

# 1 Simulação de Filtro Ativo Shunt Aplicado em um Sistema Elétrico Aeronáutico

Analisar  
se esse  
título  
está ade-  
quado

## 1.1 Características de Filtros Ativos em Sistemas Reais

### 1.1.1 Inversores Estáticos

Idealmente considera-se que filtros ativos são compostos por fontes de tensão/correntes controladas, a qual podem fornecer tensão/corrente de maneira a acompanhar uma dada referência. A concepção dessa fonte é realizada no âmbito da realidade por meio de inversores estáticos, as quais são sistemas compostos por elementos semicondutores que por meio de um controle de comutação de alta frequência consegue criar formas de onda/corrente para uma dada referência.

#### 1.1.1.1 Tipo de Conversores

Na aplicação de um filtro ativo do tipo shunt a topologia do conversor pode ser resumida em dois tipos: Conversores baseados em fonte de tensão (VSC - *Voltage-source Converter*) e Conversores baseados em fonte de corrente (CSC - *Current-source Converter*) [44]. Para ambos os casos, o arranjo dos semicondutores é o mesmo, todavia a diferença recai no lado DC do conversor. Enquanto o VSC possui uma fonte de tensão disposta no lado DC, o CSC dispõe de uma fonte de corrente em tal posição. As figuras 1a e 1b mostram circuitos comumente empregados para sistemas VSC e CSC respectivamente.

As chaves representadas nas figura 1a e 1b são realizadas por comutadores estáticos controlados, tal como MosFets, IGBTs, GTOs e etc. Cada uma destas tecnologias possuem características distintas de modo que seu emprego depende do comportamento esperado para cada tipo de aplicações. Observa-se também a presença de diodos em antiparalelo aos semicondutores para o caso VSC. Estas estão presentes de maneira a criar um caminho de roda livre para permitir a passagem de corrente induzida por indutâncias intrínsecas das linhas de transmissão e dos filtros. A presença deste não é aplicada em CSC, entretanto este tem presente diodos de bloqueio em série às chaves semicondutoras como forma proteção [49, 50]

