

## **METODOLOGIAS PARA IMPLEMENTAÇÃO DA ABORDAGEM EQUILIBRADA PARA REDUÇÃO DO RUÍDO AEROPORTUÁRIO**

**Téo Cerqueira Revoredo, revoredo@ufrj.br<sup>1</sup>**  
**Jules Ghislain Slama, julesslama@yahoo.com.br<sup>1</sup>**  
**Felix Mora-Camino, moracamino@hotmail.fr<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>LAVI/PEM/COPPE/UFRJ, Centro de Tecnologia da UFRJ, Bloco G, sala 204, cep 21945-970, Rio de Janeiro, Brasil

<sup>2</sup>LARA-ENAC, 7 avenue E. Belin, 31055 Toulouse, França

**Resumo:** *O controle do ruído aeroportuário é um assunto multidisciplinar no qual diversas formas de ação são possíveis. A Organização internacional de aviação civil (OACI), em sua 33<sup>a</sup> Assembléia em outubro de 2001, definiu uma filosofia para abordagem da problemática do ruído aeroportuário denominada Abordagem equilibrada, compostas por quatro direções principais de trabalho. Nesta comunicação apresentamos os conceitos fundamentais para implementação da abordagem equilibrada e destacamos as principais abordagens encontradas na literatura. Adicionalmente, enfatizamos trabalhos do Grupo de Estudos de Ruído Aeroportuário (GERA) da COPPE/UFRJ nas direções de medidas de ordenamento e gestão do solo, restrições de operação e procedimentos operacionais com foco na redução de ruído, apresentando propostas de metodologias e alguns exemplos de aplicação a aeroportos brasileiros.*

**Palavras-chave:** *Abordagem equilibrada, ruído aeroportuário, zoneamento aeroportuário*

### **1. INTRODUÇÃO**

O ruído é um dos principais fatores externos associados aos meios de transporte modernos. Ele aparece com frequência em pesquisas como uma das três maiores preocupações de ordem pública e, apesar das reduções alcançadas relativas à movimentação de veículos, à supressão e a melhorias de projeto, o problema do incômodo persiste (van praag e Baarsma, 2005; Levesque, 2005 e Nelson, 2004). Nesse contexto, o transporte aeronáutico comercial tem estado sob o foco das atenções, em função da concentração de tráfego por conta dos aeroportos.

Desde meados de 1960, o ruído aeronáutico gera manifestações da comunidade, especialmente a parcela da população que vive na vizinhança de grandes aeroportos. Hoje, o crescimento da demanda pela diminuição do ruído gerado em função do transporte aéreo tornou-se evidente. Isso é devido, especialmente, ao crescimento da expectativa da comunidade com relação à qualidade de vida e à necessidade de compensar não apenas o crescimento do transporte aéreo, mas também a intrusão (encroachment) em torno dos aeroportos.

Nesse contexto, esta comunicação aborda a questão do ruído aeronáutico de maneira introdutória, apresentando as principais direções de trabalho para mitigá-lo, de acordo com as diretrizes da Organização internacional de aviação civil (OACI). Alguns exemplos de aplicação das metodologias discutidas são apresentados, com base em resultados obtidos pelo Grupo de Estudos em Ruído Aeroportuário (GERA) da COPPE/UFRJ ao longo dos últimos anos.

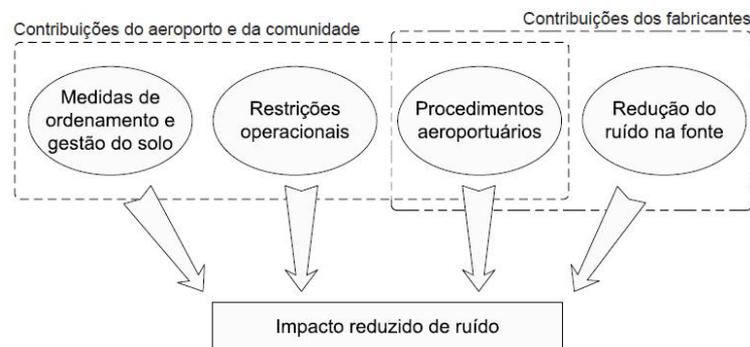
### **2. ABORDAGENS PARA REDUÇÃO DO RUÍDO AEROPORTUÁRIO**

O ruído ao redor de aeroportos é devido a diversos fatores e precisa ser abordado através de metodologias que considerem a influência de todos eles de maneira conjunta. Parâmetros aeroportuários tais como o tipo de aeronaves que operam no aeroporto, o horário dos vôos, as rotas e os procedimentos de pouso e decolagem e as condições climáticas locais têm sua parcela de influência no ruído gerado pelo aeroporto. Além disso, do ponto de vista urbano, o zoneamento e a gestão do solo é outro fator importante para a redução da exposição sonora da população.

O controle do ruído aeroportuário é, portanto, um assunto multidisciplinar no qual diversas formas de ação são possíveis. A OACI, em sua 33<sup>a</sup> assembléia em outubro de 2001, definiu uma filosofia para tratar desta questão denominada *Abordagem equilibrada*. Nesta, são definidas inicialmente quatro direções de trabalho, a saber: Redução do ruído na fonte (aeronave), medidas de ordenamento e gestão do solo, restrições de operação e procedimentos operacionais com foco na redução de ruído.

A redução do ruído na fonte diz respeito à diminuição do ruído emitido pelas aeronaves nas diferentes fases do vôo e é, portanto, a parcela de contribuição devida aos fabricantes de aeronaves e motores. O ordenamento e a gestão adequada do solo, bem como as restrições operacionais, são medidas devidas ao aeroporto e a comunidade, incluindo

os órgãos governamentais e reguladores. Já as ações relativas aos procedimentos operacionais para diminuição de ruído são contribuições compartilhadas entre os fabricantes, o aeroporto e a comunidade. Cabe aos fabricantes o desenvolvimento de aeronaves com capacidade de realização de procedimentos de pouso e decolagem, por exemplo, que diminuam o ruído na vizinhança do aeroporto, entretanto, a realização destes procedimentos estará condicionada às condições aeroportuárias locais e à distribuição e tipos de atividades da população.



