

ALOCAÇÃO DE FILTROS PASSIVOS A PARTIR DA TEORIA DE ESTRUTURAS PARA O CONDICIONAMENTO DE PROBLEMAS DE QUALIDADE DE ENERGIA EM AERONAVES MAIS ELÉTRICAS

Jonas Roberto Pesente, pesente@itaipu.gov.br¹
Luiz Carlos Sandoval Góes, goes@ita.br²

¹Itaipu Binacional, Av. Tancredo Neves, 6731, CEP 85856-970, Foz do Iguaçu - PR

²Instituto Tecnológico da Aeronáutica, Praça Marechal Eduardo Gomes, 50-CEP 12.228-900, São José dos Campos-SP

Resumo. Este trabalho tem como finalidade estudar a aplicação da teoria de estruturas sobre o condicionamento da energia elétrica de aeronaves mais elétricas a partir da alocação de filtros passivos. Inicialmente é realizada uma revisão dos principais distúrbios eletromagnéticos a que estão sujeitos os sistemas elétricos das aeronaves considerando a natureza de sua origem, seguindo de um levantamento dos critérios de avaliação da qualidade de energia baseada nas normas de certificação vigentes. Posteriormente são realizadas simulações que investigam potenciais problemas de qualidade de energia, que são tratados a partir da concepção e alocação de filtros passivos baseada na teoria de estruturas. Finalmente, são apresentados os principais resultados obtidos a partir de simulações, que indicam a boa performance da metodologia adotada no condicionamento da qualidade de energia elétrica em aeronaves.

Palavras-chave: Aeronaves Mais Elétricas, Teoria de Estruturas, Filtros

1. INTRODUÇÃO

A substituição de componentes pneumáticos e hidráulicos por elementos elétricos em aeronaves, em especial aqueles referentes aos atuadores das superfícies de controle, causa em geral, acréscimos da eficiência, confiabilidade e flexibilidade operativa, e adicionalmente, redução de peso (Truong e Birchenough, 2004).

Não obstante, a inserção de elementos concebidos a partir da eletrônica de potência nos sistemas elétricos aeronáuticos, que proporciona uma maior controlabilidade e adaptabilidade ao ponto operativo destes sistemas, geralmente figura como a principal origem dos problemas de degradação da qualidade de energia elétrica, devido à intensa característica não-linear destes dispositivos (Nascimento, 2007).

Esta categoria de problemas se destaca como aspecto de importância nos sistemas elétricos dos chamados *More Electric Aircraft*, onde a inserção de dispositivos eletro-eletrônicos representa parcelas significativas das cargas destes sistemas.

Neste contexto, se faz necessário conhecer o comportamento de tais elementos, assim como das condições operativas adversas que especificamente estes sistemas elétricos podem ser submetidos, tais como aquelas originadas por descargas atmosféricas e pulsos eletromagnéticos nucleares.

Neste trabalho é apresentada uma revisão dos modelos para simulação de: efeitos indiretos causados pela indução eletromagnética existente devido ao acoplamento entre condutores, avaliação dos harmônicos gerados por conversores e sua propagação pelo sistema elétrico, quedas de tensão causadas por curto-circuitos e efeitos transitórios causados por chaveamento de cargas.

Além disso, é discutida uma metodologia para alocação ótima de elementos condicionadores de energia elétrica, mais especificamente filtros passivos, baseada em uma abordagem relacionada à análise estrutural do sistema elétrico.

Os filtros passivos, por sua vez, são caracterizados de acordo com sua arquitetura e abordados de acordo com suas características elétricas de resposta em frequência.

Por fim, são relatadas as simulações realizadas, que ilustram a amplitude dos resultados que podem ser obtidos a partir da solução dos transitórios eletromagnéticos e reforçam a boa performance da metodologia adotada.

2. PROBLEMAS DE QUALIDADE DE ENERGIA EM AERONAVES MAIS ELÉTRICAS

De maneira simplificada, se pode definir um sistema *More Electric Aircraft* pela composição básica de três elementos principais: atuador eletro-hidráulico (EHA – *Electro-Hydraulic Actuator*), Computador de Controle de Voo (FCC – *Flight Controller Computer*) e circuitos elétricos de potência associados, que substituem os tradicionais servo-controles conectados a um circuito hidráulico.

Os sistemas elétricos de aeronaves mais elétricas civis apresentam um panorama de relativamente baixa potência (entre 50 e 300 kVA), e cargas que utilizam alta tecnologia (receptores/ transmissores de VHF, radares, computadores de bordo, etc.), que invariavelmente se valem da utilização da eletrônica de potência e degradam a energia elétrica dos sistemas a que estão conectadas.

Energia de qualidade é, basicamente, aquela que apresenta perfil similar ao perfil de tensão da fonte.

Segundo Souto *et al.* (1997), do ponto de vista de qualidade de energia, um sistema elétrico ideal tem que disponibilizar energia elétrica com tensões de suprimento equilibradas, senoidais, com amplitude e frequência constantes, sem interrupções, independentemente do equipamento elétrico energizado.

De acordo com Dungan *et al.* (2002), os fenômenos transitórios que afetam a qualidade de energia podem ser classificados em impulsivos e oscilatórios.

Impulsivos são os fenômenos unidirecionais em polaridade, que ainda se caracterizam por ser repentinos e finitos no tempo.

Exemplos de fenômenos impulsivos são os transitórios eletromagnéticos causados por descargas atmosféricas sobre a aeronave, como indução de tensão sobre o cabeamento elétrico da aeronave.

Por sua vez, os fenômenos oscilatórios são aqueles que possuem as duas polaridades, como por exemplo, o chaveamento de elementos capacitivos.

As variações de curta duração como interrupções, quedas ou elevações de tensão, também são considerados problemas de qualidade de energia que podem danificar os equipamentos usuários.

São consideradas interrupções, aquelas quedas de energia a patamares menores que 0,1 p.u.¹, por menos de um minuto.

