

SISTEMA DE REPRODUÇÃO VIBRO-ACÚSTICA PARA SIMULADOR DE CABINE DE AERONAVE

MASIERO, Bruno^{1,2}; CHAMON, Luiz²; BISTAFA, Sylvio²; YANAGIHARA, Jurandir².

(1) Universidade Estadual de Campinas,
Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação, Departamento de Comunicações,
masiero@unicamp.br;

(2) Universidade de São Paulo,
Centro de Engenharia de Conforto da Escola Politécnica,
jiy@usp.br.

RESUMO

É sabido que diversos parâmetros influenciam a sensação de conforto quando estamos viajando em um avião como, por exemplo, a temperatura, a umidade, a vibração e o ruído. Como estudar a percepção de conforto de passageiros durante voos reais seria uma tarefa complicada e cara, é mais comum que este tipo de teste seja realizado usando-se simuladores de cabine. Estes simuladores, também conhecidos por mockup, podem reproduzir um voo com diferentes graus de realismo ao mesmo tempo que permitem o controle de um ou mais parâmetros ambientais, dependendo de seus requisitos de projeto. Este trabalho descreve o sistema de reprodução vibro-acústica de um mockup construído Centro de Engenharia de Conforto da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Primeiramente será apresentado o projeto do sistema vibroacústico, descrevendo os transdutores e controladores utilizados e, em seguida, as estratégias utilizadas para a equalização e o controle do nível sonoro do sistema, de forma a garantir a reprodução adequada de sinais vibroacústicos que podem ser tanto extraídos de voos reais como também gerados sinteticamente.

Palavras-chave: reprodução vibroacústica, sistema MIMO, equalização.

ABSTRACT

It is known that several environmental parameters influence the sensation of comfort when we are flying in an airplane such as temperature, humidity, vibration, and noise. As studying the perception of passenger comfort during real flights would be a complicated and expensive task, it is more common that these type of tests are carried out using aircraft cabin simulators, or mockups, which can reproduce a flight with different degrees of realism while allowing the control of one or more environmental parameters depending on their design requirements. In this manuscript, we will describe the vibroacoustic reproduction system installed in a mockup built at the Center for Comfort Engineering at the Polytechnic School of the University of São Paulo. We will first discuss the system design, describing the used transducers and controllers, and then discuss the strategies used to equalize and control the sound level of the system in order to guarantee adequate reproduction of vibroacoustic signals, which can be extracted from real flight recordings or be generated synthetically.

Keywords: vibroacoustic reproduction, MIMO system, equalization.

1. INTRODUÇÃO

Os aviões tornaram-se um meio fundamental de transporte devido à sua eficiência energética, velocidade e segurança. De acordo com o último Anuário Estatístico publicado pela Agência Nacional de Aviação Civil em 2015 houve um aumento constante e superior a 100% do número de passageiros-quilômetros pagos transportados nos últimos 10 anos (“Anuário do Transporte Aéreo”, 2015). O mesmo aumento também é observado em outras partes do mundo e este fato voltou a atenção das fabricantes de aeronaves para o conforto das cabines (MUHM et al., 2007), para as quais o ruído desempenha um papel fundamental (WEBER et al., 2004). No entanto, as dificuldades e os custos associados ao estudo do conforto nos voos reais tornaram essencial o desenvolvimento de um simulador, ou mockup, capaz de reproduzir e controlar o ambiente da cabine de um avião.

O processo de recriar a impressão sonora de uma fonte em um determinado espaço é chamado de auralização. Este procedimento envolve o uso de modelos matemáticos, medidas e simulações para reproduzir com precisão o som de uma sala em outra, garantindo a mesma sensação auditiva ao ouvinte como se estivesse no espaço original (VORLÄNDER, 2007).

Este artigo descreve a segunda etapa do projeto de um sistema vibroacústico—a primeira etapa é descrita em (CHAMON et al., 2011)—para simulação de ruído e vibração de aeronaves. Primeiramente o manuscrito descreve como o sistema foi projetado e construído. Em seguida discute-se sobre a estratégia de equalização utilizada para controlar a distribuição sonora tanto no espaço quanto na frequência. Finalmente, descreve-se os testes realizados no mockup para a avaliação do conforto de passageiros.

