

0.1 Métodos de Atenuação de Harmônicas

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

0.1.1 Sistemas Passivos

A caracterização de um sistema passivo dá-se pela ausência de fontes externas de energia para o correto funcionamento de um circuito ou o controle ativo para o mecanismo de comutação ou condicionamento de dispositivos semicondutores, como transistores ou amplificadores operacionais [1]. Para essa classe de dispositivos passivos destacam-se os filtros lineares e os retificadores de alto fator de potência sem a presença de comutadores comandados.

0.1.1.1 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 [2, 3].

Conceitualmente, pode-se considerar a concepção de filtros ideais e reais. De maneira simplificada, os filtros ideais são tais que em determinadas frequências a atenuação é nula e em outras é infinita, ou seja, as amplitudes dos componentes do espectro não se altera em determinadas frequências mas em outras são levadas a zero, respectivamente. Tais filtros não são realizáveis e na prática são utilizados filtros reais. Esses filtros não possuem uma atenuação infinita, e a diminuição das respectivas amplitudes em função da frequência é dada segundo a ordem do filtro. De maneira geral, a ordem do filtro é dada de acordo com o número de elementos armazenadores de energia concebidos no circuito. Assim, para que o filtro real tenha o mesmo comportamento que o ideal haveria de ter ordem infinita, o que o torna inconcebível.

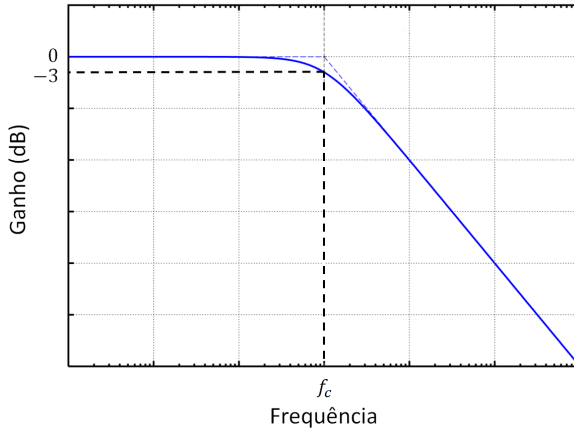
Por definição, a frequência de corte (f_c) dos filtros reais é definida segundo qual a potência do sinal de saída é tida como a metade da potência do sinal de entrada, ainda, esta definição pode ser estendida como a frequência a qual a razão dos sinais de saída e entrada é tida como $\sqrt{2}$, ou mais,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

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

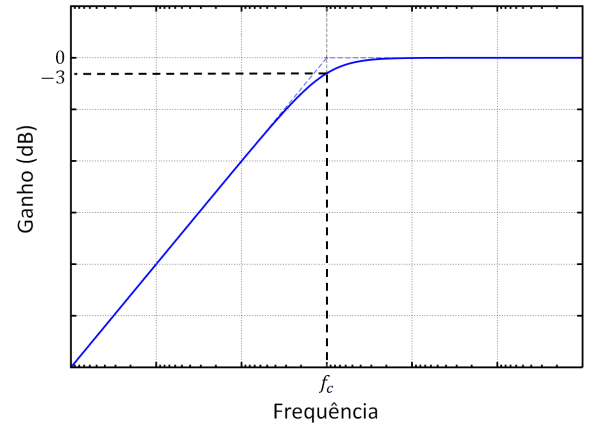
- i) *Filtro Passa Baixa:* A concepção desse tipo de filtro age de forma a criar caminhos de alta impedância entre a entrada e saída do sistema para frequências mais elevadas que f_c [3]. Desse modo, comparativamente ao sinal da entrada, a saída possui a mesma característica de amplitude e potência para 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 [2]. A resposta em módulo do sistema de um filtro passa baixa pode ser visto na figura 1a.
- 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 [3]. 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 [2]. O espectro típico de um filtro passa alto pode ser visualizado na figura 1b.
- 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) [2]. Desse modo, o comportamento do sistema caracteriza-se pela atenuação de componentes que possui frequência abaixo de f_L e acima de f_H . Outra característica fundamental dos filtros passa faixa é a largura de banda definida pela intervalo onde o sinal não é atenuado. Em termos numéricos, esse valor é definido por $f_H - f_L$. Ainda existe a frequência central f_0 ou frequência de ressonância, a qual é a média geométrica entre a frequência de corte inferior f_L e a frequência de corte superior 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 1c.