Quedas consideradas normais para a operação e sem degradação de componentes elétricos contemplam reduções entre 0,9 e 0,1 p.u. e elevações normais aumentos entre 1,1 e 1,8 p.u. para períodos que compreendem entre 0,5 ciclos e 1 minuto.

O invólucro que ilustra estas definições, e determina em quais condições operativas os equipamentos devem suportar transitórios sem que apresentem mau funcionamento, concebida como guia para fabricantes é ilustrada pela Fig. (1) (Castaño e Plata, 2003).

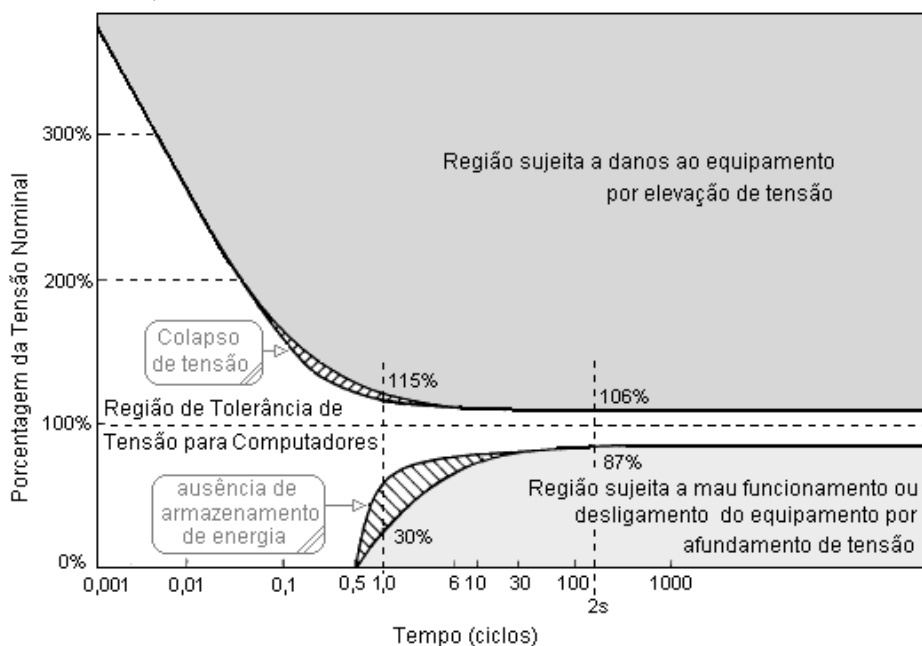


Figura 1 – Invólucro adotado pelo CBEMA.

Este invólucro foi adotado pelo *Computer Business Equipment Manufacturer's Association* (CBEMA), como produto de um esforço coordenado de usuários (especialmente militares) ao qual serve de guia a fabricantes.

Além dos fenômenos transitórios, injeções de correntes que degeneram o perfil de tensão de forma permanente, chamadas correntes harmônicas, também são classificadas como problemas de qualidade de energia.

Harmônicos são tensões ou correntes senoidais de frequências múltiplas a frequência fundamental do sistema, que se sobrepõe aos componentes fundamentais, sendo também interpretadas como batimentos da frequência natural.

Os harmônicos são perceptíveis por distorções na forma de onda senoidal do sistema e são calculados a partir da análise de Fourier através da transformada discreta de Fourier (DFT – *Discrete Fourier Transform*).

¹ Sistema “por unidade”, definido como a razão entre as grandezas reais e as grandezas de referência, geralmente definidas como as grandezas nominais dos equipamentos.

Na Figura 2), um sinal afetado por harmônicos de frequência iguais a 2, 4 e 6 vezes a fundamental, todos com amplitude igual à 10% da amplitude da tensão fundamental é apresentado, ilustrando a distorção causada por estas correntes e tensões sobre a forma de onda original.

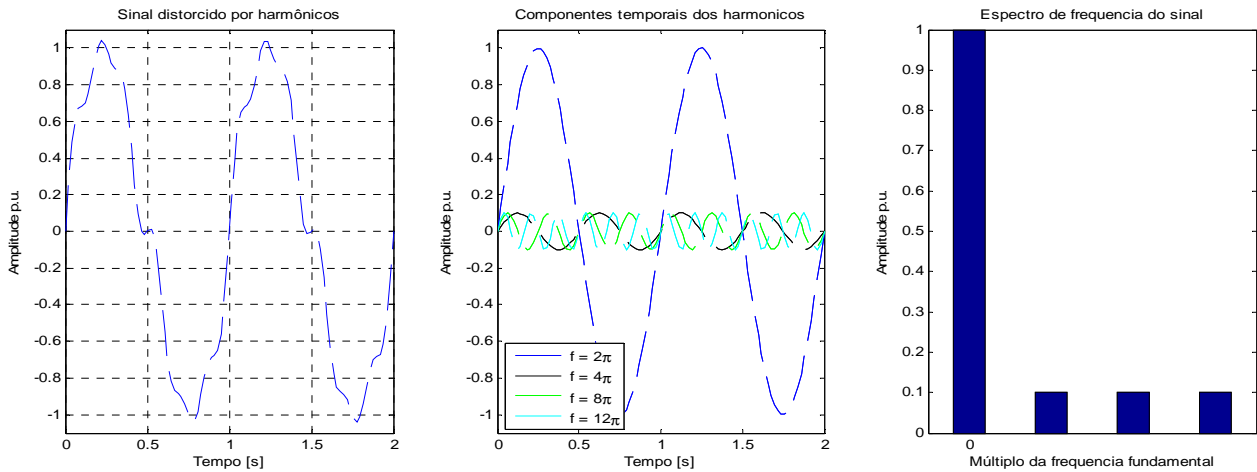


Figura 2 - Sinal sob efeito dos harmônicos (dir. onda, centro componentes, esq. múltiplos da fundamental).

Estas correntes harmônicas fluem da carga em direção a fonte, a despeito do fluxo de potência natural do sistema elétrico, podendo se propagar até outros equipamentos conectados ao mesmo sistema.

