

## 0.1 Simulação

### 0.1.1 Modelo do Sistema Elétrico

#### 0.1.1.1 Sistema de Geração

O sistema de geração aplicado na simulação visa representar de maneira suficientemente apropriada uma fonte de tensão comumente encontrada em sistemas elétricos aeronáuticos. Tal bloco é composto por uma máquina síncrona, cuja entrada mecânica é definida por um valor constante representado pela rotação do eixo proveniente do IDG, e os níveis de tensão é determinado por controle de campo de excitação. Esse último é obtido por uma GCU a qual opera juntamente com a máquina síncrona do gerador. Em sistemas elétricos aeronáuticos reais a complexidade do bloco Gerador/GCU é complexa e envolve sistemas complementares para garantir sua confiabilidade. Entretanto, para a proposta de simulação apresentado nesse trabalho, o sistema proposto por [53] mostra-se adequado. Isto deve-se principalmente pela característica da saída do gerador apresentar tensão com certa frequência definida, com amplitude controlada e as não idealidades representadas pelas resistências e indutâncias nas linhas do gerador são modeladas.

Em ambiente Simulink tanto o bloco da máquina síncrona como o bloco de excitação de campo estão presentes. Sendo assim o sistema de geração utilizado no software é mostrado na Figura 58.

Nessa ilustração o subconjunto superior é composto pelos elementos que modelam a GCU. O *Excitation System* é um bloco nativo do Simulink, a qual opera como descrito em [54]. Já os blocos auxiliares da GCU estão presentes para condicionar o sinal adequadamente. A medição de tensão que alimenta a GCU deve ser proveniente do barramento de distribuição, visto que as não idealidades do sistema alterem os níveis de tensão nesse ponto em comparação à saída do gerador.

O subconjunto inferior compõe o Gerador. A máquina síncrona é também um bloco presente no Simulink e em sua saída estão presentes as resistências e indutâncias conectadas em série, cujos valores são expostos na Tabela 1. Ainda existe uma resistência parasita no sistema com o intuito de evitar problemas numéricos na simulação. A presença deste elemento não influencia o sistema que será simulado.

