



ANÁLISE DA INCERTEZA NA MEDIÇÃO DOS NÍVEIS DE RUÍDO AERONÁUTICOS

Victor Cardoso e Silva Hecht

Projeto final submetido ao corpo docente do
Departamento de Engenharia Mecânica da
Escola Politécnica da Universidade Federal do
Rio de Janeiro como parte dos requisitos
necessários para a obtenção do grau de
Engenheiro Mecânico

Orientador: Jules Ghislain Slama

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

MARÇO de 2014

ANÁLISE DA INCERTEZA NA MEDIÇÃO DOS NÍVEIS DE RUÍDO
AERONÁUTICOS

Victor Cardoso e Silva Hecht

Projeto final submetido ao corpo docente do Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Mecânico.

Aprovado por:

Prof. Jules Ghislain Slama, Dsc. (Orientador)

Prof. Eduardo Ricardo Musafir, Dsc.

Prof. Antonio Carlos Marques Alvim, Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

MARÇO de 2014

Resumo do projeto de Graduação apresentação ao DEM/ UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Mecânico

ANÁLISE DA INCERTEZA NA MEDIÇÃO DOS NÍVEIS DE RUÍDO AERONÁUTICOS

Victor Cardoso e Silva Hecht

Março/ 2014

Orientador: Prof. Jules Ghislain Slama

Curso: Engenharia Mecânica

Este trabalho de conclusão de curso tem como finalidade dar contribuições à melhor identificação de eventos aeronáuticos, estudando a incerteza na medição dos níveis sonoros provocados pela chegadas e saídas de aeronaves no Aeroporto Internacional Tom Jobim, no Rio de Janeiro. Para isso, será utilizada a Norma ISO 20906, além do VIM (Vocabulário Internacional de Metrologia) para consulta ao longo do trabalho.

Abstract of Undergraduate Project presented to DEM/ UFRJ as a part of fulfillment of the requirements for the degree of Engineer

ANALYSIS OF THE UNCERTAINTY ON MEASURING AIRPLANE NOISE
LEVELS

Victor Cardoso e Silva Hecht

March/ 2014

Advisor: Jules Ghislain Slama

Course: Mechanical Engineering

This paper aims to contribute to better identifying airplane events, studying the uncertainty on measuring airplane noise levels caused by arrivals and departures on the Antonio Carlos Jobim International Airport, in Rio de Janeiro. It will use as a base the ISO 20906 and VIM (*Vocabulário Internacional de Metrologia*, International Metrology Vocabulary) throughout the paper

“A vontade para vencer, o desejo para ter sucesso, a necessidade para atingir seu potencial total... essas são as chaves que abrirão a porta da excelência pessoal”

Confúcio

Agradecimentos

A meus pais e familiares, por tornar esta caminhada possível.

A meus professores, pelo conhecimento e experiência transmitidos.

E um agradecimento especial à equipe do LAVI, entre eles, Prof. Jules Slama, Tarcilene Heleno e Filippe Lemos, por todo o auxílio e compreensão neste projeto de fim de curso.

Sumário:

Resumo

Glossário de termos

1. Introdução	1
2.1 Ruído aeroportuário	3
2.2 Exposição sonora	4
2.3 Nível de exposição sonora	4
2.4 Pressão eficaz	5
2.5 Nível sonoro equivalente	6
2.6 Nível sonoro equivalente máximo	7
2.7 Instrumentos de medição	7
2.7.1 Tipos de medidores de pressão sonora e suas incertezas	9
2.8 Incertezas	10
2.8.1 Método padrão para combinação de incertezas	11
2.9 Norma ISO 20906 (2009)	12
2.9.1 Identificação do evento sonoro	12
2.9.2 Classificação do som de uma aeronave	12
2.9.3 Identificação do evento sonoro	13
2.9.4 Cálculo do nível de exposição sonora para uma única aeronave	13
2.9.5 Contribuição dos instrumentos de medida	14
2.9.6 Contribuição devido ao ruído ambiente	14
2.9.7 Incerteza absoluta	15
2.9.8 Cálculo do SELaeronave	17
2.10 Sobreposição de ruídos	18
3 O Aeroporto e Aeronaves	20
3.1. O aeroporto	20
3.2. As aeronaves	22
3.2.1 Airbus A-320	22
3.2.2 Boeing 737	23

4 Metodologia	25
4.1 Seleção dos pontos de medição	25
4.2 Aquisição dos dados	26
4.3 Processamento dos dados	27
4.4 Obtendo as incertezas	29
5 Resultados	30
5.1 Ponto 1 – Laboratório Dr. Sérgio Franco	30
5.2 Ponto 2 – Alojamento	33
5.3 Ponto 3 – CIEP João Mangabeira	36
5.4 Comparações nos três pontos	39
6 Conclusão e considerações finais	40
9 Bibliografia	42
Anexo A – Resumo da norma ISO 20906	47
Anexo B – Procedimento de determinação da incerteza instrumental	51
Anexo C – Movimentos de decolagem e aterrisagem das aeronaves consideradas	53

Glossário de termos:

SEL	Nível de Exposição Sonora, relacionado a um evento ou conjunto de eventos
Lp	Nível de Pressão Sonora
LAeq	Nível de Pressão Sonora Equivalente, é o Lp equivalente em um período
LAmáx	Nível Máximo de Pressão Sonora, valor máximo do nível de pressão sonora
LRA	Nível de Pressão Sonora do Ruído Ambiente
δ_{sim}	contribuição do erro do instrumento no cálculo da incerteza
δ_{res}	contribuição do ruído ambiente no cálculo da incerteza
ΔLp	correção em SEL devido ao ruído ambiente (igual em valor a δ_{res})
Ponto 1	Laboratório Dr. Sérgio Franco, em Duque de Caxias
Ponto 2	Alojamento, na Cidade Universitária
Ponto 3	CIEP João Mangabeira, na Ilha do Governador
Erro	diferença entre o valor de uma medição e o valor verdadeiro da grandeza
Incerteza	grandeza que expressa quantitativamente a qualidade do resultado da medição
ISO 20906	norma relacionada à medição e caracterização de eventos sonoros aeronáuticos
A320	abreviação da Infraero para eventos relacionados à aeronave Airbus A320
B737	abreviação da Infraero para eventos relacionados à aeronave Boeing 737-700
Classe 1	classe mais precisa de instrumentos de medição de níveis sonoros
Classe 2	segunda classe mais precisa de instrumentos de medição de níveis sonoros
GERA	Grupo de Estudos em Ruídos Aeroportuários da UFRJ
SEL hora	métrica para o SEL total dentro da hora medida
SEL eventos	métrica para o SEL total dos eventos aeronáuticos na hora especificada
SELRA	métrica SEL do ruído ambiente no período considerado

1 Introdução

É notado nos últimos anos o acelerado crescimento do transporte aéreo nos países emergentes. Enquanto em mercados tradicionais, o número de passageiros transportados por avião no mundo cresceu em média 3,5% em 2013, em países da América Latina, África e Oriente Médio, este número sobe para 7,5% (Ipea, 2013).

A aviação civil brasileira começou em 1927, tendo sido estabelecidas ao longo dos anos empresas de diversos tamanhos e a atual agência reguladora do setor (Agência Nacional de Aviação Civil – ANAC). São realizadas hoje mais de 50 milhões de viagens por ano, com crescimento de 10% ao ano entre 2003 e 2008, incluindo novos nichos de passageiros (McKinsey, 2010). O transporte aéreo gera, atualmente, 1,2 milhões de empregos no setor.

Para viagens planejadas, a aquisição de passagens antecipadas tornam o avião o meio de transporte mais barato para viagens de longa distância no Brasil (Global Paths, 2014).

Com a realização dos eventos com projeção mundial, a Copa em 2014 e as Olimpíadas em 2016, as expectativas são de que esta atividade deva aumentar ainda mais nos próximos anos.

Junto aos grandes benefícios econômicos para as comunidades locais, a atividade aeroportuária traz consigo um ruído inerente, sendo este um passivo que, se não tratado e minorado, pode afetar, a longo prazo, a saúde destas populações.

O ruído é, em poucas palavras, um conjunto de sons que causa desconforto, sendo a exposição excessiva ao ruído danosa ao ser humano, afetando bastante a sua qualidade de vida.

Um dos recentes casos envolvendo altos níveis de ruído e o crescimento urbano desordenado foi o impasse na expansão das pistas de pouso e decolagem do Aeroporto de Guarulhos, no estado de São Paulo. Em 2002, com o projeto de implantação de uma terceira pista de pouso, seria necessária a expansão da área patrimonial do aeroporto, pois junto com a pista, seria expandida também a região dentro da qual não deveria haver ocupação residencial. Contudo, foi crescendo, ao longo dos anos, o loteamento nesta região, com a expansão de conjuntos habitacionais situados cada vez mais perto do aeroporto, inclusive dentro da nova zona não recomendada à atividade residencial. Após um impasse concluído apenas em 2008, decidiu-se pela não realocação das famílias dentro desta zona, e, por conseguinte, a não expansão do Aeroporto de Guarulhos. Com isso, o movimento excedente de pessoas e cargas

projetado para Guarulhos teve que ser realocado para o Aeroporto de Viracopos em Campinas, que recebeu investimentos necessários para tal fim (Duarte, [s.d.]).

É importante para qualquer medição ou estudo a delimitação da sua faixa de erro, e, se possível, o estreitamento desta mesma faixa. A exatidão e a precisão (número de algarismos significativos do valor medido) de um dado estarão sempre balizadas pela qualidade ou sofisticação do equipamento e a habilidade de quem realizou a medição, entre outros fatores.

Desse modo, é muito importante monitorar de modo justo e coerente a emissão de ruído em aeroportos para a correta tomada de decisões.

O trabalho que se segue tem como princípio, dar contribuições para determinar-se analiticamente e experimentalmente a incerteza na medição dos Níveis de Exposição Sonora das aeronaves Airbus A320 e Boeing 737-700 nos arredores do Aeroporto Internacional Tom Jobim (Gaelão). Com isso, poderemos localizar e caracterizar propriamente um evento aeronáutico nas imediações deste aeroporto.

Como já mencionado, por serem dois dos modelos de aeronaves mais utilizados na aviação comercial em todo o planeta, esta pesquisa poderia ser de grande utilidade não só no cenário doméstico quanto também no internacional.

Com essa pesquisa, o monitoramento de eventos aeronáuticos no Aeroporto do Galeão ficará mais preciso, contribuindo inevitavelmente para o sistema de aviação civil e para a sociedade brasileira.

Para fazer essa análise, se utilizará os conhecimentos sobre incertezas, nível de pressão sonora e exposição sonora apresentados na norma ISO 20906: *Acoustics – Unattended monitoring of aircraft sound in the vicinity of airports*, além dos conceitos de erro e incerteza de medição expostos no VIM (Vocabulário Internacional de Metrologia).

No capítulo 2 (Acústica e Incertezas), é apresentada uma fundamentação teórica e bibliográfica para o trabalho, fornecendo informações e conceitos essenciais para o seu entendimento. É tratado também neste capítulo os instrumentos de medição, sua descrição e incerteza associada.

O aeroporto e as aeronaves estudadas são apresentados no capítulo 3.

No capítulo 4, é descrita a metodologia utilizada, com método de coleta dos dados, escolha dos locais de medição e os procedimentos matemáticos utilizados neste estudo.

Já os resultados obtidos são apresentados no capítulo 5, sendo a conclusão deste estudo exposta no capítulo 6.

2 Acústica e incertezas

2.1 Ruído aeroportuário

O ruído decorrente das instalações (equipamentos alocados nos pátios) e operações de aeronaves em aeroportos é chamado de ruído aeroportuário (Infraero, 2013).

Esse ruído, quando não mascarado, pode influenciar negativamente as populações no entorno. Como exemplo, um dos grupos mais vulneráveis a este ruído são as crianças, que podem ter seu desempenho cognitivo comprometido, além de alterações no bem estar e baixa motivação (Nunes e Sattler, 2004).

A fim de analisar a influência desse ruído, são apresentados métodos de coletas de dados referentes a esse ruído, que posteriormente são analisadas através de determinados procedimentos. Um dos métodos mais comuns de analisar o impacto sonoro de um aeroporto é através da utilização de curvas de ruído, que representam limites geográficos de ruído para uma dada atividade, como ilustrado na Figura 2.1.

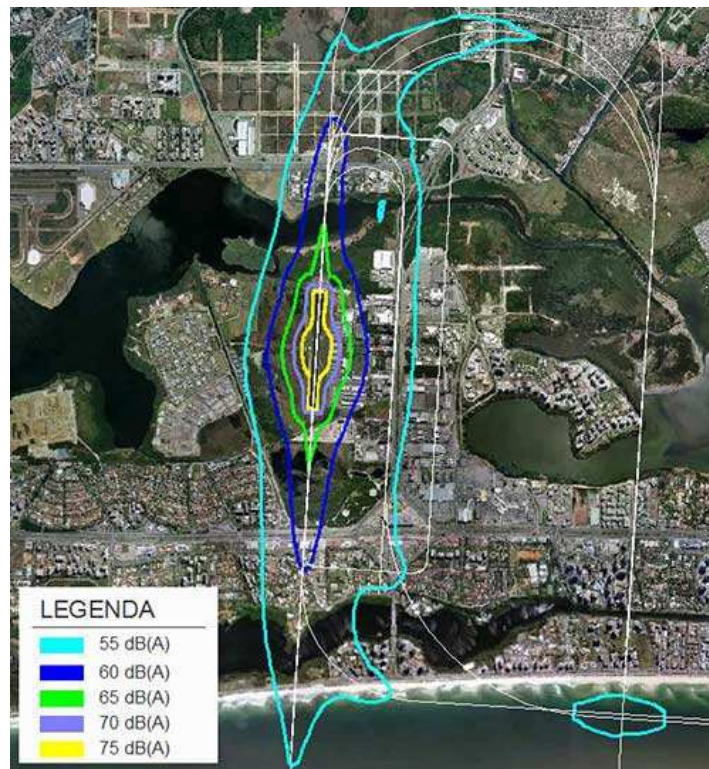


Figura 2.1 – Representação das curvas de ruído da pista de pouso de um aeroporto (GERA, 2014)

2.2 Exposição Sonora

Exposição sonora é uma métrica utilizada para caracterizar a “intensidade” de um evento sonoro (por exemplo, a passagem de aeronave ou de uma composição ferroviária). (Coelho e Ferreira, 2009)

O intervalo de tempo entre t_1 e t_2 (dois instantes distintos) é o período que contém o evento sonoro. A exposição sonora é a integral do quadrado da pressão sonora filtrada em A sobre o tempo de observação, como visto na equação 1:

$$ES(x, t_1, t_2) = \int_{t_1}^{t_2} p_A^2(x, t) dt, \quad (2.1)$$

Na equação (1), ES é a exposição sonora e $p_A(x, t)$ é a pressão sonora filtrada por um filtro tipo A. A unidade de exposição sonora é o PASQUES (Pascal SQUarred Second).

Utiliza-se $ES(x, T)$ quando se conhece o início e o final do período T considerado; e $ES(T)$ quando se conhece o ponto onde são efetuadas as medições e o início e o final do período T considerado.

2.3 Nível de Exposição Sonora (SEL)

O Nível de Exposição Sonora caracteriza a energia do evento sonoro. Ele pode ser entendido como a expressão logarítmica da “quantidade de ruído”, sendo o SEL a integral no tempo do quadrado da pressão sonora. Mesmo que muitas vezes ignorado e vagamente definido, ele é em grande parte dos casos, a métrica mais útil (Cirrus-Environmental, 2013).

Segundo a norma ISO 20906, o nível de exposição sonora (SEL ou NES) é dez vezes o logaritmo na base 10 da razão da exposição sonora ES, com relação à exposição sonora ES_0 , expresso em decibéis. A Exposição Sonora de referência ES_0 é $(20\mu Pa)^2 s = 4 \times 10^{-10} Pa^2 s$. ES_0 é a Exposição Sonora para período de referencia (t_0) de 1s e pressão de referência (p_0) de $20\mu Pa$.

$$SEL = 10 \log_{10} \left[\frac{ES}{t_0 p_0^2} \right] = 10 \log_{10} \left[\frac{ES}{ES_0} \right] 10 \log_{10} \left[\frac{1}{t_0 p_0^2} \int_t^{(t+T)} p_A^2(t) dt \right], \quad (2.2)$$

O SEL é a medida mais comum da energia cumulativa de um eventos sonora dentro de uma janela de tempo, segundo a FICAN (*Federal Interagency Committee on Aviation Noise*, 2014).

2.4 Pressão eficaz

As variáveis com interesse para a acústica têm variações temporais significativas, inclusive a pressão sonora. Desse modo, estas variáveis são normalmente calculadas pela medição de valores eficazes ou RMS (*root mean square*).

A pressão eficaz é, então, aquela que realmente nos interessa avaliar (também chamada de pressão RMS). Nos casos mais simples, quando se trata com sons puros senoidais, a pressão eficaz e a pressão máxima estão relacionadas da seguinte forma:

$$P_{eficaz} = \frac{P_{máximo}}{\sqrt{2}} \quad (2.3)$$

O som segue os padrões de um movimento ondulatório, e sua amplitude pode ser medida de diferentes formas.