arrumar
esse texto
que está
porco

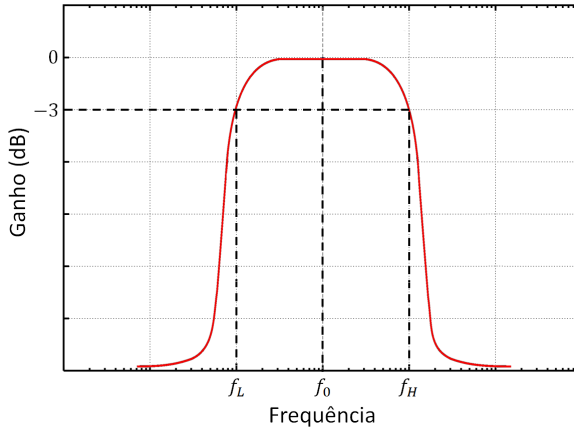
iv) *Filtro Rejeita Faixa*: Ao contrário do filtro passa faixa, este tipo de filtro é definido por atenuar componentes cujas frequências estão contidos em um determinado intervalo, enquanto as amplitudes das componentes fora deste não são alteradas. Analogamente ao passa faixa, existe a frequência de corte inferior e superior definidas por f_L e f_H , respectivamente [2]. 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 1d.



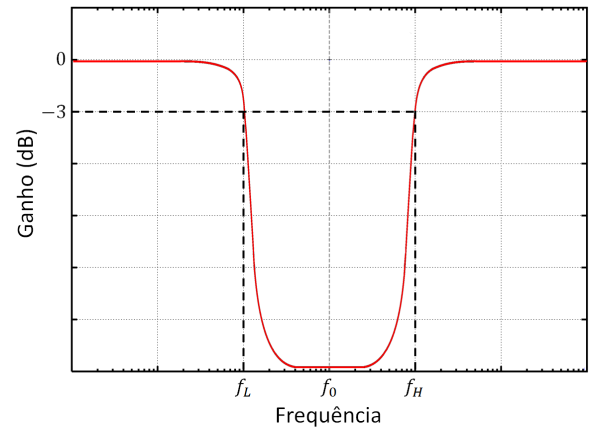
(a) Resposta em frequência de um filtro passa baixa



(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 – Ganho em função da frequência de filtros passivos típicos

Para o problema de atenuar as harmônicas de mais alta frequência que a fundamental, a utilização de filtros passa baixa é mais adequada, pois são os componentes harmônicos que acabam por degradar a qualidade de energia do sistema elétrico.

0.1.1.2 Retificadores Multipulso

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, tornando o retificador com alto fator de potência. 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 sob seus terminais.

Os retificadores são comumente encontrados com as topologias dos circuitos partindo de 12 para arranjos de mais pulsos, como 18, 24, 30 e ainda maiores valores para manter a qualidade de energia com relação ao *THD* [4]. No conceito desse retificador existe a montagem com autotransformadores de modo que o arranjo de diodos passa a conduzir de tal forma que a corrente requerida na entrada tenha um formato com baixa incidência de harmônicas de elevada frequência. Ainda, com o aumento de pulsos do conversor aumenta a qualidade de energia, porém eleva a complexidade dos elementos magnéticos do mesmo. Nas figuras 2 e 3 são mostrados típicos retificadores de 12 e 18 pulsos, respectivamente, com suas específicas formas de onda. Aqui fica evidente a melhora na forma da corrente senoidal do retificador de 18 pulsos com relação ao de 12 [4].

