

# 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 energética, a relação entre energia utilizada para transportar passageiros por quilômetro e às baixas emissões de gases do efeito estufa sejam itens cruciais para tornar uma aeronave competitiva no mercado de aviação [1]. Para atender a esses requisitos 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 e o torque do eixo 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 diretriz de projeto a qual contempla a utilização destes sistemas é comumente utilizada nas aeronaves comerciais e militares de modo 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 CO<sub>2</sub> 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 requisitos impostos pelo projeto quanto ao peso, confiabilidade e eficiência. Com esse aumento na capacidade de geração e distribuição, cada vez mais os sistemas vêm sendo substituídos por sistema elétricos cujas funções substituem o emprego do sistemas hidráulicos e pneumáticos. Segundo [6], o aumento da capacidade de geração de energia aumentará significativamente com o 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. 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 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 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

Dá de encher mais linha pelas referências Abdelhafez2009, Abdel2012

falar de geração em frequência variável

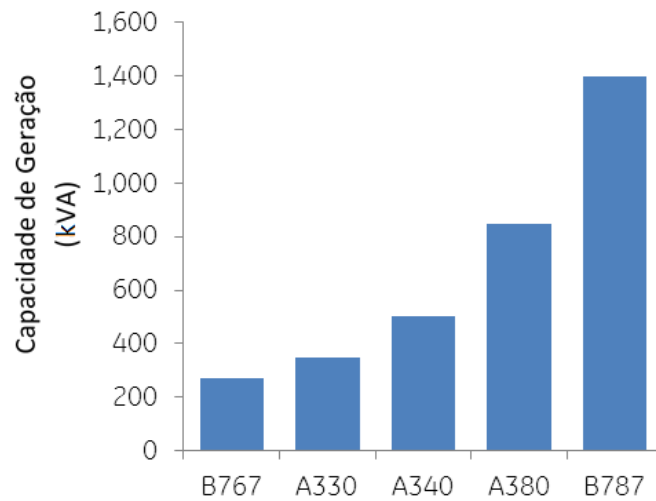


FIGURA 1 – Aumento capacidade de geração de aeronaves [6]

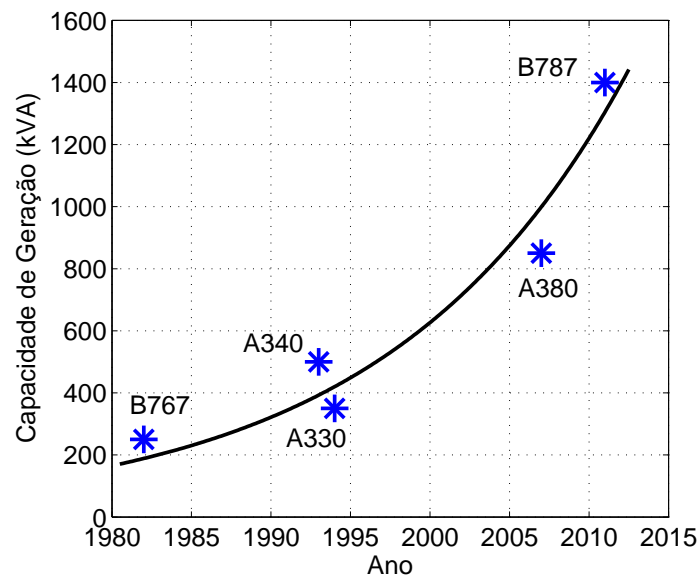


FIGURA 2 – Aumento da capacidade de geração ao longo dos anos

com a utilização de sistemas que dependam de arquiteturas convencionais.

## 1.2 Aumento de Cargas Não Lineares na Rede Elétrica de Aeronaves

A evolução tecnológica no desenvolvimento dos sistemas aeronáuticos vem trazendo a necessidade de aumentar a capacidade de geração e distribuição elétrica para suprir a crescente demanda de cargas. Nos primórdios da aviação, os sistemas aeronáuticos eram constituídos de cargas majoritariamente lineares que demandavam pouca potência, tais

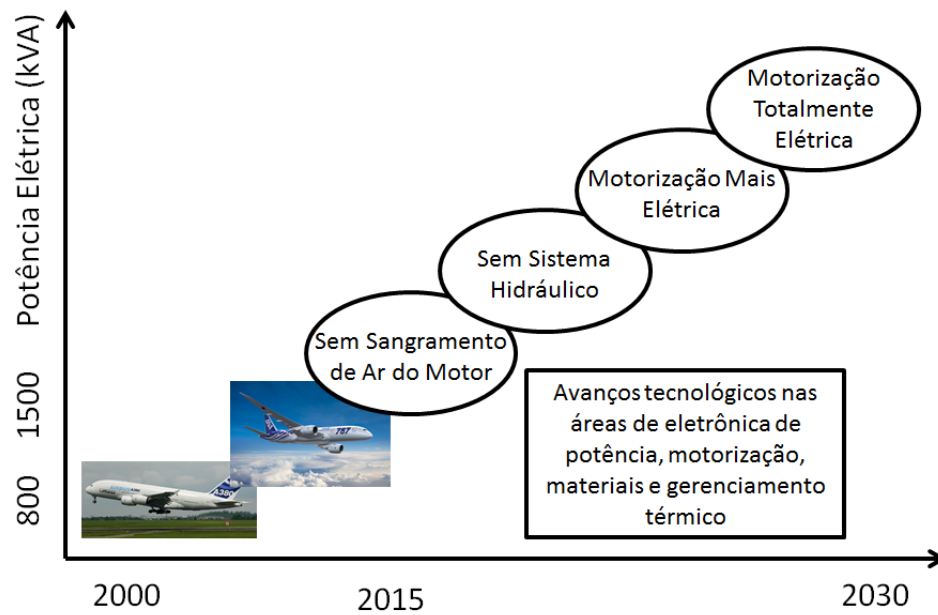


FIGURA 3 – Tendência futura para o mercado de aviação [5]

como equipamentos cuja estrutura era constituída por elementos resistivos ou indutivos. Tais cargas resumiam-se a principalmente à aquecedores resistivos, lâmpadas incandescentes, motores elétricos, fans e rádios de baixa potência [7]. Com a evolução tecnológica na área de eletrônica e semicondutores, houve uma grande mudança também nos sistemas embarcados aeronáuticos, de modo que a introdução de equipamentos eletrônicos foi largamente implementada para complementar ou substituir os sistemas que antes não demandavam consumo elétrico. Em aeronaves modernas houve a introdução de sistemas aviônicos quase que totalmente eletrônicos, com grandes displays digitais, radares e rádios mais potentes. Ainda existe a introdução de computadores de controle de voo, TRUs, sistemas de entretenimento em voo, iluminação baseada em LEDs, atuadores eletrodráulicos, motores elétricos controlados por drivers e, mais recentemente, substituição do sistema pneumático baseado em sangramento de ar do motor por compressores elétricos controlados eletronicamente. A implementação de tais equipamentos trouxe, entre outros fatores, o desafio de alimentá-los com tensão DC [7]. O condicionamento de tensão elétrica entre AC para DC introduz no sistema os conversores estáticos, que são compostos por semicondutores chaveados de modo que estes demandem correntes pulsadas e não lineares da rede elétrica. Esse aumento na utilização de conversores estáticos intensificou a degradação da qualidade de energia dos sistemas elétricos, como será explicado na seção 1.2.2, de modo que ações para garantir a manutenção da qualidade de energia é necessária para o bom funcionamento dos sistemas aeronáuticos embarcados.

### 1.2.1 Linearidade em Sistemas Elétricos

Por definição, a linearidade de um sistema advém da relação apresentada entre tensão e corrente existente nos terminais da uma carga. Em um sistema composto por elementos como indutores, capacitores e resistores, a relação entre tensão e corrente apresenta uma correspondência linear, ou seja, pode ser descrita por equações integro-diferenciais com fatores constantes [8]. Em suma, um sistema linear alimentado com tensão senoidal apresenta corrente também senoidal, porém com amplitude e fase distintas à tensão. Um exemplo de um sistema linear é mostrado na figura 4, onde a figura 4a é a representação de um circuito alimentando uma carga constituída de resistores, capacitores e indutores, e a figura 4b é a forma de onda da tensão e corrente supridos pela fonte. Já em circuitos quando a relação entre corrente e tensão não é descrita por uma equação linear, tem-se que a carga é considerada não linear. Nesse tipo de sistema a corrente requerida pela carga é dada por uma função não senoidal, mesmo quando a tensão de alimentação proveniente da fonte é senoidal pura [8]. Esse tipo de circuito é geralmente advindo de cargas com a presença de semicondutores que são operados no condicionamento de energia de um sistema. Para exemplificação, a figura 5 apresenta um sistema não linear, onde a figura 5a representa um circuito constituído de uma fonte senoidal alimentando uma retificador de tensão, e a figura 5b é mostrado a tensão e corrente provida pela fonte, onde esta última é dada por pulsos periódicos, diferentemente de uma forma de onda senoidal.

