

DETECÇÃO DE RUÍDO DAS AERONAVES USANDO TRANSFORMADA WAVELET CONTÍNUA

Tarcilene Aparecida Heleno¹

Jules Ghislain Slama²

Flavio Maldonado Bentes³

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo desenvolver um método para a identificação de eventos de aeronaves a partir de procedimentos de pouso e decolagem, o que elimina o uso de dados de radar. Este método é importante para o monitoramento do ruído das aeronaves; permite determinar a contribuição de cada aeronave por meio da métrica SEL (nível de exposição sonora) e $L_{A_{MAX}}$ (nível máximo ponderado na curva A). A aquisição de dados foi realizada utilizando um medidor de nível de pressão sonora instalado em alguns receptores críticos nas imediações do Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro. Os eventos de som são caracterizados pela sobreposição da aeronave ruído em conjunto com o ruído ambiental da área. O chapéu mexicano (transformada wavelet contínua) foi aplicado a séries temporais obtidas nas medições. Os resultados obtidos indicam um bom desempenho da transformada *wavelet* de detecção e identificação dos eventos aeronáuticos.

Palavras-chave: Ruído de aeronaves. Transformada wavelet. Detecção de evento sonoro.

DETECTION OF THE NOISE AIRCRAFT USING CONTINUOUS WAVELET TRANSFORM

ABSTRACT

This work aims to develop a method for aircraft events identifying from landing and takeoff procedures which eliminates the use of radar data. This method is crucial for monitoring aircraft noise; it allows determining the contribution of each aircraft through the metric SEL (Sound Exposure Level) and $L_{A_{MAX}}$ (maximum A-weighted noise sound). Data acquisition was performed using a sound pressure level meter installed at some critical receptors in the vicinity of the Rio de Janeiro International Airport. The sound events are characterized by the superposition of the aircraft noise together with the environmental noise of the area. The Mexican hat continuous wavelet transform was applied to time series obtained in measurements. The obtained results indicate a good performance of the wavelet transform of detection, and identification of the aeronautical events.

Keywords: Aircraft noise. Wavelet transform. Sound event detection.

1 Doutora em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, RJ, Brasil
tarcileneheleno@gmail.com

2 Pós-doutor em Engenharia Mecânica pelo Institut National de Sciences Appliquées (INSA), França
jules@mecanica.ufrj.br

3 Doutor em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, RJ, Brasil
flavio.bentes@fundacentro.gov.br

1 INTRODUÇÃO

O ruído aeroportuário é dividido em ruído oriundo da movimentação de aeronaves (durante o pouso, decolagem, operações e sobrevoos) e fontes de ruído no solo (avião taxiando, unidade auxiliar de potência - APU, teste de equipamentos e motor de apoio no solo). O presente estudo trata do ruído gerado pelo movimento de aeronaves em operação.

Um evento aeronáutico está associado à passagem de uma aeronave durante o procedimento de pouso, decolagem ou aproximação. Estes eventos têm um impacto significativo, uma vez que produzem um campo sonoro intermitente que afeta diretamente a qualidade de vida de um grande número de pessoas que residem e / ou passam perto de grandes aeroportos. O ruído do aeroporto tem vários efeitos adversos sobre as comunidades vizinhas dos aeroportos. Entre esses efeitos estão a interferência na comunicação, no sono e também a sensação de desconforto (BENTES; SLAMA, 2011).

Assim, o monitoramento de ruído das aeronaves é uma atividade de grande importância, especialmente em áreas onde a ocupação e o desenvolvimento urbano estão consolidados nas proximidades do aeroporto.

O acompanhamento visa determinar os níveis de pressão sonora e caracterização do ruído de impacto ambiental gerado por aeronaves ao redor do aeroporto e fornecer subsídios para a orientação das ações dos impactos avaliados a partir dos resultados da monitoração, em alguns receptores críticos.

Os sistemas de monitorização para o ruído das aeronaves adotado nos principais aeroportos do mundo baseiam-se na intersecção dos níveis de ruído que ultrapassem determinado valor (trigger) com informações do trajeto dos dados do radar da aeronave obtidos.