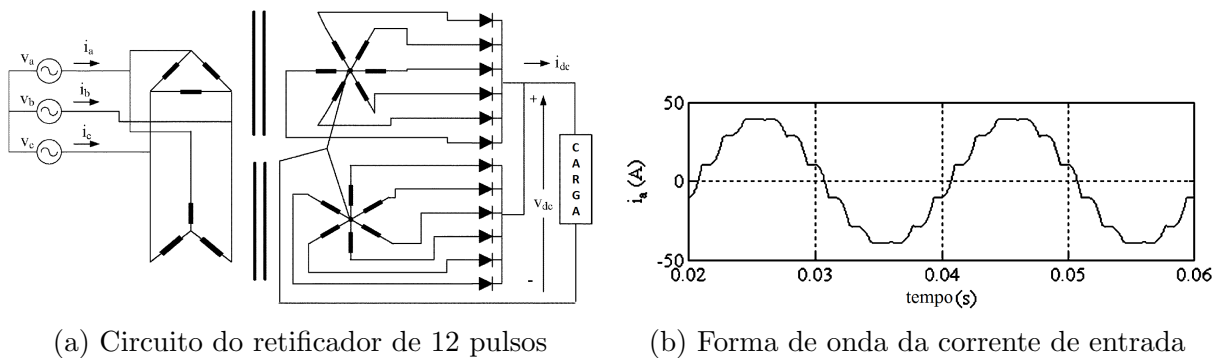


FIGURA 2 – Circuito típico de um retificador de 12 pulsos com sua respectiva corrente de entrada [4]

Cabe lembrar que a utilização de retificadores multipulso é realizável tanto em redes de 60 Hz quanto em sistemas de elevada frequência, tal qual 400-800 Hz [5, 6]. Isto faz-se necessário para atender o mercado aeronáutico que possui o sistema elétrico operando em 400 Hz, ou até 800 Hz para geração em frequência variável.

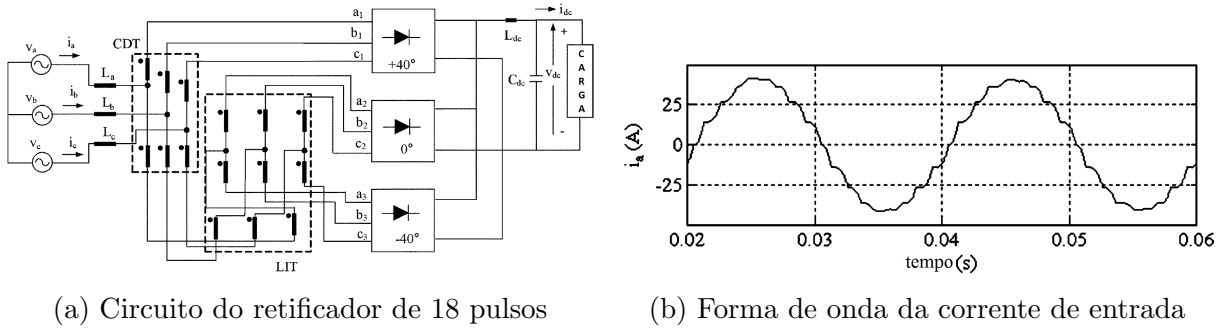


FIGURA 3 – Circuito típico de um retificador de 18 pulsos com sua respectiva corrente de entrada [4]

0.1.2 Sistemas Ativos

Em sistemas ativos os a retificação é feito 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.

0.1.2.1 Conversores com Correção de Fator de Potência

A topologia de um conversor regulado com correção de fator de potência está inserido 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 [7]. A figura 4 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 5. 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 fator de potência. [7, 8].