**Figura 2. Para redução efetiva do ruído é necessário o envolvimento de diversos atores.**

Mesmo antes da promulgação da abordagem equilibrada, muitos países ao redor do mundo já haviam adotado medidas para redução do ruído aeroportuário. Por esse motivo, muitos diferem com relação ao cenário atual, porém todos estão buscando maneiras de introduzir as modificações necessárias. Para que a implementação seja efetiva, a colaboração entre os diversos atores envolvidos é de extrema necessidade. No Brasil, por exemplo, pode-se citar a Agência nacional de aviação civil (ANAC), que é a responsável pela aviação civil no país, a Empresa brasileira de infra-estrutura aeroportuária (Infraero), que administra os principais aeroportos, as companhias aéreas, as fabricantes de aeronaves, as prefeituras, etc.

## 2.1. Redução do Ruído na Fonte

Um dos principais fatores geradores de ruído em torno dos aeroportos é a aeronave e, por conta disso, a redução da emissão de ruído pela mesma têm sido área importante de estudo nos últimos anos, o que coloca dois atores principais expostos a esta demanda, a saber: os fabricantes de aeronaves e de motores para aviação.

Um exemplo desta necessidade é o projeto Silencer(R), o maior programa de pesquisa para redução de ruído de aeronaves já financiado pela comunidade européia, no qual um consórcio de 51 empresas de 14 países da União Européia e 2 Estados associados colaboraram ao longo de 4 anos para validar tecnologias para redução de ruído.

O ruído de uma aeronave não é gerado exclusivamente por seu motor e, sim, por diversas fontes que podem ser classificadas em três grandes grupos, a saber: Aerodinâmica, compressor/hélice e mistura de gases.

O ruído aerodinâmico é oriundo dos componentes que não são relacionados à propulsão da aeronave. Ele é produzido pelo escoamento do ar sobre a estrutura do avião, induzindo perturbações de pressão, e varia com as dimensões e a velocidade da aeronave, pois depende diretamente da força de arraste aerodinâmico. Portanto, este tipo de ruído depende da configuração do avião, que pode ser classificada como suja ou limpa. Uma configuração suja indica que os flaps estão estendidos e o trem de pouso abaixado. Essas irregularidades aumentam a força de arraste, contribuindo para um aumento do nível de ruído. Quando flaps e trem de pouso estão recolhidos, a força de arraste aerodinâmico diminui, reduzindo o ruído. Esta configuração é dita limpa.

Em condições normais de voo, a aerodinâmica do avião conduz a níveis de ruído baixos, sendo a estrutura das asas a principal fonte. Entretanto, para aeronaves modernas, o componente aerodinâmico é a principal contribuição para o ruído total durante as etapas de pouso, quando os instrumentos de alta sustentação e o trem de pouso são acionados (Casalino et al., 2008). Informações adicionais sobre ruído aerodinâmico de aeronaves e tecnologias e medidas para redução do mesmo podem ser encontrados em Crighton (1975), Lockard e Lilley (2004) e Casalino et al. (2008).

O ruído devido ao compressor/hélice é gerado em função da interação entre não uniformidades na vazão e na rotação das aletas laminadas e do estator. Com o advento dos motores tipo turbohélice com alta taxa de *bypass*, o ruído gerado pela hélice tornou-se uma grande fonte em aeronaves comerciais. Estudos indicam que, durante as etapas de pouso e decolagem, o ruído da hélice possui a maior parcela de contribuição ao ruído total de sobrevoo do motor ainda que supressores sejam utilizados (Envia, 2002). O crescimento esperado para a taxa de *bypass* dos motores deve aumentar ainda mais a contribuição deste tipo de ruído. Portanto, qualquer redução significativa nesta componente deve ter boa influência no ruído total gerado pela aeronave. Informações adicionais sobre ruído gerado pela hélice de aeronaves e tecnologias e medidas para redução do mesmo podem ser encontrados em Envia (2002) e Hobbs et al. (1995).

A introdução progressiva no mercado da primeira geração de motores do tipo turbohélice na década de sessenta

contribuiu para uma grande redução do ruído gerado por aeronaves. Melhorias posteriores relativas à segunda geração foram alcançadas em função do aumento sucessivo da taxa de *bypass*, de maneira equilibrada com a mitigação do ruído da hélice por intermédio de tratamentos acústicos. Entretanto, em motores modernos com alta taxa de *bypass*, a hélice ainda contribui com aproximadamente metade da energia acústica total durante a decolagem da aeronave. Por este motivo, o ruído da hélice ainda se mantém como uma das áreas mais pesquisadas na aero-acústica desde seu estabelecimento nos anos cinquenta (Casalino et al., 2008).

## 2.2. Medidas de Ordenamento e Gestão do Solo

Em muitos países existem requisitos legais com relação aos níveis de ruído permitidos ao redor de aeroportos. Internacionalmente, entidades tais como a União Européia estão introduzindo idéias para medição e controle de ruído entre grupos de nações (européen, 2002), sendo as normas gerais utilizadas internacionalmente acordadas pela OACI (ICAO, 1993). Um dos focos dessas medidas, em acordo com a abordagem equilibrada, diz respeito ao ordenamento e gestão do solo de maneira compatível com o ruído aeroportuário. Portanto, a formulação de políticas para controle deste tipo de ruído deve contemplar a quantificação do ruído gerado pelo aeroporto em áreas próximas e a adequação do zoneamento dessas regiões a atividade aeroportuária. Entretanto, a definição de zonas de ruído adequadas nem sempre é uma tarefa fácil.

### 2.2.1. Métricas para Avaliação do Ruído

Para quantificar o ruído aeroportuário, diferentes métricas podem ser utilizadas, e o entendimento da representatividade de cada uma é essencial para a avaliação do impacto ambiental que é produzido em uma região.