2. SIMULADOR DE CABINE

Um simulador foi construído pelo Centro de Engenharia de Conforto na Universidade de São Paulo. Este simulador é composto pela seção de uma cabine composta de 30 assentos de classe econômica de um avião comercial de passageiros (**Figura 1a**) posicionada dentro de um vaso metálico hermeticamente fechado (**Figura 1b**). O vaso está ligado a uma bomba de vácuo responsável por controlar a pressão estática dentro do vaso, o que permite reproduzir a pressão de cabine encontrada durante a fase de cruzeiro das aeronaves (5000 a 8000 pés). Este sistema também permite controlar a temperatura e a umidade do ar dentro e fora da cabine. Além disto, existe um sistema de ar condicionado que replica o sistema existente dentro de aeronaves para o controle local da temperatura e, conseqüentemente, também recria o ruído ambiente causado



(a)



(b)

Figura 1: (a) Foto do interior da cabine do mockup; e (b) foto de sua instalação dentro do vaso de pressão.

Fonte: Embraer/Divulgação.

por este equipamento. O mockup também conta com um sistema de iluminação a LED similar ao encontrado nas aeronaves mais modernas e que permite a reprodução de um amplo espectro de cor. Todos estes aspectos citados acima, em conjunto com o sistema vibroacústico que será detalhado a seguir, proporcionam ao usuário uma experiência totalmente imersiva de voo.

2.1 Sistema vibratório

O sistema de reprodução vibratório é responsável por reproduzir a vibração de uma cabine de aeronave com base em gravações feitas durante voos reais ou com sinais gerados sinteticamente. Mas, nesta etapa do projeto, a vibração foi usada apenas como um componente de incremento do realismo da simulação. Por esta razão, os atuadores mecânicos foram projetados para atuar em somente uma direção, alinhada com o eixo z que é o eixo perpendicular ao piso do avião. Para tanto, foram instalados 16 atuadores (ButtKickers LFE Concert) sob os assoalhos em que os assentos estão fixados. Estes atuadores foram conectados dois a dois em série (para aumentar a impedância nominal de 2Ω para 4Ω) e cada um destes grupos foi ligado a um canal independente de um amplificador (Staner DPA2000).

Para monitoramento da vibração foram usados dois acelerômetros uniaxiais (PCB Electronics) ligados a um condicionador de sinais. Para posicioná-los, mediu-se o nível de vibração resultante quando todos os atuadores eram excitados com ruído branco. Os acelerômetros foram posicionados, respectivamente, na posição de maior e de menor nível de vibração, apenas para controlar que os níveis de ruídos a que os usuários estavam expostos era inferior aos níveis diários máximo permitidos.

2.2 Sistema acústico

O sistema de reprodução acústica é responsável por reproduzir o ruído dentro do mockup com base em gravações feitas durante voos reais ou com ruídos sintéticos. Ele é composto por seis alto-falantes de 12" (Keybass K 12-169 ST 3) instalados em caixas acústicas tipo *bass reflex* e posicionados entre o vaso de pressão e o assoalho da cabine e quinze alto-falantes quadriaxiais de 6"x9" (Selenium 69QD2TA), instalados sob cada par de assentos. Cada transdutor é alimentado por um canal independente do amplificador, permitindo o controle total sobre suas contribuições individuais para o campo sonoro. Os amplificadores (Staner DPA2000 para os subwoofers e Nashville NA2200 para os quadriaxiais) ficam armazenados fora do vaso de pressão e são conectados aos alto-falantes por cabos de sinal tipo bifilar.

O monitoramento do ruído reproduzido é feito por quinze microfones de resposta plana e omnidirecionais (Behringer ECM8000) colocados entre cada par de assentos (veja **Figura 2**). Estes microfones são conectados a pré-amplificadores (RME QuadMic) posicionados dentro da cabine e responsáveis pela polarização e condicionamento dos sinais dos microfones.