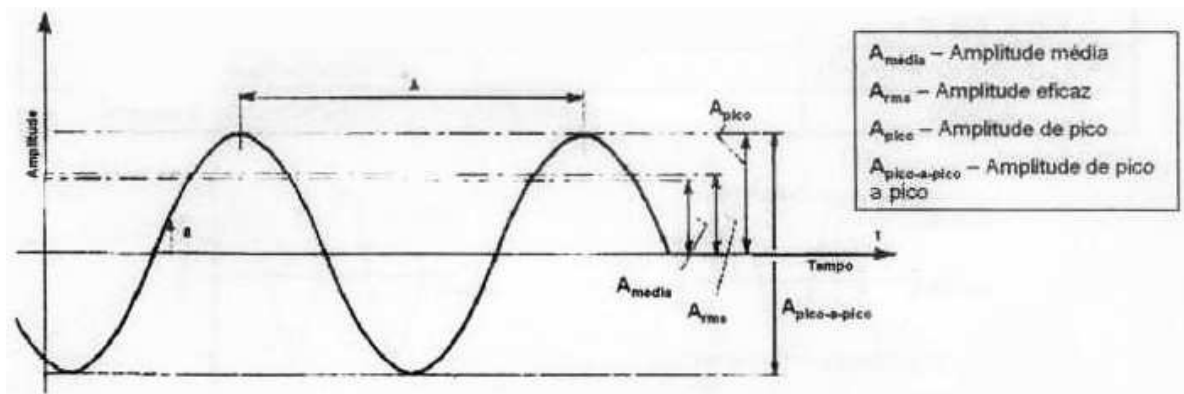


Figura 2.2 – Representação de movimentos ondulatórios senoidais (SpoundzoneMagazine, 2014)

A pressão eficaz permite determinar a intensidade média do ruído, num local determinado, sobre um indivíduo. O quadrado da pressão eficaz é definido matematicamente por:

$$p_{rms}^2(M, T_1, T_2) = \frac{1}{T_2 - T_1} \int_{T_1}^{T_2} p_A^2(t) dt, \quad (2.4)$$

Pode-se também relacionar a pressão sonora com a Exposição Sonora, o que por sua vez, nos dá uma relação entre a pressão eficaz e a pressão sonora. Isto é melhor visto nas equações (2.4) e (2.5):

$$p_{rms}^2(M, t_1, t_2) = \frac{1}{t_2 - t_1} ES(M, t_1, t_2), \quad (2.5)$$

O cálculo da pressão eficaz sobre curtos períodos é realizada nos medidores de pressão sonora para representar os níveis de pressão sonora Rápido -*Fast*- (T1-T2) = 0,125s e Lento -*Slow*- (T1-T2) = 1s. Neste trabalho, será utilizado o método Lento-*Slow* presente neste medidores de pressão sonora, ou seja, medição dos níveis de segundo a segundo.

2.5 Nível sonoro equivalente (LAeq)

O nível sonoro equivalente (LAeq) é a expressão logarítmica da média ponderada correspondente a exposição sonora no período de registro.

O LAeq, ou nível sonoro equivalente, largamente utilizado para se avaliar o incômodo causado pelo ruído ferroviário e rodoviário na Europa e no Brasil, foi criado a fim de se descrever apropriadamente o ruído ambiental, exprimindo a média da energia percebida por um indivíduo, em um determinado intervalo de tempo.

O nível sonoro equivalente é definido na fórmula (2.5):

$$L_{Aeq} = 10 \log_{10} \frac{P_{rms}^2(M, t_1, t_2)}{P_0^2}, \quad (2.6)$$

Existem medidores disponíveis comercialmente que fornecem uma leitura direta do LAeq, em intervalos de livre escolha do operador. Nesses medidores, o mesmo resultado da equação (2.6) é calculado numericamente. O procedimento consiste em fazer N leituras de níveis sonoros em intervalos de tempo iguais, como visto na equação (2.7):

$$LAeq(T) = 10 \log_{10} \frac{1}{T} \sum_{i=1}^N \Delta t_i \times 10^{\left(\frac{LAeq(\Delta t_i)}{10}\right)} (dBA) \quad (2.7)$$

Na figura acima, LAeq,Δti é o nível sonoro equivalente do período Δti considerado, T é o período total de medição, e LAeq(T) é o nível sonoro equivalente desse período total de medição.

O LAeq é uma métrica utilizada por diversas normas e legislações relativas à exposição a ruído. O LAeq é uma medida questionável para avaliar a perturbação causada por ruídos impulsivos de curta duração, pois a energia contida nos “impulsos” dilui-se nas partes “silenciosas” do registro quando do cálculo do nível médio temporal. Apesar disso, o LAeq tem sido bem aceito para avaliação de ruídos não-estacionários (BISTAFA, 2006).

A relação entre o Nível de Exposição Sonora e o Nível Sonoro Equivalente é mostrada na Equação (2.8), onde T é o período de registro considerado.

$$SEL = L_{Aeq} + 10 \log_{10} \frac{T}{T_0}, \quad (2.8)$$

O desenvolvimento desta equação leva a uma formulação mais simples para a obtenção do LAeq, vista na Equação (2.9).

$$L_{Aeq} = 10 \log_{10} \left[\frac{P_{A_{rms}}^2}{P_0^2} \right], \quad (2.9)$$

A fórmula para o nível de pressão sonora (representado por SPL ou Lp) encontra-se na equação 2.10, e ela refere-se ao nível de pressão sonora dentro da mínima janela de integração (*Fast* = 0,125s; *Slow* = 1s). A sua diferença em relação ao LAeq é que este último é o nível de pressão sonora equivalente dentro de um período considerado, seja este período 1s ou 500s, sendo esta métrica a média ponderada dos níveis no período considerado, como visto na equação 2.10.

$$Lp = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{rms}^2}{P_{ref}^2} \right) = 20 \log_{10} \left(\frac{P_{rms}}{P_{ref}} \right) dB \quad (2.10)$$

2.6 Nível sonoro equivalente máximo (LAmax)

Como presenciado em muitas medições, os níveis sonoros variam bastante com o tempo. Por exemplo, o ruído aumenta à medida que as aeronaves se aproximam do ponto de medição do ruído, e este mesmo ruído diminui e se difunde no ruído ambiente à medida que a aeronave se distancia.

2.7 Instrumentos de medição

O instrumento utilizado é o medidor de pressão sonora, comumente empregado em estudos de poluição sonora para a quantificação de diferentes tipos de ruído, principalmente industrial, ambiental e de aeronaves. O padrão internacional de especificação e caracterização desse tipo de instrumento é IEC 61672-1:2013.



Figura 2.3 – Exemplo de instrumento de medição de pressão sonora, sendo este especificamente fabricado pela empresa Cirrus Research (Wikipedia, 2014))

Nos medidores de pressão sonora, o microfone transforma pressão mecânica em sinal elétrico, que é, em seguida, processado pelo aparelho. Dentro dos medidores, o sinal pode ser integrado por dois modos: *Fast* (rápido), com tempo de integração de 125ms; ou *Slow* (lento), com tempo de 1s. Cada modo tem as suas vantagens e desvantagens, relacionadas à necessidade de uso da janela de tempo correspondente. O modo *Fast* fornece uma representação mais coerente com as reais flutuações do sinal, por exemplo. Alguns medidores de maior qualidade possuem também o modo *Impulse*, adequado para medições de sinais impulsivos, como disparo de arma de fogo.

Além da integração no tempo, também chamada de ponderação no tempo, os medidores oferecem ponderação da curva na frequência. Todos os medidores de pressão sonora contém o filtro de ponderação A, e muitos também contém o filtro de ponderação C.

O filtro de ponderação A é comumente utilizado para destacar frequências na faixa de 3 a 6 kHz, onde o ouvido humano é mais sensível, enquanto suprime frequências muito altas ou muito baixas, imperceptíveis para o ouvido. O objetivo é garantir que o volume medido corresponda à percepção humana.

Enquanto o filtro em A é usado para sons mais “silenciosos”, os filtros de ponderação B e C são utilizados para sons mais “barulhentos”, e os filtros em D, usados para registrar ruídos em aeronaves com grande nível de ruído, como as militares. Como visto na Figura 2.4, o ganho da curva A acontece na faixa entre 1 kHz e 10 kHz.

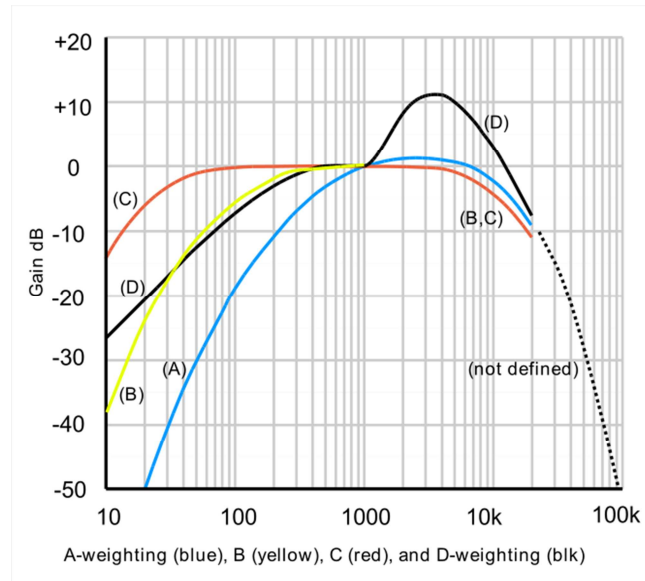


Figura 2.4 – Curvas de ponderação do sinal na frequência: curvas A, B, C e D (Wikipedia, 2014)

O filtro C é utilizado para medir picos de nível de ruído de acordo com algumas legislações. O B, um meio-termo entre os filtros A e C, não tem praticamente nenhum valor, e portanto, quase nunca é usado. Já o filtro D era antigamente usado com aeronaves de grande potência, como o Concorde, mas, com o tempo, passou a servir apenas a medições de aeronaves militares. Para medições com aeronaves civis, filtros em A são obrigatórios, segundo padrões da ISO (*International Standards Organizations*) e ICAO (*International Civil Aviation Organization*).

Quando medidos no filtro A, os decibéis recebem a abreviação dB(A) ou simplesmente dBA. Este tipo de filtro é largamente utilizado para medições de som ambiente, sendo padrão em muitos instrumentos, além de ser bastante empregado em medições de potencial dano auditivo causado por ruído excessivo.

Nas medições, geralmente é usado o LAeq (ou LAT, como também é chamado), o nível médio equivalente de pressão sonora para aquela janela de tempo. Se utilizarmos o modo de medição *Fast*, o resultado será a média ponderada dentro dos 125ms, ou seja, o LAeq deste período de 125ms. Se utilizarmos o modo *Slow*, o resultado será o nível médio para aquele 1s. O SEL não é uma métrica muito utilizada nestes aparelhos.

2.7.1 Tipos de medidores de pressão sonora e suas incertezas

Os medidores de pressão sonora usuais são divididos pela IEC (*International Electrotechnical Commission*) basicamente em duas classes, nas quais os aparelhos possuem a

mesma funcionalidade, porém tolerâncias (representadas pelas faixas de erro) diferentes. Instrumentos de Classe 1 possuem uma faixa de frequências de trabalho maior e uma tolerância mais estreita que os instrumentos de Classe 2, que são, por sua vez, menos custosos. Para muitas medições, não existe tanta necessidade do uso de aparelhos de Classe 1, que encontram melhor aplicação em atividades de pesquisa ou de aplicação de medidas legais.

Vale ressaltar que a *American National Standards Institute* (ANSI) também tem seus padrões de medidores de pressão sonora, divididos em Tipos 0,1 e 2. O Tipo 0 é usado em pesquisas de laboratório, o Tipo 1 em medições em campo com alta precisão, e o Tipo 2 para medições gerais. Por comodidade, diz-se que a exatidão dos instrumentos Tipo 2 é de $\pm 2\text{dBA}$, enquanto para os de Tipo 1, essa exatidão é de $\pm 1\text{dBA}$. Contudo, costuma-se usar a convenção de que instrumentos de Classe 1(IEC) e Tipo 1(ANSI) possuem características equivalentes ou semelhantes, valendo a mesma convenção entre os de Classe 2 e Tipo 2 (Solutions, 2014).

Os medidores de pressão são hoje instrumentos digitais e, assim como todo aparelho digital, apresentam um erro associado. Com instrumentos analógicos, sabemos calcular facilmente sua incerteza, que consiste na metade da menor divisão da escala. Já com aparelhos digitais, estamos lidando com um instrumento formado por componentes eletrônicos, que possuem uma imperfeição associada. Desse modo, cada medidor digital possui uma insegurança da indicação do aparelho, que exprime o máximo desvio das indicações desse instrumento em relação à grandeza medida, sendo esse máximo desvio geralmente representado em porcentagem do fundo de escala, ou seja, uma porcentagem da máxima indicação que esse aparelho pode atingir.

2.8 Incertezas

A exatidão de qualquer medição pode ser afetado por diversos tipos de erros ou incertezas. Os componentes da incerteza podem ser classificados como aleatórios ou sistemáticos. Ao fazer uma série de medições repetidas, o efeito é sempre produzir valores aleatórios ao redor de um valor médio. Ao contrário, componentes sistemáticos de incerteza fazem o valor medido sempre ser maior ou menor que seu real valor (LIMA JÚNIOR, 2011).

A incerteza de medição é classificada como um intervalo de confiança em torno do valor medido, onde é mais provável de seu valor verdadeiro ser encontrado. Associado à incerteza de medição está também o nível de confiança relacionado à medição, isto é, a

probabilidade de o real valor se encontrar dentro deste intervalo de medição. Sendo assim, incertezas de medição geralmente são feitas com um nível de confiança estatístico de 95%.

Possíveis fontes de incerteza na medição de ruído aeronáutico são, além da instrumentação, variações na fonte, no caminho de propagação, variações de temperatura, entre outros.

Diferenciando a incerteza de erro, este último é a diferença entre o valor obtido em uma medição e o valor verdadeiro da grandeza medida. Pressupõe-se que ao mensurando pode ser atribuído um valor verdadeiro bem definido. Contudo, em alguns casos, não existe um valor verdadeiro ou não é possível obtê-lo.

Já a incerteza é uma grandeza que expressa quantitativamente a qualidade do resultado da medição, caracterizando os valores que são atribuídos ao mensurando.

De acordo com o VIM (Vocabulário Internacional de Metrologia, 2012):

- Erro de medição: Diferença entre um valor medido de uma grandeza e um valor de referência para esta mesma grandeza (VIM, 2.16 [3.10])
- Incerteza de medição: Parâmetro não negativo que caracteriza a dispersão dos valores atribuídos a uma mensuranda, com base nas informações utilizadas (VIM, 2.26 [3.9])

No presente estudo, são considerados apenas a influência do instrumento e do ruído ambiente no cálculo das incertezas.

2.8.1 Método padrão para combinação de incertezas

O método mais aceito para o cálculo de incertezas combinadas é a ISO *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*, (2008). Segundo esta norma, todos os fatores que podem afetar no valor final da medição são listados, combinando-se depois suas incertezas individuais, a fim de se obter a incerteza geral.

Assim, será utilizado o cálculo da incerteza combinada expandida, o método mais completo e difundido. Sua fórmula é apresentada na equação (2.11) abaixo, onde U é a incerteza absoluta, c_i é o coeficiente de sensibilidade, δ_i é o erro da variável estudada, e k é o coeficiente de confiabilidade (geralmente k=2, isto é, uma confiança de 95%)

$$U = \sqrt{\sum_i \left(c_i \times \frac{\delta_i}{k} \right)^2} \times k \quad (2.11)$$

2.9 Norma ISO 20906 (2009)

A Norma ISO 20906: *Acoustics – Unattended monitoring of aircraft sound in the vicinity of airport (2009)* é um padrão internacional confiável para medição de ruído de aeronaves.

Esta norma descreve um sistema confiável de reconhecimento de um evento sonoro em uma situação sonora complexa com múltiplas aeronaves e outras fontes de ruído.

São fornecidos também outros critérios na separação dos eventos sonoros de aeronaves. Tais métodos incluem localização das aeronaves por radar, informações das torres de comando dos aeroportos, entre outros.

Uma descrição resumida da norma encontra-se no Anexo A.

2.9.1 Detecção do evento sonoro

Por essa norma, a detecção de um evento sonoro se dá da seguinte forma:

- a) Quando o som não é constante (mas também não é impulsivo) e tem limites de duração entre dois instantes de tempo;
- b) O nível sonoro excede um nível básico em uma quantidade mínima;
- c) Quando o evento termina, o nível sonoro não sobe novamente acima de um nível específico dentro de um intervalo específico de tempo.

2.9.2 Classificação do som de uma aeronave

Nem todo evento sonoro detectado está relacionado a uma aeronave. Uma classificação primária baseada nas propriedades acústicas pode ajudar a separar eventos sonoros relacionados a aeronaves dos não-relacionados a aeronaves.