O termo métrica tal como utilizado em avaliações de ruído ambiental, refere-se à unidade (quantidade) que indica o efeito do ruído no ambiente (Wyle, n.d.). A mais básica das métricas de ruído é o *nível de pressão sonora*, denotado por SPL e definido pela Eq. (1), na qual  $p$  é a pressão sonora efetiva (RMS) e  $p_0$  é a pressão sonora de referência cujo valor é  $20\mu\text{P}$  e a que se refere ao limite de sensibilidade aproximado do ouvido humano na faixa de frequências na qual é mais sensível.

$$SPL = 10 \log_{10} \left( \frac{p^2}{p_0^2} \right) = 20 \log_{10} \left( \frac{p}{p_0} \right) \quad (1)$$

Há três famílias fundamentais de métricas utilizadas na medição de ruído de aeronaves (Ren, 2007). Estas famílias são derivadas do *nível sonoro ponderado em A*, do *nível sonoro ponderado em C* e do *nível sonoro percebido* (PNL).

O nível sonoro ponderado em A é o SPL modificado de maneira a enfatizar frequências no intervalo entre 1 e 6.3 kHz, dando pouca ênfase às baixas (menores do que 1 kHz) e altas (maiores do que 6.3 kHz) frequências. O objetivo é aproximar a resposta do ouvido humano às diferentes frequências, dando maior peso àquelas onde responde bem e pouco peso às frequências nas quais a resposta é pobre. Esta ponderação relaciona-se bem com o julgamento subjetivo médio das pessoas com relação ao ruído, independentemente do nível. Por esse motivo, o nível sonoro ponderado em A é o mais comumente utilizado para medição de ruído ambiental.

O nível sonoro ponderado em C é o SPL modificado de maneira a enfatizar as baixas frequências do espectro (entre 0.1 e 2 kHz). Esta ponderação fornece uma aproximação melhor do que o nível ponderado em A para o comportamento do ouvido humano na percepção de níveis de ruído acima de 90 dB. Por esse motivo, este tipo de ponderação é mais utilizado para medição de valores de pico de um som objetivando avaliar o risco de dano auditivo. Em medições de ruído aeronáutico, o nível sonoro ponderado em C é geralmente utilizado para avaliar cenários dominados por ruídos de baixa frequência, tais como em pontos próximos ao início da decolagem de uma aeronave.

O terceiro grupo de métricas é associado ao nível sonoro percebido. O PNL é mais exato na estimativa da percepção de ruídos de grande faixa tais como os gerados por uma aeronave, de duração semelhante, que não contenham fortes componentes de frequências discretas. A ponderação por tom é utilizada de maneira a considerar o incômodo devido às irregularidades do espectro e às componentes de frequências discretas. A métrica utilizada na certificação de aeronaves, o nível sonoro percebido efetivo (EPNdB), é o valor do PNL ajustado às irregularidades do espectro e à duração do som.

A métrica mais utilizada ao longo das últimas décadas em avaliações de ruído aeroportuário é denominada *nível sonoro equivalente dia e noite*, denotada por DNL. Sua utilização é baseada na idéia de controlar o número de reclamações geradas na vizinhança do aeroporto em função de sua operação. O DNL é tido como a melhor métrica para medição de ruído que pode ser uniformemente aplicada na medição em comunidades e em torno de aeroportos, e para a qual existe uma relação altamente confiável entre o ruído emitido e a reação das pessoas. O DNL considera a magnitude do ruído de todos os eventos sonoros ocorridos durante um período de 24 horas, o número de eventos, e a alta sensibilidade ao ruído durante períodos típicos de descanso. Ele é uma média obtida através do acúmulo da exposição sonora total ao longo de um período de 24 horas dividido pela quantidade de segundos em um dia, tal

como apresentado na Eq. (2). A relação entre o DNL e o número de pessoas altamente incomodadas foi estudada por Schultz (1978) e é apresentada na Fig. (3). Posteriormente, Fidell (1999) apresentou novos resultados nesta relação.

$$DNL = 10 \log_{10} \left[ \frac{1}{3600 \times 24} \times \left( \int_{7am}^{10pm} 10^{\frac{L_A(t)}{10}} dt + \int_{10pm}^{7am} 10^{\frac{L_A(t)+10}{10}} dt \right) \right] \quad (2)$$

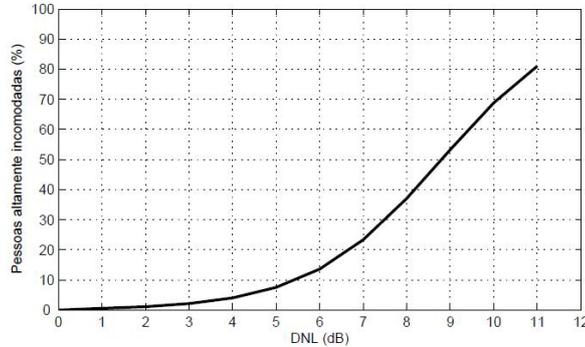


Figura 3. Relação entre DNL e o número de pessoas altamente incomodadas.

A utilização do DNL é amplamente difundida em ruído aeroportuário e o zoneamento em torno de aeroportos em muitos países do mundo é baseado nesta métrica. Como exemplo, cita-se o histórico da adoção do DNL pelo órgão que administra os aeroportos americanos, a FAA, que pode ser encontrado em Connor (2007). No Brasil, é autorizada a instalação de residências em áreas onde  $DNL \leq 65$  dB(A).

Diversas ações baseadas na utilização da métrica DNL foram tomadas ao redor do mundo culminando na redução da exposição sonora da população em níveis significativos. Entretanto, a preocupação com o ruído aeronáutico persiste como um dos maiores fatores de reclamação de populações vizinhas a aeroportos. Em reconhecimento à insatisfação pública relacionada à utilização do DNL o governo americano, por exemplo, aprovou a utilização de métricas suplementares (US Department of Transportation, n.d.), pois estas podem ser úteis na caracterização de eventos específicos e podem reforçar a compreensão da comunidade com respeito a potenciais efeitos resultantes de eventuais mudanças propostas nas operações das aeronaves. Algumas métricas suplementares são descritas a seguir.