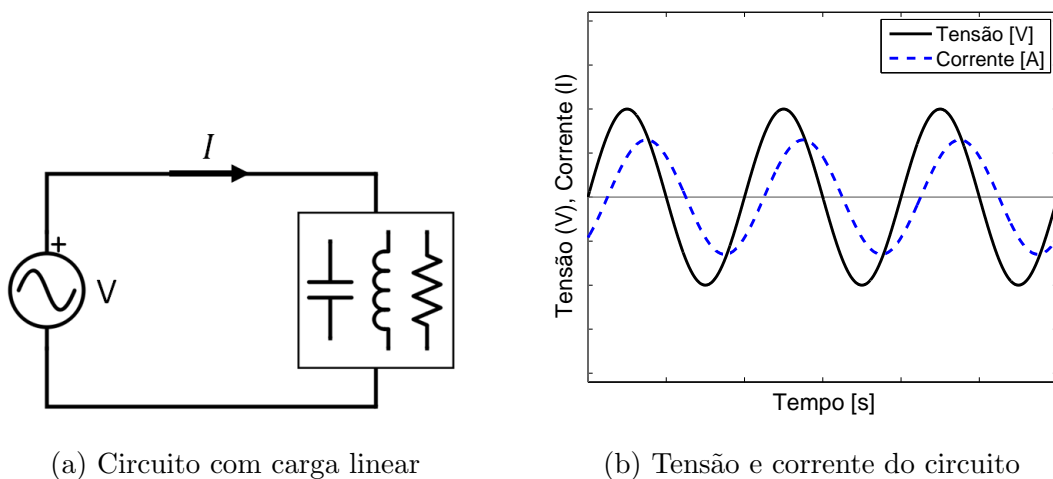


FIGURA 4 – Circuito com carga linear com as respectivas formas de onda

A presença de cargas não lineares na rede tem como consequência a queda na qualidade de energia no sistema de distribuição elétrica. A explanação dos efeitos negativos provenientes com a presença das caragas não lineares em redes elétricas será abordada na seção 1.2.2.

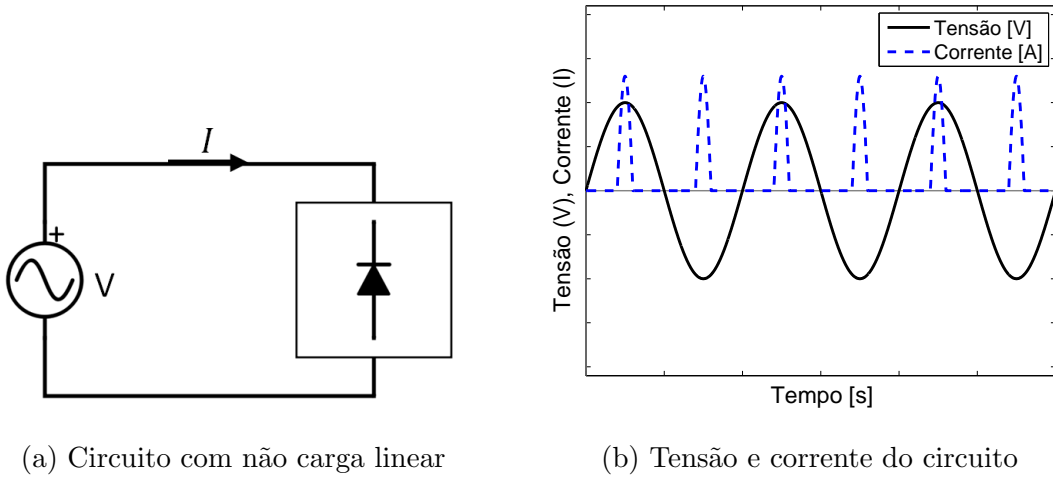


FIGURA 5 – Circuito com carga não linear com as respectivas formas de onda

### 1.2.2 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 [9]. 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 Thévenin. 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  $Z_{th}$  [10]. 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 Thévenin é tido apenas como uma impedância composta pelas reatâncias e as resistências da linha de transmissão. A figura 6a mostra o equivalente Thévenin de um gerador típico, enquanto que a figura 6b mostra o equivalente de uma linha de transmissão qualquer.

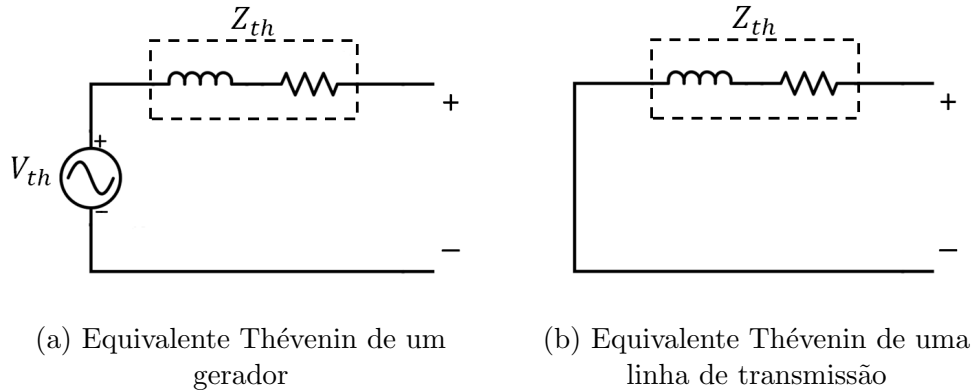


FIGURA 6 – Equivalentes Thévenin

Com isso em mente, pode-se modelar um sistema composto por cargas acopladas a um barramento alimentado por um gerador em uma linha de transmissão. Considerando a figura 7, 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 Thévenin 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

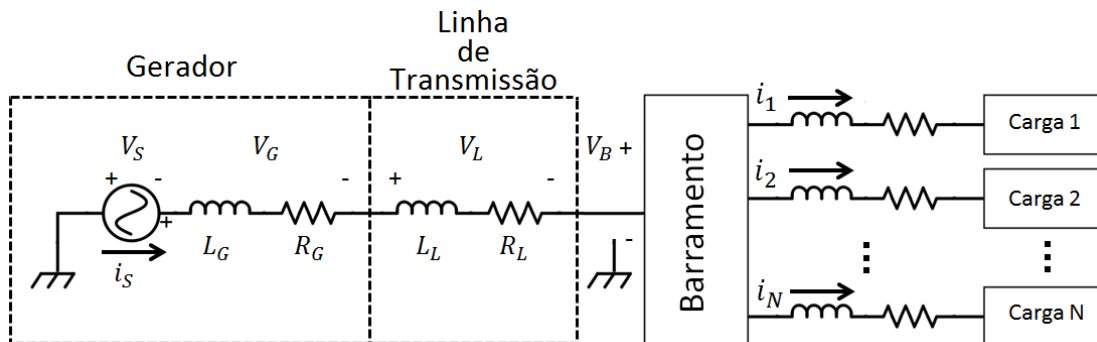


FIGURA 7 – Circuito real monofásico

Analisando o circuito da figura 7 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 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 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 desprezadas, a ondulação distorcida da corrente traz influências sobre onde esta passa, como transformadores, condutores e fusíveis [11], todavia esta condição não afetaria a tensão do barramento  $V_B$ .



Agora, considerando os efeitos das não idealidades da linha de transmissão e do gerador, a equação 1.4 possui todas as variáveis diferentes de zero e consequentemente 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  $V_B$  [12]. 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 correção do fator de potência nesse caso é feita por uma abordagem diferente se comparado com o caso em que cargas lineares são conectadas ao barramento. Para esse caso a correção do fator de potência pode ser feita utilizando filtros casados com as frequências harmônicas ou filtros ativos dispostos na rede [13].

Para exemplificar o problema posto, considera-se um sistema como descrito pela figura 7, e que a composição das correntes das cargas necessita uma corrente do gerador  $i_S$  cuja forma é definida segundo a figura 8.