Para a classificação de um evento relacionado a aeronaves, deve-se seguir os seguintes critérios, segundo a ISO 20906 (2009):

- a) Conhecimento prévio do espectro de velocidade sonora e da distância do microfone à aeronave, sendo assim, da típica duração do evento sonoro;
- b) Típica relação entre o máximo nível de pressão sonora (L_{Amax}) e o nível de exposição sonora (SEL);
- c) Informações do espectro;
- d) Escutar o som gravado durante o evento sonoro.

2.9.3 Identificação do evento sonoro

Se dados não-acústicos da aeronave estiverem disponíveis, como: informação do número do voo, tipos de aeronaves, rotas de voo; informações de posicionamento da aeronave, então o som gravado para uma aeronave pode ser checado e confirmado depois, a fim de constatar se ele foi mesmo produzido por uma aeronave, de acordo com boletins das torres de controle de aeroportos locais;

Assim, geralmente em um evento sonoro aeronáutico, o nível de pressão sonora vai aumentando conforme a aeronave se aproxima do local de medição, e reduzindo conforme a aeronave se distancia.

Na Figura 2.5 é representado o espectro de pressão sonora quando da passagem de uma aeronave. Geralmente os eventos aeronáuticos costumam durar de 30 a 40 segundos ($t_{passagem}$). É também comum representar nestes espectros o tempo de decaimento de 10dB em relação ao nível máximo de pressão sonora (L_{Amax}), sendo este tempo representado por t_{10} .

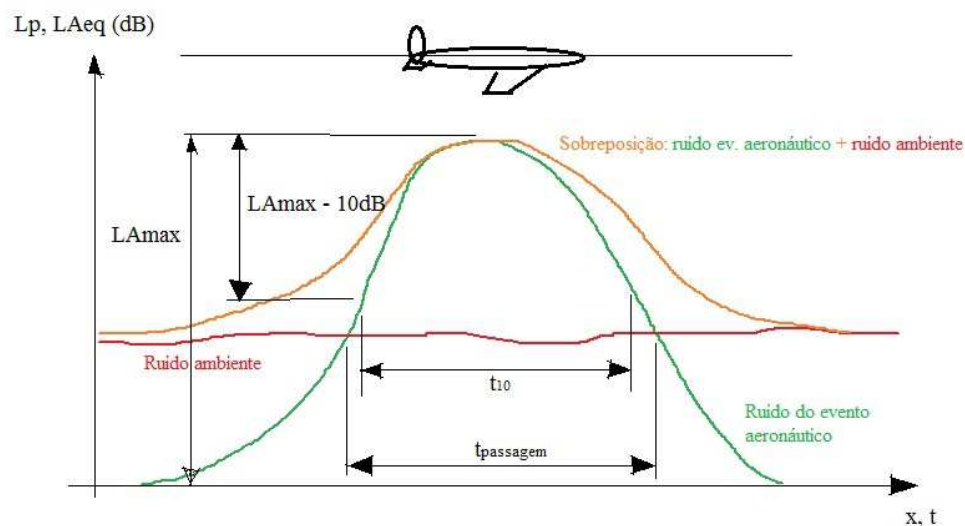


Figura 2.5 – Histórico de passagem de uma aeronave no tempo

2.9.4 Cálculo do nível de exposição sonora para uma única aeronave

Pela norma ISO 20906, o valor real do SEL é expresso como uma função de três fatores, ou seja:

$$SEL_{real} = f(SEL_{medido}, \delta_{sim}, \delta_{res}) \quad (2.12)$$

onde:

- SEL_{medido} é o nível de exposição sonora para um evento individual;
- δ_{sim} é o erro do medidor;
- $\delta_{residual}$ é o erro do nível de ruído ambiente;

Essa expressão acima indica que o valor real do SEL depende, além dos valores medidos de SEL, da contribuição do erro devido ao ruído ambiente e da incerteza do instrumento.

2.9.5 Contribuições dos instrumentos de medida

Foram utilizados dois tipos de medidores de nível de pressão sonora: um de Classe 1 (ou Tipo 1) e dois de Classe 2 (ou Tipo 2). Para o medidor de Classe 1, a incerteza do instrumento é de $\pm 0,86$ dB, enquanto que, para o de Classe 2, esta incerteza é de $\pm 1,4$ dB.

No Anexo B, são explicados os parâmetros necessários para a determinação da incerteza do instrumento de Classe 1. Para a incerteza do equipamento de classe 2, toma-se como referência o equipamento DT-8852 Precision Data Logging Sound Level Meter, vendido pela empresa ATP Instrumentation, do Reino Unido. Este equipamento é de Classe 2, e possui precisão de $\pm 1,4$ dB (ATP-Instrumentation, 2014).

2.9.6 Contribuição devido ao ruído ambiente

O ruído ambiente, que está presente durante um evento com aeronave, é incluído na medição e produz um aumento no nível de ΔLp em relação ao nível de pressão sonora referente unicamente ao evento. Seu cálculo é representado na equação (2.9), onde Lp_{evento} é o nível LAeq (de segundo a segundo) medido pelo instrumento, LRA, o nível LAeq referente ao ruído ambiente naquela hora.

$$\Delta Lp = -10 \log \left[1 - 10^{-0,1(Lp_{evento} - LRA)} \right] dB \quad (2.13)$$

Em muitas medições padrão, recomenda-se instalar os instrumentos de medição apenas em locais onde a aeronave produz o nível máximo de pressão sonora com no mínimo

15dB acima no nível de ruído ambiente. Desse modo, são minimizadas as incertezas causadas pelo ruído ambiente, sendo, contudo, difícil seguir sempre essa recomendação fielmente.

Na tabela 2.1, são mostrados exemplos de diferenças entre o LAeq (medido) do evento e o LRA, e o respectivo ΔLp causado por esta diferença, com base na fórmula (2.9).

Tabela 2.1 – Diferenças de Nível de Pressão Sonora Equivalente entre o evento e o ruído ambiente e o respectivo ΔLp (ISO 20906)

LAeq – LRA	ΔLp
15	0,1
10	0,5
6	1,3

E vale lembrar que a fórmula acima apenas se aplica para determinados valores de LAeq. O valor LAeq deve ser maior que o LRA, e a diferença entre os dois deve ser maior que 3dB. Abaixo desse valor, o cálculo se torna incerto e os valores de ΔLp não-confiáveis.

Assim, o ΔLp encontrado será a o erro devido ao ruído ambiente (δ_{res} , de $\delta_{residual}$, do inglês *residual sound*, a nomenclatura para “ruído ambiente”).

2.9.7 Incerteza absoluta

A incerteza absoluta para o SEL dos eventos é obtida através da equação (2.14) abaixo:

$$U(SEL) = \sqrt{\left(\frac{\partial SEL}{\partial sim} \times \frac{\delta sim}{k}\right)^2 + \left(\frac{\partial SEL}{\partial res} \times \frac{\delta res}{k}\right)^2} \times k \quad (2.14)$$

Como já discutido, a incerteza depende, além dos erros referentes ao instrumento e ao ruído ambiente, também dos coeficientes de sensibilidade (ci) e confiabilidade (k). O coeficiente de confiabilidade (k) tem como referência uma distribuição normal com 95% de confiabilidade, segundo a ISO 20906.

Os coeficientes de sensibilidade são uma medida de quanto o nível de exposição sonora é afetado pelo instrumento de medição e pelo ruído ambiente. Matematicamente, esses coeficientes são iguais à derivada parcial da função SEL com respeito a esses fatores, como visto na equação (2.14). Nela são descritos os dois coeficientes de sensibilidade utilizados:

- Do instrumento: mede quanto o nível de exposição sonora (SEL) é afetado pelo instrumento. Será representado pela notação $(\partial SEL / \partial sim)$;

- Do som ambiente: mede o quanto o nível de exposição sonora é afetado pelo ruído ambiente. Será representado pela notação $(\partial SEL / \partial res)$.

Coefficiente de Sensibilidade do Instrumento (csim):

A fim de se determinar o coeficiente de sensibilidade referente ao instrumento $(\partial SEL / \partial sim)$, utiliza-se a equação (2.8) ($SEL = L_{Aeq} + 10 \log_{10} \frac{T}{T_0}$). Como o fator medido pelo instrumento é o nível de pressão sonora (LAeq de segundo a segundo), toma-se, neste estudo, que a única influência sobre o SEL é o LAeq registrado pelo medidor. Como, a derivado do SEL em relação ao LAeq é unitário, e, com base na equação (2.8), o coeficiente de sensibilidade $(\partial SEL / \partial sim)$, que registra a influência do instrumento sobre o SEL é também unitário.

Coefficiente de Sensibilidade do Ruído Ambiente (cres):

Para calcular o coeficiente de sensibilidade do ruído ambiente (cres), toma-se como base a equação (2.14) abaixo:

$$SEL_{hora} = SEL_{eventos} \oplus SEL_{RA} \quad (\text{Soma logarítmica}) \quad (2.15)$$

O SEL da hora é calculado pela equação (2.15), e é, desse modo, dependente da grandeza LAeq (nível sonoro equivalente na hora).

$$SEL_{hora} = 10 \log_{10} \left(\sum_1^{3600} 10^{\left(\frac{LAeq}{10}\right)} \right) = 10 \log_{10} \left(3600 \times 10^{\left(\frac{LAeq}{10}\right)} \right) \quad (2.16)$$

A derivada parcial $(\partial SEL_{hora} / \partial LAeq)$ pode ser obtida com o auxílio da equação (2.17), que expressa a derivada de uma função logarítmica (Stewart, 2006).

$$\frac{d}{dx} (\log_a x) = \frac{1}{x \ln a} \quad (2.17)$$

Seu desenvolvimento mostra que esta derivada é praticamente nula, já que o valor de LAeq não costuma passar de 70dB. Isto é melhor visualizado na equação (2.16) abaixo. Com

isso, o termo $(\partial SE_{Leventos} / \partial SEL_{hora})$ também é nulo, e, portanto, não exerce influência no SEL dos eventos.

$$\frac{\partial SEL_{hora}}{\partial LAeq} = 10 \times \frac{1}{(3600 \times 10^{\frac{LAeq}{10}}) \times \ln 10} \times \frac{LAeq}{10} \times \left(10^{\left(\frac{LAeq}{10} - 1 \right)} \right) \approx 0 \quad (2.16)$$

Voltando-se, para o SEL do ruído ambiente (SELRA), este é calculado com o mesmo princípio da equação (2.8), resultando na equação (2.17). Nesta equação, TRA é o tempo de presença do ruído ambiente, ou seja, é o período dentro da hora, no qual não ocorre eventos aeronáuticos.

$$SELRA = LRA + 10 \log_{10} TRA \quad (2.17)$$

Também aqui, só o LRA exerce influência sobre o SELRA, e, portanto, a derivada do SELeventos em relação ao LRA é unitária.

Na tabela 2.2, vê-se a “construção” dos componentes necessários para o cálculo da incerteza combinada.

Tabela 2.2 – Cálculos de incerteza combinada para determinação do nível de exposição sonora

Item	Estimado (dB)	Incerteza padrão uij (dB)	Distribuição de probabilidade	Coefficiente de sensibilidade ci	Contribuição da incerteza ciui (dB)
SEL	SELmedido		normal	1	
δ_{sim}	0	0,86/2	normal	1	0,86/2
$\delta_{residual}$	0	$\Delta L_p/2$	normal	1	$\Delta L_p/2$

2.9.8 Cálculo do SELaeronave

Uma vez com o SELevento (o SEL do evento considerado) e o SELRA (SEL do ruído ambiente no período do evento), pode-se encontrar o SELaeronave (SEL referente apenas ao ruído da aeronave) através da diferença logarítmica entre os dois primeiros termos (SELeventos e SELRA), como visto na Figura 2.8.1 e na equação (2.24) abaixo.

$$SE_{Levento} = SEL_{aeronave} \oplus SELRA \quad (2.17)$$

Após medir, segundo a segundo, os $L_{Aeq}(t)$, e realizar os procedimentos para obtenção do SEL do evento aeronáutico (SEL_{evento}) e do SELRA, é possível o cálculo do SEL referente apenas ao ruído da aeronave ($SEL_{aeronave}$). Este procedimento é feito da seguinte maneira:

- Considerando um período de passagem da aeronave de 40 segundos, o SEL total do evento é:

$$SEL_{evento} = 10 \log_{10} \left(\sum_1^{40} \left(10^{\left(\frac{L_{Aeq}}{10} \right)} \right) \right) \quad (2.18)$$

- Tendo previamente calculado o LRA (nível de ruído ambiente da hora na qual o evento se encontra), o SELRA durante o evento, ou seja, durante estes 40 segundos é:

$$SELRA = LRA + 10 \log_{10}(TRA) = LRA + 10 \log_{10}(40) \quad (2.19)$$

- Assim, o $SEL_{aeronave}$ é encontrado através da operação logarítmica descrita na equação (2.24).

Utilizando valores numéricos usuais em eventos aeronáuticos:

Tabela 2.3 – Exemplo do cálculo do $SEL_{aeronave}$ com valores numéricos

SEL_{evento}	LRA(hora)	SELRA(40s)	SEL_{aero}(40s)
98,3	57,2	73,2	98,3

Embora sejam numericamente iguais, como visto na Tabela 2.3 deve-se lembrar que o SEL_{evento} e o $SEL_{aeronave}$ representam níveis sonoros diferentes.

Vale frisar também que, nos cálculos das equações (2.17), (2.18) e (2.19), também está envolvida uma propagação de erros. Entretanto, a fim de simplificar o cálculo de incertezas, não irá se considerar tais erros neste estudo.

2.10 Sobreposição de ruídos

Outro ponto importante quando se trata com as métricas relacionadas a eventos sonoros é que muitos dos cálculos empregados não são lineares, e sim, logarítmicos.

Em operações logarítmicas, somar dois níveis com o mesmo valor (em decibéis), por exemplo, produzirá um terceiro nível com 3 decibéis a mais que o valor dos níveis originais.

Assim, deve-se atentar ao fato de que, se, ao sobrepor ruídos, o nível resultante for 3dB maior que o nível mais elevado da soma, esta será uma operação entre dois níveis de mesma intensidade. Isto acarreta que, pode-se, assim, não estar caracterizando corretamente um ruído, já que esta incerteza estaria em uma “faixa nebulosa” onde poderia (ou não) haver a presença de outros ruídos associados.

É esperado que, ao lidar com os valores de pico de passagem de uma aeronave, não haja a interferência, a sobreposição do ruído ambiente, já que este é muito menor que os valores de pico.

Considerando que os picos são os locais onde haverá a menor possibilidade de superposição entre o ruído da aeronave e o ruído ambiente, a incerteza envolvida na medição terá maior efeito nas “extremidades” do evento aeronáutico, ou seja, no seu começo e no seu fim. Nessas áreas do espectro, o ruído do evento ainda é baixo e por isso, há maior possibilidade de superposição entre este e o ruído ambiente. Desse modo, é necessário que se tenha incertezas baixas, de modo a caracterizar corretamente o evento aeronáutico, delimitando seu início, meio e fim.

3 O Aeroporto e Aeronaves

3.1 O aeroporto

O Aeroporto Internacional do Rio de Janeiro/Galeão, também conhecido como Aeroporto Antônio Carlos Jobim, segundo maior aeroporto internacional do país, localiza-se no bairro da Ilha do Governador, na cidade do Rio de Janeiro (RJ).

Com a segunda maior pista de pouso e decolagem do Brasil (4.000m) e dois terminais de passageiros com capacidades de 7 a 8 milhões de passageiros por ano cada um, o aeroporto ainda conta com um Terminal de carga e Logística, um dos mais movimentados do país.

Ele situa-se nas imediações da Base Aérea do Galeão, da Força Aérea Brasileira. Na Figura 3.1, observa-se a vista aérea do Aeroporto.



Figura 3.1 – Visão aérea do Aeroporto Internacional do Galeão, incluindo as duas pistas e os prédios
(Birutanews, 2014)

O aeroporto conta também com duas pistas de pouso e decolagem, a pista 15/33, com 3,18 mil metros de extensão e a 10/28, com 4 mil metros de extensão (Wikipédia, 2013).

Desde 1987, o aeroporto é público e administrado pela Infraero, quando a Aeroporto do Rio de Janeiro S. A. (ARSA), sua antiga dona, foi incorporada pela Infraero.

Inaugurado oficialmente em 1952, sua história remonta ao início do século XX, quando a localidade fora escolhida para sediar a base da aviação naval, devido ao grande número de hidroaviões que realizavam o percurso Brasil-Europa.

Assim foram surgindo diversos hangares e prédios, com a criação da primeira Escola de Aviação Civil, em 1924, além da primeira fábrica nacional de aviões. Também se estabeleceram algumas indústrias aeronáuticas no entorno, que produziam componentes para a holandesa Fokker e a alemã Wulf.

Em 1945, com o surgimento de grandes aviões que se deslocavam no solo, foi-se necessário a construção de uma pista, recebendo o aeroporto grande número de voos e, com isso, a denominação “internacional”.

Foi inaugurado em 1977 o atual Terminal 1, que agregou o mais atual em termos de terminal de passageiros da época, e em 1999, veio a inauguração do Terminal 2, duplicando a capacidade do aeroporto (Nunes, 2011).