O *nível sonoro equivalente*,  $L_{Aeq}$ , é uma métrica cumulativa que determina o nível sonoro em estado estacionário para um determinado intervalo de tempo. Esta métrica é apropriada para avaliação do ruído de aeronaves quando este afeta atividades com períodos menores do que 24 horas de duração. O  $L_{Aeq}$  é determinado através da Eq. (3), na qual T é o tempo de medição e  $L_A(t)$  o nível sonoro.

$$L_{Aeq} = 10 \log_{10} \left[ \frac{1}{T} \times \int_0^T 10^{\frac{L_A(t)}{10}} dt \right] \quad (3)$$

O *nível sonoro máximo*,  $L_{Amax}$ , é utilizado para descrever o maior nível sonoro gerado por um evento individual durante um determinado período de tempo. O nível sonoro máximo, em dB, é determinado através da Eq. (4).

$$L_{Amax} = \max L_A(t) \Big|_0^T \quad (4)$$

O *nível de exposição sonora*, SEL, representa a intensidade e a duração de um som. Eventos sonoros individuais variantes no tempo, tais como sobrevôo de aeronaves, têm duas características principais: um nível sonoro que é modificado ao longo do evento e um período de tempo ao longo do qual o som é percebido. O SEL provê a medição do impacto do evento como um todo, porém não representa diretamente o nível sonoro que é ouvido em um instante de tempo qualquer. O SEL é calculado através da Eq. (5), na qual  $T_0=1s$ .

$$SEL = 10 \log_{10} \left[ \frac{1}{T_0} \int_0^T 10^{\frac{L_A(t)}{10}} dt \right] \quad (5)$$

O *tempo acima de um nível de ruído* (AT) é uma métrica que pode ser utilizada nas mesmas situações da métrica  $L_{Aeq}$ , com o objetivo de quantificar a exposição sonora em períodos de tempo específicos. A designação do limiar a ser utilizado pode ser definida em relação à interferência sonora ou ao nível de ruído ambiente.

### 2.2.2. Zoneamento Aeroportuário

Apesar dos esforços de entidades tais como a União Européia e das normas da OACI, a legislação que regulamenta a poluição sonora em torno de aeroportos ainda diverge entre países e até mesmo entre regiões de um mesmo país, o que pode causar desentendimentos entre os atores envolvidos. Nesse contexto, a utilização de métricas suplementares ganha importância como fator de adequação entre regulamentações distintas. Como exemplo, seja a legislação brasileira relativa à poluição sonora:

- Legislação aeronáutica: Portaria 1141 DG5 que utiliza a métrica DNL para definição do zoneamento aeroportuário.
- Resolução do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA), de 8 de Março de 1990, refere-se a norma NBR 10151, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), que utiliza a métrica  $L_{Aeq}$  para estudos de ruído e zoneamento.

Diversos trabalhos desenvolvidos pelo GERA abordam a adequação entre regulamentações de poluição sonora distintas (Revoredo e Slama, 2008; Slama et al., 2007 e Revoredo et al., 2007), especialmente com relação ao exemplo brasileiro.

Além da sensação de incômodo, o ruído aeroportuário produz muitos efeitos adversos dos quais os mais importantes são a interferência na comunicação durante o dia e o distúrbio do sono durante a noite. O ruído urbano produz efeitos semelhantes. Baseado nestas características, a regulamentação para zoneamento urbano adota critérios diferenciados para avaliar os ruídos diurno e noturno. A métrica geralmente adotada é o nível sonoro equivalente. Para que seja possível determinar o nível sonoro em um receptor utilizando esta métrica é necessário definir um período de avaliação o qual estará sujeito às características temporais do ruído considerado.

No Brasil, a regulamentação urbana para controle de poluição sonora utiliza os critérios apresentados na Tab. (1) para os períodos diurno e noturno.

**Tabela 1. Níveis de ruído permitidos conforme a NBR 10151.**

$L_{AeqDia}$	$L_{AeqNoite}$	Tipo de área
40	35	$A_{ext}$ – Fazendas
50	45	$A_2$ - Estritamente residencial urbana, hospitais ou
55	50	$A_3$ - Mista, predominantemente residencial
60	55	$A_4$ - Mista com vocação comercial ou administrativa
65	55	$A_5$ - Mista com vocação recreacional
70	60	$A_6$ - Predominantemente industrial

Devido às características não-estacionárias do ruído aeroportuário, caso deseje-se utilizar a regulamentação urbana e a métrica  $L_{Aeq}$  em regiões próximas a um aeroporto, convém que sejam considerados dois períodos diferenciados, a saber: Diurno ( $L_{AeqD}$ , de 7 às 22 horas) e noturno ( $L_{AeqN}$ , de 22 às 7 horas do dia seguinte). As Eq. (6) e (7) definem os níveis sonoros equivalentes calculados em um receptor crítico durante esses períodos.

$$L_{AeqD} = 10 \log_{10} \left[ \frac{1}{3600 \times 15} \int_{7am}^{10pm} 10^{\frac{L_A(t)}{10}} dt \right] \quad (6)$$

$$L_{AeqN} = 10 \log_{10} \left[ \frac{1}{3600 \times 9} \int_{7am}^{10pm} 10^{\frac{L_A(t)}{10}} dt \right] \quad (7)$$

É importante notar que, em uma localização próxima a um aeroporto, uma relação simples entre as métricas DNL,  $L_{AeqD}$  e  $L_{AeqN}$  existe. Esta relação é dada pela Eq. (8).

$$DNL = 10 \log_{10} \left[ \frac{1}{24} \left( 15 \times 10^{\frac{L_{AeqD}}{10}} + 90 \times 10^{\frac{L_{AeqN}}{10}} \right) \right] \quad (8)$$

Portanto, uma vez que os níveis de ruído de acordo com as métricas  $L_{AeqD}$  e  $L_{AeqN}$  sejam conhecidos, é possível calcular o nível DNL equivalente. Considerando os valores apresentados na Tab. (1) é possível determinar um nível de ruído em função da métrica DNL para cada tipo de área. Considerando que a legislação urbana para controle de poluição sonora é aplicável, têm-se os valores apresentados na Tab. (2).