Assim, os eventos de som aeronáuticos são identificados por um limiar de detecção de nível de som, no entanto, o problema é o de assegurar que o evento detectado é realmente produzida por qualquer aeronave.

O Regulamento Brasileiro de Aviação Civil (RBAC n. 161) (AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL, 2013) estabelece que o operador de aeroportos cuja média anual dos movimentos de aeronaves ao longo dos últimos três anos seja superior a 120 mil e com regiões de uso residencial ou misto em mais de 50% das áreas definidas pelas curvas definidas ruído da mesma, devem apresentar a ANAC (Agência Nacional de Aviação Civil) um projeto de monitoramento de ruído.

Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo focar o monitoramento de ruído nos aeroportos em certos lugares, com ênfase na identificação e detecção de eventos de aviação com base em processamento de dados acústicos gravados com o registrador de dados.

Dress e Kercel (1994) usaram a transformada wavelet ortogonal Daubechies para o reconhecimento e identificação de eventos sonoros. Os coeficientes de wavelet foram calculados a partir de um algoritmo recursivo simples, que utiliza um banco de filtros com a estrutura proposta pela árvore Mallat (1989a, 1989b). A vantagem da análise de sinal em subespaços wavelet se dá pelo fato que o tempo característico não é perdido. A transformada wavelet Daubechies é utilizada em 12 subespaços previstos para cada evento aeronave. Na maioria dos casos, os coeficientes entre cinco e oito níveis foram suficientes para identificar o evento. No entanto, para alguns eventos, tais como aviões a jato, uma parte significativa da energia reside

nos níveis de um a quatro. Os resultados mostraram bom desempenho no processamento de sinais para reconhecimento de eventos de aviação.

Dufournet e Jouenne (1997) desenvolveram novos instrumentos para análise de ruído capazes de identificar e quantificar automaticamente, em tempo real, várias saídas em um determinado ambiente e avaliar o seu efeito/impacto. Este projeto tornou-se conhecido como Madras. A base de dados inclui gravações em alta qualidade de várias fontes de ruído, tais como: carros, caminhões, motocicletas, ciclomotores, aeronaves, serras elétricas, instalações industriais, dentre outros. Para caracterizar a passagem de veículos foi criada uma rede neural com mais de mil reais padrões diferentes pelo terceiro espectro de oitava, na faixa de 50 Hz a 5 kHz para distinguir carros, motos, caminhões. Para tratar ocorrências de aeronaves sobrevoos, sugeriu uma análise usando Daubechies wavelet.

O presente trabalho desenvolve um método para segmentação dos eventos de sinal de som na origem aeronáutica e não-aeronáutica. Os eventos sonoros são caracterizados pela superposição do movimento ruído de aeronaves que operam em conjunto com o ruído ambiente local. Estes algoritmos foram construídos em Matlab, utilizando a transformada wavelet contínua (TWC) e aplicados em LAeq (t), obtidos durante procedimentos de medição

2 TRANSFORMADA WAVELET

A transformada wavelet é definida como o produto interno da função $f(t)$ e $\psi_{a,b}(t)$, de acordo com a equação 1.

$$C_{a,b} = \langle f(t)\psi_{a,b}(t) \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)\psi_{a,b}(t)dt \quad (1)$$

A função $\psi_{a,b}(t)$ é definida pela equação 2.

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) \quad (2)$$

Onde a e b são dois coeficientes e ψ^* indica o conjugado complexo de uma função *wavelet*. O termo $(1 / |a|^{1/2})$ é o fator de normalização. A equação 3 é apresentada abaixo.