2.3 Sistema de conversão e controle

Tanto o sistema de acústico como o de vibração são controlados pelo mesmo sistema de conversão e controle. Este sistema fica localizado na sala de controle, externa ao vaso de pressão, e é conectado aos sistemas internos por cabos independentes para cada canal.

O sistema é composto por seis conversores AD/DA (RME ADI 8 DS) todos conectados a duas placas PCI (HDSP 9652) instaladas em um único computador com sistema operacional Windows 7. Todo o controle foi feito pelo software Matlab com o pacote ITA-Toolbox (DIETRICH

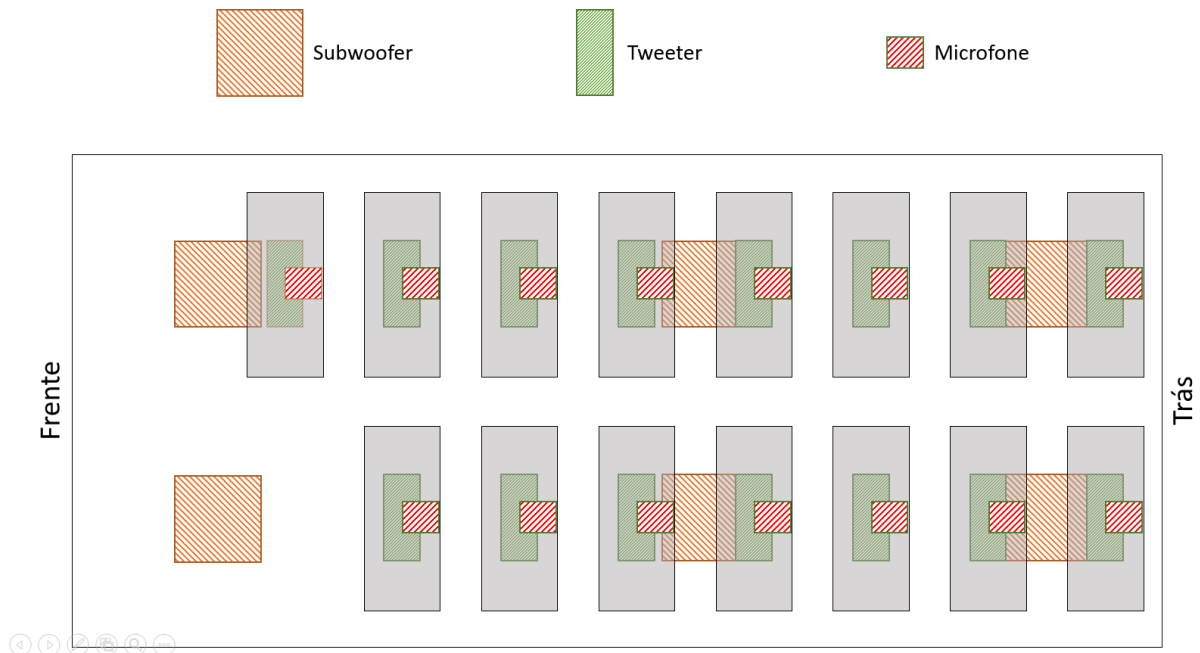


Figura 2: Diagrama esquemático do mockup indicando posicionamento dos transdutores do sistema acústico. Os retângulos cinza indicam a posição das poltronas duplas. Os tweeters e subwoofers estão debaixo das poltronas enquanto os microfones estão acima delas.

et al., 2012), que permite aquisição e reprodução simultânea de múltiplos canais através do protocolo de driver de placa de som ASIO.

2.4 Ruído de fundo

O mockup com todos os sistemas de controle ambiental desligados apresenta um ruído de fundo caracterizado, de acordo com as curvas de avaliação de ruído como NC 35. Quando os sistemas ambientais são ligados o ruído de fundo, causado principalmente pelo sistema de ar condicionado, é elevado consideravelmente, como pode ser visto na **Figura 3**. No entanto, o nível do ruído de fundo com o sistema em operação ainda é inferior ao menor nível de ruído de cabine usado nos testes, confirmado a viabilidade do mockup para simulações acústicas.