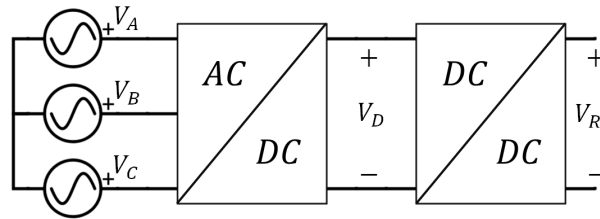


FIGURA 4 – Conversores AC-DC de dois estágios

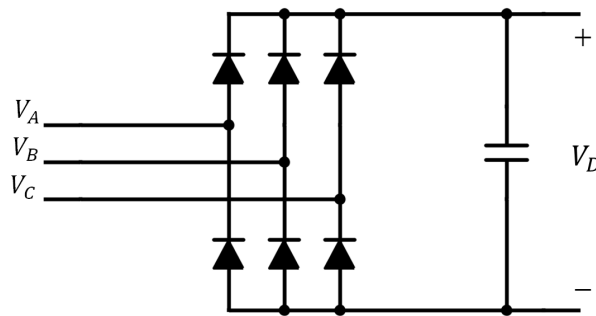


FIGURA 5 – Retificador trifásico com ponte de diodos

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 *Poewer Factor Coreection* (PFC) do tipo *boost*. Esse conversor é concebido pela ponte 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 6), 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 a corrente nos indutores cresçam de forma proporcional a tensão aplicada em seus terminais pela fonte de entrada. Quando o a chave S_1 para de conduzir, a corrente dos indutores são levadas 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 alta frequência e facilmente filtrada com filtros passa-baixo [9, 10]. Com isso 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 carga de potência, de modo que outras topologias híbridas com circuitos *PFC boost* e *PFC buck* sejam aplicadas, ou ainda a conexão em delta ou estrela das fases em separado para aumentar a capacidade de potência e tornar o FP próximo da unidade [7].

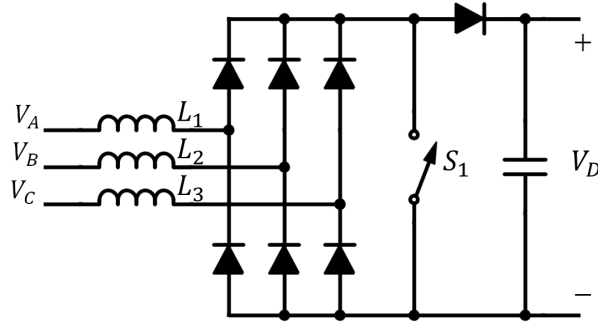
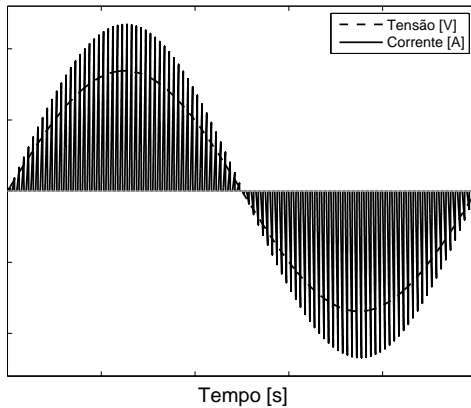
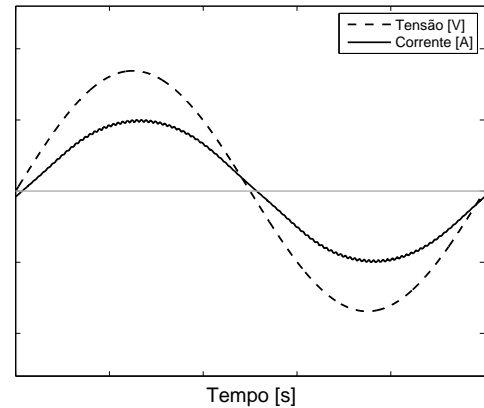


FIGURA 6 – Conversor com correção de fator de potência do tipo Prasad-Ziogas [10]

Como resultado da operação do conversor Prasad-Ziogas, as formas de onda nos indutores de entrada são tidos como mostrado na figura 7. Como mencionado, a forma de onda apresenta forma modulada em amplitude (figura 7a), desse modo o espectro de frequência apresenta um pico na fundamental e harmônicas de alto valor. Com essa consequência, é possível de implementar filtros passa-baixo na linha de modo que essas harmônicas de alta frequências sejam atenuadas, sobrando apenas a componente fundamental, o resultado dessa etapa é mostrado na figura 7b.