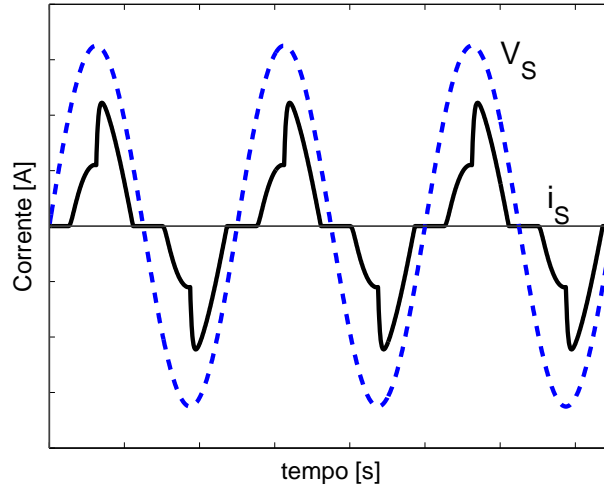
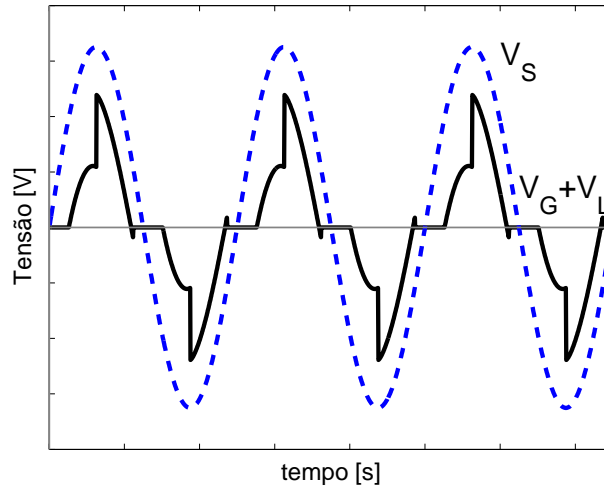
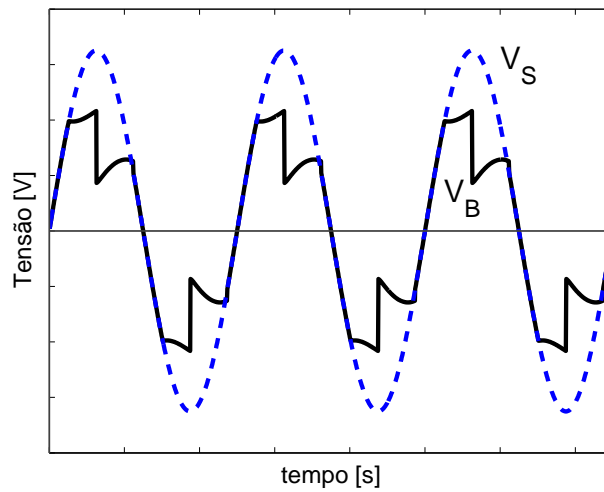


FIGURA 8 – Corrente do gerador para o barramento

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 1.2 e 1.3, e aplicando a corrente  $i_S$  da figura 8 tem-se que a forma de onda da tensão  $V_G + V_L$  é representada pela figura 9.

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 9. Seguindo essas expressões, tem-se que a forma de onda encontrada no barramento, para este exemplo, é dada pela figura 10. Aqui pode-se claramente observar que a tensão no barramento é periódica não senoidal.

O aspecto senoidal na tensão do barramento é perdido mas o valor da frequência

FIGURA 9 – Queda de tensão em  $V_G + V_L$ FIGURA 10 – Tensão  $V_B$  comparativamente à tensão  $V_S$ 

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 11.

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 sua presença distorce a forma de onda a qual podem trazer efeitos indesejáveis em equipamentos conectados na rede.

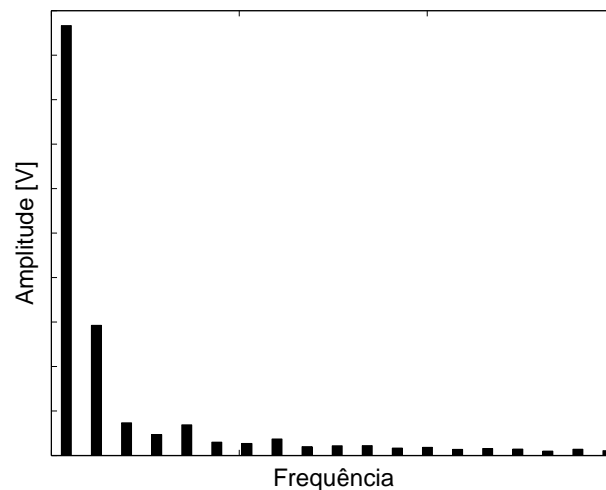


FIGURA 11 – Transformada de Fourier da tensão  $V_B$

### 1.3 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 [13]. 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 distorce a forma de onda senoidal tornando-a disforme, a qual altera 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 [13] e [11], serão elencados os principais efeitos da distorção harmônica em equipamentos tipicamente afetados do sistema elétrico de uma aeronave.

Deve ser lembrado que equipamentos eletrônicos aeronáuticos não são projetados admitindo-se operação sob condições de tensão e corrente senoidais puras.

- i) *Equipamentos Eletrônicos:* A evolução dos sistemas em aeronaves trouxe a ten-

dência 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) [14], onde a comutação ocorre no cruzamento da tensão de entrada por zero. Isto se deve basicamente para reduzir interferência eletromagnética e corrente de *inrush* [15]. 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 para fornecer 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 harmônicos 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 12.

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 condutores que são captados pela cablagem de outros sistemas. Sua presença na rede elétrica pode causar interferência em equipamentos eletrônicos digitais que, porventura, podem induzir bits errôneos nestes equipamentos.

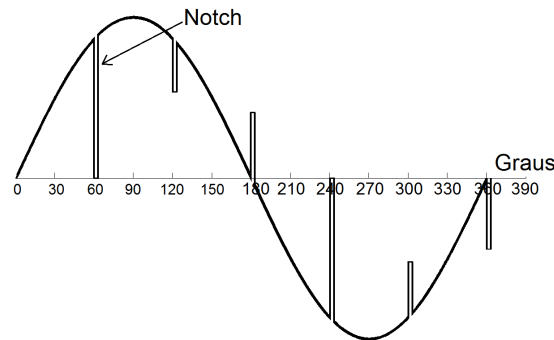


FIGURA 12 – Presença de *notch* na ondulação de tensão [16]

- ii) *Maquinas Rotativas*: As maquinas rotativas estão presente em diversos sistemas de uma aeronave e as criticidades 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 rotativas 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 elétrico estão diretamente relacionadas com a frequência da tensão em sua entrada. Como a forma de onda distorcida é dada pela composição da fundamental com componentes de alta frequência, tem-se que estas atuam de maneira a sobreaquecer os elementos do motor, como o núcleo ferromagnético e os fios que compõem os rolamentos. 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 a falha na alimentação de equipamentos eletrônicos ou tornar ineficiente a detecção de distúrbios indesejados que agiriam no sistema de 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 [17]. 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 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 deve estar livres de erros e funcionamentos inadvertidos.

De forma geral, o comportamento do relé só é interferido por componentes harmônicas para ramos cuja corrente de falha apresentam um valor baixo. Neste caso, 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 comando 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 diferentes 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.

## 1.4 Métodos de Correção de Fator de Potência

O fator de potência é um parâmetro de circuitos elétricos cuja definição é dada pela a relação entre a potência ativa e a potência aparente consumidas por um dispositivo ou equipamento, independentemente das formas que as ondas de tensão e corrente apresentem [18]. O valor deste parâmetro é usado tanto em circuitos lineares quanto nos não lineares e o conhecimento de seu valor é de grande importância para determinação da eficiência do uso de energia. Para o caso em que cargas não lineares estão sendo alimentado por uma fonte de tensão senoidal, o fator de potência é dado como um indicador para determinar a qualidade de energia do sistema, visto que seu cálculo leva em conta as amplitudes das componentes harmônicas presentes no sistema. Sendo assim, quanto mais próximo da unidade o fator de potência estiver melhor será qualidade de energia do sistema. Para o melhor entendimento, a definição do fator de potência do ponto de vista matemático é abordado na seção ?? .

Existem métodos bem concebidos na literatura com relação às metodologias para mitigar o problema das distorções harmônicas em sistemas elétricos. Em um sistema de geração senoidal pura, a fonte de distorção nas tensões dá-se pela presença de cargas não lineares na rede elétrica, como descrito nas seções 1.2.1 e 1.2.2, e o método para mitigar o problema da distorção nos níveis de tensão é dado pela inclusão de filtros nas linhas do sistema. A inserção dos filtros na rede elétrica é para casos gerais onde a origem das distorções harmônicas vão desde retificadores à equipamentos eletrônicos interferindo na qualidade de energia. Dentre as cargas que mais influenciam na geração de componentes harmônicas, os retificadores são os que mais afetam a qualidade de energia. Isto deve-se principalmente à necessidade de equipamentos eletrônicos serem alimentados por tensão contínua, o que torna abundante a presença de retificadores em sistemas elétricos. Deste modo o foco do estudo dos métodos de atenuação de harmônicas não se dá apenas no estudo de filtros, mas também no estudo de retificadores cuja operação apresenta alto fator de potência.

#### **1.4.1 Sistemas Passivos**

A caracterização de um sistema passivo dá-se pela ausência de uma fonte dedicada de energia para o correto funcionamento de um circuito ou a inexistência de um controle ativo para o mecanismo de comutação ou condicionamento de dispositivos semicondutores, como transistores ou amplificadores operacionais [19]. Para essa classe de dispositivos destacam-se os filtros passivos lineares e os retificadores de alto fator de potência sem a presença de comutadores controlados.