O índice utilizado para contabilizar a quantidade de harmônicos presente sobre uma onda senoidal é o Índice de Distorção Harmônica Total (THD – *Total Harmonic Distortion*), apresentada na Eq. 1.

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^k A_n^2}}{A_1} \quad (1)$$

onde “A” é o módulo da componente em Volts e o subscrito o índice o número do harmônico correspondente.

Ao que se refere especificamente às aeronaves, os problemas associados a aspectos ambientais tais como as descargas atmosféricas e os pulsos eletromagnéticos nucleares, e relacionados à compatibilidade eletromagnética, estreitamente ligada aos materiais que compõe a fuselagem são de grande importância eletromagnética (Faranda e Zaninelli, 2001).

As três principais origens dos problemas de interferência elétrica advindos do ambiente são as induções causadas por descargas atmosféricas e pulsos eletromagnéticos nucleares (*Nuclear Electromagnetic Pulse – NEMP*) e as interferências que possuem estar associada à transmissão de dados por ondas de rádio, ilustradas na Fig. (3).

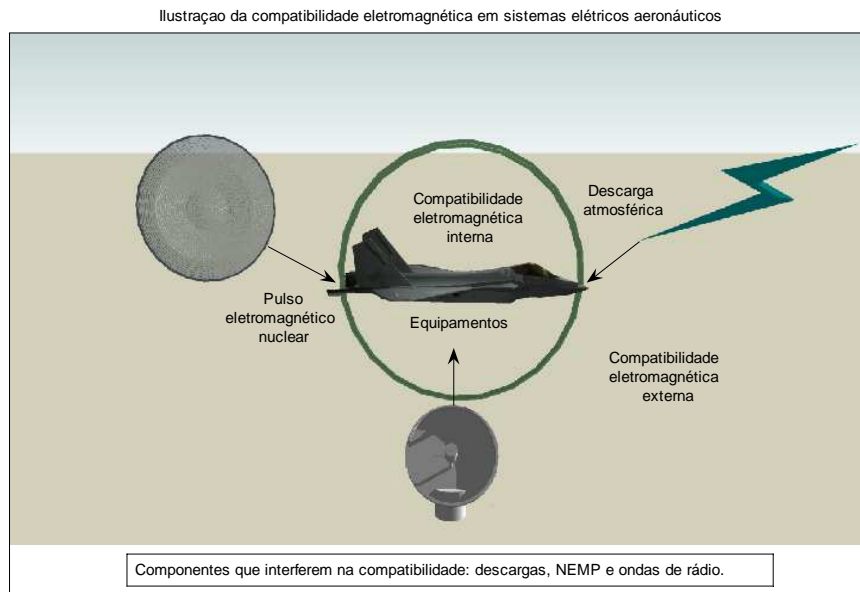


Figura 3 – Problemas Eletromagnéticos a que uma aeronave está sujeita.

A diferente influência das perturbações eletromagnéticas nos materiais é causada principalmente pelas diferenças entre as impedâncias de transferência dos mesmos.

A impedância de transferência de um material é representada pela resposta em frequência da impedância, como representado na Fig. (4), onde também está ilustrada a banda de frequências característica de cada fenômeno.

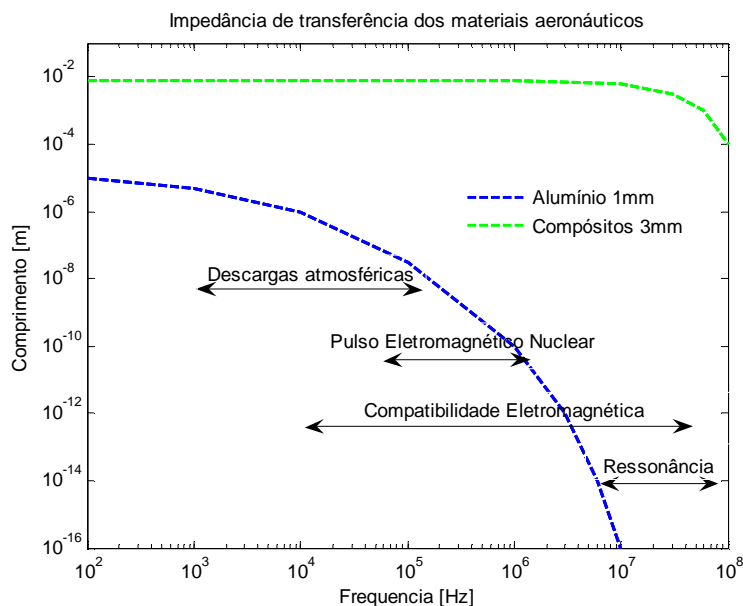


Figura 4 – Impedância de transferência dos diferentes materiais.

As diretrizes que regem a qualidade de energia em aeronaves de grande e médio porte, e que servem como critérios de avaliação desta qualidade são definidas pelas normas FAR 25 (*Federal Aviation Regulations*) e JAR 25 (*Joint Airworthiness Requirements*).

De forma simplificada, estas normas definem quais fenômenos eletromagnéticos caracterizam a degradação da qualidade de energia elétrica e determinam envoltórias de amplitude versus duração das grandezas elétricas que todos os pontos do sistema elétrico em questão deve respeitar, ilustradas na Fig. (5) para amplitudes e variações de frequência nas tensões dos barramentos de um SEA com tensão de distribuição alternada em 115 Vrms.