Figura 3.2 – Vista aérea dos terminais do Aeroporto do Galeão (Infraero, 2014)

Em novembro de 2013, o governo federal realizou o leilão para a concessão do Aeroporto. Junto com o Galeão, também foram a leilão a concessão do Aeroporto de Confins, em Minas Gerais. O consórcio Aeroportos do Futuro, formado pela empresa Odebrecht e pela Changi, de Cingapura, ganhou a concessão, e terá 51% de controle do Aeroporto, ficando a Infraero com os 49% restantes. O prazo de concessão será de 25 anos, e espera-se que com esta concessão, seja melhorada a qualidade do aeroporto, através da realização de obras necessárias de infraestrutura, além do aumento do número de voos realizados (UOL, 2013).

3.2 As aeronaves

São calculadas, neste estudo, as incertezas e erros do nível de exposição sonora para as aeronaves Airbus A320 e Boeing 737-700, duas das aeronaves mais presentes nos aeroportos brasileiros e no resto do mundo.

3.2.1 Airbus A-320

O Airbus A320 é uma aeronave comercial para passageiros construído pela Airbus. Surgiu, em 1981, do projeto de construção de uma aeronave para curtas e médias distâncias, com capacidade para até 190 passageiros. Com fuselagem estreita, ela atuaria em rotas curtas de menor densidade.

Assim surgiu a família Airbus A320, com quatro variantes, todas com base no A320, sendo algumas mais curtas, como o A319/A318 , e mais alongadas como o A321. A capacidade de passageiros desta família varia entre 100 a 200.

O A320 possui duas variantes: o A320-100 e o A320-200. O A320-100 é a versão de menor sucesso pelo fato de que apenas 21 A320-100 foram construídos.

O alcance com 150 passageiros para o A320-200 é de 5,400 km (2,900 nm). É equipado com 2 turbofans CFMI CFM56-5 ou IAE V2500 com empuxo entre 25,500 a 27,000 libras de força (113 kN a 120 kN).

O A320 no Brasil é utilizado pela TAM , pela Whitejets e pela Avianca Brasil (Wikipédia, 2014)



Figura 3.3 – Airbus A320 operando pela TAM (Airplane-pictures, 2014)

3.2.2 Boeing 737

O Boeing 737 é um avião comercial a jato, bimotor, de fuselagem estreita produzido pela Boeing. É, estatisticamente, a aeronave de maior venda na história da aviação civil (Wikipédia, 2013).

O 737 nasceu da necessidade da Boeing em exercer a concorrência, antes iniciada pelo BAC 1-11 (One-Eleven), Sud-Aviation Caravelle e pelo Douglas DC-9, no mercado para jatos de curtas-distâncias e baixa capacidade de passageiros.

Considerado o mais popular jato comercial de passageiros de fuselagem estreita (narrow-body) para médio-alcance no mundo, com mais de 8.100 pedidos e maior número de unidades de transporte de passageiros em toda a história.

Existem 9 versões do 737, lançadas em diferentes ocasiões e mais três versões já existentes, relançadas na família MAX, mais eficiente do que as outras versões, que contém as versões 737-700, -800 e -900 em uma versão muito mais eficiente equipados com os motores Leap. Os 737 também se enquadram em três diferentes gerações. Os modelos "Originals" são os 737-100 e 737-200. Os modelos "Classic" compreendem os 737-300, 737-400 e o 737-500. As versões "Next Generation" incluem os 737-600, 737-700, 737-800 e, o mais recente, 737-900. Embora sejam nove versões do 737, existem inúmeras sub-variações para cada modelo.

No Aeroporto do Galeão operam os modelos 737-700, 737-300 e 737-800, que, segundo abreviações aeronáuticas, em torres de controle de aeroportos, são denominados 737, 733 e 738 (Skycrapercity, 2013).

Os modelos 737 já foram e são utilizados no Brasil por diversas empresas. O 737-300 é operado hoje pela Puma Air, enquanto os modelos 737-700 e 737-800, pela Gol Transportes Aéreos. (Wikipédia, 2013)



Figura 3.4 – Boeing 737-700 em operação pela Gol (Culturaaeronáutica, 2013)

4 Metodologia

A metodologia para a obtenção das incertezas das aeronaves consiste em 4 etapas:

- Seleção dos locais de medição;
- Aquisição e processamento dos dados;
- Obtenção das incertezas;
- Comparação dos resultados obtidos

4.1 Seleção dos pontos de medição

Os pontos de medição são escolhidos levando-se em determinados fatores. Um deles é a rota dos aviões, pois esta influencia os níveis medidos; quanto mais próximo da rota, maior os níveis.

Outro é localização dos pontos em relação às cabeceiras do aeroporto. As cabeceiras são os locais onde ocorrem pousos ou decolagens. O aeroporto possui duas pistas e, portanto, quatro cabeceiras. Nas cabeceiras 15 e 10 ocorrem normalmente as aterrisagens e nas cabeceiras 33 e 28, as decolagens. Normalmente, a pista 15/33 é a mais usada, com aproximadamente 95% das operações totais de aterrisagem e decolagem no aeroporto.

Os critérios para seleção dos pontos de medição também se encontram no Anexo A da ISO 20906, e levam em conta também a interferência de outras fontes de ruído, a presença de linhas de telefone e energia nas proximidades, barreiras prediais, facilidade de acesso a lugares, segurança e as incertezas que viriam desta medição.

Portanto, os pontos escolhidos são:

- Ponto 1 - Laboratório Dr. Sérgio Franco: Rua Xavier Pinheiro, 439 – Realengo – Duque de Caxias, RJ
- Ponto 2 - Alojamento – Cidade Universitária: Largo Wanda de Oliveira, 400 – Rio de Janeiro, RJ
- Ponto 3 - CIEP João Mangabeira: Av. Ilha das Enxadas s/nº - Ilha do Governador – Rio de Janeiro, RJ

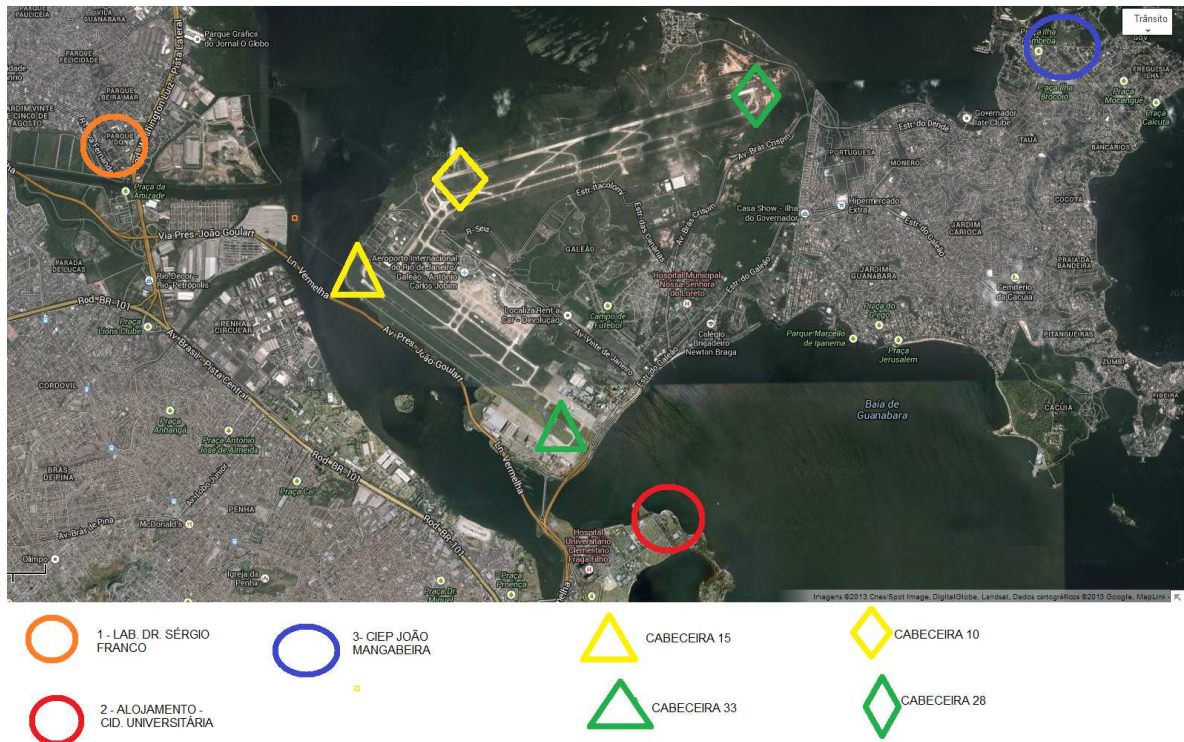


Figura 4.1 – Vista aérea do Aeroporto do Galeão e dos pontos de medição 1,2 e 3

Como visto na Figura 4.1, o Ponto 1 (Laboratório) é o ponto mais próximo da cabeceira 15 e, portanto, mais perto das aterrisagens. O Ponto 2 (Alojamento) é o ponto mais próximo da cabeceira 33, ou seja, mais próximo das decolagens. E o Ponto 3 (CIEP) é o mais afastado, sofrendo influência de decolagens pela cabeceira 28, quando esta for utilizada.

4.2 Aquisição dos dados

São usados dois medidores de nível de pressão sonora para aquisição dos dados. Os dois instrumentos possuem classes diferentes (classe 1 e classe 2). Os Classe 1 possuem uma menor incerteza instrumental ($\pm 0,86\text{dB}$) que o Classe 2 ($\pm 1,4\text{dB}$).

Para a medição no Laboratório Dr. Sergio Franco (Ponto 1), utilizou-se o medidor de Classe 1. E, para os dois outros pontos (Alojamento e CIEP), utilizou-se um medidor de Classe 2.



Figura 4.2 – Medidor de nível de pressão sonora DT-8852 Precision Data Logging Sound Level Meter, da empresa ATP Instrumentation

Deve-se lembrar que esses instrumentos medem o Nível de Pressão Sonora Equivalente (LAeq), necessitando de cálculos posteriores para se encontrar o Nível de Exposição Sonora (SEL). As medições ocorreram nos pontos nos seguintes horários:

- Ponto 1 – Medição de 11:46:40 do dia 05/06/2012 até 11:46:40 do dia 06/06/2012
- Ponto 2 – Medição de 14:19:43 do dia 13/06/2012 até 14:19:42 do dia 14/06/2012
- Ponto 3 – Medição de 08:08:08 do dia 22/05/2012 até 08:08:08 do dia 23/05/2012

4.3 Processamento dos dados

Obtidos os valores de LAeq, utiliza-se os procedimentos de cálculo do GERA (Grupos de estudos em Ruídos Aeroportuários da UFRJ) sendo realizado um tratamento matemático, suavizando estes dados, com o princípio da média móvel com 17 valores. Encontra-se, por fim, o LAeq da média desses 17 valores. Isto é feito de modo a eliminar os muitos vales e picos que ocorrem na distribuição e que podem não caracterizar corretamente um evento sonoro ligado à passagem de uma aeronave.

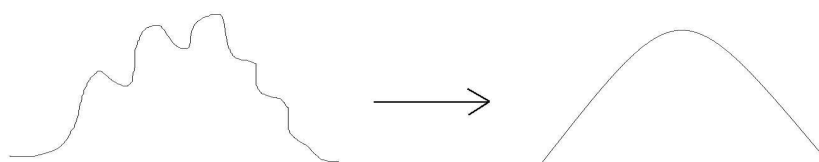


Figura 4.3 – Representação simplificada da distribuição dos valores de LAeq, de segundo a segundo, de um evento aeronáutico antes e depois do processo matemático de suavização

Seguindo com o procedimento do GERA, calcula-se a inclinação dessa nova curva de LAeq em um intervalo de 17 valores: 8 abaixo e 8 acima do ponto em questão. Esse intervalo tem amplitude de 17 pontos de modo a eliminar ainda os muitos picos e vales não ligados ao evento aeronáutico. Nesse procedimento, procura-se os “máximos”, ou seja, pontos onde a inclinação muda de positiva para negativa, que mais fielmente representem à passagem da aeronave. Isto é melhor visualizado no esquema ilustrativo da Figura 4.4.

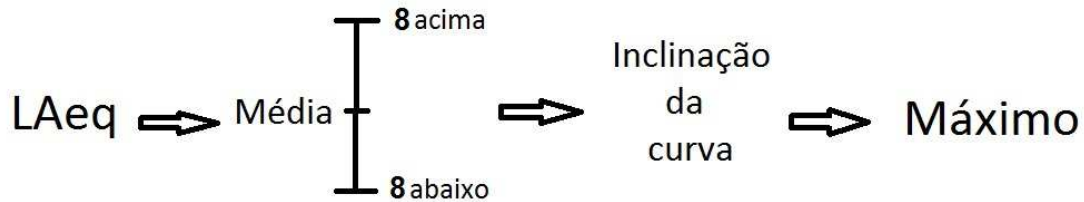


Figura 4.4 – Esquema ilustrativo da obtenção dos pontos de máximo da curva de LAeq, correspondentes aos eventos aeronáuticos

Os máximos são identificados como os pontos centrais nos períodos de passagem das aeronaves. Assim, para calcular o SEL deste evento aeronáutico, soma-se as exponenciais de 20 valores acima e abaixo deste ponto, que correspondem a energia contida neste período de passagem da aeronave, de aproximadamente 40 segundos.

O cálculo do LRA envolve duas etapas: encontrar o SEL total da hora; e subtrair deste valor o SEL dos eventos aeronáuticos da hora, visualizado na equação (4.1). Ou seja, encontrar a energia total na hora, e dela subtrair a energia dos eventos aeronáuticos.

$$SEL_{hora} = SEL_{eventos} \oplus SEL_{RA}, \text{ (Soma logarítmica)} \quad (4.1)$$

O SEL em qualquer período de tempo é calculado pela equação (4.2). O que muda de uma métrica para outra é o período, e os limites deste período.

$$SEL = 10 \log_{10} \left(\sum 10^{\left(\frac{LAeq}{10} \right)} \right) \quad (4.2)$$

Já o SELRA é calculado pela equação (4.3), onde TRA é o período de presença de ruído ambiente. O processo de obtenção do LRA é melhor explicado no esquema ilustrativo da Figura 4.5.

$$LRA = SELRA - 10 \log_{10}(TRA) \quad (5.3)$$

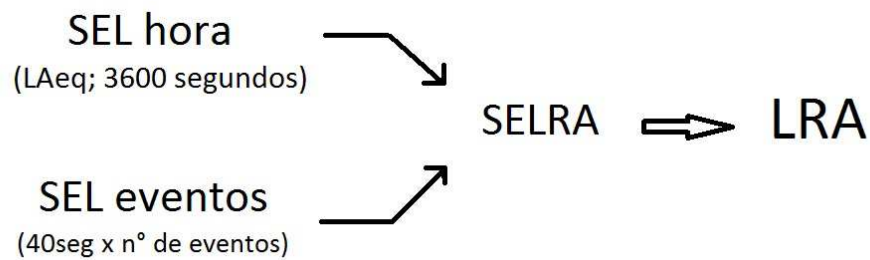


Figura 4.5 – Esquema ilustrativo de obtenção do LRA (Nível de Pressão Sonora Equivalente do Ruído Ambiente)

4.4 Obtendo as incertezas

Como já comentado, será utilizada a abordagem da incerteza combinada expandida, considerada a mais completa por muitas fontes, inclusive a Norma ISO 20906.

Uma vez com o LRA em cada hora, filtra-se, no total de eventos, os máximos referentes a A320 e B737, calculando-se, em seguida, o ΔLp (δ_{res}) para estes eventos, através da equação (2.13). Isto é, cada hora apresentará um nível de ruído ambiente (LRA) próprio e, estando o evento aeronáutico (seja ele A320 ou B737) dentro desta hora, o ΔLp referente a ele será calculado com base no valor de LRA daquela hora.

Será utilizado um estudo dos eventos por hora. Assim, obtém-se o ΔLp médio dos eventos individuais aeronáuticos (A320 ou B737) na hora. Como o erro do instrumento é constante, pois não varia ao longo do tempo, a única variável nestes cálculos é a incerteza do ruído ambiente.

Este procedimento também é melhor ilustrado na Figura 4.6, abaixo:

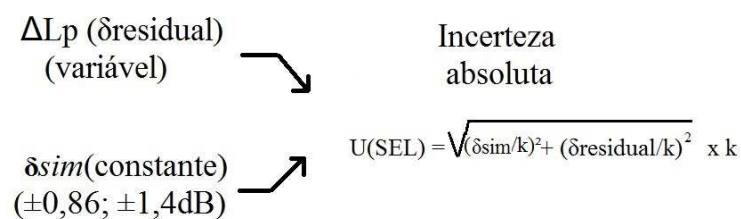


Figura 4.6 – Esquema ilustrativo do processo de cálculo das incertezas absoluta e relativa

5 Resultados

Seguindo os procedimentos descritos acima, foram obtidos os seguintes resultados para as medições nos três pontos. Estes resultados podem ser melhor visualizados, um a um, no Anexo C.