##### **1.4.1.1 Filtros Passivos**

Filtros passivos são circuitos dotados de componentes elétricos passivos lineares, como indutores, capacitores e resistores, concebidos 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 [20, 13]. A implementação de filtros passivos em uma rede de sistemas elétrico dá-se pelo arranjo dos elementos lineares de forma a criar impedâncias que são realizadas em série e/ou paralelo de modo a criar passagem de alta e/ou baixa impedância para um sinal qualquer. De maneira generalista, a figura 13 mostra um sistema de filtragem passiva em uma rede trifásica, juntamente com a presença de uma carga não linear.

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



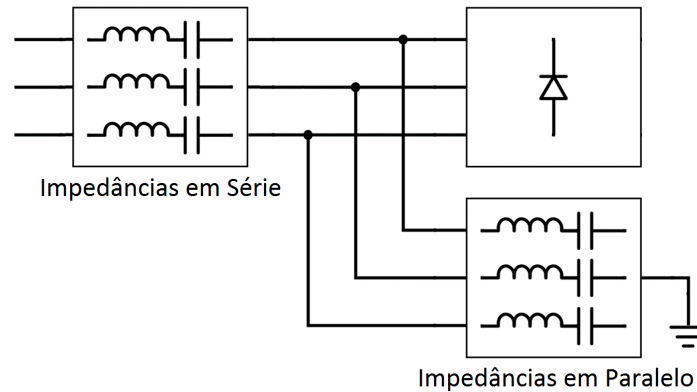


FIGURA 13 – Esquema de um filtro passivo genérico

de um sinal é nula e em outras é infinita, ou seja, as amplitudes dos componentes do espectro não se alteram 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 sendo a frequência onde a potência do sinal de saída é igual a metade da potência do sinal de entrada, ainda, esta definição pode ser estendida como a frequência a qual a razão dos sinais de entrada e saída é igual  $1/\sqrt{2}$ , ou ainda, a frequência onde a atenuação do sinal é igual a 3 decibéis.

As principais topologias de filtros passivos podem ser divididas 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  $f_c$  [13]. 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, para  $f > f_c$ . Ainda, deve-se ter em mente que, no regime de corte, quanto maior o valor da frequência das componentes que compõem o sinal, maior a redução em suas amplitudes [20]. A resposta em módulo do sistema de um filtro passa baixa pode ser visto na figura 14.
- 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 [13]. Desse modo, a

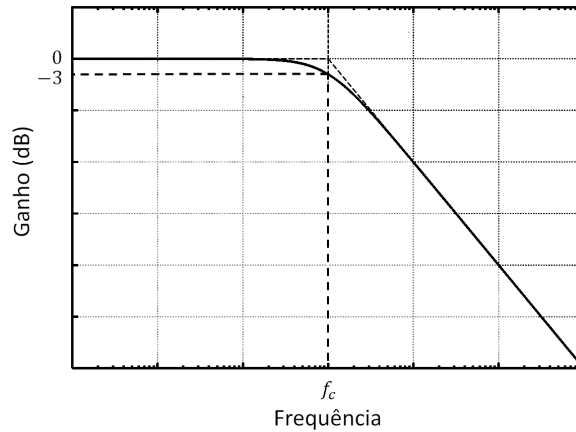


FIGURA 14 – Resposta em frequência de um filtro passa baixa

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 [20]. O espectro típico de um filtro passa alto pode ser visualizado na figura 15.

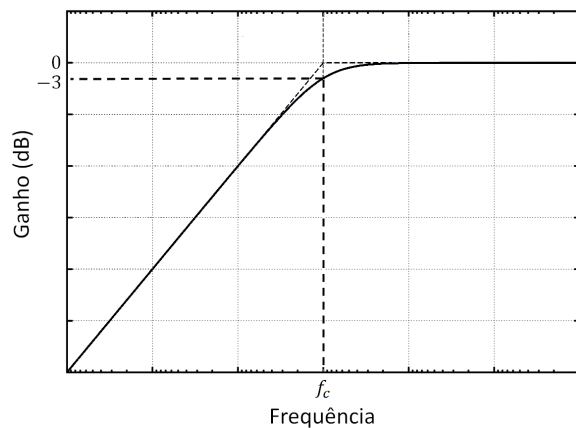


FIGURA 15 – Resposta em frequência de um filtro passa alta

- 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 ( $f_H$ ) [20]. 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 pelo 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

$f_H$  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 16.

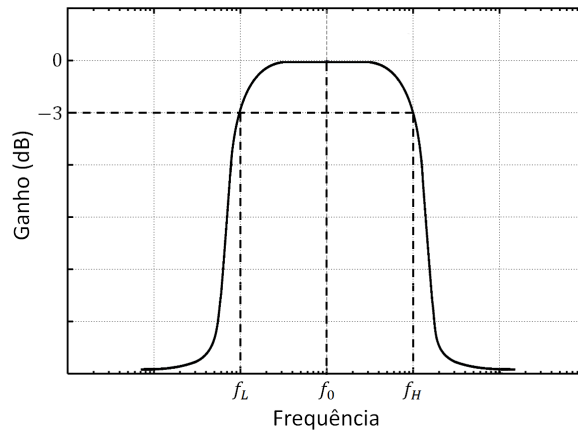


FIGURA 16 – Resposta em frequência de um filtro passa faixa

- 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 [20]. 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 17.

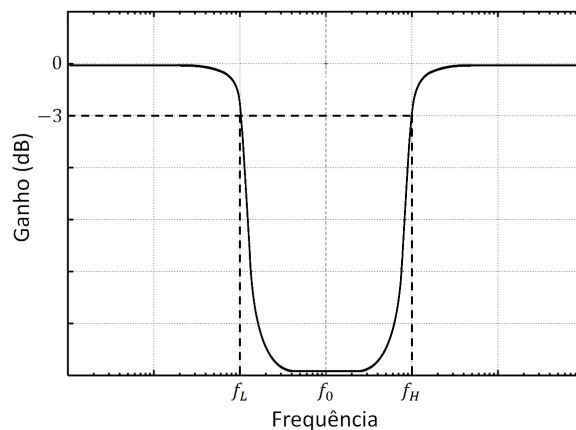


FIGURA 17 – Resposta em frequência de um filtro rejeita faixa

Na questão de aumentar a qualidade de energia de sistemas elétricos, tem-se que a utilização de filtros passa baixa é mais adequada para o problema, pois são os componentes harmônicos de frequência mais elevada que a fundamental que acabam por degradar a qualidade de energia do sistema elétrico.

### 1.4.1.2 Retificadores Multipulso

Retificadores multipulso são dispositivos condicionadores de energia elétrica que convertem tensões CA para CC, cuja principal característica é o fato de operar com alto fator de potência. Neste tipo de circuito o retificador é concebido utilizando uma filosofia semelhante a um retificador comum com pontes de diodo, porém o arranjo dos semicondutores junto com autotransformadores faz com que a corrente requerida da fonte possua uma forma quase senoidal. Outra particularidade desse conversor é a ausência de controle externo sobre os semicondutores, sendo que a comutação no retificador ocorre nos diodos e seu funcionamento depende apenas das tensões e correntes aplicadas sobre seus terminais.

Os retificadores são comumente encontrados com as topologias dos circuitos partindo de 12 para arranjos de mais pulsos, como 18, 24, 30, ou ainda maiores valores para aumentar a qualidade de energia com relação ao *THD* [21]. O princípio de operação desse tipo de conversor é realizado pelo arranjo do autotransformador juntamente com os diodos. Os autotransformadores são realizados de tal forma que criam-se formas de ondas específicas e defasadas com a entrada de modo que são aplicadas tensões nos terminais dos diodos para sua operação em condução ou bloqueio. A operação de comutação dos diodos decorre na retificação das formas de onda de maneira que requerem pulsos de corrente extraídos da fonte. A composição dos pulsos de corrente ocorridos nos diodos visto pelo lado da entrada do conversor é dada de forma quase senoidal. Existem inúmeras maneiras de conceber um conversor multipulso, porém de maneira simplificada e genérica os elementos essenciais são concebidos e arranjados como mostrado na figura 18. Ainda, o aumento do número de pulsos do conversor aumenta a qualidade de energia, entretanto eleva a complexidade dos elementos magnéticos do mesmo. Nas figuras 19 e 20 são mostrados típicos retificadores de 12 e 18 pulsos, respectivamente, com suas específicas formas de onda. Nessas figuras fica evidente a melhora na forma da corrente senoidal do retificador de 18 pulsos com relação ao de 12 [21].

Uma característica importante quanto à operação de retificadores multipulso é o fato de que a tensão na entrada do retificador pode ter sua frequência variável. Sendo assim, o fator de potência é elevado no sistema independente da frequência em seus terminais [22, 23]. Cabe lembrar, porém, que o desenvolvimento de um conversor multipulso deve contemplar o fato deste operar em frequência variável desde a fase de projeto, para adequar a operação do autotransformador altamente dependente da frequência de operação.