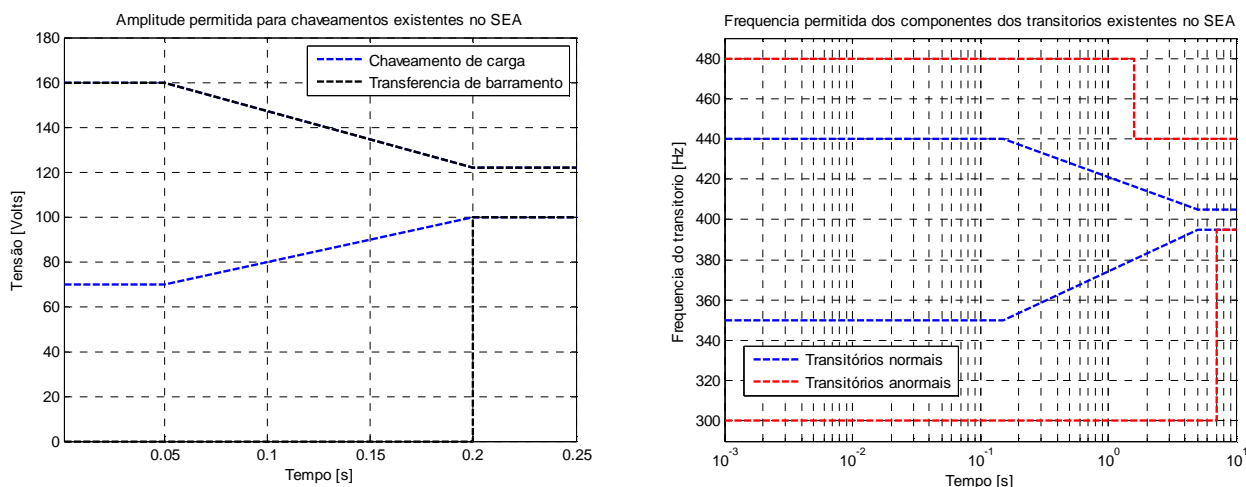


Figura 5 – Envoltórias determinadas por norma para amplitudes e variações de frequência da tensão nos barramentos do SEA, originada por transitórios.

3. FILTROS PASSIVOS

Os filtros passivos são elementos em derivação utilizados em sistemas elétricos de potência na redução da distorção de tensão e na correção do fator de potência.

Fundamentalmente, além de os filtros serem circuitos elétricos que apresentam um caminho de baixa impedância às correntes harmônicas indesejadas, geralmente são projetados para operar capacitivamente na frequência fundamental, auxiliando a manutenção de um perfil de tensão adequado e no suporte de potência reativa.

Os filtros passivos são construídos a partir de elementos resistivos, capacitivos e indutivos, e podem ser definidos através de três parâmetros nominais:

- Potência reativa a frequência fundamental;
- Frequência de sintonia; e

- Fator de qualidade, que é uma medida da “nitidez” do filtro, e pode ser também interpretado como o fator de severidade que o filtro possui na supressão do harmônico indesejado.

Os quatro tipos de filtros abordados nesse trabalho são: filtro sintonizado, filtro duplamente sintonizado, filtro passa-alta e filtro “tipo-C”, ilustrados na Fig. (6), da esquerda para a direita, e que apresentam as impedâncias de transferência das Equações 2 a 5, respectivamente.

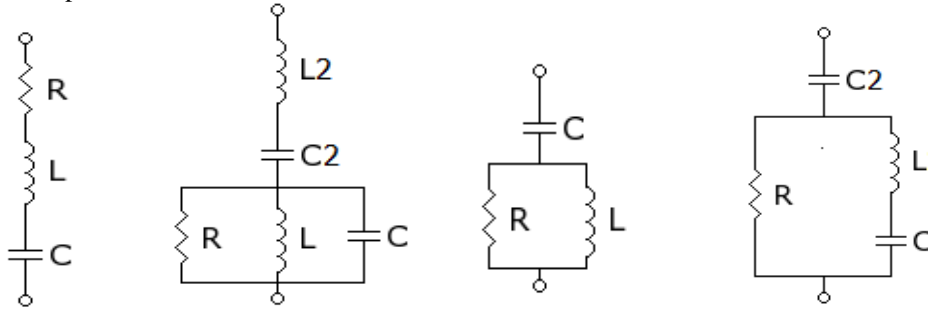


Figura 6 – Arquitetura dos filtros sintonizado, duplamente sintonizado, passa alta e “tipo-C”.

$$Z(j\omega) = R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C} \quad (2)$$

$$Z(j\omega) = j\omega L_2 + \frac{1}{j\omega C_2} + \left(\frac{\frac{R \cdot j\omega L}{R + j\omega L} \cdot \frac{1}{j\omega C}}{\frac{R \cdot j\omega L}{R + j\omega L} + \frac{1}{j\omega C}} \right) \quad (3)$$

$$Z(j\omega) = \frac{R \cdot j\omega L}{R + j\omega L} + \frac{1}{j\omega C} \quad (4)$$

$$Z(j\omega) = \frac{\left(\frac{1}{j\omega C} + j\omega L \right) R}{R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C}} + \frac{1}{j\omega C_2} \quad (5)$$

4. TEORIA DE ESTRUTURAS APLICADA À FILTRAGEM DE HARMÔNICOS

A teoria de estruturas foi inicialmente aplicada a redes elétricas em 1964, em um estudo apresentado por Laughton e El-Iskandarani (1978), e trata basicamente de explorar as características inerentes à topologia e disposição dos elementos em um sistema elétrico de maneira a melhorar parâmetros tais como perfil de tensão e capacidade máxima de transferência de potência.

De uma maneira geral, essa teoria rearranja a matriz admitância de rede em termos de seus autovalores e autovetores.

Essa formulação é bastante conveniente, uma vez que os autovetores podem representar os modos naturais de oscilação da rede, enquanto os autovetores auxiliam a determinação dos fatores de participação de cada elemento da topologia da rede.

A matriz admitância nodal ou de rede representa a disposição dos elementos do circuito, assim como suas magnitudes, e é fundamentada na relação entre as tensões e correntes de uma rede elétrica, tal como apresentado na Eq. 6.

$$[I] = [Y] * [V] \quad (6)$$

onde [I] representa o vetor das injeções de corrente em cada nó da rede, [V] o vetor das tensões nodais e [Y] a matriz admitância.