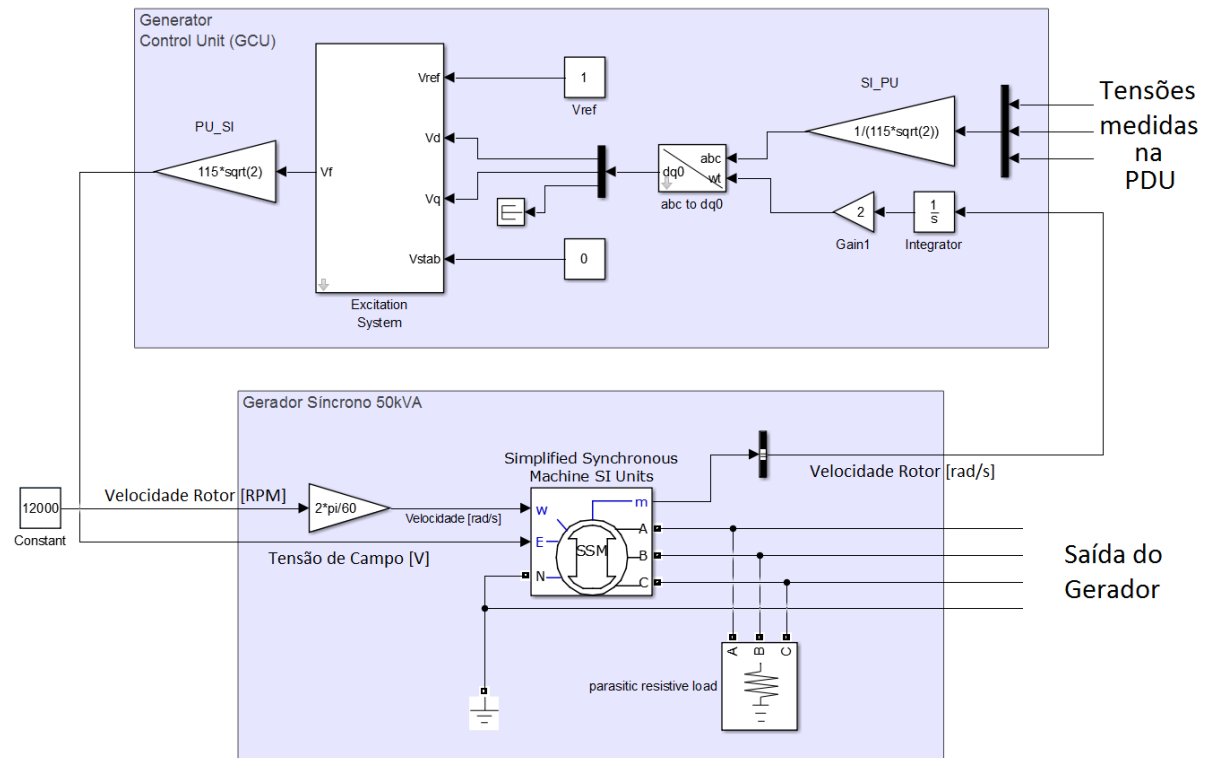


FIGURA 1 – Modelo do sistema de geração

Resistência [ $\Omega$ ]	Indutância [mH]	Impedância (400 Hz) [ $\Omega$ ]
0.0404	0.09204	$0.0404 + j0.213$

TABELA 1 – Impedância interna do Gerador

### 0.1.1.2 Sistema de Distribuição

O sistema de distribuição de uma aeronave é constituído pelos condutores que transferem a energia entre os subsistemas, além dos barramentos de distribuição e equipamentos de proteção do sistema elétrico. Contudo, nesse trabalho as proteções não estão no escopo da simulação, sendo que o modelo proposto será composto apenas pelas linhas de transmissão e um barramento a qual as cargas possam ser conectadas.

O ponto de conexão em comum está localizado na PDU (*Primary Distribution Unit*). Apenas um barramento será considerado e as cargas não lineares compostas pelos EHAs serão conectadas em paralelo a partir dessa unidade. A Figura 59 apresenta o modelo implementado no Simulink para realização da simulação. Aqui pode-se observar as cargas compostas pelos EHAs sendo conectadas a partir da PDU. A alimentação da PDU é realizada diretamente pelo gerador através de uma linha de transmissão trifásica. Nessa unidade ainda existe um sensor de tensão que cede informação ao GCU para o controle de excitação de campo, a qual fornecer ao gerador o controle para que este apresente níveis de tensão adequadas para manter a tensão de fase no PCC sendo 115 V.

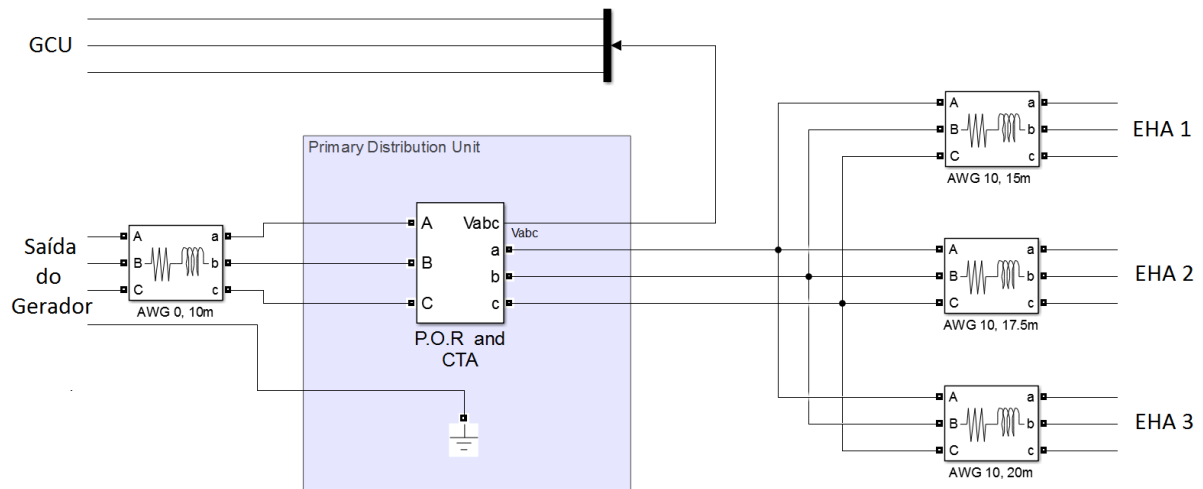


FIGURA 2 – Sistema de Distribuição

As não idealidades dos condutores são modeladas com a inserção de resistências e reatâncias indutivas conectadas em série nas linhas de transmissão do sistema. As capacitâncias entre os condutores e o plano de terra não são considerados devido sua insignificância frente a potência e o tamanho das cablagens. As bitolas dos fios e seus comprimentos estão adequadamente dimensionados para a corrente transmitida e o tamanho comumente encontrado em uma aeronave do porte do modelo, respectivamente. Sendo assim, os valores de impedância de cada seção do sistema trifásico é definido seguindo os parâmetros encontrados em [55]. A Tabela 2 expõe as definições do modelo quanto às cablagens utilizadas e suas impedâncias de cada seção.