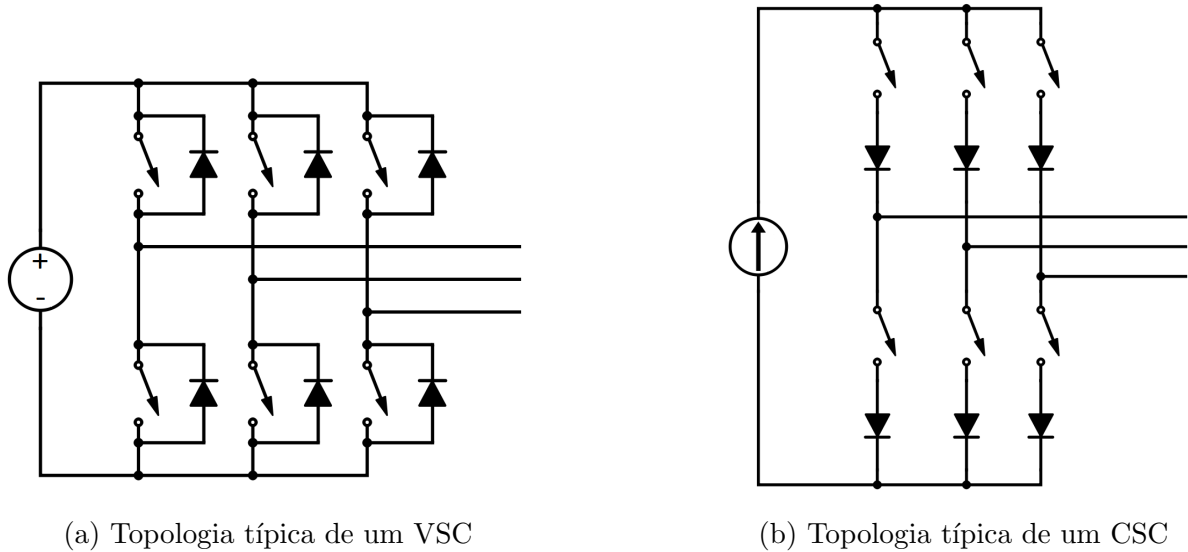


FIGURA 1 – Inversores de tensão e corrente

#### 1.1.1.2 Controle por PWM

Em ambos os casos o controle de tensão/corrente do lado AC é realizado por PWM. Este sinal é comumente gerado por um microcontrolador programado de maneira a operar a comutação dos semicondutores a fim de obter uma saída específica no lado AC. Existem dois principais tipos de controle por PWM para o comando de conversores: o de frequência fixa e variável. O primeiro tipo opera comparando um sinal de referência com um sinal periódico triangular com frequência fixa e de valor elevado para determinar a razão cíclica dos pulsos. Nesta operação a saída apresenta em seu espectro de frequência uma componente fundamental de baixo valor seguido de componentes de alta frequência provenientes da onda triangular. Com isso, o emprego de filtros com frequência de corte elevada torna a saída composta apenas pela fundamental, que corresponde ao sinal de referência da entrada do comparador. Já a operação com frequência variável tem como principal característica o controle por histerese. Nesta operação o sinal de referência é envolto por uma banda de histerese que faz com que a operação da comutação dos semicondutores mantêm o sinal de saída contido dentro desta banda. Para o melhor entendimento, a operação de controle por histerese é mostrado na Figura 3 [51].

A implementação de ambos os tipos VSC e CSC mostram-se adequadas para a aplicação em filtros ativos do tipo shunt. Todavia para o uso em sistemas aeronáuticos o conversor do tipo VSC apresenta maiores vantagens devido à maior eficiência, menor custo, menor tamanho e peso comparativamente ao CSC [44]. Já o controle PWM mais adequado e comumente encontrado na aplicação deste tipo de filtro é feito por frequência variável por histerese. Este controle no PWM faz com que o VSC se comporte com o fonte de corrente pela comparação da saída do inversor com a referência advinda do

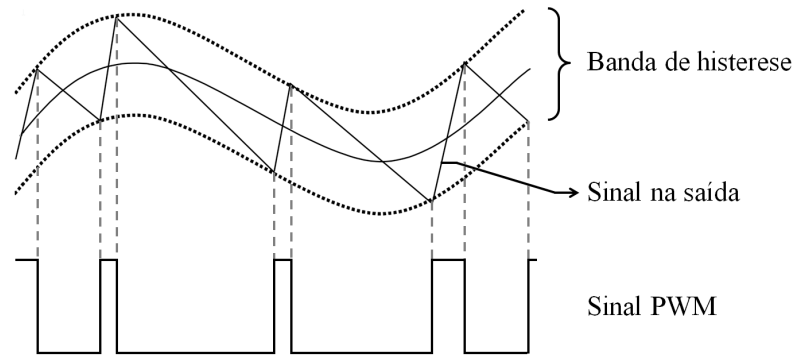


FIGURA 2 – Controle por histerese [51]

controlador. O comportamento de fonte de corrente ocorre pela adição de indutores na saída do conversor, de modo que o controle dos semicondutores aplique pulsos de tensão advindas do capacitor do lado DC tornando a corrente crescente ou decrescente proporcionalmente à indutância e a tensão aplicada. Este sinal é medido e comparado com as bandas de histerese do sinal de referência, fazendo com que a operação dos semicondutores se estabeleçam de forma a manter o sinal de saída entornado à referência.

Como forma de obter uma resposta rápida às variações do sinal de referência, a aplicação de um indutor de alto valor impede que a saída do conversor acompanhe adequadamente a referência. Deste modo é desejável um valor de indutância com baixo valor na saída do conversor de modo a não limitar uma rápida variação de corrente no tempo. Todavia essa aplicação traz a implicação de tornar a corrente de saída ruidosa, trazendo o aparecimento de componentes de alta frequência nas tensões da linha do sistema. Para contornar esse problema capacitância são alçadas entre as fases de modo a filtra o sinal ruidoso de alta variação no tempo. O valor dessa capacitância deve ser escolhido de maneira a atender a filtragem de corrente do conversor mas também não pode ser elevada o suficiente para aumentar a potência reativa do sistema e consequentemente diminuir o fator de potência.