5.1 Ponto 1 – Laboratório Dr. Sérgio Franco

Através da tabela 5.1 e da Figura 5.1, foram observados dois picos de eventos aeronáuticos: um entre as 18hs e a meia-noite; e outro entre as 6hs e as 13hs, este último, com menor movimento que o primeiro. Concomitantemente, constata-se um maior ruído ambiente nestes dois períodos, devido a maior presença de ruídos (principalmente devido a atividades urbanas, como comércio e veículos) nestes horários.

Tabela 5.1- Distribuição de SEL para todos os eventos aeronáuticos por horas, e de LRA (nível de ruído ambiente) entre as 12hs do dia 05/06/2012 até as 12hs dia 06/06/2012 no Ponto 1

Hora	SEL hora (dB)	SEL eventos (dB)	LRA (dB)
12	95,47	92,58	56,95
13	93,82	86,74	57,42
14	93,80	0,00	58,24
15	95,30	0,00	59,74
16	94,71	82,82	58,89
17	99,40	96,63	60,92
18	100,63	95,33	63,96
19	101,71	98,00	64,31
20	100,91	98,46	62,53
21	100,44	99,74	57,19
22	97,98	97,27	54,65
23	102,58	102,45	52,42
24	99,94	99,70	52,12
1	101,36	101,19	51,78
2	96,85	96,37	51,58
3	91,46	89,42	51,67
4	88,49	0,00	52,92
5	97,66	96,25	56,70
6	97,71	96,68	55,76
7	100,04	98,35	59,98
8	101,09	98,19	62,66
9	98,95	97,27	58,79
10	101,90	100,50	61,24
11	98,59	96,92	58,44

Obs. Os campos nulos de SELeventos indicam que não houve eventos aeronáuticos naquela hora. O mesmo se aplica para as tabelas 5.2 e 5.3.

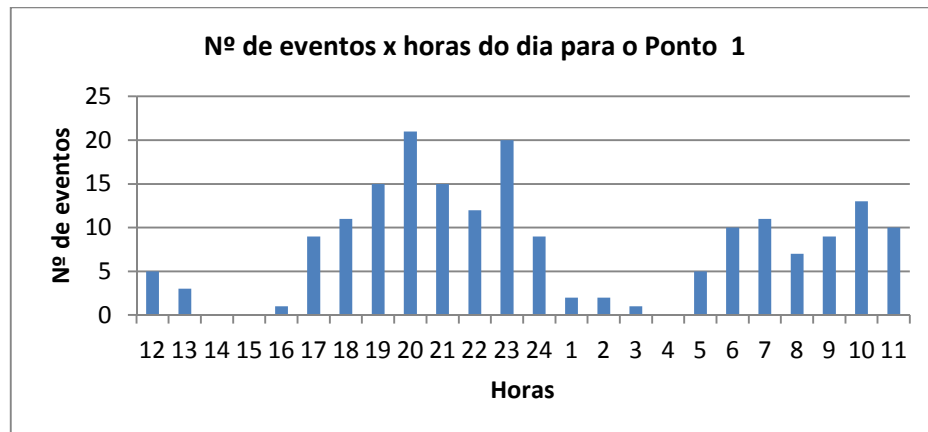


Figura 5.1 – Gráfico Número de eventos x horas do dia no Ponto 1

O número de eventos A320 e B737 dentro daquele intervalo de 24 hs foi de 191 eventos, sendo os A320 28% do total de eventos, quase um terço do total de eventos. Enquanto isso, os B737 foram 15% apenas, como visto na Figura 5.2.

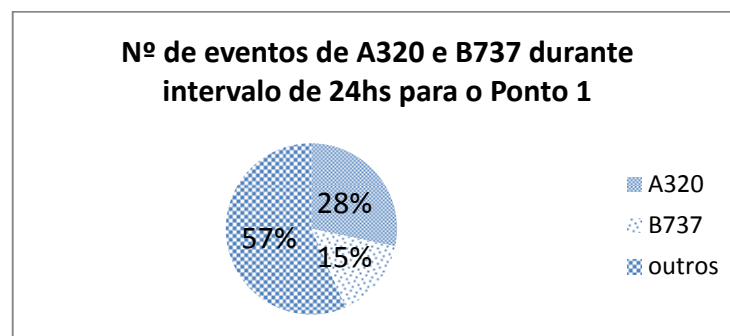


Figura 5.2 – Numero de eventos de A320 e B737 para o Ponto 1 em um intervalo de 24 horas

A320 e B737:

Para os A320 e B737, a incerteza absoluta é, na média, $\pm 1,0\text{dB}$ (A320), e $\pm 0,95\text{dB}$ (B737), como visto nas Figuras 5.3, 5.4, 5.5 e 5.6. É observado também a baixa influência do erro do ruído ambiente sobre a incerteza total, sendo, portanto, o erro do instrumento maior.

O ruído ambiente atinge sua maior contribuição na incerteza às 18hs e 19hs, dentro do horários de pico, e quando o LRA atinge seu valor máximo (64,31dB), como visto na Tabela 5.1. Vale lembrar que, de acordo com a equação (2.13), esta contribuição do ruído ambiente aumenta quando a diferença entre o LAeq e o LRA é maior.

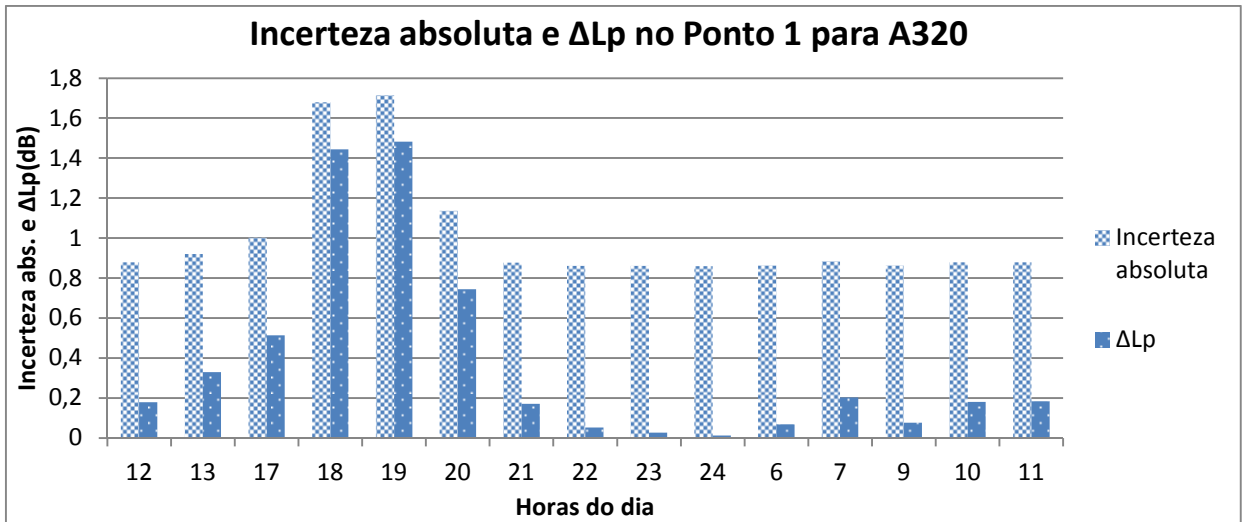


Figura 5.3 – Gráfico da Incerteza absoluta e ΔLp no Ponto 1 para o Airbus A320

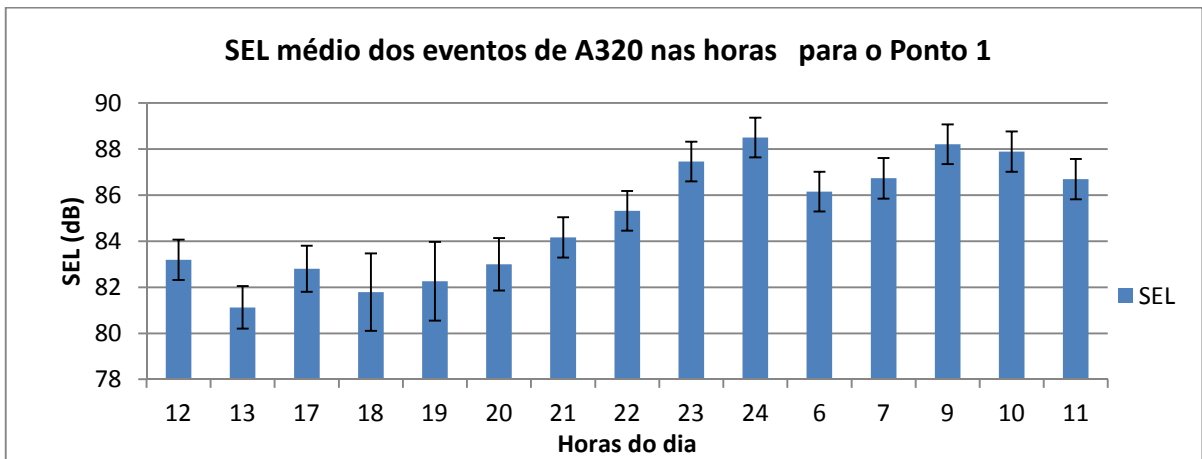


Figura 5.4 – Gráfico SEL médio dos eventos de A320 , com a incerteza absoluta para o Ponto 1

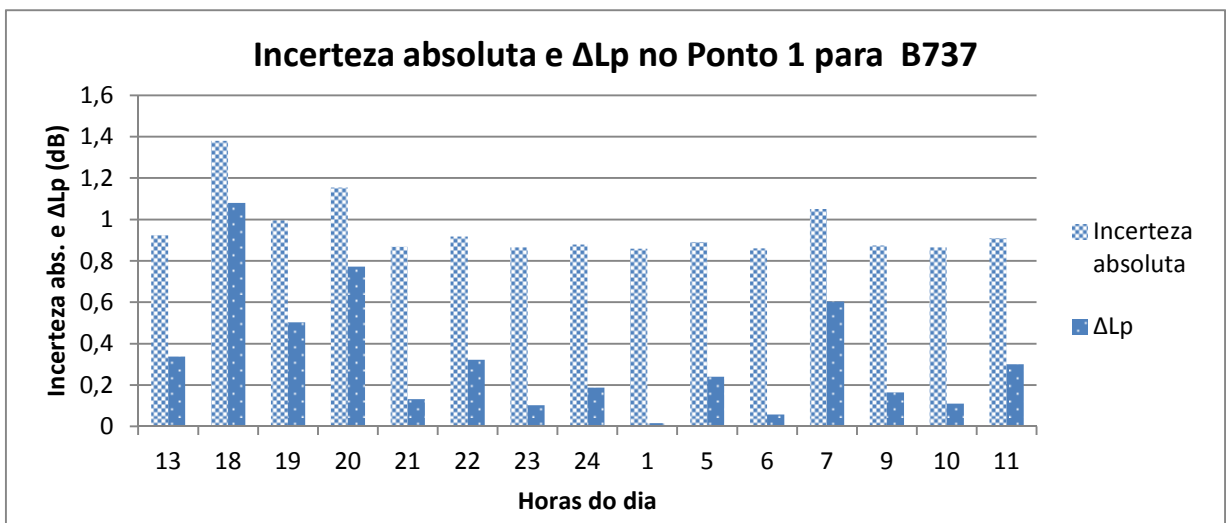


Figura 5.5 – Gráfico da Incerteza absoluta e ΔLp durante o período de 24hs no Ponto 1 para o Boeing 737-700

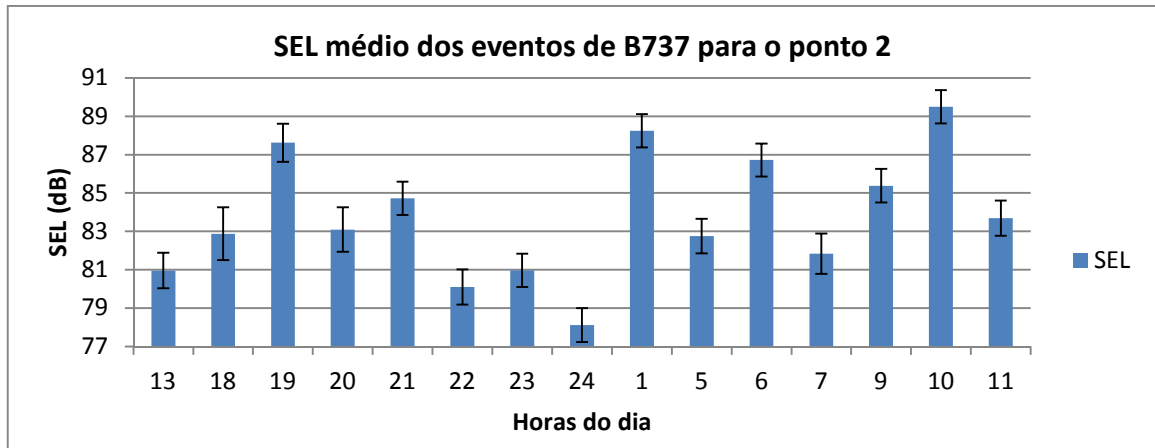


Figura 5.6 – Gráfico SEL médio dos eventos de A320 nas horas para o Ponto 1

5.2 Ponto 2 – Alojamento

Pela Tabela 5.2 e a Figura 5.7, também se observou dois picos de eventos: um por volta das 21hs; e outro entre as 8hs e as 13hs, com movimento considerável em relação ao anterior. Como já mencionado, estes horários também contribuem para uma elevação dos níveis de ruído ambiente.

Tabela 7.2 - Distribuição de SEL para todos os eventos aeronáuticos por horas, e de LRA (nível de ruído ambiente), para o período relatado, no Ponto 2

horas	SEL hora (dB)	SELeventos (dB)	LRA (dB)
16	103,28	103,18	51,20
17	98,37	97,98	52,20
18	86,58	0,00	51,02
19	100,07	99,93	49,68
20	97,97	97,82	47,74
21	104,09	104,05	47,72
22	101,62	101,56	47,84
23	99,46	99,40	45,33
24	100,07	100,04	42,78
1	93,93	93,84	41,12
2	101,63	101,61	42,36
3	77,32	0,00	41,75
4	83,99	0,00	48,43
5	81,78	0,00	46,21
6	85,78	74,10	49,95
7	100,91	94,16	64,35
8	101,68	101,05	57,51
9	101,88	100,82	60,27
10	101,92	101,46	56,83
11	106,07	106,02	51,97
12	101,19	101,08	49,92
13	94,07	93,42	50,09



Figura 5.7 – Gráfico Número de eventos x horas do dia no Ponto 2

Com um total de 87 eventos, praticamente um quinto foi A320 (22%) e 9%, B737, como visto no gráfico da Figura 5.8.

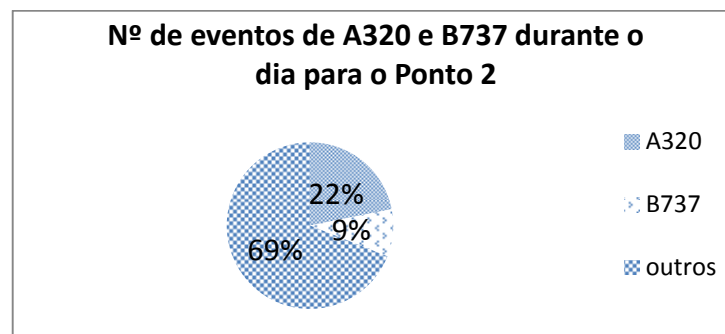


Figura 5.8 – Numero de eventos de A320 e B737 para o Ponto 2 em um intervalo de 24 horas

A320 e B737:

Pelas Figuras 5.9, 5.10, 5.11 e 5.12, constata-se incerteza absoluta de 1,4dB (para as duas aeronaves). Observa-se também a pouca influência do ruído ambiente sobre a incerteza, sendo esta mais marcante às 7hs, quando o ruído de fundo atinge seu valor máximo (64,35dB), e portanto, é maior a diferença entre o LAeq (de segundo a segundo) dos eventos e o LRA.

Nota-se também a maior incerteza neste ponto (Alojamento) em relação ao anterior (Lab. Dr. Sérgio Franco). Isto ocorre devido à maior influência do instrumento sobre a incerteza. Como o instrumento utilizado para as medições neste ponto é de Classe 2, com uma incerteza de $\pm 1,4\text{dB}$, e o utilizado no primeiro ponto é de Classe 1, com incerteza de $\pm 0,86\text{dB}$, vê-se claramente essa influência nos resultados.