(a) Corrente dos indutores de entrada sem filtragem



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

FIGURA 7 – Corrente de entrada para o caso sem e com filtro na linha

0.1.2.2 Filtros Ativos

O princípio dos filtros ativos é prover um alto fator de potência, seja pela distorção e/ou de deslocamento, com a injeção de corrente na rede a qual somado com a mesma requerida pela carga faz com que esta apresente uma forma de onda senoidal e em fase com a tensão. Isso é conseguido aplicando uma fonte de corrente e/ou tensão controladas nas linhas da rede do sistema. Estas fontes são concebidas por inversores de frequência

cujo controle é feito pela leitura da corrente requerida pela carga e gerando na saída uma forma de onda compatível com a correção do fator de potência do sistema.

0.2 Vantagens e Desvantagens dos Sistemas de

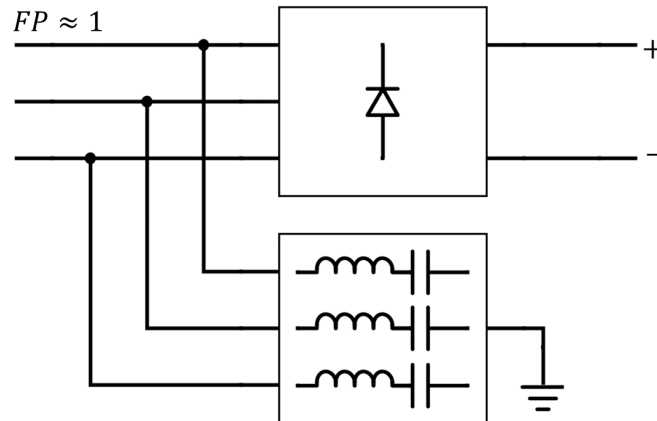


FIGURA 8 – Filtro Passivo



FIGURA 9 – Filtro PFC

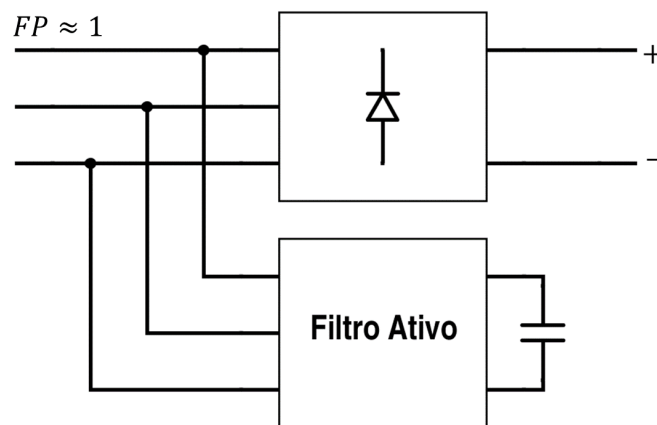


FIGURA 10 – Filtro Ativo

Melhorar o título visto que alguns métodos não atenuam e sim já implementam a solução com alto fator de potência

Referências Bibliográficas

- [1] LACANETTE, K. *A Basic Introduction to Filters: Active, Passive, and Switched-Capacitor*. 1991. National Semiconductor. AN779.
- [2] MUSSOI, F. L.; ESPERANÇA, C. *Resposta em frequência: Filtros passivos*. 2. ed. Florianópolis, 2004. Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina.
- [3] KASSICK, E. V. *Harmônicas em Sistemas Industriais de Baixa Tensão*. Florianópolis, Abril 2010. Instituto de Eletrônica de Potência. Universidade Federal de Santa Catarina.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] NAIRUS, J. G. *Three-Phase Boost Active Power Factor Correction for Diode Rectifiers*. Ohio, 1996. AFRL Propulsion Directorate - Wright-Patterson Air Force Base.
- [10] 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.