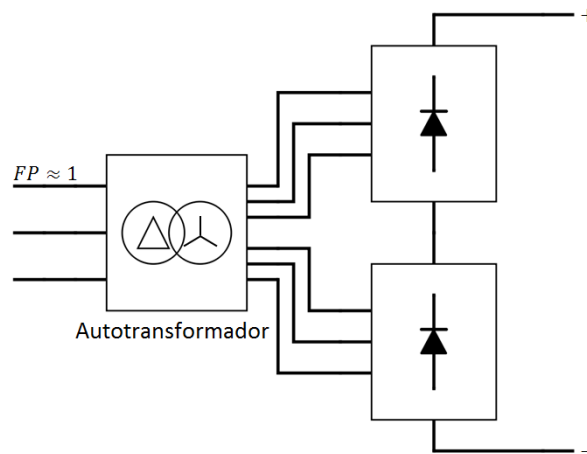
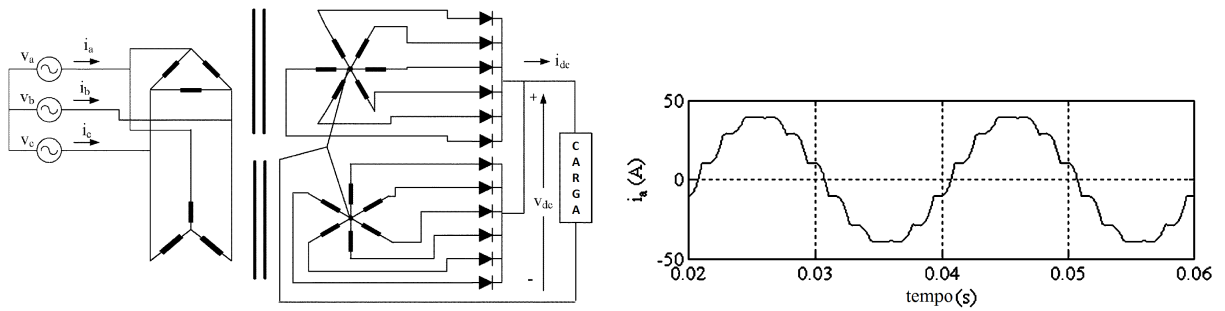
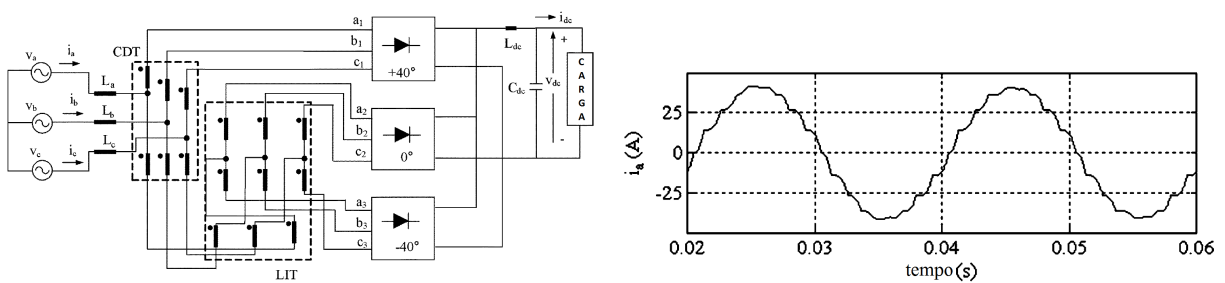


FIGURA 18 – Esquema genérico de um conversor multipulso



(a) Circuito do retificador de 12 pulsos [21] (b) Forma de onda da corrente de entrada [21]

FIGURA 19 – Circuito típico de um retificador de 12 pulsos com sua respectiva corrente de entrada



(a) Circuito do retificador de 18 pulsos [21] (b) Forma de onda da corrente de entrada [21]

FIGURA 20 – Circuito típico de um retificador de 18 pulsos com sua respectiva corrente de entrada

### 1.4.2 Sistemas Ativos

Em sistemas ativos a manutenção do de potência do sistema elétrico é feita com a utilização de conversores operados com a implementação de chaves estáticas com comutação controlada, cujo objetivo é diversificar as topologias e, dentro de certas faixas de operação, reduzir as perdas por condução quando comparados com circuitos comutados por diodos. Com isso, a flexibilidade de projeto é aumentada de modo que há uma maior diversificação de tipos de retificadores disponíveis. Além do mais, com o comando na comutação é possível haver uma melhor regulação da tensão na saída do sistema e, utilizando certas topologias, um controle de corrente de entrada de modo a proporcionar um fator de potência em acordo com os requisitos de qualidade de energia do sistema. Dois dos principais tipos de sistemas ativos implementados para mitigar as harmônicas da rede são os conversores de alto fator de potência e os filtros ativos.

#### 1.4.2.1 Conversores com Correção de Fator de Potência

A topologia de um conversor regulado com correção de fator de potência está inserida em retificadores com condicionamento de dois estágios. A operação desses retificadores tem em seu primeiro estágio a conversão AC-DC da tensão, seguido de um segundo estágio com a regulação dos níveis DC para valores bem definidos de tensão [24]. A figura 21 mostra o esquema de um conversor de dois estágios. Usualmente o primeiro estágio é concebido pelo arranjo de uma ponte retificadora à diodo, como mostra a figura 22. Esse tipo de retificador, por sua simplicidade, possui um baixo fator de potência com alta distorção de corrente na linha de entrada. Para contornar este problema, conversores AC-DC com correção de fator de potência são empregados no primeiro estágio de condicionamento, tendo o controle de distorção harmônica com a inserção de semicondutores com comutação controlada. O controle de fator de potência dá-se com a operação de comando dos comutadores de forma que a corrente de entrada do conversor rastreie a forma de onda da tensão da rede, proporcionando um alto FP. [24, 25].

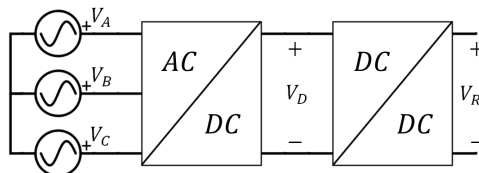


FIGURA 21 – Conversores AC-DC de dois estágios

Encontram-se inúmeras topologias de conversores com correção de fator de potência na literatura. O mais utilizado é o conversor com correção de fator de potência, ou *Power Factor Correction* (PFC) do tipo *boost*. Esse conversor é concebido pela ponte

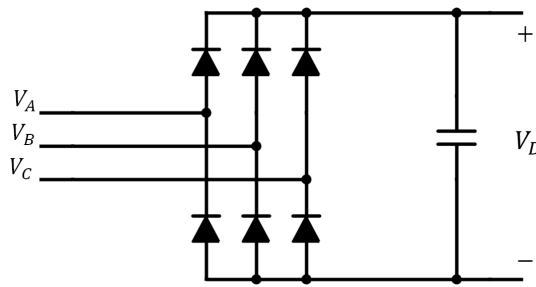


FIGURA 22 – Retificador trifásico com ponte de diodos

de diodos arranjados juntamente com chaves controladamente comutadas. Ainda, pela flexibilidade de possíveis arranjos dos semicondutores sob a ponte de diodos e pelas linhas de entrada e saída de energia, uma gama imensa de conversores do tipo *PFC boost* pode ser concebido. Para elucidar o funcionamento deste tipo de conversor será estudado o circuito Prasad-Ziogas (figura 23), cuja topologia é simples e apresenta uma única chave controlada. Também para facilitar o entendimento, será explicado a operação em modo de condução descontínua. O princípio de funcionamento é dado pelo controle da chave  $S_1$  que, quando em estado de condução, aplica a tensão da fonte sobre os indutores de entrada  $L_i$ ,  $i = 1, 2, 3$ . Isso faz com que as correntes nos indutores cresçam de forma proporcional a tensão aplicada em seus terminais pela fonte de entrada. Quando a chave  $S_1$  para de conduzir, as correntes dos indutores decaem à zero. Por ter a frequência de comutação muito maior que a frequência da rede, tem-se que a corrente de entrada apresenta uma forma modulada em amplitude de alta frequência, a qual pode ser facilmente filtrada com filtros passa-baixo [26, 27]. Sendo assim o circuito completo de um conversor com PFC é concebível com um filtro passa baixa aplicado na entrada do sistema. Todavia, por ter uma modulação em alta frequência, tem-se que o filtro possui frequência de corte alta e suas dimensões e peso são reduzidos. O diagrama completo de um sistema composto pelo filtro, retificador com PFC e o regulador é mostrado na figura 24. Após a filtragem é possível que a corrente apresente formato senoidal e em fase com a tensão. Na prática o funcionamento desse conversor apresenta certa distorção harmônica e não suporta alta capacidade de potência, de modo que outras topologias híbridas com circuitos *PFC boost* e *PFC buck* sejam utilizadas, ou ainda, pelo controle individual do fator de potência de cada fase para aumentar a capacidade de condicionamento de energia e tornar o FP próximo da unidade [24].