Porção	Bitola	Comprimento	Impedância (400 Hz) [ $\Omega$ ]
GEN - PDU	AWG 0	10 m	$0,0047 + j0,0067$
PDU - EHA 1	AWG 10	15 m	$0,0540 + j0,0199$
PDU - EHA 2	AWG 10	17.5 m	$0,0630 + j0,0233$
PDU - EHA 3	AWG 10	20 m	$0,0720 + j0,0266$

TABELA 2 – Impedâncias das linhas de distribuição

### 0.1.1.3 Atuador Eletrohidrostático

O atuador eletrohidrostático é um dispositivo empregado em sistemas de controle de voo na qual atua nas superfícies de comando para manter a aeronavegabilidade de uma aeronave. Os EHAs são compostos por dois principais subsistemas: o subsistema elétrico e o subsistema hidráulico. A porção elétrica é composto por conversores de tensão elétrica de modo a energizar um motor que impulsiona a bomba do subsistema hidráulico. Com a

pressurização das linhas hidráulicas o EHA fica apto a acionar o deslocamento linear do pistão por meio da atuação de sistemas de controle.

A subsistema elétrico tem como principais componentes uma ponte trifásica de diodos, um driver DC-DC, um inversor de frequência e uma máquina síncrona baseada em ímãs permanentes [56]. A Figura 60 mostra o diagrama simplificado do subsistema elétrico. Cabe lembrar que outros componentes secundários são empregados neste subsistema com o intuito de prover controle e proteção ao EHA, e que não são mostrados na Figura 60.

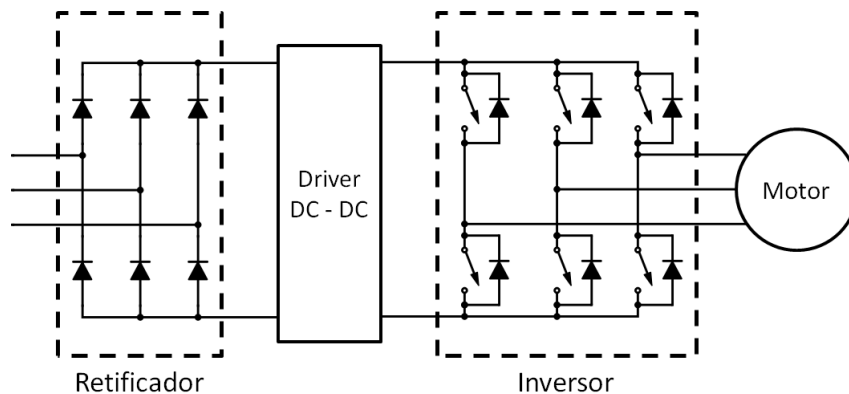


FIGURA 3 – Subsistema elétrico de um EHA

Por apresentar uma ponte de retificadora de diodos na entrada, a operação de um EHA acaba por injetar componentes harmônicas nas formas de onda de corrente, trazendo assim a depreciação da qualidade de energia elétrica de uma aeronave. Como o foco deste trabalho diz respeito à qualidade de energia, tanto a modelagem do subsistema hidráulico juntamente com a operação do motor elétrico não serão modelados. Sendo assim, o foco recai nas formas de onda da corrente que atravessam o retificador de entrada, a qual é o principal componente responsável pela queda na qualidade de energia quando se opera o EHA. A Figura 61 mostra o modelo do EHA empregado no Simulink para realização da simulação. Este modelo é composto por uma ponte retificadora trifásica que interfaceia a conversão AC-DC, como em um EHA, sendo que no lado DC existe uma fonte de corrente controlada. A realização desta fonte tem por objetivo simular o comportamento de consumo de energia proferido pelo restante dos componentes do lado DC do subsistema elétrico. A presença de uma resistência *snubber* em paralelo à fonte de corrente tem como objetivo eliminar incompatibilidades do modelo, visto que isto é uma exigência para compilação do Simulink. Contudo, o valor de  $R$  é escolhido com alto valor de resistência de maneira que este interfere insignificamente ao sistema.