Os autovalores λ_i e autovetores \vec{v}_i , da matriz [Y], por sua vez, são escalares e vetores, respectivamente, que satisfazem as seguintes relações:

$$\begin{aligned} [Y] \cdot \vec{v}_1 &= \lambda_1 \cdot \vec{v}_1 \\ [Y] \cdot \vec{v}_2 &= \lambda_2 \cdot \vec{v}_2 \\ &\vdots = \vdots \\ [Y] \cdot \vec{v}_n &= \lambda_n \cdot \vec{v}_n \end{aligned} \quad (7)$$

A representação linear tradicional utilizada nos estudos de curto-circuitos e penetração harmônica é dada pela Eq. 8:

$$[V] = [Z] \cdot [I] \quad (8)$$

Uma vez definida a matriz admitância nodal em termos de seus autovalores e autovetores, sua correspondente matriz impedância de rede pode então ser reescrita como na Eq. 9.

$$[Z] = [M] \cdot \text{diag} \left(\frac{1}{\lambda} \right) \cdot [M]^{-1} \quad (9)$$

e substituindo-se a Eq. 9 na Eq. 8, obtém-se:

$$[V] = \sum_{n=1}^N \frac{1}{\lambda} \cdot [S]_n^T \cdot [I] \quad (10)$$

onde N é número de barramentos do sistema elétrico sobre análise, n é o enésimo barramento do sistema elétrico, e $[S]_n$ é definida como a matriz sensibilidade de rede.

Isto posto, percebe-se que cada elemento da matriz sensibilidade corresponde ao coeficiente de sensibilidade relacionado às modificações do enésimo autovalor em relação aos elementos da matriz admitância de rede.

Sendo assim, pela observação da Equação 4.11, nota-se que cada elemento da matriz S_n corresponde ao coeficiente de sensibilidade entre o enésimo autovalor e o respectivo elemento da matriz admitância.

Logo, quanto maior for o elemento S_{nn} da matriz sensibilidade, maior será a sensibilidade do enésimo autovalor ao elemento y_{nn} da matriz admitância.

É possível provar que o autovalor de menor módulo corresponde ao autovetor com menores variações percentuais entre seus elementos, ou seja, modificações nos elementos conectados ao barramento associado ao autovetor correspondem a uma distribuição mais uniforme das modificações das grandezas elétricas nos demais nós do sistema elétrico.

Adicionalmente, este barramento corresponde a maior variação percentual da tensão harmônica antes e após a alocação do elemento condicionador de energia neste ponto, correspondendo ao ponto de máxima capacidade de drenagem das excitações indesejadas no sistema em questão.

5. EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS

Inicialmente foram simulados os efeitos indiretos por induções causadas por descarga atmosférica ou fuga de corrente para o neutro, harmônicos gerados pelos conversores e qualidade de energia nas cargas alimentadas por eles, propagação dos harmônicos na rede, transitórios eletromagnéticos causados por chaveamentos de cargas, quedas de tensão causadas por partida de motores e por distúrbios na rede.

Durante as simulações, foi adotado um modelo hipotético de sistema elétrico que possui os barramentos principais de distribuição em corrente alternada, com frequência nominal de 400 Hz e tensão nominal de 115 Vrms, tal como proposto em Faranda e Zaninelli (2001), e configurações similares a aeronaves comerciais com capacidade de aproximadamente 130 passageiros.

Neste estudo, a avaliação da propagação de distúrbios, da geração de harmônicos nos retificadores e dos harmônicos existentes nas cargas é realizada a partir de simulações utilizando o software ATP (*Alternative Transient Program*).

Posteriormente a caracterização dos prováveis problemas de qualidade de energia existentes no sistema simulado, procurou-se condicionar os àqueles distúrbios que violaram os critérios de qualidade definidos pelas normas, a partir da concepção de filtros passivos e de sua alocação de acordo com a metodologia baseada na teoria de redes, utilizando o software MATLAB, onde foram também implementadas as rotinas de fluxo de potência para análise da influência da compensação sobre o perfil de tensão do sistema.

Observou-se, durante as simulações, que os distúrbios gerados pela tomada ou rejeição de cargas não infringem os invólucros determinados pelas normas, e que, aqueles originados por curto-circuitos podem ser condicionados de modo a atender os critérios impostos pelas normas através do ajuste de proteções para atuação em tempos inferiores a 200 ms.

Por outro lado, os retificadores injetaram correntes harmônicas que afetaram as tensões nos barramentos do sistema de maneira proibitiva, tanto nos terminais de corrente alternada quanto nos terminais de corrente contínua dos dispositivos.

Verificou-se que, o retificador de 12 pulsos apresentou uma ondulação de 7,5% nos terminais de corrente contínua, como ilustrado na Fig. (7), com principais componentes de frequência múltiplos de 6, 12, 18 e 24 vezes a fundamental, e, um índice de distorção harmônica total igual a 18,189% nos terminais de corrente alternada, com componentes principais múltiplos de 5, 7, 11 e 13 vezes a frequência fundamental (Fig. (8)).

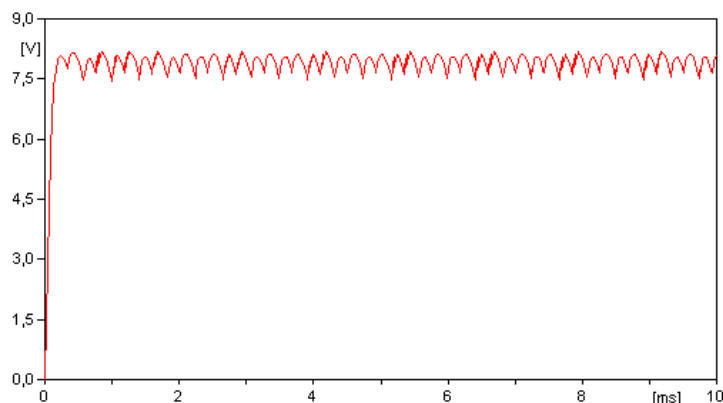


Figura 7 – Ondulação na tensão dos terminais de corrente contínua do retificador de 12 pulsos.