**Tabela 2. Níveis de ruído equivalentes de acordo com a métrica DNL para os critérios da NBR 10151.**

$L_{AeqD}$	$L_{AeqN}$	DNL	Tipo de área
40	35	42,57	A <sub>ext</sub>
50	45	52,57	A <sub>2</sub>
55	50	57,57	A <sub>3</sub>
60	55	62,57	A <sub>4</sub>
65	55	65	A <sub>5</sub>
70	60	70	A <sub>6</sub>

Considerando os valores  $L_{AeqD} = 55\text{dB(A)}$  e  $L_{AeqN} = 50\text{dB(A)}$ , os quais são o critério segundo a NBR 10151 para áreas mistas, predominantemente residenciais, próximas a um aeroporto, obtém-se o valor DNL equivalente de 58dB(A). Uma vez que este tipo de área é a residencial mais ruidosa de acordo com a Tab. (1), é verificado que este valor é bem menor do que o utilizado pela legislação aeronáutica (65dB(A)).

Considerando o critério  $DNL \leq 58\text{dB(A)}$  para autorização da implantação de residências, espera-se que os critérios  $L_{AeqD} \leq 55\text{dB(A)}$  e  $L_{AeqN} \leq 50\text{dB(A)}$  sejam verificados. Entretanto, isso não necessariamente acontece, uma vez que a relação entre  $L_{AeqD}$  e DNL ao redor de um aeroporto depende da relação entre o número de movimentos (pousos ou decolagens de aeronaves) diurnos e noturnos no aeroporto (Revoredo e Slama, 2005).

A partir da amplitude acústica,  $\Delta$ , definida pela Eq. (9), é possível determinar uma nova relação entre DNL,  $L_{AeqD}$  e  $L_{AeqN}$ , tal como apresentado nas Eq. (10) e (11).

$$L_{AeqD} - L_{AeqN} = \Delta \quad (9)$$

$$L_{AeqD} = DNL - 10 \log_{10} \left[ 1 + 6 \times 10^{\frac{-\Delta}{10}} \right] + 2 \quad (10)$$

$$L_{AeqN} = DNL - 10 \log_{10} \left[ 6 + 10^{\frac{\Delta}{10}} \right] + 2 \quad (11)$$

A Tabela (3) mostra a relação entre as métricas para dois valores diferentes de  $\Delta$ . Os exemplos 1 e 2 apresentam casos práticos desta diferença, considerando valores relativos a dois aeroportos brasileiros.

**Tabela 3. Relação entre DNL,  $L_{AeqD}$  e  $L_{AeqN}$  para dois valores diferentes de  $\Delta$ .**

$\Delta$	$L_{AeqD}$	$L_{AeqN}$
0	DNL	DNL - 10
10	DNL + 6,4dB(A)	DNL + 6,4dB(A)

Exemplo 1: Aeroporto de Congonhas.

$$L_{AeqD} = DNL - 0,5\text{dB(A)} \therefore L_{AeqN} = DNL - 19,5\text{dB(A)} \Rightarrow \Delta = L_{AeqD} - L_{AeqN} = 19\text{dB(A)} \quad (12)$$

Portanto, um nível de ruído  $DNL = 58\text{dB(A)}$  corresponde a níveis de  $L_{AeqD} = 57,5$  e  $L_{AeqN} = 38,5$  dB(A). Neste caso a condição diurna  $L_{AeqD} \leq 55\text{dB(A)}$  não é verificada.

Exemplo 2: Aeroporto de Recife.

$$L_{AeqD} = DNL - 6,6\text{dB(A)} \therefore L_{AeqN} = DNL - 6,3\text{dB(A)} \Rightarrow \Delta = L_{AeqD} - L_{AeqN} = -0,3\text{dB(A)} \quad (13)$$

Portanto, um nível de ruído  $DNL = 58\text{dB(A)}$  corresponde a níveis de  $L_{AeqD} = 51,4$  e  $L_{AeqN} = 51,7$  dB(A). Neste caso a condição noturna  $L_{AeqN} \leq 50\text{dB(A)}$  não é verificada.

É verificado que a utilização do critério  $DNL \leq 58\text{dB(A)}$  pode levar a diferentes condições em aeroportos distintos. O fato de penalizar o ruído noturno em 10dB(A) não significa que as condições de utilização do solo são satisfeitas. A partir dos Exemplos 1 e 2 pode-se verificar que o nível  $DNL = 65\text{dB(A)}$  não é representativo do limite entre áreas residenciais e não residenciais. É importante que sejam reduzidos os níveis adotados atualmente no Brasil, através da Portaria 1141 GM5, de maneira a torná-los compatíveis com os níveis apresentados na NBR 10151.

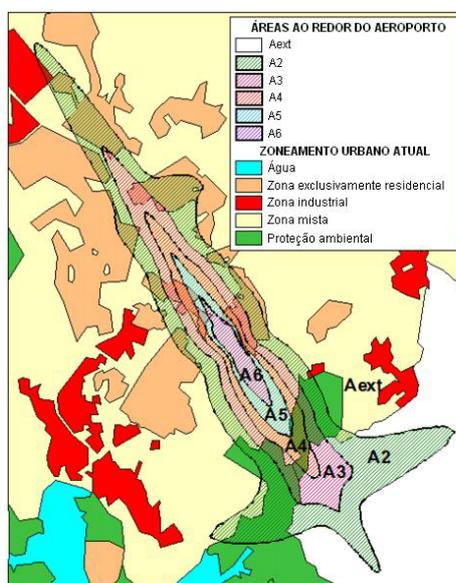
Para uma formulação mais geral, pode-se considerar os níveis de ruído apresentados na NBR 10151 e utilizar as métricas  $L_{AeqD}$  e  $L_{AeqN}$  para representar o nível sonoro equivalente durante o dia e a noite, respectivamente, de

maneira a desenvolver as condições lógicas necessárias para o interior de cada área, tal como exposto na Tab. (4).