Como resultado da operação do conversor Prasad-Ziogas, as formas de onda nos indutores de entrada são mostradas na figura 25. Como mencionado, a forma de onda apresenta modulação em amplitude (figura 25a), assim o espectro de frequência da corrente de entrada apresenta um pico na componente fundamental juntamente com harmônicas nas altas frequências. Com a implementação de filtros passa-baixo com a alta frequência de corte, são atenuadas as componentes de alta frequência, sobrando majoritariamente a

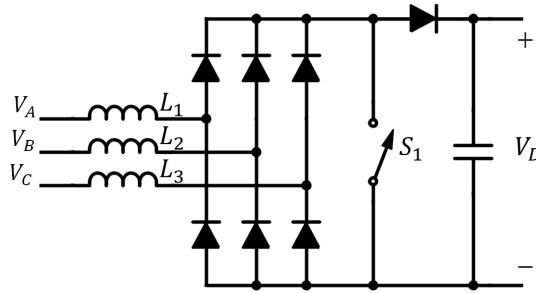


FIGURA 23 – Conversor com correção de fator de potência do tipo Prasad-Ziogas [27]

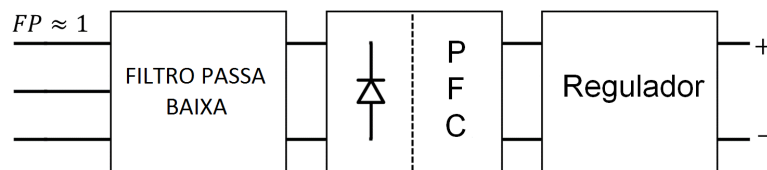
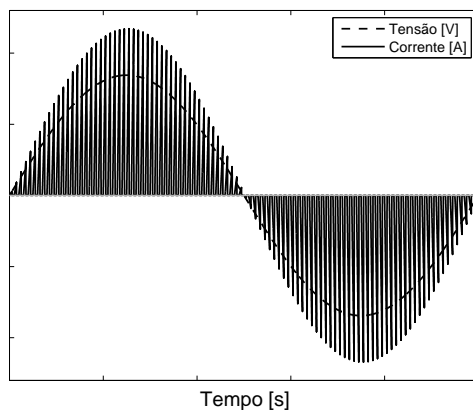
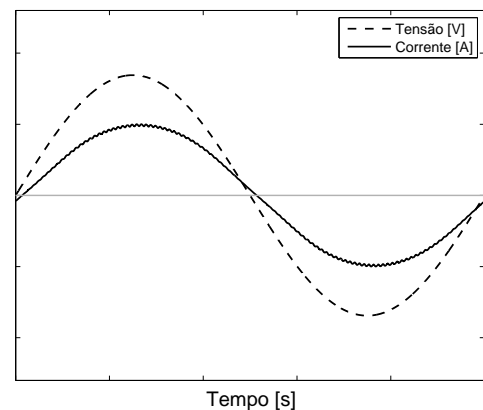


FIGURA 24 – Diagrama básico do conversor PFC

fundamental. A corrente de linha resultante após a filtragem é mostrado na figura 25b.



(a) Corrente dos indutores de entrada sem filtragem



(b) Corrente dos indutores de entrada com filtragem de 2º ordem

FIGURA 25 – Corrente de entrada para o caso sem e com filtro na linha

#### 1.4.2.2 Filtros Ativos

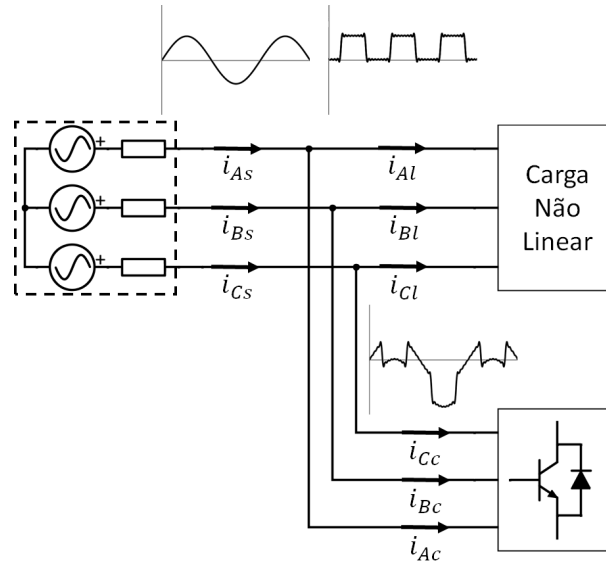
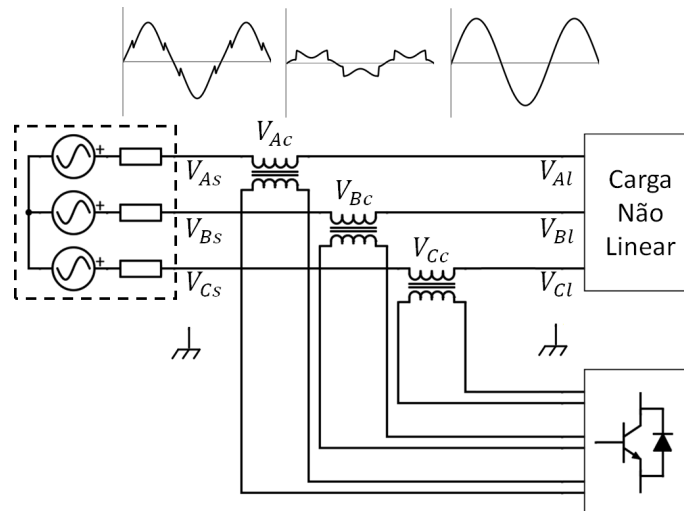
Filtros ativos podem ser classificados em dois tipos: os baseados em amplificadores operacionais e os baseados em conversores CC-CA. O princípio de funcionamento do primeiro tipo de filtro é igual em sistema passivo, onde a operação é dada pela atenuação de determinadas componentes de frequência da rede. A diferença entre os filtros ativos com os passivos é que no primeiro há a presença de amplificadores operacionais, a qual necessitam de fontes externas para funcionar adequadamente. Esse tipo de filtragem é



muito utilizado em sinais de baixa potência, sendo que para o escopo desse trabalho torna-se inviável dado o tipo de potência do sistema elétrico de aeronaves.

A filtragem baseada em conversores CC-AC tem por princípio a utilização de inversores controlados, visto que este tipo de conversor pode, teoricamente, recriar formas de tensão e corrente de qualquer configuração dada à uma referência definida [28]. O princípio dos filtros ativos é promover a qualidade de energia pela compensação das componentes harmônicas presentes nos sistemas quando há a conexão de cargas não lineares. Ainda, pode-se corrigir o fator de potência de deslocamento com a filtragem ativa. Os filtros ativos baseados em conversores CC-CA possuem topologias de tal forma à compensar a não linearidade da corrente da carga ou a distorção na forma de onda da tensão do barramento com a utilização de filtros *shunt* ou filtros série, respectivamente. O funcionamento do primeiro tipo de filtro é dado pela injeção de corrente na rede que, somado com a requerida pela carga, faz com que a corrente no barramento do gerador tenha forma de onda senoidal e em fase com a tensão. A consequência do uso desse filtro reflete tanto no fator de potência como também na distorção harmônica na forma de onda de tensão no barramento de geração [29], visto que não haverá quedas de tensão de forma distorcidas nas reatâncias dos geradores e linhas de transmissão, como descrito na seção 1.2.2. Um exemplo de funcionamento de uma filtro *shunt* pode ser visto na figura 26, onde é mostrado as formas de onda de corrente na carga e no filtro que, quando somadas, tem como produto a forma sinusoidal de corrente nas linhas de transmissão. Já o filtro série tem como objetivo a correção da distorção da tensão aplicada à carga com a inserção de fontes controladas de tensão na linha de alimentação. A compensação dá-se pela adição de componentes defasadas em  $180^\circ$  às harmônicas geradas pela distorção de corrente sobre as reatâncias das linhas. Para esse último filtro a forma de onda da corrente não é compensada, de modo que o fator de potência não é igual a unidade. Assim, tem-se que o filtro série é indicado apenas para assegurar a forma de onda senoidal de tensão nos terminais de alimentação da carga [29]. A figura 27 mostra um filtro ativo série em um sistema. Nota-se que a tensão pelo lado do barramento de geração e distribuição é distorcida, porém com a adição das tensões  $V_{Ac}$ ,  $V_{Bc}$  e  $V_{Cc}$  em suas respectivas linhas, as tensões na entrada da carga apresentam uma forma de onda senoidal pura. A utilização desse tipo de filtro é apenas indicada quando deseja-se preservar a integridade da qualidade de energia pelo lado da carga, visto que a carga ainda apresenta injeção corrente distorcida no sistema de modo a contribuir com a má qualidade de energia da rede.