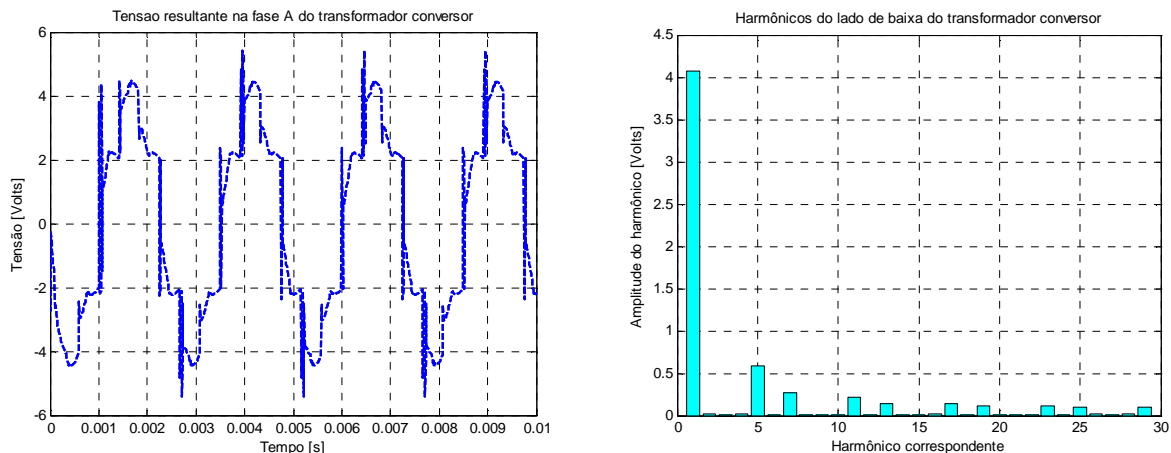


Figura 8 – Distorção nos terminais dos transformadores conversores do retificador (direita) e seus componentes harmônicos principais (esquerda).

De maneira análoga, o retificador de 6 pulsos apresentou distorção nos terminais de corrente contínua igual a 17% e índice de distorção harmônica total de 25,138%, e os mesmos componentes principais de frequência.

A partir da simulação da injeção destes harmônicos nos pontos de conexão dos conversores, utilizando fontes harmônicas, pode-se perceber que o sistema modelado apresenta uma baixa atenuação destas correntes, como pode ser observado na forma de onda da tensão da carga eletricamente mais distante do ponto de injeção, apresentada na Fig. (9), e que possui um índice de distorção harmônica total igual a 13,27%.

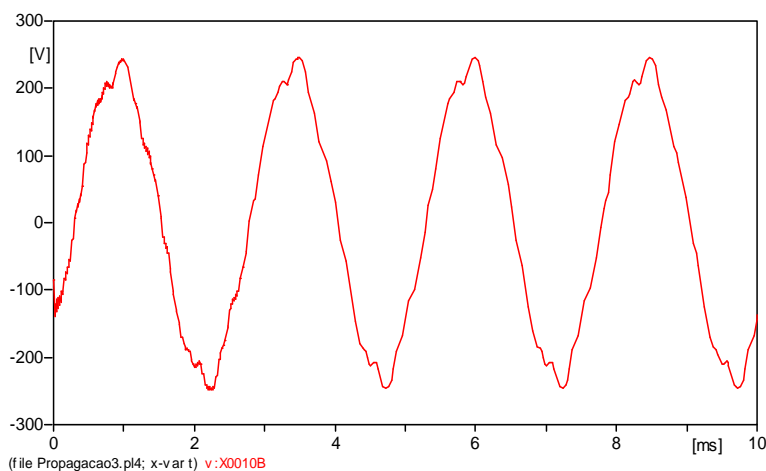


Figura 9 – Forma de onda da tensão no nó eletricamente mais distante da injeção de correntes harmônicas.

Para supressão destas excitações não desejadas foi concebido um banco de filtros sintonizados que tem seus parâmetros definidos pela Tabela 1.

Tabela 1 – Filtro sintonizados (parâmetros por fase, bancos trifásicos).

Harmônico	L [mH]	C [µF]	R[Ohm]	f [Hz]	Q	Var (400 Hz)
5 (2000 Hz)	3,2	2	0.0001	1989	40	124,08
7 (2800 Hz)	3,2	1	1	2814	56,56	122,13
11 (4400 Hz)	1	1,3	1	4400	31,62	371,25
13 (5200 Hz)	1	1	1	5033	31,62	365,7

Estes filtros são conectados em derivação, e são compostos por três circuitos monofásicos conectados em estrela, com neutro aterrado de modo franco, sendo um filtro para cada harmônico que se desejou mitigar.

A potência reativa trifásica total do banco de filtros corresponde à somatória de reativos de cada filtro.

As respostas em frequência da composição dos filtros em um banco de filtros em paralelo para os quatro harmônicos de interesse, é apresentada na Fig. (10).

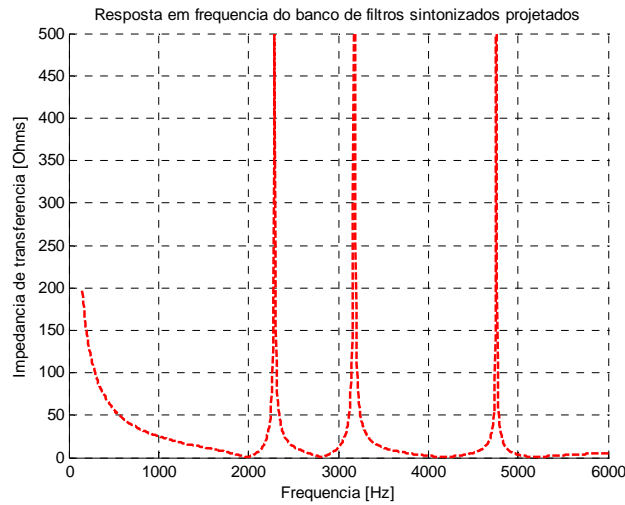


Figura 10 – Resposta em frequência do banco de filtros sintonizados.