**Tabela 4. Condições lógicas para o interior das áreas de acordo com os níveis de ruído da NBR 10151.**

$L_{AeqD}$	$L_{AeqN}$	Condição lógica	Tipo de área
40	35	$L_{AeqD} \leq 40\text{dB(A)}$ <b>E</b> $L_{AeqN} \leq 35\text{dB(A)}$	A <sub>ext</sub>
50	45	$L_{AeqD} \leq 50\text{dB(A)}$ <b>E</b> $L_{AeqN} \leq 45\text{dB(A)}$	A <sub>2</sub>
55	50	$L_{AeqD} \leq 55\text{dB(A)}$ <b>E</b> $L_{AeqN} \leq 50\text{dB(A)}$	A <sub>3</sub>
60	55	$L_{AeqD} \leq 60\text{dB(A)}$ <b>E</b> $L_{AeqN} \leq 55\text{dB(A)}$	A <sub>4</sub>
65	55	$L_{AeqD} \leq 65\text{dB(A)}$ <b>E</b> $L_{AeqN} \leq 55\text{dB(A)}$	A <sub>5</sub>
70	60	$L_{AeqD} \leq 70\text{dB(A)}$ <b>E</b> $L_{AeqN} \leq 60\text{dB(A)}$	A <sub>6</sub>

Dessa maneira é possível gerar condições lógicas para determinação das áreas permitidas para cada tipo de utilização do solo definido na Tab. (1). Essas áreas podem ser representadas como complementares a união das curvas de ruído  $L_{AeqD}$  e  $L_{AeqN}$  obtidas em simulações. A Fig. 4 apresenta um exemplo de aplicação desta metodologia ao aeroporto de Congonhas.



**Figura 4. Zoneamento atual e novas áreas determinadas em torno do aeroporto de Congonhas.**

### 2.3. Restrições de operação

A terceira direção de trabalho recomendada pela OACI para implementação da abordagem equilibrada diz respeito à utilização de restrições de operação nos aeroportos. Esse tipo de medida vem aumentando ao longo dos anos como resultado do aumento do número de reclamações das comunidades. Estudos indicam que o número de restrições associadas ao ruído em aeroportos ao redor do mundo vêm dobrando a cada década, desde 1970 (Antoine, 2004). As estimativas incluem restrições de horário e multas, dentre outros.

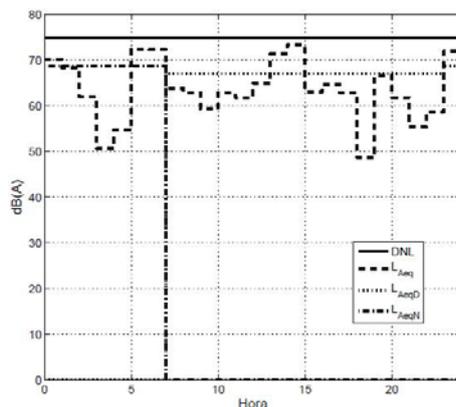
No Brasil, o exemplo mais famoso de aplicação de restrições operacionais em função dos conflitos entre comunidade e aeroporto diz respeito ao aeroporto de Congonhas. Construído em 1936, em uma região absolutamente desabitada que, com o passar das décadas, passou por grande adensamento populacional, o aeroporto, hoje, não opera vôos comerciais no período compreendido entre às 23h e 6h do dia seguinte, com o objetivo de amenizar o incômodo sonoro imposto a população vizinha.

Para que medidas de mitigação de ruído por intermédio de restrições operacionais de aeronaves sejam adotadas, é necessário que a avaliação do impacto ambiental em torno do aeroporto seja avaliada com relação a distribuição da movimentação ao longo do tempo, bem como a distribuição da utilização de rotas e procedimentos de pouso e decolagem específicos por tipo de aeronave.

Uma consideração importante para esta avaliação é a análise do ruído gerado em pontos específicos ao redor do aeroporto ao longo dos diferentes períodos do dia, com o objetivo de determinar em quais períodos o ruído é crítico. A evolução dos níveis de ruído nesses pontos, relacionada ao tipo de aeronaves e às rotas e procedimentos utilizados ao longo do período avaliado, auxiliam na análise do impacto sonoro produzido e fundamentam medidas de ordenamento e restrição operacionais.

Como exemplo, seja a Figura (6). Nesta são apresentados os níveis de ruído obtidos através de simulação em um ponto próximo ao aeroporto de Recife, devidos a operação de aeronaves em um determinado dia do ano. É possível notar a grande variação dos níveis de ruído obtidos através da métrica  $L_{Aeq}$  calculados de hora em hora, além da

grande diferença entre o nível encontrado utilizando as métricas DNL,  $L_{AeqD}$  e  $L_{AeqN}$ .



**Figura 6. Níveis de ruído durante o dia em uma localização próxima ao aeroporto de Recife.**

Além da análise acima citada, é também importante avaliar a contribuição que cada tipo de aeronave possui no ruído gerado pelo aeroporto, para que seja possível avaliar cenários de modificações na distribuição de movimentos tais como substituição de aeronaves por tipos menos ruidosos e modificação de horários de vôos. Para esse tipo de avaliação a realização de estudos de sensibilidade é de grande valia.

Os estudos de sensibilidade têm por objetivo estudar a variação de uma função objetiva em função de modificações em parâmetros do sistema. No caso do ruído aeroportuário, a função objetiva descreve o impacto do ruído sobre a população. Os parâmetros a serem considerados são os parâmetros aeroportuários significativos para a emissão sonora. Diversos trabalhos do GERA abordam a questão da análise de sensibilidade para aeroportos brasileiros de maneira introdutória (Quilliou et al., 2003; Revoredo e Slama, 2004 e Gama et al., 2008), apresentando a aplicação de metodologias simples para avaliação dos principais atores (aeronaves e rotas de pouso e decolagem) do cenário de ruído. Os resultados são apresentados em termos de qualidade do ambiente sonoro, a ser estabelecida como meta para a região do aeroporto.