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi_{a,b}(t)dt = \int_{-\infty}^{\infty} |\psi(t)|^2 dt \quad (3)$$

O parâmetro b indica que a função foi transferida para o eixo t a uma distância equivalente a b . Pode-se dizer então que, matematicamente, atrasar a função $f(t)$ por b é a mesma coisa que a função $f(t - b)$. Dessa forma, a transformada wavelet contínua (CWT) pode ser reescrita como dada pela equação 4.

$$C_{a,b} = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt \quad (4)$$

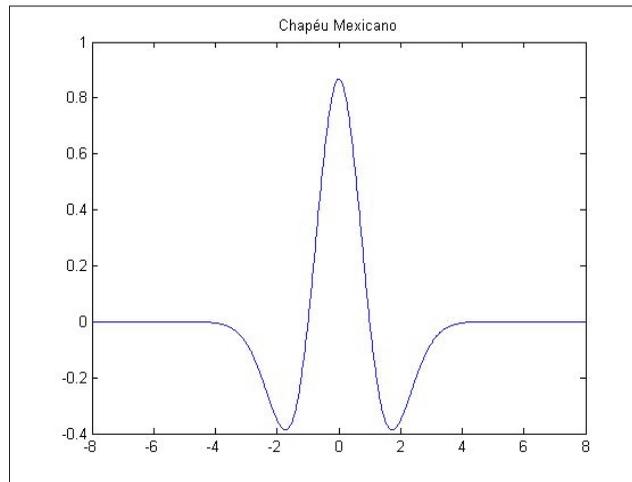
Ao variar os valores de escala (a), e translação (b), são criados os coeficientes de wavelet C (a, b).

2.1 Transformada wavelet chapéu mexicano

A wavelet chapéu mexicano é uma função proporcional a segunda derivada da função densidade de probabilidade da Gaussiana (MALLAT, 1998). A função utilizada é dada pela equação 5 e representada graficamente na figura 1.

$$\psi(t) = (1 - 2t^2)e^{-t^2} \quad (5)$$

Figura 1: Transformada wavelet chapéu mexicano



Fonte: Os autores.

No entanto, antes de aplicar a CWT para sinalizar, você deve escolher uma wavelet mãe que apresenta bom desempenho na detecção de eventos de som. A escolha da transformada wavelet mãe - chapéu mexicano foi feita devido ao seu bom desempenho para moldar os níveis sonoros LA(t) gerados por uma aeronave sobrevoou.

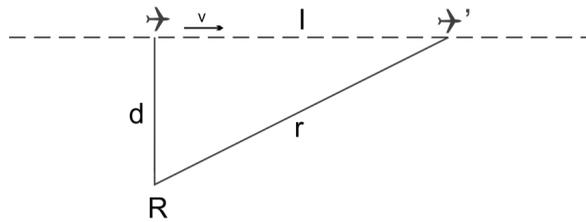
2.2 Nível de pressão sonora das aeronaves

As aeronaves (procedimentos de pouso e decolagem) são consideradas uma fonte de som em movimento. Para o caso de uma fonte omnidireccional, considerando que objeto se desloca ao longo da fonte em um caminho linear, o nível de pressão sonora a uma distância r (t) é dada pela equação 6.

$$L_A(t) = L_W + 10 \log \frac{1}{4\pi r_t^2} \quad (6)$$

Em que $L_A(t)$ é o nível de pressão de som na curva de ponderação A; L_W é o nível de potência sonora; d é a distância entre a fonte e o receptor. A partir do desenho esquemático da figura 2, pode-se chegar na equação 7.

Figura 2: Representação de evento aeronáutico



Fonte: Os autores.

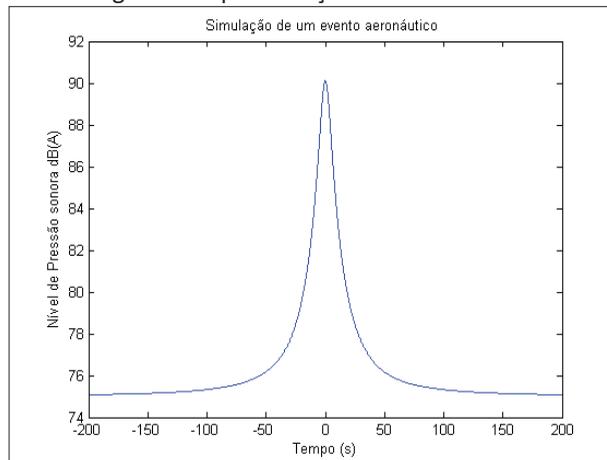
$$r^2 = d^2 + x^2 \quad (7)$$

Sabe-se que espaço é produto da velocidade pelo tempo, logo a partir da substituição de $x = vt$, obtém-se o nível de pressão sonora em função do tempo de acordo com a equação 8.

$$L_A(t) = L_W - 10 \log \left[d^2 \left(1 + \left(\frac{vt}{d} \right)^2 \right) \right] \quad (8)$$

A figura 3 mostra o comportamento dos níveis de pressão de som para um evento aeronáutica.