Considerando-se o problema de alocação do filtro sintonizado de quinto harmônico apresentado na Tabela 1, aplicou-se a teoria de redes a partir da matriz admitância para o harmônico especificado, de onde foram obtidos os respectivos autovalores e autovetores.

Estas grandezas são invariavelmente números complexos, devido à característica da matriz admitância, porém sua utilização na aplicação da teoria de redes é realizada considerando-os em módulo.

Isso se justifica devido ao aspecto que o parâmetro a ser avaliado é a sensibilidade dos barramentos em relação às modificações topológicas da rede.

A Figura 11) apresenta os módulos dos autovalores harmônico abordado.

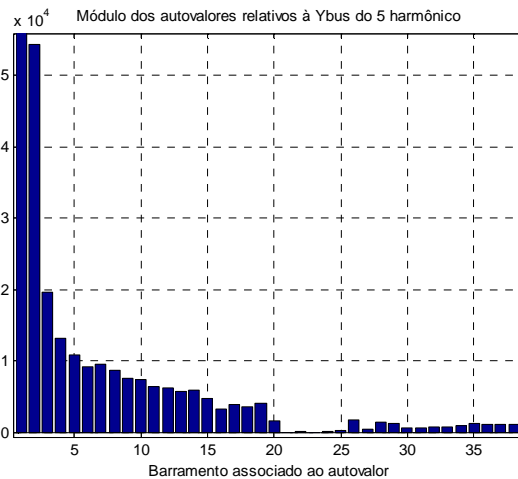


Figura 11 – Módulos dos autovalores da matriz admitância do sistema para o quinto harmônico.

Esta Figura ilustra que aquele relacionado ao barramento de número 21 é o que possui menor módulo, e a maior sensibilidade à alocação de um elemento passivo.

Sendo assim, no caso do 5 harmônico, o barramento 21, de acordo com as definições descritas, é aquele que fornece o caminho de menor impedância para a fuga desta corrente no sistema considerado.

Essa afirmação é ilustrada pela comparação da variação da tensão de quinto harmônico em cada barramento antes e após a alocação do filtro projetado para o quinto harmônico neste barramento, ilustrada na Fig. (12).

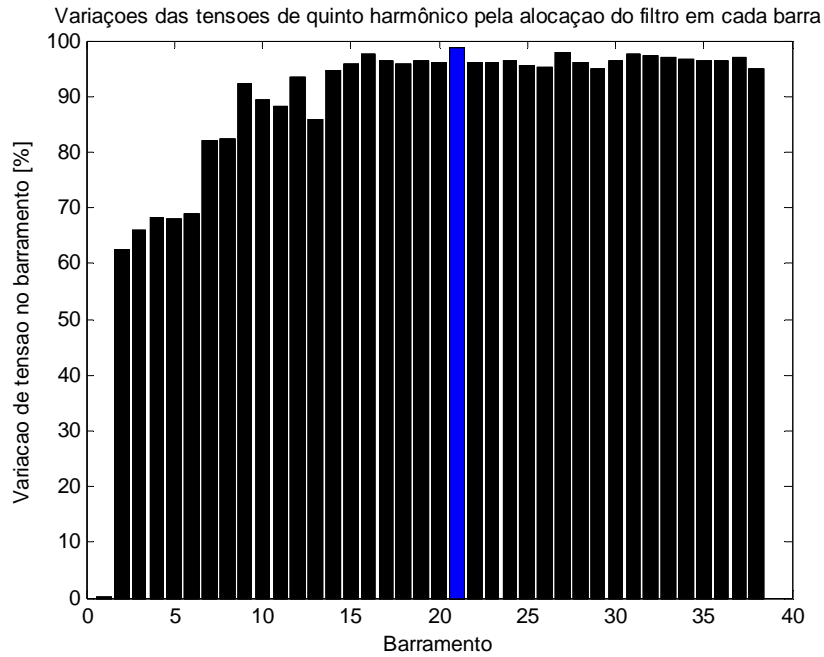


Figura 12 – Variações percentuais de tensão de 5º harmônico nos barramentos do sistema pela alocação do filtro em cada barramento.

Nesta Figura, a coluna colorida em azul salienta a variação da tensão de quinto harmônico no 21º barramento do sistema, reduzida em 98,63%, a maior dentre as demais.

De maneira análoga, a aplicação da teoria de redes aos demais harmônicos indicaram o mesmo barramento como candidato à alocação ótima dos filtros passivos para as respectivas frequências harmônicas.

Assim, os filtros propostos no subitem foram alocados ao barramento 21, de onde obteve-se uma redução de THD de 13,27 %, para 2,17 % no barramento mais afetado anteriormente à alocação dos filtros, ou seja, reduziu a distorção harmônica total em 83,65% do seu valor inicial.

Na Figura 13) é apresentada a forma final da onda de tensão após a compensação, assim como a amplitude final dos harmônicos nesta barra.

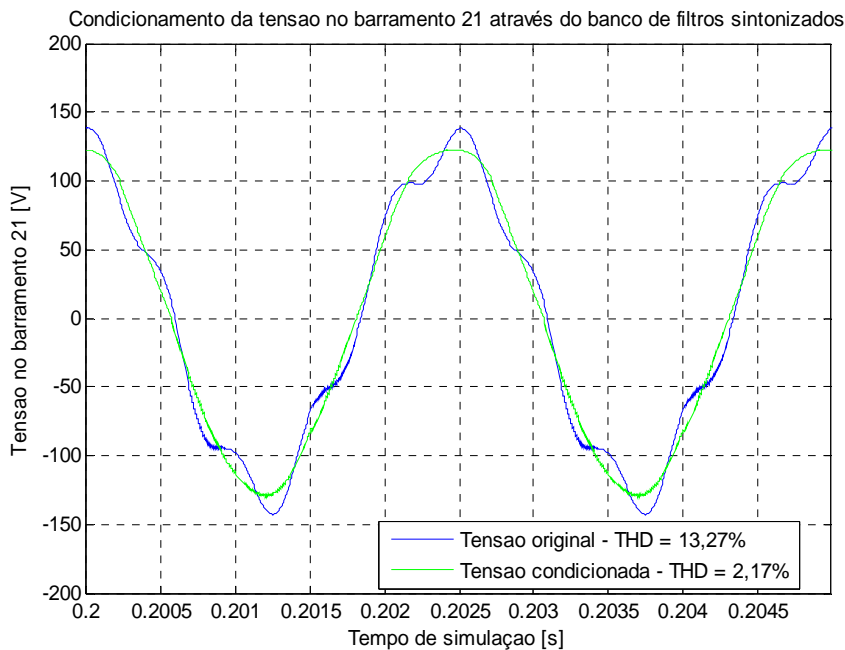


Figura 13 – Comparação entre a tensão distorcida e a tensão condicionada sobre a carga.

