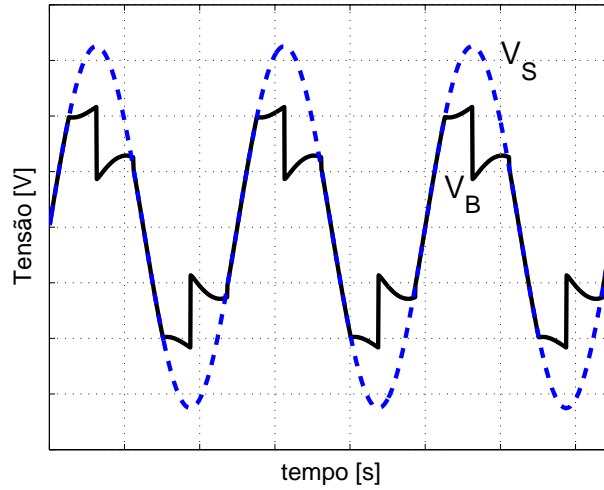


FIGURA 1.8 – Dominio do tempo

O aspecto senoidal na tensão do barramento é perdido mas o valor da frequência fundamental é mantido. Aplicando a serie de Fourier em V_B , pode ser observado o aparecimento das harmônicas nas frequências múltiplas de f_0 . Para o exemplo descrito anteriormente, a serie de Fourier de V_B é representada na figura 1.9.

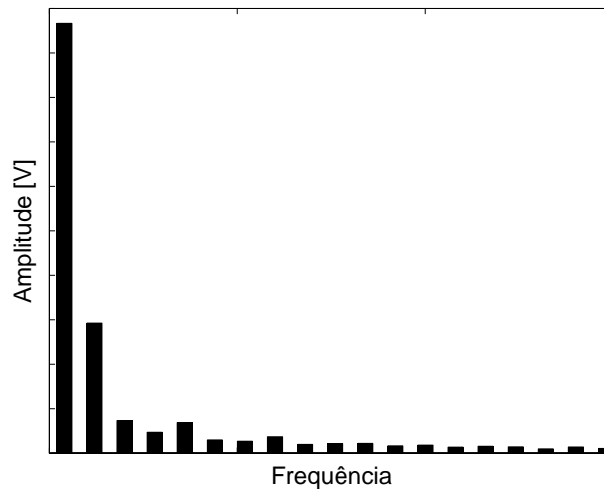


FIGURA 1.9 – fft

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

das tensões e as componentes de alta frequências podem trazer efeitos indesejáveis em equipamentos conectados na rede.

Simplificando para circuito monofásico, pode-se estender esse estudo para circuitos monofásicos.

Com o exemplo anterior pode-se facilmente
os problemas da energia suja são

1.3.1 DO-160

1.3.2 MIL-STD 704

1.4 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.

1.4.1 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 [11, 10].

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 entendida 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.

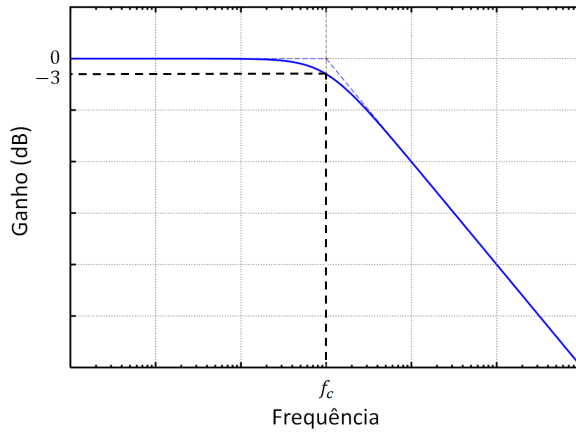
As principais topologias de filtros passivos podem ser divididos em 4 tipos:

- 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 [10]. 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 [11]. A resposta em módulo do sistema de um filtro passa baixa pode ser visto na figura 1.10a.
- 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 [10]. 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 [11]. O espectro típico de um filtro passa alto pode ser visualizado na figura 1.10b.
- 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) [11]. 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

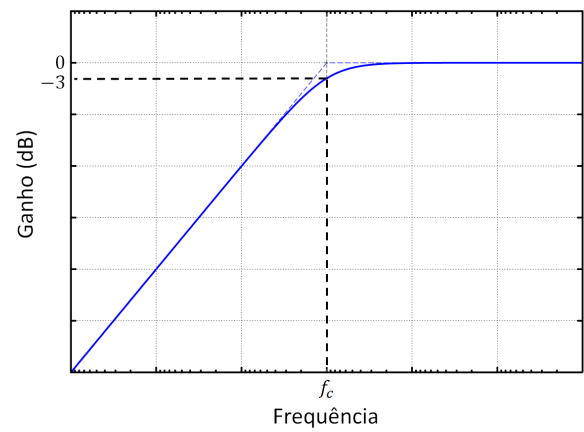
arrumar
esse
texto
que
está
porco

geométrica entre a frequência de corte inferior f_L e a frequência de corte superior 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 1.10c.

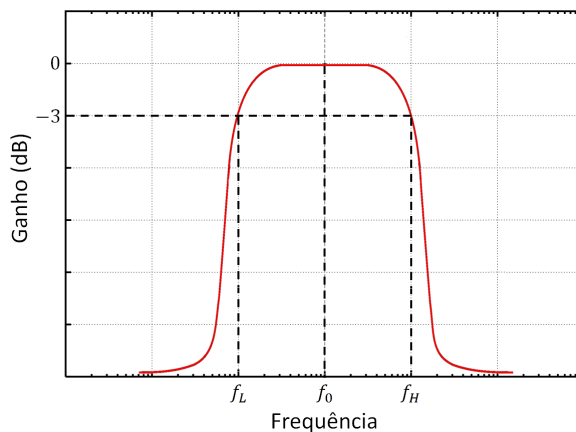
- iv) *Filtro Rejeita Faixa:* Ao contrário do filtro passa faixa, este tipo de filtro é definido por atenuar componentes cujas frequências estão contidos em um determinado intervalo, enquanto as amplitudes das componentes fora deste não são alteradas. Analogamente ao passa faixa, existe a frequência de corte inferior e superior definidas por f_L e f_H , respectivamente [11]. 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 1.10d.



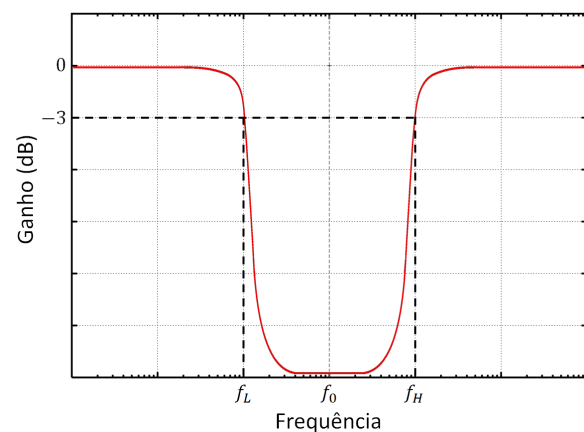
(a) Resposta em frequência de um filtro passa baixa



(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 1.10 – Ganho em função da frequência de filtros passivos típicos

Para o problema de atenuar as harmônicas de mais alta frequência que a funda-

mental, 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.

1.4.2 Conversores com Correção de Fator de Potência

1.4.3 Filtros Ativos

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 a Biociências*. Acessado em 25/04/2015.
- [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.