Figura 3: Representação de um sobrevoo

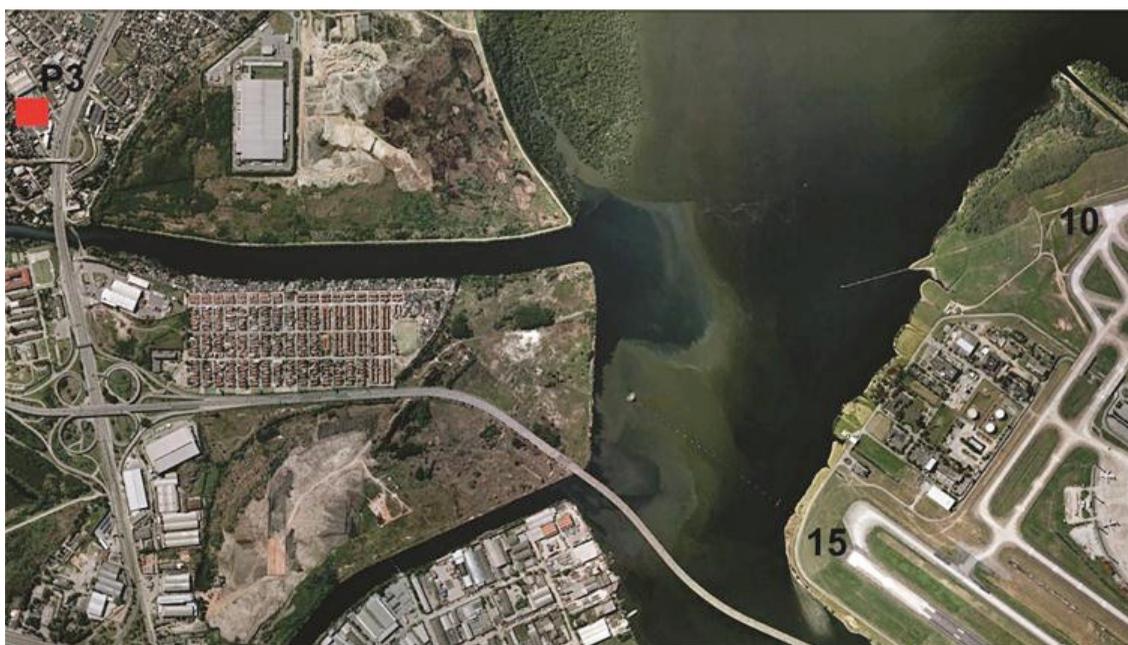


Fonte: Os autores.

3 AQUISIÇÃO DE DADOS

A primeira etapa do trabalho consiste na aquisição de níveis de ruído nos receptores localizados nas imediações do Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro - Galeão. Os dados experimentais foram obtidos utilizando um medidor de nível de pressão sonora com capacidade para armazenar dados de áudio e os níveis sonoros (data logger). O equipamento foi configurado para registrar o nível de pressão sonora instantânea - LA (t) ao longo de um período de 1 segundo, durante o processo de medição. A partir dos dados registrados e armazenados no aparelho, é possível obter os valores do SEL e LA_{MAX} correspondentes a cada evento aeronáutico. O medidor de nível de pressão sonora foi instalado na extensão da pista 15. A figura 4 apresenta a localização do receptor.

Figura 4: Localização do receptor



Fonte: GOOGLE EARTH.