Comparativamente a análise realizada para o banco de filtros sintonizados, foram projetados os demais tipos de filtros apresentados no capítulo anterior. Alocando-se cada banco de filtros ao barramento 21, também determinado como o mais indicado para alocação dos filtros, a redução do THD comparativamente àquela obtida pelo banco de filtros sintonizados, foram de 57,95%, 36,41% e 58,25% para os filtros duplamente sintonizado, passa-alta e “tipo-C”, respectivamente.

6. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi apresentada uma análise da qualidade de energia da carga e de conversores de corrente alternada em corrente contínua, a partir da simulação da operação de elementos não-lineares e prováveis distúrbios utilizando um modelo de sistema elétrico aeronáutico baseado na literatura.

Esta análise teve como finalidade caracterizar e estimar a intensidade dos problemas de qualidade de energia que porventura possam ocorrer em sistemas elétricos de aeronaves, assim como compará-los às normas vigentes.

Também foi apresentada uma metodologia de condicionamento da qualidade de energia que consta na alocação de filtros passivos fundamentada na topologia da rede e nos parâmetros dos seus elementos constituintes.

Estes filtros são caracterizados pelas respostas em frequências de suas impedâncias e pela quantidade de elementos e modo de conexão, sendo considerados os filtros sintonizado, duplamente sintonizado, passa-alta e “tipo-C”.

Verificou-se das simulações, que as descargas atmosféricas, o acoplamento eletromagnético entre condutores e as tomadas e rejeições de carga não infringem as normas postuladas. Adicionalmente, os curtos-circuitos podem apresentar correntes elevadas, porém se os circuitos dispõem de dispositivos de proteção com capacidade de interrupção em tempos inferiores a 200 ms, as normas são atendidas e espera-se que a integridade dos circuitos seja mantida.

Por outro lado, as correntes e tensões harmônicas geradas pelos conversores apresentadas nas simulações associam-se a valores impeditivos, tanto sobre os transformadores-conversores quanto nas cargas quando injetados na rede elétrica, que possui baixa capacidade de atenuação de harmônicos.

Os harmônicos críticos e que justificaram a concepção de filtros foram os de frequências múltiplas de 5, 7, 11 e 13 vezes a fundamental (2000, 2800, 4400 e 5200 Hz), correspondente à índices de distorção harmônica total iguais a 18,189% e 25,138 % para os conversores de 12 e 6 pulsos, respectivamente.

A alocação destes filtros mostrou que uma mesma barra, próxima ao circuito principal dos motores síncronos modelados para representar atuadores elétricos, corresponde ao melhor posicionamento para filtragem de todas as harmônicas simultaneamente.

Por fim, verificou-se que o banco composto por filtros sintonizados se apresentou como a solução mais eficiente no condicionamento da energia elétrica da aeronave, reduzindo a distorção harmônica total em 83,65% em comparação aos bancos de filtros duplamente sintonizados (redução de 57,95%), passa alta (36,41%) e “tipo-C” (58,25%).

7. REFERÊNCIAS

- Braidotti, V., 1999. “The quality of energy in electrical systems on aircraft”. Tese (Mestrado) - Dipartimento di Elettrotecnica, Politecnico di Milano, Milano.
- Carpinelli, G., Russo, A., and Verde, P., 1998. “Inherent Structure Theory of networks and power system harmonics”. IEE proceedings Generation, Transmission and Distribution. Vol. 145, No 2.
- Faranda, R., Zaninelli, D., and Zanini, A., 2001. “Electric Power Quality on Aircraft: Analysis and Propagation of Disturbances”. In: IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Canadá, pp. 222-227.
- He, T.; Kuhlman, B., 2005. “Investigation of Lightning Induced Transients on Power Interfaces for Aircraft Avionics Systems”. In: IEEE Transactions on Aerospace and Electronics Systems.
- Laughton, M. A., El-Iskandarani., 1978. “On the Inherent Network Structure”. In: Proceedings of 6th PSCC, Darmstad, pp. 185-186.
- Macedo, J. R. e Resende, J. W., 2001. “Alocação ótima de filtros, capacitores e cargas no contexto da qualidade da energia elétrica”. IV Seminário Brasileiro sobre a Qualidade de Energia Elétrica, Porto Alegre.
- Reiquam, E. T., 1982. “Power System Design for an All-Electric Airplane. Journal of Energy of American Institute of Aeronautics and Astronautics, Vol. 6, No 1.

8. NOTA DE RESPONSABILIDADE AUTORMAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo material incluído neste artigo.

MORE ELECTRIC AIRCRAFT POWER QUALITY PROBLEMS CONDITIONING BY PASSIVE FILTERS ALLOCATION BASED ON STRUCTURES THEORY

***Abstract.** This paper aims to study the application of structures theory on the more electric aircraft power conditioning through passive filter allocation. Initially, a review of the main electromagnetic disturbances which aircraft electrical system are subject is presented, considering the nature of its origin, according to a survey evaluation criteria for power quality based on the existing certification standards. Later simulations are performed to investigate the potential power quality problems, which are conditioned from the design and allocation of passive filters based on the structure theory. Finally, we present the main results obtained from simulations, which indicate the good performance of the adopted methodology in conditioning of the aircraft electrical power.*

Keywords: More Electric Aircraft, Theory of Structures, Filters