### 2.3.1. Sistematização para Implementação da Abordagem Equilibrada

Embora os estudos de sensibilidade acima citados sejam excelentes ferramentas de apoio a gestão ambiental sonora em aeroportos urbanos, eles não levam em consideração questões importantes que possam efetivamente culminar na implantação de medidas de mitigação do ruído no aeroporto. A modificação do horário de um vôo da noite para o dia, por exemplo, não é uma ação pontual e deve considerar, dentre outros fatores, as reações em cadeia que serão sentidas em outros aeroportos. No exemplo em questão, é necessário que haja aeronave disponível para realização do vôo no novo horário, que o aeroporto possa recebê-la no horário proposto e que esta modificação não implique no horário de vôos em outros aeroportos que dependam desta aeronave. Além disso, a avaliação da viabilidade econômica da mudança também é fundamental, dentre outros fatores.

Portanto, toda e qualquer modificação proposta para melhoria no impacto ambiental sonoro do aeroporto que seja focada na modificação da organização e movimentação da frota de aeronaves, deve ser avaliada de maneira global, levando em consideração as reações em cadeia que podem gerar.

Em Mora-Camino et al. (2008), os autores apresentam uma metodologia para realização de estudos de sensibilidade baseada em ferramentas de otimização. A metodologia parte da modelagem do tráfego aéreo através da definição de parâmetros e variáveis associadas à estrutura do aeroporto e seu ambiente, tais como a quantidade e capacidade das pistas de pouso e decolagem; da frota de aeronaves que opera no aeroporto, tais como quantidade e tipo de aeronaves presentes no aeroporto que utilizam determinadas rotas de pouso e decolagem; e das restrições e níveis operacionais, tais como conservação de fluxo de aeronaves e capacidades de carga e passageiros do aeroporto; para que seja possível propor a minimização de uma função de custo associada ao ruído sob determinadas restrições.

O nível de ruído é caracterizado em função dos parâmetros acima citados e da densidade populacional ponderada em regiões em torno do aeroporto. A área afetada pode ser calculada por intermédio do software Integrated noise model (INM).

A proposta para minimização do ruído é baseada em equações de balanceamento que garantem a manutenção dos níveis operacionais (pousos, decolagens, passageiros e carga) oferecidos pelo aeroporto e a técnica de busca proposta é heurística, possuindo, pelo menos, duas grandes limitações citadas pelos autores, a saber:

- A solução encontrada pode estar distante de ser a melhor possível;
- O procedimento pode ser muito lento.

## 2.4. Procedimentos Operacionais

A quarta diretiva estabelecida pela abordagem equilibrada diz respeito à atuação nos procedimentos operacionais

do aeroporto. Os procedimentos operacionais para redução de ruído (NAPs) podem ser classificados em três grupos, a saber (ICAO, 2007):

- Procedimentos de voo para redução de ruído: Aproximação em descida contínua (CDA); Procedimentos de decolagem para redução de ruído (NADP); Modificação de ângulos de aproximação e deslocamento de ponto de toque; Procedimentos de aproximação com baixo arraste/baixa potência; Utilização mínima de empuxo reverso após o pouso.
- Gerenciamento espacial: Utilização de rotas de pouso e decolagem preferenciais; Dispersão ou concentração de rotas de pouso e decolagem; Utilização de pistas de pouso preferenciais.
- Gerenciamento do solo: Gerenciamento de testes de motores (orientação e localização da aeronave, hora do dia e limites máximos de empuxo); Gerenciamento de unidades de potência auxiliar (APU); Gerenciamento de taxejamento e filas de aeronaves; Reboque; Controle de potência durante taxejamento (taxejamento com menos do que todos os motores em funcionamento).

Dentre estes NAPs, os que mais têm sido abordados na literatura são os focados nos procedimentos de voo e rotas de pouso e decolagem para redução de ruído. De um modo geral, esses procedimentos são baseados na tentativa de evitar voos sobre áreas densamente populadas. Como exemplo, pode-se citar os procedimentos de decolagem NADP1 e NADP2 (ICAO, 2006), também conhecidos como NADPs próximo e distante, respectivamente, e o procedimento de pouso CDA. Os primeiros visam diminuir a exposição sonora em regiões próximas (NADP1) ou a uma certa distância (NADP2) do aeroporto sob determinadas rotas de decolagem e o segundo objetiva a manutenção da aeronave em maiores altitudes e com menor utilização de potência do motor durante o pouso se comparado a procedimentos convencionais. Um exemplo de estudos para diminuição do ruído gerado por aeronaves quando da realização de procedimentos de decolagem pode ser encontrado em SOURDINE-I (2000) e SOURDINE-II (2006) e uma análise da implementação de procedimentos operacionais para redução de ruído em aeroportos ao redor do mundo é encontrada em ICAO (2007). Outros exemplos de aplicação podem ser encontrados em Erkelens (1997) e business aviation association (2009).

### 3. CONCLUSÃO

O controle do ruído aeroportuário é um problema complexo tal como o ruído de transportes de um modo geral. Existem regulamentações para a certificação de aeronaves e para o zoneamento aeroportuário, entretanto, para que o controle do ruído aeroportuário seja eficaz, é necessário abordar o problema de uma forma multidisciplinar, na qual diversos atores são envolvidos na busca por uma solução adequada. Além dos requisitos de controle de ruído, requisitos de segurança e economia devem também ser buscados.

Embora as soluções devam considerar fatores globais tais como a influência que a modificação de um voo em um aeroporto possui em outro, deve-se ter em mente que a proposta de redução de ruído aeroportuário é fortemente dependente das condições locais de cada aeroporto e sua vizinhança. Estudos detalhados são necessários e a implementação das modificações eventualmente propostas dependem da cooperação dos atores envolvidos, tais como órgãos governamentais, fabricantes de aeronaves, administradores de aeroportos etc.

Neste trabalho apresentamos uma visão geral sobre as metodologias para diminuição do Ruído aeroportuário de acordo com a abordagem equilibrada proposta pela OACI. Alguns exemplos simples de aplicação foram apresentados focados nos resultados do Grupo de Estudos em Ruído Aeroportuário da COPPE. Muitos dos temas aqui abordados são assuntos correntes de pesquisa e desenvolvimento no GERA.