Em um sistema elétrico genérico com a presença de cargas não lineares, pode-se garantir a qualidade de energia de todo o sistema com a correção da forma de onda da corrente de todos os pontos de alimentação das cargas. Caso o sistema não possua essa característica para correção da qualidade de energia, mas seja desejado que uma nova carga não interfira no sistema e, além disso tenha uma forma de onda de tensão pura em

FIGURA 26 – Filtro ativo do tipo *shunt*FIGURA 27 – Filtro ativo do tipo *série*

seus terminais, pode-se utilizar a topologia híbrida, onde há a presença tanto do filtro *shunt* quanto *série* num mesmo ponto de alimentação. Com isso, tem-se que possíveis distorções da tensão são corrigidas pelo filtro *série*, e ainda, garante-se que esta carga não interfira no resto do sistema com relação a não linearidade de corrente por ela produzida.

## 1.5 Características de Dispositivos de Correção de Fator de Potência em Sistemas Elétricos de Aeronaves

Dada a importância da manutenção da qualidade de energia em um sistema elétrico genérico para o correto funcionamento dos equipamentos nele conectados, diversas topologias de circuitos podem ser inseridas nos sistemas de modo a garantir o fator de

potência para próximo a unidade. As topologias vão desde a implementação de filtros conectados na rede até a utilização de conversores com alto fator de potência, sendo que este último possui larga utilização e contribui na manutenção da qualidade de energia nas redes elétricas. Entretanto cada sistema elétrico possui características distintas em que torna-se vantajoso a utilização de certos dispositivos para correção de fator de potência quando comparado à outras topologias. A escolha do sistema de correção de fator de potência depende de diversos fatores, que vão desde as características do sistema elétrico e seu contexto instalativo, quanto às particularidades de cada tipo de sistema. Dentre as diversas características desejáveis destacam-se a simplicidade, robustez, peso, custo, confiabilidade, eficiência e etc.. Cada topologia apresenta vantagens e desvantagens frente aos requisitos do sistema elétrico a ser utilizado, e cabe ao projetista identificar as características desejadas para cada tipo de sistema e determinar qual a topologia com alto de fator de potência adéqua-se de melhor maneira à cumprir os requisitos.

O sistema elétrico de uma aeronave possui alta criticalidade na segurança operacional. Com a tendência de aumento do uso de sistemas eletricamente energizado com o advento do *MEA*, a dependência do sistema elétrico e a criticalidade na segurança tende a aumentar. Com isso, os sistemas elétricos de aeronaves possuem requisitos de modo a garantir sua integridade em voo, sendo que os equipamentos ligados nesse sistema necessitam ser robustos e confiáveis de modo que eventuais falhas não prejudiquem a segurança operacional. Dentre outras características desejáveis para um equipamento em uma aeronave, destaca o peso e volume para viabilizar o projeto economicamente. Isto deve-se principalmente à grande dependência entre o consumo de combustível com o peso da aeronave, além da dependência do volume com o espaço da cabine, influenciando na aerodinâmica e no arrasto. Por fim, os sistemas elétricos aeronáuticos alimentados com tensão alternada operam em 400 Hz para frequência fixa, e na faixa de 350 a 800 Hz em frequência variável. O projeto de sistemas de correção de fator de potência e conversores AC-DC devem considerar tais frequências na entrada de alimentação, visto que quando comparados com os sistemas comumente encontrados de 50-60 Hz as características dos sistemas nas frequências mais altas apresentam singularidades que devem ser consideradas e que podem determinar qual a tecnologia mais adequada no projeto. Ainda há a relevância sobre à frequência variável devido sua implementação em sistemas elétricos modernos, cuja capacidade de geração é mais elevada que geradores de frequência fixa. Os métodos de filtragem para correção de fator de potência e retificação de tensão enunciados na seção 1.4 serão abordados com ênfase na utilização aeronáutica, de modo que suas principais características serão abordadas e a proposição da utilização de filtros ativos em aplicação aeronáutica será melhor elucidada.

Os filtros passivos por serem dispositivos que utilizam apenas elementos lineares como resistores, capacitores e reatores, tem sua implementação de maneira simples e com

baixo custo, ao mesmo tempo que a manutenção desse dispositivo é facilitada devido a sua simplicidade. Ainda, este sistema possui flexibilidade quanto a sua implementação, sendo que este filtra as componentes de alta frequência da linha independentemente do tipo de carga conectada na rede. Ainda, a maturidade desse sistema é alta devido à larga utilização em sistemas elétricos industriais. Outra vantagem é que pode-se projetar tais filtros para compensar a potência reativa do sistema regulando o fator de potência de deslocamento [30]. Entretanto este tipo de topologia possui grande volume e peso mesmo que operados na mitigação de harmônicas de sistemas à 400 Hz [31], o que os tornam um entrave em sua utilização em sistemas elétricos aeronáuticos. Outra restrição do uso de filtros casados passivos é o impedimento na utilização de sistemas com frequência variável [31, 32], sendo que esse tipo de geração é tendência futura em sistemas elétricos de aeronaves. A utilização de filtros com a topologia otimizada e mais complexa poderia ser utilizada para esse caso, porém isso iria contra o princípio da simplicidade da filtragem passiva [31].

Os conversores multipulso são dispositivos passivos e têm como principal característica o condicionamento de energia utilizando comutadores estáticos, sendo que o controle destes é desprovido de comando externo. Por este motivo, o projeto desta topologia apresenta uma complexidade reduzida em relação à ausência de controle dedicado aos semicondutores, ao passo que o sistema proporciona uma boa confiabilidade quanto à falha do conversor [22, 23]. Outra característica que o torna atraente na utilização no setor aeronáutico é a possibilidade de empregar esse retificador em sistemas de geração com frequência variável, apresentando baixos níveis de harmônicas na operação de 350 - 800 Hz [22, 23]. Por outro lado, existem desvantagens neste tipo de conversor, sendo que as mais afetam sua implementação no setor aeronáutico são o alto peso e volume. Isto deve-se principalmente pela utilização de autotransformadores que compõem-se de elementos magnéticos pesados e volumosos. Isto traz outra implicação que é a baixa densidade de energia com relação ao peso do conversor [30]. Entretanto, mesmo com estas características este conversor já é empregado em alguns equipamentos em sistemas elétricos aeronáuticos.

Os conversores com correção de fator de potência apresentam diversas topologias as quais podem ser empregadas para diminuir as harmônicas de corrente. Tais topologias apresentam um grande leque de opções que variam com a complexidade e densidade de energia a ser condicionados na conversão de tensão elétrica. Primeiramente, tem-se que esta abordagem traz a necessidade de utilizar um filtro casado na linha para obtenção de corrente sinusoidal, como mostra a figura 25, todavia tais filtros possuem tamanho reduzido devido à alta frequência de comutação do semicondutor controlado. No entanto estes filtros acabam por limitar a operação em frequência variável, visto que as componentes harmônicas variam no tempo, o que limita a utilização de filtros passa baixa

na entrada do sistema. Como característica em uma topologia básica, estes conversores provém boa robustez ao sistema devido a proteção quanto a limitação da corrente na carga, a qual protege o sistema elétrico contra curto circuito [22, 23]. Entretanto nesses circuitos há uma grande dissipação de energia nos semicondutores controlados fazendo com que o peso e o volume aumentem e, conseqüentemente, diminuem a densidade de energia [22, 23]. Existem topologias que contornam esse problema com a implementação de mais estágios de conversão [22, 23], porém este fato juntamente com a necessidade de regulador de um tensão na saída do conversor aumenta a complexidade, resultando na diminuição da confiabilidade do equipamento [30].

Os filtros ativos baseados em conversores CC-CA possuem diversas características que viabilizam sua utilização em sistemas elétricos aeronáuticos. Como ocorre com os filtros passivos, existe a flexibilidade quanto a implementação de filtros ativos na rede, a qual independe o tipo de carga ou origem da distorção harmônica do sistema. Ainda, Dentre as vantagens destaca-se o fato de este conversor ter uma performance superior de filtragem, são menores e mais flexíveis que uma topologia de filtragem passiva [33]. Isto ocorre, principalmente, devido ao fato que este conversor condiciona apenas a potência reativa necessária para mitigação das harmônicas na rede. Deste modo sua densidade de potência é bastante elevada, ao passo que seu peso e volume é reduzido [30]. Ainda destaca-se a capacidade de utilização desse sistema em redes de frequência variável, como ocorre em aeronaves mais modernas. Outra característica é a capacidade de implementação de uma malha de controle para manutenção dos níveis de tensão na saída do conversor. A implementação de uma malha de controle pode ser até necessária dependendo da carga, visto que é requerido uma boa resposta dinâmica para suportar uma rápida variação de impedância [30], tornando-o robusto quanto a sensibilidade frente à variação da carga [34]. Dentre as características negativas quanto à utilização desse tipo de topologia na mitigação de harmônicas em sistemas aeronáuticos, tem-se a elevada complexidade se comparado à outras topologias, diminuindo a confiabilidade e elevando o custo. Além do mais, por possuir semicondutores controlados, este conversor apresenta perdas relativamente elevadas comparados à topologias de filtragem passiva [33].