3. EQUALIZAÇÃO DO SISTEMA ACÚSTICO

Como descrito anteriormente, o sistema acústico é composto por dois tipos de transdutores. O primeiro passo na equalização do sistema foi definir a região de atuação de cada um deles. Após avaliar as curvas de sensibilidade fornecidas pelos fabricantes definiu-se a frequência de transição (*crossover*) em 350 Hz.

Devido à natureza dos testes a serem realizados, que iriam reproduzir sinais descorrelacionados, não se fazia necessário a equalização da fase do sistema, mas somente de sua amplitude. Por esta razão decidiu-se pela equalização do nível médio de pressão sonora da cabine. Isto foi feito reproduzindo em cada alto-falante uma realização distinta de um ruído rosa filtrada pelo filtro de *crossover* adequado. Em seguida calculava-se a média da amplitude do espectro do sinal resultante em cada microfone, equivalente à amplitude média observada dentro da cabine. Por fim, aplicava-se na amplitude média resultante uma suavização de média móvel com largura de

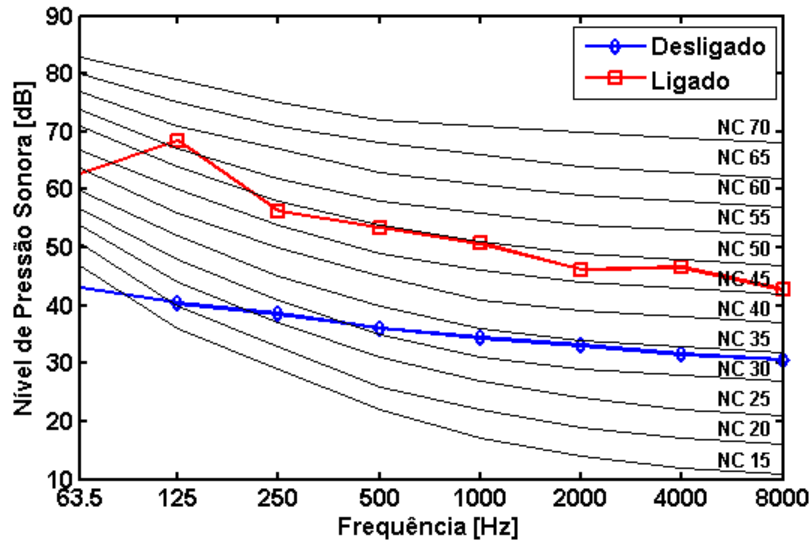


Figura 3: Comparação do nível de ruído de fundo avaliado dentro do mockup com todo os sistemas ambientais desligados, que caracteriza o mockup como NC 35, e com os sistemas ambientais ligados, que aumentam consideravelmente o nível interno de ruído, similar ao presente em uma aeronave.

um terço de oitava—calculada pela função *ita_smooth* da ITA-Toolbox (DIETRICH et al., 2012).

Para a obtenção do filtro de equalização a média suavizada da amplitude do ruído rosa de excitação era então comparada com a média suavizada da amplitude do sinal observado nos microfones. Para garantir um filtro causal, o espectro real resultante desta divisão é convertido em um espectro de fase mínima (complexo) com a função *ita_minimumphase* da ITA-Toolbox (DIETRICH et al., 2012).

O filtro resultante é aplicado a todos os canais em série com os respectivos filtros de *crossover* para equalizar a amplitude da resposta em frequência do mockup. O resultado é bastante adequado já que, apesar de a distribuição espacial do campo sonoro não ser constante, ela se encontra dentro do limite especificado mostrado na Figura 4.

Este filtro também garante a calibração do nível de pressão sonora do sistema, ou seja, se for gerado um ruído com um certo nível de pressão sonora, garante-se que o nível de pressão sonora reproduzido dentro da cabine será, na média, igual ao nível do sinal original.