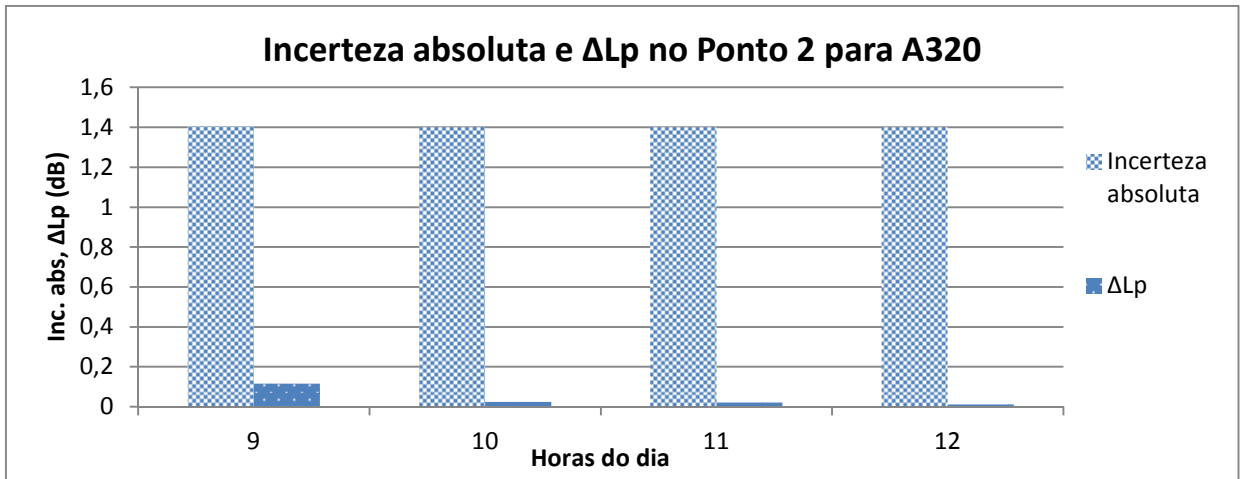


Figura 5.9 – Gráfico da Incerteza absoluta e ΔL_p durante o período de 24hs no Ponto 2 para o Airbus A320

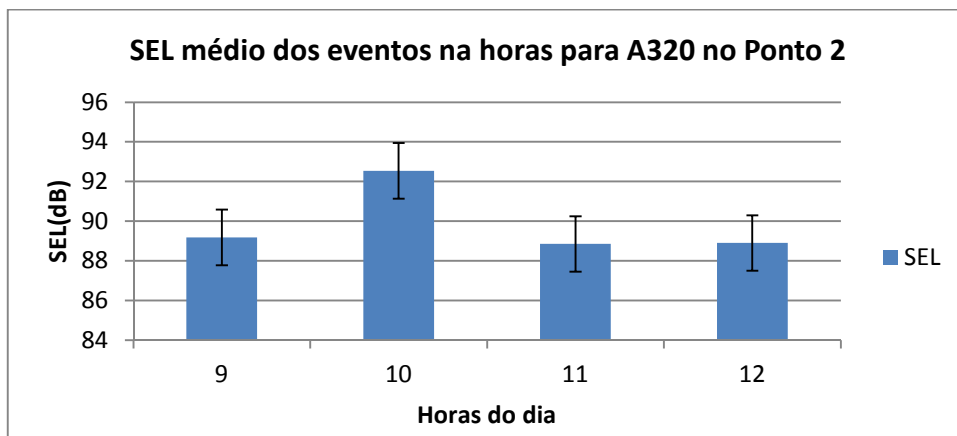


Figura 5.10 – Gráfico SEL médio dos eventos de A320 nas horas para o Ponto 2

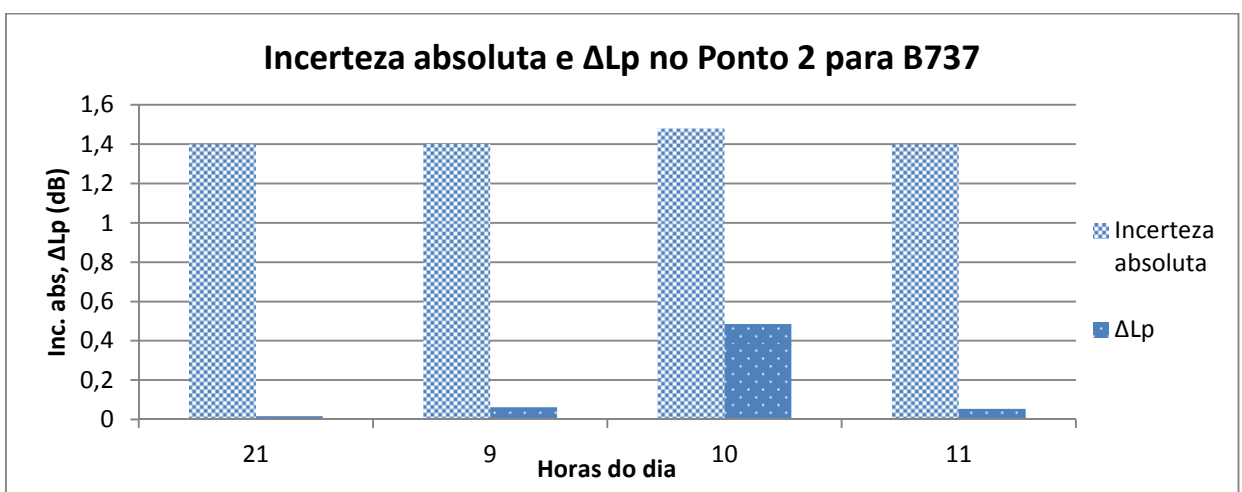


Figura 5.11 – Gráfico da Incerteza absoluta e ΔL_p durante o período de 24hs no Ponto 2 para o Boeing 737-700

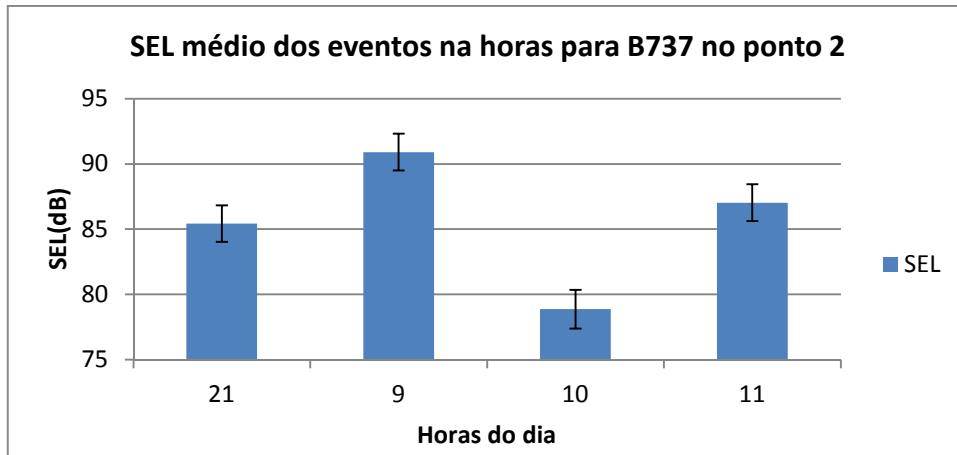


Figura 5.12 – Gráfico SEL médio dos eventos de B737 nas horas para o Ponto 2

5.3 Ponto 3 – CIEP João Mangabeira

Assim como nos outros locais de medição, também foram observados dois picos de eventos no Ponto 3: um entre as 8hs e 13hs, e outro entre as 15hs e as 23hs, pela Tabela 5.3 e pela Figura 5.13.

Tabela 7.3- Distribuição de SEL para todos os eventos aeronáuticos por horas e eventos, e de LRA (nível de ruído de fundo) entre as 08:08:08 do dia 22/05/2012 até as 08:08:08 do dia 23/05/2012 no Ponto 3.

horas	SEL hora (dB)	SEL eventos (dB)	LRA (dB)
8	93,33	87,38	57,36
9	93,67	89,98	56,92
10	93,67	91,30	55,72
11	94,41	91,42	57,14
12	100,16	98,60	60,38
13	95,52	86,50	60,20
14	94,58	85,38	59,23
15	97,58	94,52	60,28
16	95,81	91,50	59,32
17	94,74	88,95	58,79
18	101,05	98,07	63,53
19	95,42	92,39	58,04
20	94,56	91,34	57,27
21	95,04	92,52	57,15
22	95,08	94,00	54,42
23	92,97	89,04	56,10
24	83,77	0,00	48,85
1	80,22	0,00	45,30
2	78,96	0,00	44,04
3	75,58	0,00	40,67
4	79,86	0,00	44,94
5	86,71	83,37	49,21
6	91,70	88,14	54,57
7	96,02	90,84	59,92
8	94,94	88,64	67,47

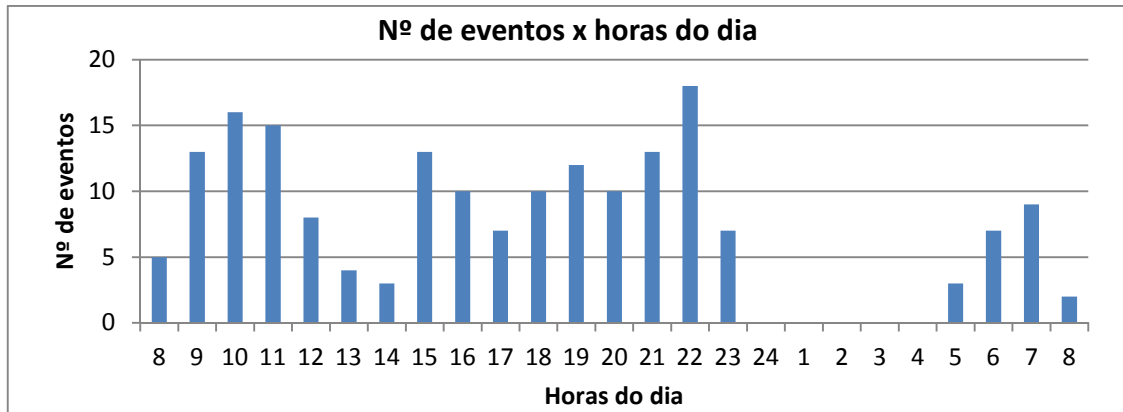


Figura 5.13 – Gráfico Número de eventos x horas do dia no Ponto 3

Com um total de 185 eventos, 30% foi A320 e apenas 13%, de B737, visto na Figura 5.14.

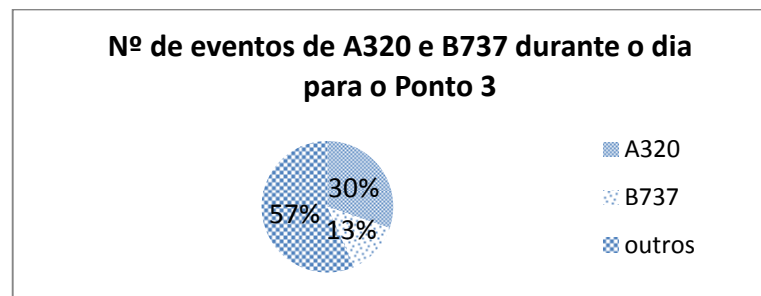


Figura 5.14 – Numero de eventos de A320 e B737 para o Ponto 3 em um intervalo de 24 horas

A320 e B737:

Como visto nas Figuras 5.15, 5.16, 5.17 e 5.18, a incerteza absoluta é $\pm 1,7\text{dB}$ (A320) e $\pm 2,0\text{dB}$ (B737). É observada uma maior influência do ruído ambiente sobre a incerteza neste ponto, como vistos nos dois gráficos. Vale lembrar que as medições no Ponto 3 são feitas com instrumentos de Classe 2, levando assim, ao maior valor absoluto das incertezas.

Sendo este ponto mais afastado das pistas do aeroporto, e fora das rotas de aeronaves, constata-se, portanto, um menor SEL neste ponto, como visto nas figuras 5.16 e 5.18.

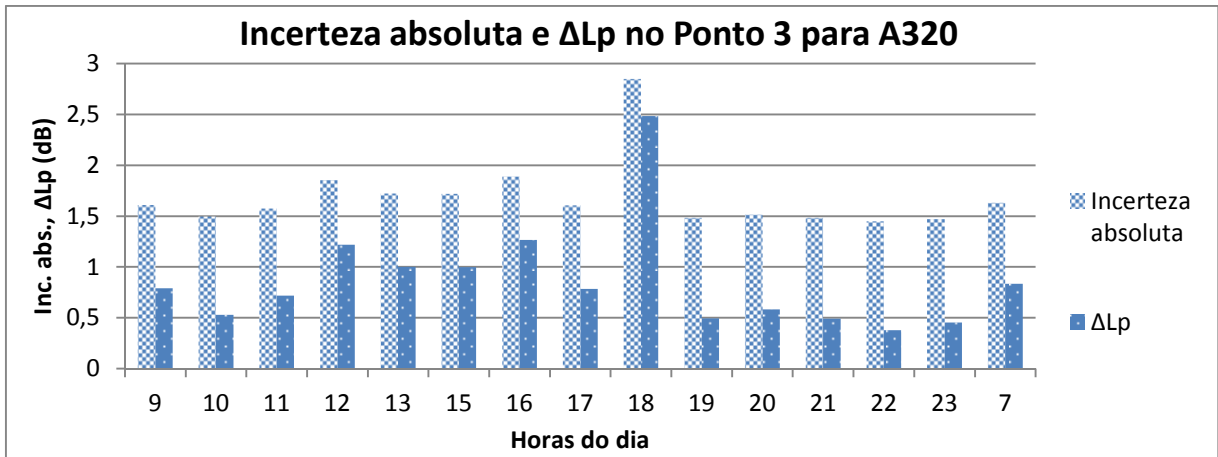


Figura 5.15 – Gráfico da Incerteza absoluta e ΔLp durante o período de 24hs no Ponto 3 para o Airbus A320

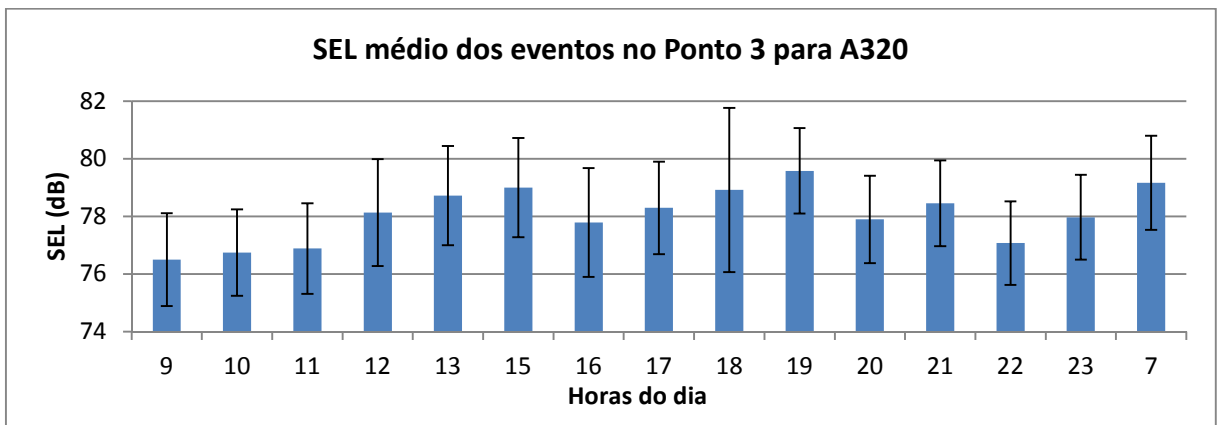


Figura 5.16 – Gráfico SEL médio dos eventos de A320 nas horas para o Ponto 3

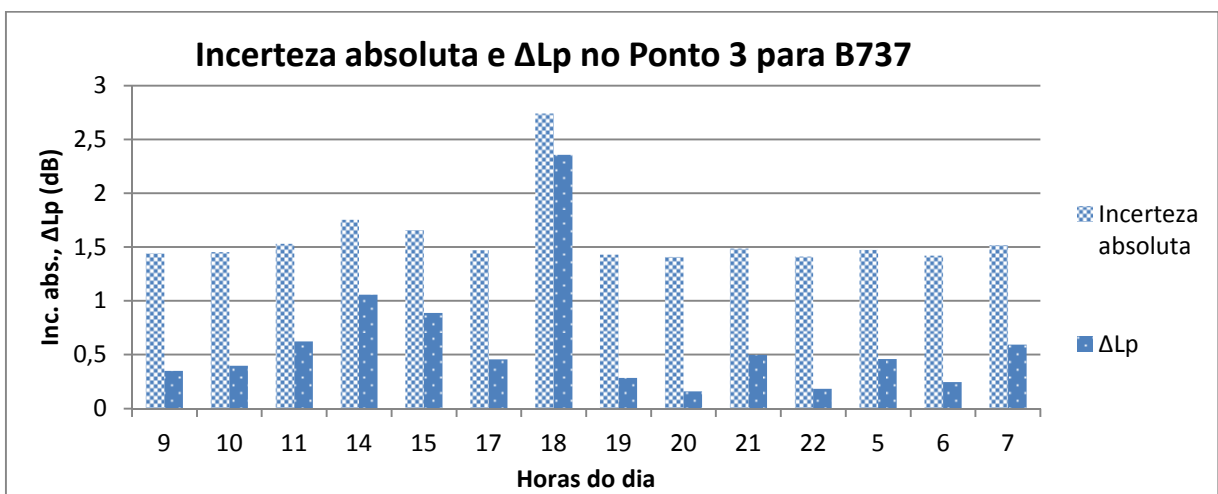


Figura 5.17 – Gráfico da Incerteza absoluta e ΔLp durante o período de 24hs no Ponto 3 para o Boeing 737-700

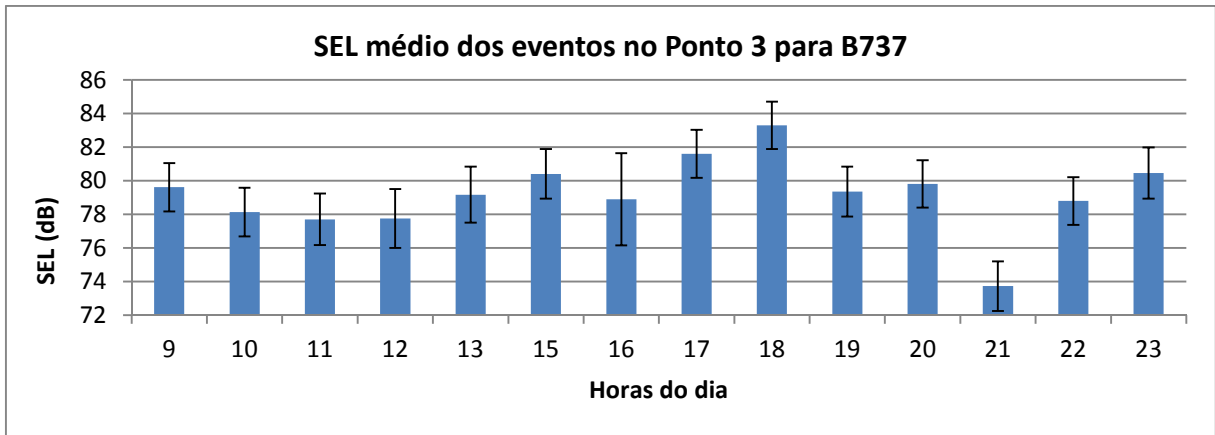


Figura 5.18 – Gráfico SEL médio dos eventos de B737 nas horas para o Ponto 3

5.4 Comparações nos três pontos

Através da Figura 5.19, os Pontos 1 e 2 apresentam as faixas de incerteza mais consistentes. O Ponto 3, como já explicado, apresenta maiores incertezas que os outros pontos, devido à maior influência do ruído ambiente. O SEL médio no Ponto 3 é mais baixo que nos outros pontos, indicando que o LAeq (de segundo a segundo) dos eventos também é menor, e, portanto, a diferença entre o LAeq destes eventos e o LRA (nível do ruído ambiente) é menor. E, como visto pela equação (2.13) e pela tabela 2.1, quanto menor essa diferença, maior o ΔL_p , isto é, maior a influência do ruído ambiente sobre a incerteza.