Diante das características apresentadas sobre as topologias de sistemas de correção de fator de potência, seja por meios de filtragem das harmônicas, ou ainda pela característica intrínseca de retificadores com alto fator de potência, tem-se que na aplicação aeronáutica o uso de filtros ativos são os mais promissores. Estudos mostram que o método de redução de harmônicas provida pelo sistema de filtragem ativa é a melhor topologia para ser utilizada em aeronaves [30]. Isto deve-se principalmente a sua flexibilidade, a qual pode-se implementar filtros ativos desde na linha de saída do gerador quanto em pontos de carga cujo fator de potência é baixo [35]. Outra característica que torna a filtragem ativa vantajosa é a alta eficiência e densidade de energia. Simulações mostram que, comparati-

vamente à sistemas de filtragem passiva e conversores de alto fator de potência, os filtros ativos são os que apresentam melhor eficiência e densidade de energia [36]. Para aplicação aeronáutica essas características são essenciais para manter o baixo peso e volume dos sistemas embarcados. Ainda, a filtragem ativa oferece a capacidade de implementação para aplicações no sistema de distribuição de aeronaves mais modernas cuja geração é provida por frequência variável. Entretanto esta opção de mitigação apresenta alguns fatores que impedem que este seja amplamente utilizado nos sistemas elétricos aeronáuticos. Os principais fatores são a alta complexidade, que acaba por diminuir a confiabilidade do sistema, e as perdas nos dispositivos semicondutores. Entretanto o desenvolvimento tecnológico na aplicação de chaves semicondutoras de alto desempenho, apresentando baixas perdas e alta vida útil, vem sendo progredido ao longo do tempo de maneira que a aplicação destas em sistemas que exigem alta confiabilidade podem ser aplicadas. Ainda, os controladores digitais dos semicondutores comutados estão evoluindo de modo que estes apresentem alta frequência de operação e maior velocidade de processamento. Deste modo, o desenvolvimento tecnológico na área de eletrônica de potência faz com que a robustez do sistema de filtragem ativa aumente de modo que seja interessante seu uso em sistemas elétricos aeronáuticos.

## 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] SINGER, C. et al. Aircraft electrical power systems and nonlinear dynamic loads. *SAE International Journal of Aerospace*, SAE International, v. 5, n. 2, p. 447–454, 2012.
- [8] EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS E ELETRÔNICOS DE POTÊNCIA LTDA. *Harmônicos em Instalações Elétricas*. Acessado em 06/06/2016. Disponível em: <[http://www.engematec.com.br/site/downloads/harmonicos\\_em\\_instalacoes\\_eletricas.pdf](http://www.engematec.com.br/site/downloads/harmonicos_em_instalacoes_eletricas.pdf)>.
- [9] CIDADE, G. *Eletricidade e Eletrônica Aplicada à Biociências*. Acessado em 25/04/2015. Disponível em: <[http://fisbio.biof.ufrj.br/restrito/bmb353/4\\_M\\_eletric/ele\\_ele/conc\\_bas/index.htm](http://fisbio.biof.ufrj.br/restrito/bmb353/4_M_eletric/ele_ele/conc_bas/index.htm)>.

- [10] ALEXANDER, C. K.; SADIKU, M. N. O. *Fundamentals of of Electric Circuits*. 3. ed. [S.l.]: McGraw-Hill Higher Education, 2005.
- [11] WAGNER, V. et al. Effects of harmonics on equipment. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, v. 8, n. 2, p. 672–680, 1993.
- [12] DECKMANN, S. M.; POMILIO, J. A. *Avaliação da Qualidade da Energia Elétrica*. 2010. Acessado em 28/05/2015. Disponível em: <<http://www.dsce.fee.unicamp.br/antenor/pdf/qualidade/b5.pdf>>.
- [13] KASSICK, E. V. *Harmônicas em Sistemas Industriais de Baixa Tensão*. Florianópolis, Abril 2010. Instituto de Eletrônica de Potência. Universidade Federal de Santa Catarina.
- [14] 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>>.
- [15] MANOUSAKA, E. *DC-DC Buck Converter with Inrush Current Limiter*. Dissertação (Mestrado) — Faculty of Applied Sciences, Lorentzweg, 2013.
- [16] 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>>.
- [17] FITZGERALD, A.; KINGSLEY, C.; UMANS, S. *Máquinas Elétricas - Com Introdução à Eletrônica de Potência*. 6. ed. [S.l.]: McGraw-Hill, 2006.
- [18] VICTORINO, A. *Fator de Potência e Distorção Harmônica*. 2011. Acessado em 18/06/2016. Disponível em: <[http://www.joinville.ifsc.edu.br/~aryvictorino/leituras\\_SIP\\_2011-1/sugest%c3%a3o%20de%20leitura%20da%20aula%2015%20-%20fator%20de%20pot%c3%aancia%20e%20distor%c3%a7%c3%a3o%20harm%c3%b4nica.doc](http://www.joinville.ifsc.edu.br/~aryvictorino/leituras_SIP_2011-1/sugest%c3%a3o%20de%20leitura%20da%20aula%2015%20-%20fator%20de%20pot%c3%aancia%20e%20distor%c3%a7%c3%a3o%20harm%c3%b4nica.doc)>.
- [19] LACANETTE, K. *A Basic Introduction to Filters: Active, Passive, and Switched-Capacitor*. 1991. National Semiconductor. AN779.
- [20] MUSSOI, F. L.; ESPERANÇA, C. *Resposta em frequência: Filtros passivos*. 2. ed. Florianópolis, 2004. Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina.



- [21] SINGH, B. et al. Multipulse ac–dc converters for improving power quality: a review. *IEEE Transactions on Power Electronics*, IEEE, v. 23, n. 1, p. 260–281, 2008.
- [22] GONG, G.; DROFENIK, U.; KOLAR, J. 12-pulse rectifier for more electric aircraft applications. In: IEEE. *2003 IEEE International Conference on Industrial Technology*. Maribor, 2003. v. 2, p. 1096–1101.
- [23] GONG, G. et al. Comparative evaluation of three-phase high-power-factor ac-dc converter concepts for application in future more electric aircraft. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, IEEE, v. 52, n. 3, p. 727–737, 2005.
- [24] KOLAR, J. W.; FRIEDLI, T. The essence of three-phase pfc rectifier systems. In: IEEE. *2011 IEEE 33rd International Telecommunications Energy Conference (INTELEC)*. Amsterdam, 2011. p. 1–27.
- [25] BARBOSA, P. M. *Three-Phase Power Factor Correction Circuits for Low-Cost Distributed Power Systems*. Tese (Doutorado) — Faculty of the Virginia Polytechnic Institute, Blacksburg, 2002.
- [26] NAIRUS, J. G. *Three-Phase Boost Active Power Factor Correction for Diode Rectifiers*. Ohio, 1996. AFRL Propulsion Directorate - Wright-Patterson Air Force Base.
- [27] TAKEUCHI, N. et al. A novel pfc circuit for three-phase utilizing a single switching device. In: IEEE. *IEEE 30th International Telecommunications Energy Conference 2008. (INTELEC 2008)*. San Diego, 2008. p. 1–5.
- [28] POMILIO, J. A.; DECKMANN, S. M. *Condicionamento de Energia Elétrica e Dispositivos FACTS*. Campinas, 2009.
- [29] AFONSO, J. L.; GONÇALVES, H.; PINTO, J. *Power Quality Issues*. [S.l.]: INTECH Open Access Publisher, 2013.
- [30] ZHU, S.; MA, W. Methods of aircraft grid harmonic reduction: A review. *Scholars Journal of Engineering and Technology (SJET)*, v. 2, p. 270–275, 2014.
- [31] BARRUEL, F.; SCHANEN, J.; RETIERE, N. Volumetric optimization of passive filter for power electronics input stage in the more electrical aircraft. In: IEEE. *2004*.

- PESC 04. 2004 IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference*. [S.l.], 2004. v. 1, p. 433–438.
- [32] CHEN, Z. et al. A research on cascade five-level aeronautical active power filter. In: IEEE. *2012 7th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC)*. [S.l.], 2012. v. 4, p. 2732–2737.
- [33] AKAGI, H. Modern active filters and traditional passive filters. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences, Technical Sciences*, v. 54, n. 3, 2006.
- [34] CHEN, Z.; CHEN, M. A novel 400hz shunt active power filter for aircraft electrical power system. In: IEEE. *2012 7th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC)*. [S.l.], 2012. v. 4, p. 2838–2843.
- [35] CHEN, Z.; LUO, Y.; CHEN, M. Control and performance of a cascaded shunt active power filter for aircraft electric power system. *IEEE Transactions on Industrial electronics*, IEEE, v. 59, n. 9, p. 3614–3623, 2012.
- [36] KARATZAFERIS, J. et al. Comparison and evaluation of power factor correction topologies for industrial applications. *Energy and Power Engineering*, Scientific Research Publishing, v. 5, n. 6, 2013.