4. VARIAÇÃO DA PRESSÃO ESTÁTICA

A variação da pressão estática (pressão atmosférica) causa uma variação na potência gerada por uma fonte acústicas, como um alto-falante. Kuttruff discute que, em uma primeira aproximação, um alto-falante pode ser interpretado como um pistão em uma parede infinita (KUTTRUFF, 2006). Neste caso, assumindo que o raio do pistão é muito menor que o comprimento de onda, a potência sonora irradiada pelo pistão é dada por

$$P \approx \rho_0 \frac{(S\omega\hat{v}_o)^2}{4\pi c}, \quad (1)$$

onde S é a área do pistão, ω sua frequência de oscilação, \hat{v}_o sua velocidade de deslocamento e c é a velocidade do som no meio. Verifica-se, portanto, que a potência sonora é diretamente

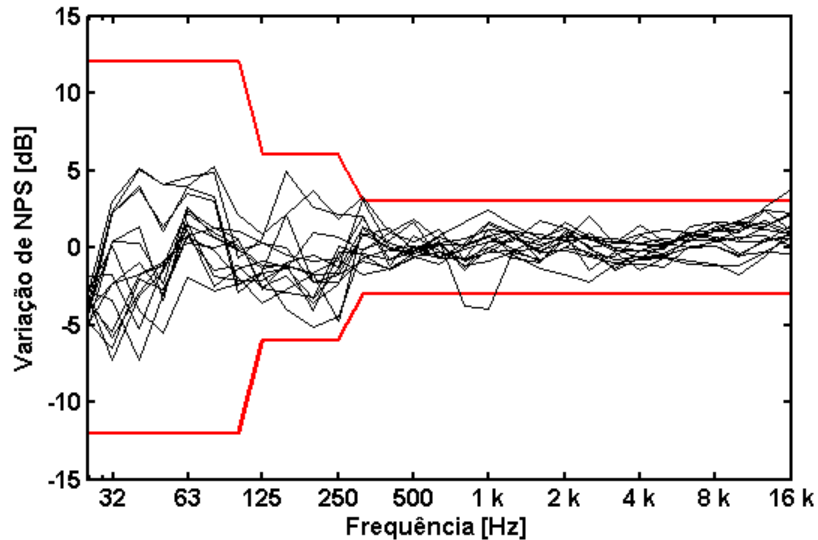


Figura 4: Variação do nível de pressão sonora ao longo do mockup após equalização do sistema acústico. Verifica-se que a variação aumenta para as baixas frequências por causa da característica modal do campo sonoro nestas frequências, mas, no entanto, a variação ainda se encontra dentro dos limites estabelecidos.

proporcional à pressão estática ρ_0 . Já a sensibilidade de microfones capacitivos praticamente não varia com a pressão estática (KUTTRUFF, 2006).

Como a calibração do sistema apresentada na seção anterior é sempre feita a pressão ambiente (avião em terra) é necessária uma correção do ganho do sistema conforme a pressão interna no mockup varia para simular a altitude de cabine da aeronave.

Isto foi feito com um sistema de controle de baixa latência implementado em Matlab. Este sistema avaliava o nível de pressão sonora médio da cabine nos últimos 5 s e, caso o nível médio fosse menor ou maior que 0,5 dB do nível desejado, o ganho global do sistema era ajustado em mais ou menos 0,5 dB, respectivamente.

5. TESTES DE CONFORTO

O mockup foi usado para uma série de testes para estudar a percepção de conforto de passageiros em voos de média duração. Foram realizados 28 “voos”, cada um levando de 15 a 28 passageiros, todos com prévia experiência de voo e com idade e gênero distribuídos de acordo com as estatísticas de passageiros da aviação comercial brasileira.

Cada voo tinha uma duração de 6,5h e começava com uma fase de aclimação em uma sala de embarque conectada ao mockup por um corredor que simula um *finger* como os que encontramos em aeroportos.

No início do voo, durante a fase de taxiamento e decolagem, o sistema acústico reproduzia o sinal gravado dentro de um avião comercial de porte semelhante ao do mockup. Nesta etapa o sistema vibratório também era usado para imprimir maior realismo à fase da decolagem, visto que a aceleração na direção de deslocamento do avião não estava presente. Durante a fase de subida da aeronave o sinal gravado era suavemente alternado para um sinal sintético que reproduz uma curva espectral que representa uma média do ruído encontrado neste tipo de aeronaves (ANGERER; MCCURDY; ERICKSON, 1991). Pelo restante do voo, durante a fase de cruzeiro, apenas este sinal sintético era reproduzido, ficando o sistema vibratório desligado.