O sinal de controle da fonte de corrente do lado DC é realizado de maneira a providenciar adequadamente o consumo de corrente visto pelo lado AC de um EHA. Tal sinal de controle foi gerado utilizando resultados experimentais de um EHA operando com carga em seu pistão. A metodologia empregada para a obtenção do sinal de controle

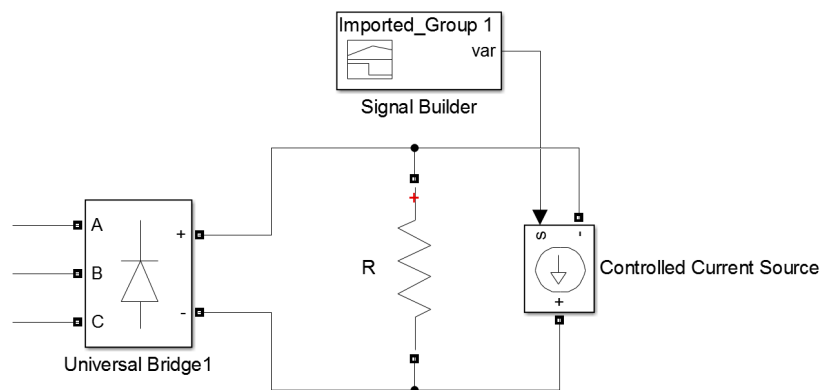


FIGURA 4 – Modelo do EHA empregado no Simulink

da fonte de corrente foi através do cálculo da potência aparente consumida de um EHA real, através de dados experimentais, e inferir essa mesma potência no lado DC do EHA do modelo. Com isso garante-se que a potência aparente apresentada no modelo seja a mesma de um EHA real operando com carga, além de garantir a equivalência das formas de onda da corrente no lado AC. Com essa metodologia empregada o sinal criado para o controle da fonte de corrente do lado DC do modelo é visto na Figura 62.

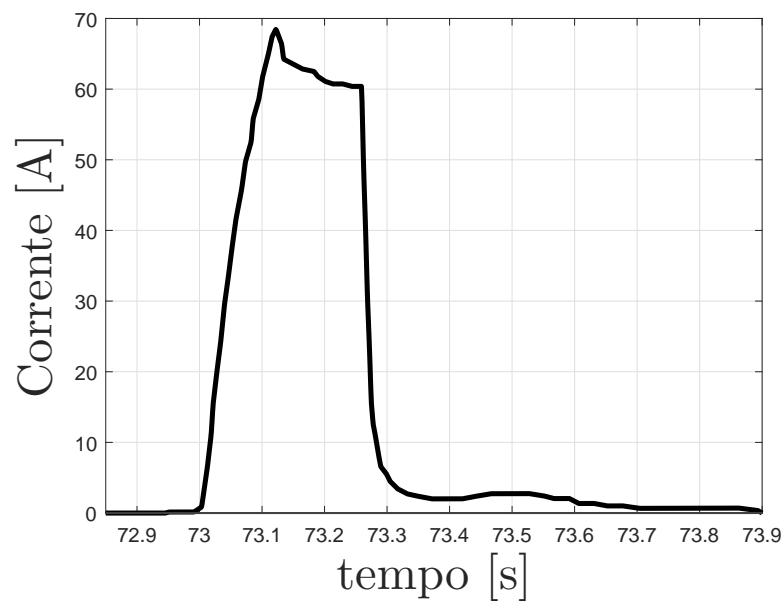


FIGURA 5 – Valores estipulados na fonte de corrente controlada

## **0.1.2 Modelo do Filtro Ativo**

### **0.1.2.1 Controle**

### **0.1.2.2 Compensador**

## **0.1.3 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.
- [52] WATANABE, E. H.; STEPHAN, R. M.; AREDES, M. New concepts of instantaneous active and reactive power in electrical systems with generic loads. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, v. 8, n. 2, p. 697–703, 1993.
- [53] TREMBLAY, L.-A. D. O. *Aircraft Electrical Power Generation and Distribution*. Montreal: Ecole de Technologie Superieure. Acessado em 14/10/2016. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/examples/aircraft-electrical-power-generation-and-distribution.html>>.
- [54] IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies. *IEEE Std 421.5-1992*, August 1992.
- [55] EXNER, D.; SINGER, G. Impedance data for 400-cycle aircraft distribution systems. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, Part II: Applications and Industry*, IEEE, v. 71, n. 6, p. 410–419, 1953.
- [56] DINCA, L. et al. Mathematical modeling and analysis of an electro-hydrostatic servo actuator with brushless dc motor. In: BUZATU, C. (Ed.). *Modern Computer Applications in Science and Education*. Cambridge, MA, USA: WSEAS Press, 2014. p. 157–163.