### 4. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq por seu suporte na realização deste trabalho.

### 5. REFERÊNCIAS

- Antoine, N. E. (2004), Aircraft optimization for minimal environmental impact, PhD thesis, Stanford university.
- business aviation association, N. (2009), 'Noise abatement program', internet.
- Casalino, D., Diozzi, F., Sannino, R. & Paonessa, A. (2008), 'Aircraft noise reduction technologies: A bibliographic review', Aerospace Science and Technology 12, 1–17.
- Connor, T. L. (2007), 'The search for more meaningful aircraft noise analysis in support of more effective airport planning', NOISE-CON.
- Crighton, D. (1975), 'Basic principle of aerodynamic noise generation', Prog. Aerospace Sci. 16(1), 31–96.
- Envia, E. (2002), 'Fan noise reduction: an overview', Aeroacoustics 1(1), 43–64.
- Erkelens, L. (1997), 'Research on noise abatement procedures', Aviation-2000 Prospects Symposium . EUROCONTROL (2009), '<http://www.eurocontrol.int>'.
- européen, P. (2002), 'Directive 2002/49/ce'. relative `a l'évaluation et à la gestion du bruit dans l'environnement.
- Fidell, S. (1999), 'Assessment of the effectiveness of aircraft noise regulation', Noise and Health 1(3), 17–23.
- Gama, A. P., Slama, J., Magina, R., Revoredo, T. C. & de Carvalho, L. A. (2008), 'Coeficientes de sensibilidade: Um instrumento de apoio à gestão ambiental sonora em aeroportos urbanos', proceedings of the VII SITRAER

- Hobbs, D. E., Neubert, R. J., Malmberg, E. W., Philbrick, D. H. & Spear, D. A. (1995), Low noise research fan stage design, Final contractor report, National Aeronautics and Space Administration - NASA.
- ICAO (1993), 'Annex 16 to the convention on international civil aviation', International standards and recommended practices - Environmental protection. Volume I - Aircraft noise - Third edition.
- ICAO (2006), 'The procedures for air navigation services: aircraft operations pans-ops'.
- ICAO (2007), 'Review of noise abatement procedure research & development and implementation results discussion of survey results', Technical report, International Civil Aviation Organization.
- Levesque, T. J. (2005), 'Modelling the effects of airport noise on residential housing markets', Journal of Transport Economics and Policy 28, 199–210.
- Lockard, D. P. & Lilley, G. M. (2004), The airframe noise reduction challenge, Technical memorandum, National Aeronautics and Space Administration - NASA.
- Mora-Camino, F., Slama, J., Chaibou, R. & Revoredo, T. (2008), 'Systematization of balanced approach for airport noise abatement through sensitivity analysis', Proceedings of the Internoise 2008 .
- Nelson, J. P. (2004), 'Meta-analysis of airport noise and hedonic property values: problems and prospects', Journal of Transport Economics and Policy 38, 1–28.
- Quilliou, T., Slama, J. G. & Revoredo, T. (2003), 'Airport noise sensitivity studies', Anais do DINCON 1, 1–6.
- Ren, L. (2007), Modeling and Managing Separation for Noise Abatement Arrival Procedures, PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology.
- Revoredo, T. C. & Slama, J. G. (2005), 'Metrics conversion in airport noise', Proceedings of the 18th international congress of mechanical engineering 1(1-4).
- Revoredo, T. C. & Slama, J. G. (2008), 'Noise metrics comparison and its use on urban zoning in airport surveys: A brazilian case study', Journal of Air Transport Management 14(6), 304–307.
- Revoredo, T. C., Slama, J. G., Magina, R. & Mora-Camino, F. (2007), 'Noise metrics and zoning around brazilian airports', Proceedings of the 19th International Congress of Mechanical Engineering .
- Revoredo, T. & Slama, J. (2004), 'Abordagens de controle linear e não-linear em estudos de sensibilidade em ruído aeroportuário: Caso do aeroporto de recife', proceedings of the DINCON 2004 .
- Schultz, T. J. (1978), 'Synthesis of social surveys on noise annoyance', The Journal of the Acoustical Society of America 64(377-405).
- Slama, J., Revoredo, T. & Neto, S. (2007), 'The strategies for the implementation of the balanced approach in airport noise control in developing countries.', Proceedings of the Internoise 2007 .
- SOURDINE-I (2000), Establishment of noise abatement solutions, Technical report, Work Package 3.
- SOURDINE-II (2006), Final report, Technical report, Work Package 9.
- US Department of Transportation, F. A. O. (n.d.), 'Faa order 1050.1e, chg. 1. environmental impacts: Policies and procedures'.
- van praag, B. M. S. & Baarsma, B. E. (2005), 'Using happiness surveys to value intangibles: the case of airport noise', The Economic Journal 115, 224–246.
- Wyle (n.d.), 'Noise basics and the effect of aviation noise on the environment', internet.

## 6. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

# METHODOLOGIES FOR THE IMPLEMENTATION OF THE BALANCED APPROACH FOR AIRPORT NOISE REDUCTION

Téo Cerqueira Revoredo, revoredo@ufrj.br<sup>1</sup>

Jules Ghislain Slama, juleslama@yahoo.com.br<sup>1</sup>

Felix Mora-Camino, moracamino@hotmail.fr<sup>2</sup>

<sup>1</sup>LAVI/PEM/COPPE/UFRJ, Centro de Tecnologia da UFRJ, Bloco G, sala 204, cep 21945-970, Rio de Janeiro, Brasil

<sup>2</sup>LARA-ENAC, 7 avenue E. Belin, 31055 Toulouse, França

**Abstract:** Airport noise control is a multidisciplinary issue on which several actions are possible. The International Civil Aviation Organization (ICAO), in its 33rd Assembly in October of 2001, defined a philosophy to approach airport noise intitled Balanced approach, which is composed by four main directives. In this paper we present the fundamental concepts found in the literature for the implementation of the balanced approach. In addition, we emphasize the work of the Airport Noise Study Group (GERA) of COPPE/UFRJ in the directions of land use management, operations restrictions and operational procedures focused in noise reduction, presenting methodologies proposition and some application examples to Brazilian airports.

**Keywords:** Balanced approach, airport noise, airport zoning