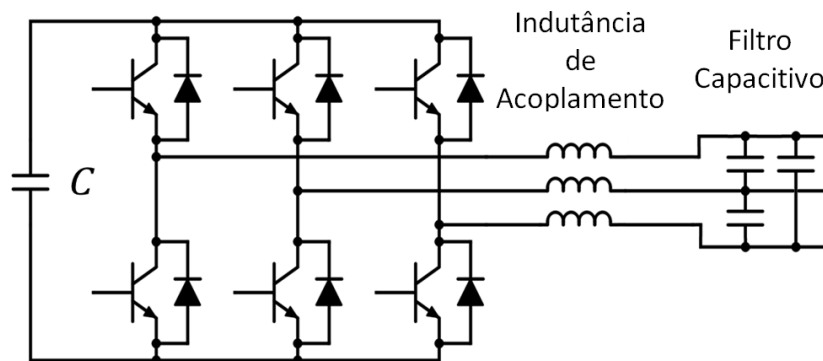
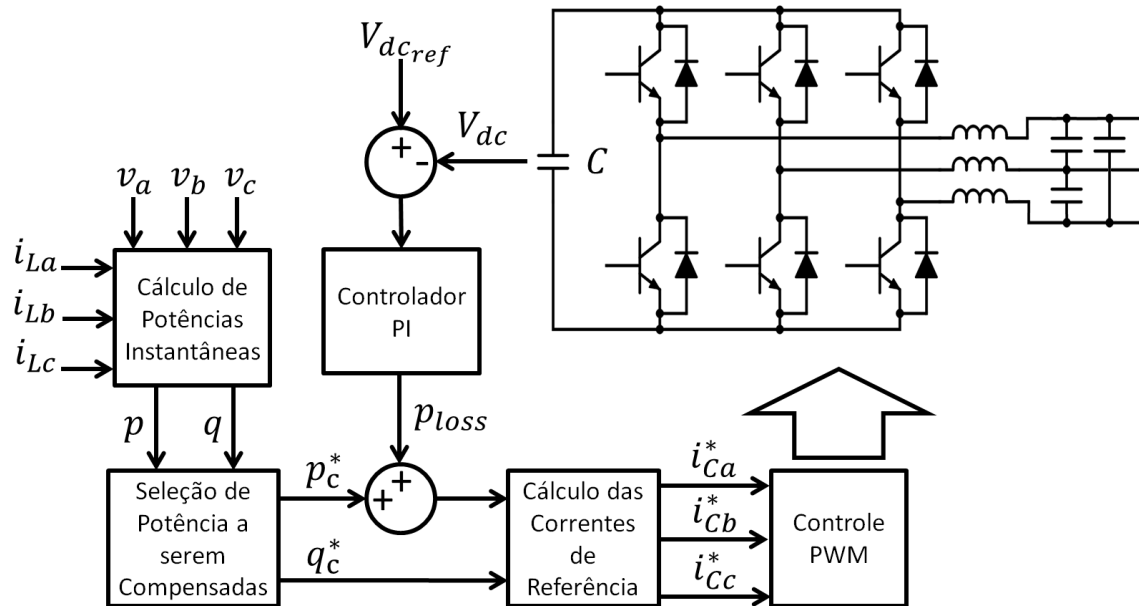


FIGURA 3 – Controle por histerese [51]

### 1.1.1.3 Não Idealidades



falar das perdas e do efeito na queda de tensão do capacitor. Ainda falar controle para manter a tensão fixa

FIGURA 4 – Controle por histerese [44]

## 1.1.2 Controlador

### 1.1.2.1 Tipos de Controle

Em sistemas reais a concepção da filtragem ativa

#### 1.1.2.1.1 Corrente Constante

#### 1.1.2.1.2 PLL

## 1.2 Simulação

### 1.2.1 Modelo do sistema

### 1.2.2 Modelo do Conversor

### 1.2.3 Resultados

## 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] AVERY, C.; BURROW, S.; MELLOR, P. Electrical generation and distribution for the more electric aircraft. In: *Universities Power Engineering Conference, 2007. UPEC 2007. 42nd International*. [S.l.]: IEEE, 2007. p. 1007–1012.
- [8] ZHAO, X.; GUERRERO, J. M.; WU, X. Review of aircraft electric power systems and architectures. In: IEEE. *Energy Conference (ENERGYCON), 2014 IEEE International*. Dubrovnik, 2014. p. 949–953.
- [9] 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.
- [10] 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/harmonicoseminstalacoes-eletricas.pdf>>.
- [11] 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)>.
- [12] ALEXANDER, C. K.; SADIKU, M. N. O. *Fundamentals of of Electric Circuits*. 3. ed. [S.l.]: McGraw-Hill Higher Education, 2005.
- [13] WAGNER, V. et al. Effects of harmonics on equipment. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, v. 8, n. 2, p. 672–680, 1993.
- [14] 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>>.
- [15] KASSICK, E. V. *Harmônicas em Sistemas Industriais de Baixa Tensão*. Florianópolis, Abril 2010. Instituto de Eletrônica de Potência. Universidade Federal de Santa Catarina.
- [16] 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>>.
- [17] MANOUSAKA, E. *DC-DC Buck Converter with Inrush Current Limiter*. Dissertação (Mestrado) — Faculty of Applied Sciences, Lorentzweg, 2013.
- [18] 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>>.
- [19] FITZGERALD, A.; KINGSLEY, C.; UMANS, S. *Máquinas Elétricas - Com Introdução à Eletrônica de Potência*. 6. ed. [S.l.]: McGraw-Hill, 2006.
- [20] 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)>.