4 MÉTODO DE DETECÇÃO DOS EVENTOS DE RUÍDO DAS AERONAVES

Para a detecção de eventos de ruídos das aeronaves foram adotados dois procedimentos: a segmentação de dados do nível de pressão sonora baseado na NFS31-190 e a transformada *wavelet* contínua.

A detecção consiste na análise dos níveis sonoros registrados. Quando o nível de LAeq_{1s} excede o limiar escolhido, um evento for detectado. A classificação automática é o processo de identificação dos eventos de aeronaves entre todos os eventos registrados, associados com os dados de nível de pressão sonora. Normalmente, apenas os dados de LA(t) correspondente ao sobrevoo da aeronave são armazenados, o resto da medição é considerado como o ruído ambiente local.

A norma NF S31-190 propõe um algoritmo de segmentação para a série temporal de LA(t) com base na média móvel e, em seguida, aplica o método dos mínimos quadrados para determinar o máximo. A mudança de sinal de positivo para negativo indica o coeficiente de inclinação da presença de um máximo na curva de LA(t). Localizando o máximo, determina-se a energia associada com a passagem de uma aeronave. A média móvel é calculada usando a equação 9.

$$y(m) = \frac{1}{2n+1} \sum_{n-8}^{n+8} x(m+n) \quad (9)$$

Nesta equação $x(n)$ é a série temporal de níveis de LAeq_1s. A detecção máxima é realizada na curva $y(m)$. O declive da linha é determinada pelo método dos mínimos quadrados, em que uma sequência de séries assinaladas pelo declive da linha é associada com um evento aeronáutico.

Em paralelo, a análise wavelet das séries temporais dos níveis de ruído foi feita para melhorar a possibilidade de detecção e localização de eventos de som. A wavelet escolhida deve ter uma curva perto que represente o evento sonoro durante a passagem de uma aeronave, motivo pelo qual foi escolhida uma família wavelet mãe Gaussian.

O programa para análise e detecção de eventos do ruído das aeronaves foi desenvolvido em MATLAB, versão 7.10 (R2012a) baseado no algoritmo wavelet implementado na caixa de ferramentas, que tem a função *cwtft* para calcular a transformada wavelet contínua via transformada de Fourier inversa. O cálculo da TWC usando o algoritmo FFT favorece o cálculo computacional de TWC inversa. Ao calcular o TWC, são obtidos os coeficientes de wavelet e escalograma indicando um mapeamento de eventos sonoros.

5 VALIDAÇÃO DOS EVENTOS DAS AERONAVES

A validação dos eventos de som de origem aeronáutica foi baseado no cruzamento de movimentação de dados operacional do aeroporto fornecidos pela Infraero (Empresa Brasileira de Infraestrutura Aeroviária) e eventos aeronáuticos registrados durante o processo de medição.

6 NÍVEIS DE SOM DOS EVENTOS AERONÁUTICOS

Primeiramente os níveis de som foram calculados em SEL, e métricas LA_{MAX}. O cálculo destas variáveis foi desenvolvido a partir do nível de pressão sonora ponderado em A de um evento aeronáutico. O LA_{MAX} é um nível de ruído de pico instantâneo medido em um local de observação durante o período de tempo em consideração como uma medida crítica do nível de ruído (BAIRD; HARDER; PREIS, 1997).

O nível de exposição sonora (SEL) é geralmente utilizado para a avaliação do ruído ambiental, como aviões, comboios e ruído do tráfego rodoviário, sendo calculado de acordo com a equação 10.

$$SEL_i = 10 \log_{10} \sum_1^n 10^{L_A(t)/10} \quad (10)$$

SEL_i refere-se à passagem de cada aeronave. Depois disso, os níveis sonoros obtidos em diferentes métricas foram associados com todos os eventos aeronáuticos durante o período de análise.

7 RESULTADOS

Nesta seção, são apresentadas as medições de análise *wavelet*. Um receptor caracterizou as decolagens das aeronaves que ocorreram durante o período de 9h às 11h. Os parâmetros escolhidos foram: transformada wavelet mãe do tipo chapéu mexicano e escala linear. O receptor escolhido foi o laboratório Sergio Franco Laboratório, localizado em Duque de Caxias.