Vale destacar que, pela Figura 5.19, o local com menor incerteza absoluta é o Ponto 1, sendo este ponto, portanto, aquele com maior confiabilidade na identificação de eventos aeronáuticos. Como já comentado, quanto menor a incerteza, absoluta, maior a precisão na medição e, portanto, mais precisa a identificação do evento aeronáutico.

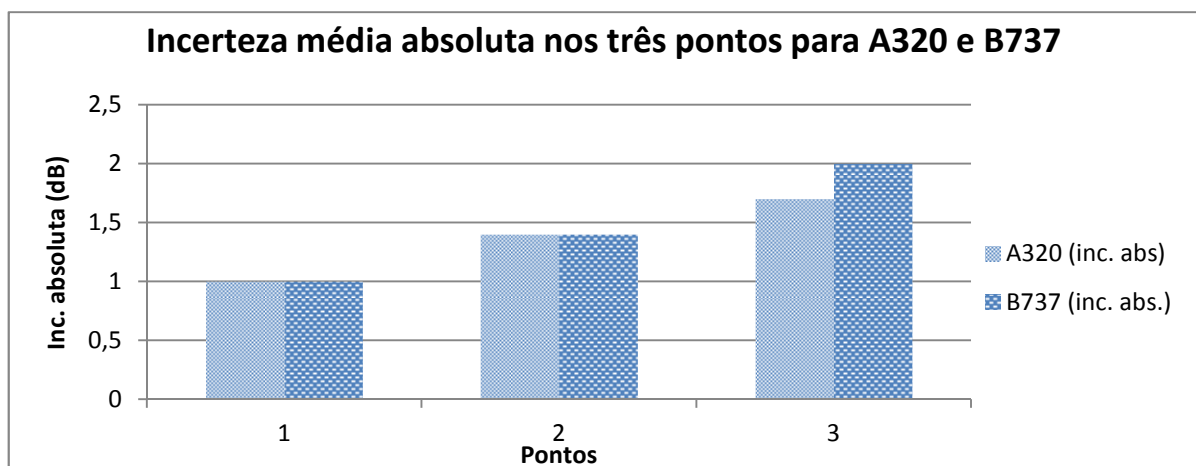


Figura 5.19 – Gráfico da Incerteza média absoluta nos três pontos de medição para as aeronaves A320 e B737

6 Conclusão e considerações finais

Como discutido ao longo deste estudo, a aviação comercial é um setor de grande importância para um país ou para um conjunto destes (p.e. a Airbus para o cenário europeu), permitindo o fluxo de pessoas e de cargas, movimentando grandes somas de dinheiro e propiciando o desenvolvimento de muitas economias. É, portanto, um setor que não pode ser negligenciado, e cujas questões merecem ser tratadas com cuidado e esmero, já que influenciam a vida de muitas pessoas.

Assim, ao olharmos a questão do ruído referente à atividade aeroportuária, inúmeros fatores devem ser levados em conta antes de ser emitida uma decisão, sejam estes fatores de ordem social, política ou econômica. E isso se torna mais relevante ainda em um país como o Brasil, um país emergente, com altas taxas de crescimento da aviação comercial, porém ainda com muitos problemas sociais a serem resolvidos, destacando-se, neste caso, a ocupação humana desordenada do espaço urbano. Ocupação humana que, por falta de políticas públicas adequadas e fiscalização, entra em choque com projetos de operação e expansão de aeroportos no país.

O objetivo de dar contribuições para a melhoria na identificação de eventos aeronáuticos no Aeroporto do Galeão foi atingido. De acordo com os resultados obtidos, vê-se que a medição no Ponto 1 (Laboratório Dr. Sérgio Franco, em Duque de Caxias) foi a que apresentou a menor faixa de incerteza. As razões para isso são que, no Ponto 1, utilizou-se um instrumento de Classe 1 para a realização das medições (cuja faixa de incerteza de medição é menor, sendo portanto um instrumento mais preciso), e o fato de este ponto não estar muito distante do aeroporto.

Outra constatação obtida com esse estudo é a de que, na determinação da incerteza combinada expandida, o erro do ruído ambiente é geralmente inferior àquela do instrumento. O erro do ruído ambiente só se torna significativo em horas com maior atividade urbana, ou quando o SEL médio dos eventos aeronáuticos é baixo, causado por um distanciamento maior do objeto de estudo da medição (no caso, as pistas do aeroporto).

Desse modo, a fim de cumprir com o objetivo de melhor identificação de ruídos aeronáuticos, propõe-se que, em futuras medições, estas sejam realizadas com instrumentos de Classe 1, e em locais mais próximos do objeto de estudo da medição.

Ao realizarmos estudos referentes ao sistema da aviação comercial nacional e aos seus elementos, estaremos contribuindo para a sua melhoria. O panorama deste setor, embora seja de crescimento, necessita ainda de intensas melhoras e reestruturações. E, realizando ações e

iniciativas para auxiliar a tomada de decisões referentes ao Aeroporto Internacional Tom Jobim (Galeão), estaremos, ao mesmo tempo, contribuindo para o desenvolvimento da cidade do Rio de Janeiro, e para o setor da aviação comercial brasileira.

7 Referências bibliográficas

Acessa.com. Disponível em: <<http://www.acesa.com/saude/arquivo/fonoaudiologia/2009/07/20-artigo/>> . Acesso em: janeiro de 2014.

Aecnonoise. Disponível em: <http://www.aecnonoise.com/lexicon_of_noise_parameters_and_terminology.htm>. Acesso em janeiro de 2014

Airbus. Disponível em: < <http://www.airbus.com>>. Acesso em janeiro de 2014

Airplane-pictures. Disponível em: <<http://www.airplane-pictures.net/photo/9377/pt-mvl-tam-airbus-a330-200/>>. Acesso em janeiro de 2014.

ATP-Instrumentation. Disponível em: <<http://www.atp-instrumentation.co.uk/products/sound.html>>. Acesso em janeiro de 2014

BBC. First supersized Airbus assembled. **BBC**. 14 de maio de 2004. Disponível em: <<http://news.bbc.co.uk/2/hi/business/3692933.stm>>. Acesso em janeiro de 2014.

BISTAFA, Sylvio R. **Acústica Aplicada ao Controle de Ruído**. Editora Edgard Blücher. São Paulo, 2006

Ceab Escola de Aviação. Disponível em: <http://www.ceabbrasil.com.br/noticias/paises-emergentes-puxam-alta-de-demanda-de-passageiros.html>. Acesso em: janeiro de 2014

Cirrus Environmental. Disponível em: <<http://www.cirrus-environmental.com/noise-measurement-terms-part-3-time-average-sound-level-sound-exposure-level-sel-lae-and-statistical-levels-110-190/>> Acesso em: 10 de dezembro de 2013

Cirrus Research. Disponível em: < <http://www.cirrusresearch.co.uk/blog/2012/07/iec-61672-a-standard-for-sound-level-meters-in-three-parts/>>. Acesso em janeiro de 2014

COELHO J.L.B. e FERREIRA, A.J., **Crêterios para análise de rela es exposi o-impacte do ruído de infra-estruturas de transporte**. Instituto Superior Técnico – Lisboa, Portugal, dezembro/2009. Disponível em: <http://www.apambiente.pt/_zdata/DAR/Ruido/NotasTecnicas_EstudosReferencia/Criterios_analise_relacoes_exposicao_impacte_ruído_infra_estruturas_transporte.pdf> Acesso em: 10 dez. 2013

COSTA, N. Lei do Inverso da Quadrado da Distância; Pressão Eficaz. **Soundzone**. 20 de outubro de 2013. Disponível em: < <http://soundzonemagazine.blogspot.com.br/2013/10/lei-do-inverso-do-quadrado-da-distancia.html>>. Acesso em: janeiro de 2014.

Cultura Aeronáutica. Disponível em: <<http://culturaaeronautica.blogspot.com.br/2010/08/modificacoes-sfp-para-os-boeing-737-800.html>>. Acesso em: janeiro de 2014.

DUARTE, G. M. de. **Questões Contempor neas: as consequências da ocupa o urbana irregular de áreas ao redor do Aeroporto Internacional de São Paulo para a macrometr ple paulista**. [s. d.]. Disponível em: <http://www1.sp.senac.br/hotsites/campus_santoamaro/Simposio_Arquitetura_Urbanismo/2011/PDFs/20111025_Simposio_GersonMoura.pdf>. Acesso em: janeiro de 2014

ERCD REPORT 0506 – Precision of Aircraft Noise Measurements at the London Airports. S White

FICAN – *Federal Interagency Committee on Aviation Noise*, Estados Unidos. Disponível em: < http://www.fican.org/pdf/aircraft_noise.pdf>. Acesso em: janeiro de 2014.

GALVÃO, V. Q. Favela atrapalha expansão de Cumbica. **Folha de S. Paulo**. São Paulo, 06 de maio de 2007. Caderno Cotidiano. Disponível em: <<http://www1.folha.uol.com.br/fsp/cotidian/ff0605200705.htm>>. Acesso em: janeiro de 2014

GERA – Grupo de Estudos em Ruído Aeroportuário. Disponível em: < <http://www.gera.mecanica.ufrj.br/trabalhostecnicos/curvasderuido/curvasatuais.html>>. Acesso em janeiro de 2014

Global Paths. Matéria: Eduardo Sanovicz – A ABEAR e o setor aéreo brasileiro. Disponível em: <<http://luiztrigo.blogspot.com.br/2013/05/eduardo-sanovics-abear-e-o-setor-aereo.html>> Acesso em: janeiro de 2014

GOMES, M. da G. **Acústica de Edifícios**. Departamento de Engenharia Civil e Arquitectura. Instituto Superior Técnico – Portugal. [s.d.]. Disponível em: <<http://www.unit.br/downloads/manuais/citacoes-e-referencias1.pdf>>. Acesso em: 11 de dezembro de 2013.

Grozier. Disponível em: <<http://www.grozier.com/MeasuringSound.shtml>>. Acesso em: janeiro de 2014)

Guia Rápido de Produtos para Profissionais de Saúde Ocupacional – 3M. Disponível em:<http://solutions.3m.com.br/3MContentRetrievalAPI/BlobServlet?lmd=1347997525000&local_e=pt_BR&assetType=MMM_Image&assetId=1319238399076&blobAttribute=ImageFile>. Acesso em: janeiro de 2014

GUM: *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement* (1995)

Infraero. Disponível em: < <http://www.infraero.gov.br/index.php/aeroportos/rio-de-janeiro/aeroporto-internacional-do-rio-de-janeiro.html>>. Acesso em janeiro de 2014

ISO 20906: *Acoustics – Unattended monitoring of aircraft sound in the vicinity of airports*

Legisweb. Disponível em: <<https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=264433>>. Acesso em: janeiro de 2014.

LIMA JÚNIOR,P. e Silveira, F. L. da, **Discutindo os conceitos de erro e incerteza a partir da tábua de Galton com estudantes de graduação: uma contribuição para a incorporação de novas abordagens da metrologia ao ensino de Física superior**. Instituto de Física – UFRGS, agosto/2011

McKinsey & Company. **Estudo do Setor de Transporte Aéreo no Brasil: Relatório Consolidado**. Rio de Janeiro. 2010

MONTGOMERY, D.C., RUNGER, G.C. e HUBELE, N.F. **Estatística Aplicada à Engenharia**. Segunda edição. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2004.

NUNES, G. Série NOSSOS AEROPORTOS – Aeroporto do Rio de Janeiro/ Galeão – Antônio Carlos Jobim. **Birutanews**. 17 de janeiro de 2011. Disponível em: <<http://birutanews.blogspot.com.br/2011/01/serie-nossos-aeroportos-aeroporto-do.html>>. Acesso em janeiro de 2014

NUNES, M.F. de O. e SATTLER, M.A. **Percepção do ruído aeroportuário em escolas da zona I do PEZR do Aeroporto Salgado Filho**. ENGEVISTA. Dezembro de 2004

Programa Ruído da Infraero. Disponível em: <<http://www.infraero.gov.br/index.php/br/meio-ambiente/programa-ruído.html>> Acesso em: 10 de dezembro de 2013.

SEGUÍ PONS, J.M.; MARTÍNEZ REYNÉS, M.R.; RUIZ PÉREZ, M.; MARTÍ PENAS, J. **El problema del ruído em los entornos aeroportuarios. El caso del aeropuerto de Palma de Mallorca**. Boletim da A.G.E. N°38 – 2004. Disponível em: <dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/1079145.pdf> Acesso em: 10 de dezembro de 2013.

SLAMA, J.G. **Apostila de Curso de Acústica Ambiental**. COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2007

SLAMA, J.G. **Apostila de Curso de Ruído Aeroportuário**. COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2007

Skyscrapercity. Disponível em: < <http://www.skyscrapercity.com/showthread.php?t=846142>>. Acesso em: 11 de dezembro de 2013

STEWART, J. **Cálculo, Volume I** – 5ª ed. – São Paulo: Thomson Learning, 2006

UOL. Aeroporto do Galeão é leilado por R\$19 bi; Confins é arrematado por 1,82 bi. UOL. São Paulo, 22 de novembro de 2013. Disponível em: < <http://noticias.uol.com.br/cotidiano/ultimas-noticias/2013/11/22/aeroporto-do-galeao-e-leilado-por-r-19-bi-confins-e-arrematado-por-r-182-bi.htm#fotoNav=6>>. Acesso em janeiro de 2014.

VIM: Vocabulário Internacional de Metrologia – Conceitos Fundamentais e Gerais e Termos Associados – 1ª edição Luso-Brasileira. 2012

Wikipédia. Disponível em: < http://pt.wikipedia.org/wiki/Aeroporto_Internacional_do_Rio_de_Janeiro-Gale%C3%A3o#Terminal_1_2> Acesso em: novembro/2013

Wikipédia. Disponível em: < <http://en.wikipedia.org/wiki/Airbus>>. Acesso em janeiro de 2014.

Wikipédia. Disponível em: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Airbus_A320>. Acesso em: novembro/2013

Wikipédia. Disponível em: <<http://en.wikipedia.org/wiki/Boeing>>. Acesso em janeiro de 2014.

Wikipédia. Disponível em: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Boeing_737>. Acesso em: novembro/2013

Wikipedia. Disponível em: <http://en.wikipedia.org/wiki/Sound_level_meter>. Acesso em: janeiro de 2014.

Anexo A – Resumo da Norma ISO 20906: *Acoustics – Unattended monitoring of aircraft sound in the vicinity of airports*

A Norma especifica as típicas aplicações para sistemas de medição sonora ao redor de aeroportos, assim como especificações de performance e requerimentos para instrumentos utilizados e dados a serem obtidos nesta atividade. É Também estabelecida procedimentos para determinação da incerteza expandida dos dados obtidos segundo a norma ISO/IEC *Guide* 98-3.