Os níveis de ruído dentro da cabine eram monitorados durante todo o voo pelos microfones distribuídos entre os assentos. Para garantir a confiabilidade dos dados a calibração destes microfones era verificada antes e após cada voo com o uso de um pistofone. Os microfones usados se mostraram bastante robustos, não apresentando variações significativas em suas sensibilidades durante toda a fase de testes.

Além de monitorar o nível sonoro, os microfones também permitiam verificar a distribuição espectral do ruído durante o voo, que também não mostrou variações significativas. E os sinais adquiridos pelos microfones também eram usados para se avaliar durante o voo diversas métricas acústicas e psicoacústicas, todas calculadas com o ITA-Toolbox (DIETRICH et al., 2012). Todos estes valores eram gravados em uma tabela em intervalos pré-definidos para posterior análise e comparação com a sensação de conforto avaliada pelos passageiros através de questionários preenchidos durante o voo.

6. CONCLUSÕES

Neste manuscrito apresentamos a segunda versão do projeto de um simulador de cabine de aeronave. Apesar deste simulador poder controlar diversos parâmetros ambientais como temperatura, umidade, pressão ambiente e fluxo de ar, aqui focamos nos sistemas vibroacústicos e em especial na equalização do sistema acústico. Como a potência das fontes sonoras variava por causa da variação da pressão estática dentro da cabine, também foi necessário o desenvolvimento de um sistema de controle para compensar o nível de pressão sonora médio dentro da cabine. O sistema apresentado se mostrou robusto e permitiu a realização de uma série de testes de conforto de voo com um grande número de passageiros.

Os próximos passos são agora realizar uma análise estatística dos dados obtidos e correlacioná-los com a percepção de conforto dos passageiros para permitir o desenvolvimento de um modelo de conforto de passageiros.

REFERÊNCIAS

ANGERER, J. R.; MCCURDY, D. A.; ERICKSON, R. A. **DEVELOPMENT OF AN ANNOYANCE MODEL BASED UPON ELEMENTARY AUDITORY SENSATIONS FOR STEADY-STATE AIRCRAFT INTERIOR NOISE CONTAINING TONAL COMPONENTS**. Hampton, VA: [s.n.].

Anuário do Transporte Aéreo. Brasília: [s.n.]. Disponível em: <<https://www.anac.gov.br/assuntos/dados-e-estatisticas/anuario/anuario-2015.zip>>.

CHAMON, L. F. O. et al. **An SVD-Based MIMO Equalizer Applied To the Auralization of Aircraft Noise in a Cabin Simulator**. 18th International Congress on Sound & Vibration. **Anais...**Rio de Janeiro, Brazil: 2011

DIETRICH, P. et al. **ITA-Toolbox - An Open Source MATLAB Toolbox for Acousticians**. Fortschritte der Akustik -- DAGA. **Anais...**Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V., 2012

KUTTRUFF, H. **Acoustics. An introduction**. first ed. New York, USA: Taylor & Francis, 2006.

MUHM, J. M. et al. Effect of aircraft-cabin altitude on passenger discomfort. **The New England journal of medicine**, v. 357, n. 1, p. 18–27, 2007.

QUEHL, J. **Comfort Studies on Aircraft Interior Sound and Vibration**. [s.l.] Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, 2001.

VORLÄNDER, M. **Auralization: Fundamentals of Acoustics, Modelling, Simulation, Algorithms and Acoustic Virtual Reality (RWTHedition)**. [s.l.] Springer, 2007.

WEBER, R. et al. **Effects of noise on the comfort of cabin crew studied in an aircraft cabin simulator**. Fortschritte der Akustik -- DAGA. **Anais...**2004

WILBY, J. F. AIRCRAFT INTERIOR NOISE. **Journal of Sound and Vibration**, v. 190, n. November, p. 545–564, 1996.