Os maiores coeficientes da transformada wavelet possuem como característica uma alta concentração de energia e são, a nível local, indicados pela região denominada cone de influência. Nessa região ocorrem os mais altos níveis de ruído emitidos pelo sobrevoo das aeronaves. A tabela 1 apresenta os eventos durante o período de medição associados aos voos das aeronaves, com valores SEL e LA_{MAX}.

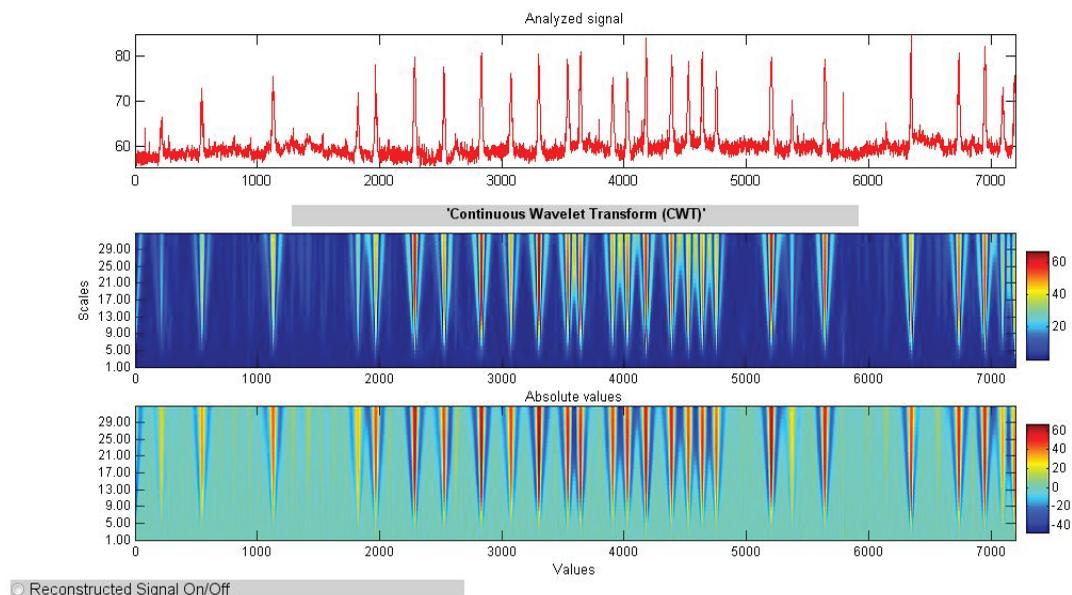
Tabela 1: Eventos aeronáuticos associados às métricas de ruído SEL e LA_{MAX}

Horário de partida	Modelo da aeronave	LA _{MAX} dB(A)	SEL dB(A)
09:05	A319	66,3	76,0
09:09:06	E190	68,3	81,0
09:18:50	B738	72,5	84,2
09:29:45	B738	71,8	79,7
09:32:48	A320	77,2	84,5
09:38:08	A320	78,4	88,9
09:42:07	B738	77,7	85,9
09:47:12	A320	80,0	89,5
09:51:14	B737	74,7	85,1
09:55:03	A320	80,6	89,4
09:58:59	B738	78,2	88,3
10:00:43	A320	79,5	89,9
10:05:06	B738	73,8	85,2
10:07:06	A320	77	86,2
10:09:39	C130	83,0	91,8
10:13:08	A320	77,7	89,0
10:15:26	E190	77,3	87,5
10:17:19	A320	81,1	88,7
10:19:14	B738	76,1	85,6
10:26:44	A330	77,8	89,4
10:29:33	B737	68,4	79,3
10:34:02	A320	79,2	88,4
10:45:47	C130	83,6	91,8
10:52:18	A320	79,1	88,9
10:55:49	A319	81,0	90,2
10:58:17	B738	73,2	81,9

Fonte: Os autores.

A figura 5 ilustra os coeficientes da transformada wavelet em diferentes escalas.

Figura 5: Série temporal e coeficientes wavelet em diferentes escalas



Fonte: Os autores.