- [21] LACANETTE, K. *A Basic Introduction to Filters: Active, Passive, and Switched-Capacitor*. 1991. National Semiconductor. AN779.
- [22] MUSSOI, F. L.; ESPERANÇA, C. *Resposta em frequência: Filtros passivos*. 2. ed. Florianópolis, 2004. Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] 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.
- [28] NAIRUS, J. G. *Three-Phase Boost Active Power Factor Correction for Diode Rectifiers*. Ohio, 1996. AFRL Propulsion Directorate - Wright-Patterson Air Force Base.
- [29] 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.
- [30] POMILIO, J. A.; DECKMANN, S. M. *Condicionamento de Energia Elétrica e Dispositivos FACTS*. Campinas, 2009.
- [31] AFONSO, J. L.; GONÇALVES, H.; PINTO, J. *Power Quality Issues*. [S.l.]: INTECH Open Access Publisher, 2013.



- [32] 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.
- [33] 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.
- [34] 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.
- [35] AKAGI, H. Modern active filters and traditional passive filters. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences, Technical Sciences*, v. 54, n. 3, 2006.
- [36] 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.
- [37] 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.
- [38] 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.
- [39] PAREDES, H. K. M. *Eletrônica de Potência para Geração, Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica: Tópicos em teorias de potência em condições não ideais de operação*. Acessado em 24/06/2016. Disponível em: <<http://www.dsce.fee.unicamp.br/antenor/pdffiles/it744/CAP6.pdf>>.
- [40] STAUDT, V. Fryze-buchholz-depenbrock: A time-domain power theory. In: IEEE. *2008 International School on Nonsinusoidal Currents and Compensation*. [S.l.], 2008. p. 1–12.

- [41] CZARNECKI, L. Budeanu and fryze: Two frameworks for interpreting power properties of circuits with nonsinusoidal voltages and currents. *Electrical Engineering*, Springer, v. 80, n. 6, p. 359–367, 1997.
- [42] BUDEANU, C. Puissances réactives et fictives. institut romain de l'énergie. bucharest. *Romania*, 1927.
- [43] CZARNECKI, L. S. What is wrong with the budeanu concept of reactive and distortion power and why it should be abandoned. *IEEE Transactions on Instrumentation and measurement*, IEEE, v. 1001, n. 3, p. 834–837, 1987.
- [44] AKAGI, H.; WATANABE, E. H.; AREDES, M. *Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2007.
- [45] WATANABE, E. H.; AREDES, M. *Teoria de Potência Ativa e Reativa Instantânea e Aplicações - Filtros Ativos e FACTS* -. UFRJ - Rio de Janeiro: Laboratório de Eletrônica de Potência.
- [46] AKAGI, H.; KANAZAWA, Y.; NABAE, A. Instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy storage components. *IEEE Transactions on industry applications*, IEEE, n. 3, p. 625–630, 1984.
- [47] PENG, F. Z.; LAI, J.-S. Generalized instantaneous reactive power theory for three-phase power systems. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, IEEE, v. 45, n. 1, p. 293–297, 1996.
- [48] AFONSO, J. L.; COUTO, C.; MARTINS, J. S. Active filters with control based on the pq theory. *IEEE Industrial Electronics Society Newsletter*, IEEE, v. 47, n. 3, p. 5–10, 2000.
- [49] HABERBERGER, M.; FUCHS, F. W. Novel protection strategy for current interruptions in igbt current source inverters. In: IEEE. *2004 IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference. PESC 04*. [S.l.], 2004. v. 1, p. 558–564.
- [50] TRZYNADLOWSKI, A. M. *Introduction to Modern Power Electronics*. Third edition. New Jersey: John Wiley & Sons, 2015.

- [51] THEKKEVALAPPIL, S. N. Master Thesis, *Hysteretic Pulse Width Modulation with Internally Generated Carrier for a Boost Dc-dc Converter*. Gainesville: University of Florida, 2005.