Observa-se que as escalas menores (5-15) já contem a localização dos picos associados com eventos de aeronaves, assim, não é necessário o cálculo da TWC em escalas maiores. A representação dos coeficientes em diferentes escalas indica a forma do sinal resultante do produto escalar da função $LA(t)$ para a wavelet chapéu mexicano com largura variável. Comparando os resultados obtidos no boletim de operação do aeroporto, constata-se que 26 eventos foram detectados pela metodologia desenvolvida utilizando a transformada wavelet chapéu mexicano.

8 CONCLUSÕES

Observou-se que a transformada wavelet - chapéu mexicano foi muito útil para detectar transições bruscas no sinal, produzindo relativamente grandes coeficientes wavelet (em valor absoluto) centradas em torno da descontinuidade do sinal em todas as escalas. A melhor localização dos eventos aeronáuticos é marcada pela descontinuidade do sinal com base nos coeficientes wavelet obtidos em escalas menores. As medições realizadas no Laboratório Sergio Franco foram caracterizadas em único procedimento de pouso de aeronaves. Os eventos associados as aeronaves foram validados com informações dos movimentos operacionais do aeroporto durante o período analisado.

Os resultados mostraram que houve um bom desempenho na detecção de eventos sonoros de origem aeronáutica. Observou-se que os eventos foram devidamente registrados em espectrograma com representação do sinal em diferentes escalas, com objetivo de facilitar o processo de detecção, de modo que a representação dos coeficientes de wavelet em escalas menores é suficiente para caracterizar um evento advindo do sobrevoo de aeronaves.

REFERÊNCIAS

AFNOR GROUPE. **French standard NF S31-190**: acoustique: caractérisation des bruits d' aéronefs perçus dans l'environnement. France, 2008.

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL (Brasil). Regulamento brasileiro da aviação civil n. 161. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 13 set. 2013.

BAIRD, J. C. ; HARDER, K. ; PREIS, A. Annoyance and community noise: psychophysical model of dose-response relationships. **Journal of Environmental Psychology**, Ohio, v. 17, n. 4, p. 333-343, Dec. 1997.

BENTES, F. M.; SLAMA, J. G. Sensitivity analysis of airport noise using computer simulation. **Journal of Aerospace Technology and Management**, São José dos Campos, v. 3, n. 3, p. 295-300, Sept./Dec. 2011.

DRESS, W. B.; KERCEL. S. W. **Wavelet-based acoustic recognition of aircraft**. Orlando: Conference on Wavelet Applications, 1994.

DUFOURNET, D.; JOUENNE, P. **MADRAS**: an intelligent assistant for noise recognition. Hungary: Internoise, 1997.

MALLAT, S. G. Multiresolution approximation and wavelets orthonormal bases of $L^2(\mathbb{R})$. **Transactions of the American Mathematical Society**, Columbia, v. 315, p. 69-88, 1989.

MALLAT, S. G. Theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation. **IEEE Trans**, London, v. 11, p. 674-693, 1989.

MALLAT, S. G. **Wavelet tour of signal processing wavelet analysis & its applications**. Los Angeles: Academic Press-Elsevier, 1998.

MALLAT, S. G. **A wavelet tour of signal processing**. 2. ed. San Diego: Academic Press-Elsevier, 1999.

MATLAB. **User's guide**: version 7.10: R2012a. Texas, 2012.

MORLET, J.; GOUPILLAUD, P.; GROSSMAN, A. Cycle-octave and related transforms in seismic signal analysis. **Geoexploration**, Amsterdam, v. 23, p. 85-102, 1984.

AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de agradecer ao Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE/UFRJ), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Rio de Janeiro (FAPERJ), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), à Fundação Jorge Duprat Figueiredo de Segurança e Medicina do Trabalho (Fundacentro), ao Laboratório de Acústica e Vibrações (LAVI) e ao Grupo de Estudos em Ruído Aeroportuário (GERA), que apoiaram o estudo.

Recebido em: 8 jan. 2016.

Aprovado em: 21 jan. 2016.