Como base para esta norma incluem-se os seguintes documentos de referência:

- ISO1996-1, *Acoustics – Description, measurement, and assessment of environmental noise – Part 1: Basic quantities and assessment procedures*
- ISO/IEC 17025 -, *General requirements for the competence of testing and calibration laboratories*
- ISO80000-8, *Quantities and units – Part 8: Acoustics*
- ISO/IEC Guide 98-3:2008, *Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM: 1995)*
- IEC 60942, *Electroacoustic – sound calibration*
- IEC 61672-1:2002, *Electroacoustic – Sound level meters – Part 1: Specifications*
- IEC 61672-3, *Electroacoustic – Sound level meters – Part 3: Periodic tests*

A norma também estabelece termos e definições de conceitos como: operação de aeronaves, aterrisagem, sistema de monitoramento sonoro, nível de pressão sonora equivalente, nível de exposição sonora, entre outros.

Entre os mais relevantes para este trabalho de projeto final, encontram-se:

- Exposição sonora: integral da quadrado da pressão sonora p , sobre um determinado período de tempo (indo de t_1 a t_2), como visto na equação 2.1 ($ES(x, t_1, t_2) = \int_{t_1}^{t_2} p_A^2(x, t) dt$). A exposição sonora é expressa em pascal segundo-quadrado.
- Nível de exposição sonora: é dez vezes o logaritmo na base 10 da razão da exposição sonora ES_t , com referência à exposição sonora ES_0 , expresso em decibéis. O nível de referência ES_0 é $(20\mu Pa)^2 s = 4 \times 10^{-10} Pa^2 s$. Esta representação encontra-se na equação (A.1) abaixo.

$$SEL = 10 \log_{10} \frac{ES_t}{ES_0} dB \quad (A.1)$$

- Som ambiente: som total remanescente em uma dada situação quando o som específico em estudo é suprimido
- Nível de pressão sonora equivalente: dez vezes o logaritmo na base 10 da razão do quadrado da pressão sonora, dividido pelo tempo, em um período específico de tempo

(T), de t_1 a t_2 , em relação ao quadrado da pressão sonora de referência. É expresso em decibéis. O valor de p_0 , pressão de referência, é de $20\mu\text{Pa}$. A sua equação se encontra na seção 2.5

São definidos também na norma a montagem dos equipamentos, como o microfone, definindo sua altura, que deve ser no mínimo de 6m acima do solo. Abaixo deste valor ocorreria interferência pela reflexão do som no solo.

Com relação aos locais de medição, deve-se atentar para determinadas condições. Como vista na Figura A.1, é necessário que a menor distância entre os observador e a aeronave (s) seja perpendicular à direção de voo. Quando a aeronave está a uma distância de $3s$ do observador, o nível do som medidor pode diminuir até 10dB.

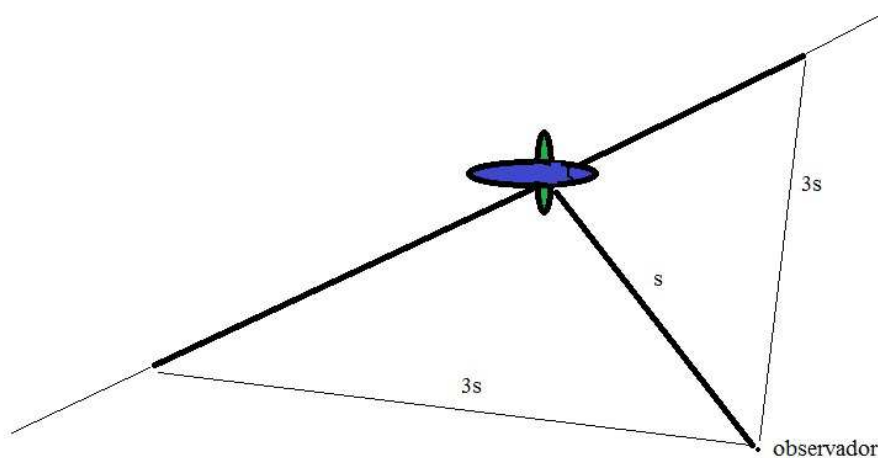


Figura A.1 – Localização do observador em relação à aeronave

Também se discorre sobre a detecção e classificação de eventos aeronáuticos, já descritos na Seção 2.9 do presente estudo. A influência de fatores ambientais, como temperatura e características do suprimento de energia também é comentada, entretanto, sua influência não provoca muita variação dentro de uma ampla faixa de condições ambientais. O evento sonoro é detectado quando: a) o som não é contínuo, mas também não impulsivo, e localizado dentro de um limite de tempo específico; b) o som excede um determinado nível básico referência; c) quando o evento termina, o som não sobe novamente dentro de um determinado período.

A caracterização dos níveis durante o evento aeronáutico é mostrada na Figura A.2, onde o evento é restrito a um determinado período de tempo (*tacima*). Ele atinge um pico máximo de nível de pressão sonora (L_p), existindo também um determinado período, onde o

nível decai de 10dB (t_{10}). Esse decaimento de 10dB, assim como o tempo necessário para esse decaimento (t_{10}) é comumente representado em espectros de passagem de aeronaves.

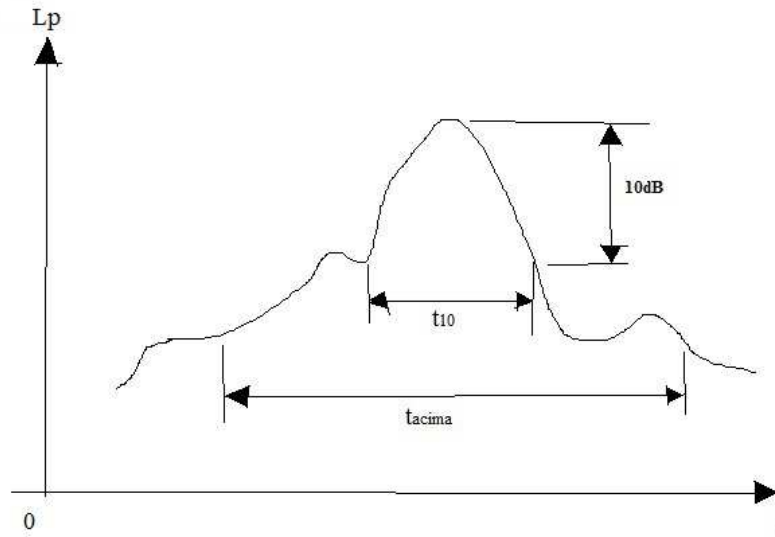


Figura A.2 – História do Nível de pressão sonora durante o evento

Com relação à incerteza do nível de exposição sonora (SEL), existem contribuições referentes ao instrumento e ao som ambiente. Geralmente estas contribuições são supostas nulas. Entretanto, em um estudo mais apurado do nível de exposição sonora ou nível máximo de pressão sonora, estas contribuições não são nulas, e, exercem, portanto, influência na incerteza combinada destas duas métricas. Isto é melhor visto na equação (2.12) ($SEL_{real} = f(SEL_{medido}, \delta_{sim}, \delta_{res})$).

O significado da fórmula consiste em mostrar que o valor real do SEL depende do valor medido do SEL, da contribuição do instrumento (δ_{sim}), e da contribuição do som ambiente (δ_{res}). Esta fórmula não significa, entretanto, que estas contribuições são somadas linearmente ao valor medido do SEL. Estas contribuições são combinadas na incerteza combinada expandida para se obter a incerteza do nível de exposição sonora do evento, visto

na equação (214) ($U(SEL) = \sqrt{\left(\frac{\partial SEL}{\partial usim} \times \frac{\delta_{sim}}{k}\right)^2 + \left(\frac{\partial SEL}{\partial ures} \times \frac{\delta_{res}}{k}\right)^2} \times k$). Na equação da

incerteza combinada expandida, também entram o coeficiente de sensibilidade (para mostrar a influência das variáveis sobre o SEL) e o coeficiente de confiabilidade (k), utilizado como

para a suposição de distribuição normal dos dados obtidos. Quando se quer uma confiabilidade de 95%, utiliza-se um $k = 2$.

As contribuições do erro devido ao aparelho instrumental são explicadas no Anexo 2. Já o erro devido ao som ambiente é obtido através da equação (2.13) ($\Delta Lp = -10 \log[1 - 10^{-0,1(LAeq-LRA)}]$ dB). Nesta equação, LAeq é o nível de pressão sonora medido no evento (de segundo a segundo), enquanto o LRA equivale ao nível de pressão sonora do ruído ambiente. Os dois níveis podem ser melhor visualizados na Figura A.3.

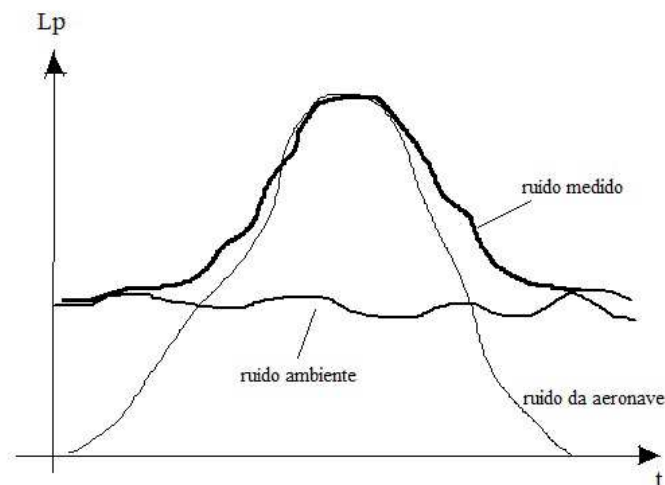


Figura A.3 – Distinção do ruído ambiente, ruído medido e ruído da aeronave em um evento sonoro

A norma também trata de contribuições devido a emissões da fonte sonora (as turbinas aeronáuticas, na maioria das vezes) e devido às reflexões do som no ar e no solo. Entretanto, estas duas contribuições não serão abordadas no presente estudo.

Anexo B – Procedimento de determinação da incerteza instrumental

Segue abaixo o método para determinação da incerteza de instrumentos de medição de Classe 1:

$$\delta_{\text{sim}} = \delta_{\text{mic}} + \delta A + \delta_{\text{lin}} + \delta V + \delta P + \delta T + \delta_{\text{RH}} + \delta_{\text{calref}} + \delta_{\text{calop}}$$

onde

- δ_{mic} é a contribuição do microfone, pré-amplificador
- δA é contribuição do filtro em A
- δ_{lin} é contribuição do nível de linearidade
- δV é a contribuição da voltagem variável
- δP é a contribuição da variação de pressão do ar
- δT é a contribuição da variação de temperatura do ar
- δ_{RH} é a contribuição da variação na umidade relativa do ar
- δ_{calref} é a contribuição do nível de pressão sonora na cavidade do calibrador de som nas condições de referencia
- δ_{calop} é a contribuição do nível de pressão sonora na cavidade do calibrador de som nas condições de operação

No caso do microfone sobre um terreno plano, o ângulo θ de incidência do som é geralmente menor que 90° (correspondente à horizontal).

Para o nível máximo L_{Amax} , o ângulo entre a direção de referência do microfone e a direção à linha perpendicular à rota de voo pode ser usado como uma estimativa para o ângulo de incidência do som θ .

Assim, os limites de reposta direcional para $\theta \leq 30^\circ$ e $\theta \leq 90^\circ$ são 1,3dB e 1,8dB respectivamente. Neste espectro de frequências a incerteza expandida de medição é 0,3dB. Nesse caso, assumindo distribuição normal com um fator de cobertura $k=2,58$, a incerteza expandida é:

$$- u_{\text{mic}} = 1,0/2,58 \text{ dB} = 0,39\text{dB para } \theta \leq 30^\circ$$

$$\text{ou } u_{\text{mic}} = 1,5/2,58 \text{ dB} = 0,58\text{dB para } \theta \leq 90^\circ$$

Entre as frequências de 50Hz a 1,25kHz, a tolerância fica abaixo de 1,5dB e a incerteza expandida de medição é de 0,5dB.

$$- u_A = 0,8/2,58\text{dB} = 0,39\text{dB}$$

O erro do nível de linearidade não deve exceder $\pm 1,1\text{dB}$ e a incerteza expandida de medição é de $0,3\text{dB}$.

$$- u_{lin} = 0,8/2,58\text{dB} = 0,31\text{dB}$$

O desvio no nível sonoro mostrado não deve exceder $\pm 0,3\text{dB}$ para mudanças na voltagem de alimentação e a incerteza expandida de medição é de $0,2\text{dB}$.

$$- u_V = 0,1/2,58\text{dB} = 0,04\text{dB}$$

O desvio no nível de pressão sonora mostrado não deve exceder $\pm 0,7\text{dB}$ para variações na pressão estática do ar entre 850hPa e 1080hPa e a incerteza expandida de medição é de $0,3\text{dB}$.

$$- u_P = 0,4/2,58\text{dB} = 0,16\text{dB}$$

O desvio no nível sonoro mostrado não deve exceder $\pm 0,8\text{dB}$ para variações de temperatura entre -10°C e $+50^\circ\text{C}$ e a incerteza expandida de medição é de $0,3\text{dB}$.

$$- u_T = 0,5/2,58\text{dB} = 0,19\text{dB}$$

O desvio no nível sonoro mostrado não deve exceder $\pm 0,8\text{dB}$ para humidade relativa entre 25% e 90% e a incerteza expandida de medição é de $0,3\text{dB}$.

$$- u_{RH} = 0,5/2,58\text{dB} = 0,19\text{dB}$$

O limite de tolerância é $0,4\text{dB}$ para o nível de pressão sonora na cavidade de um calibrador em condições de referencia:

$$- u_{calref} = 0,4/2,58\text{dB} = 0,16\text{dB}$$

O limite de tolerância é $0,4\text{dB}$ para condições de operação:

$$- u_{calop} = 0,4/2,58\text{dB} = 0,16\text{dB}$$

A incerteza combinada, u_{sim} para a contribuição, δ_{sim} é a raiz quadrada da soma de todos os u_i^2 .

$$- u_{sim} = 0,86\text{dB} \text{ para } \theta \leq 90^\circ$$

$$- \text{ou } u_{sim} = 0,74\text{dB} \text{ para } \theta \leq 30^\circ$$

Anexo C – Tabelas referentes aos movimentos de decolagem e aterrissagem das aeronaves consideradas

- Ponto 1 – Laboratório Dr. Sérgio Franco

- Airbus A320

Tabela C.1 – Horários dos movimentos de aterrissagem e decolagem e LAeq antes e depois da suavização matemática por ponto flutuante das aeronaves Airbus A320 no Ponto 1

Hora	LAeq antes da suavização	LAeq depois da suavização
12:27	75,0	70,9
13:06	69,4	68,3
13:22	71,5	69,3
17:03	75,1	71,2
17:16	72,8	69,7
17:42	72,7	70,6
18:30	72,1	69,6
18:33	69,6	69,4
19:13	68,8	68,1
19:31	71,4	70,3
19:36	74,2	71,6
19:56	71,2	69,9
20:26	70,8	69,8
20:41	71,5	71,1
20:43	74,5	71,8
20:48	71,4	69,3
20:52	74,9	71,4
21:05	75,5	71,9
21:12	73,5	70,4
21:15	74,4	71,6
21:18	69,3	68,8
21:30	76,0	72,2
21:49	79,9	76,3
22:25	74,3	72,6
22:59	77,1	73,4
23:16	75,9	75,4
23:18	77,9	76,1
23:28	73,3	73,3
23:30	79,2	73,9
23:32	75,2	73,1
23:40	78,2	76,1
23:48	67,0	66,7
23:51	72,6	70,6
23:52	79,7	79,8
23:54	81,7	78,2
0:05	81,5	78,3
0:15	75,3	74,1
6:49	76,0	73,8

7:50	81,3	77,5
7:57	71,9	71,3
9:32	71,0	72,5
9:38	79,6	76,6
9:47	80,7	77,2
9:55	78,0	77,3
10:00	80,7	77,6
10:05	73,9	72,9
10:13	80,3	76,7
10:17	78,0	76,6
10:52	79,4	76,6
10:59	75,2	73,2
11:17	78,2	77,4
11:19	65,4	67,8
11:23	79,5	76,0
11:39	80,1	76,3

- Boeing 737-700 (B737)

Tabela C.2 – Horários dos movimentos de aterrissagem e decolagem e LAeq antes e depois da suavização matemática por ponto flutuante das aeronaves B737 no Ponto 1

Hora	LAeq antes da suavização	LAeq depois da suavização
13:25	72,4	68,7
18:25	73,5	70,8
18:42	72,3	70,4
19:10	75,5	71,8
19:18	78,3	78,8
20:07	76,1	73,0
20:10	73,5	71,8
20:26	70,8	69,8
20:37	73,3	68,6
21:01	75,9	71,8
21:46	76,5	74,2
21:52	73,9	73,1
22:00	72,8	71,8
22:35	75,0	73,2
22:46	61,0	63,8
23:59	70,6	68,7
0:23	67,9	65,8
1:57	79,4	75,9
5:08	71,5	68,9
5:11	65,8	67,4
5:29	77,1	75,1
6:45	75,7	74,4

7:41	67,1	67,2
7:52	73,6	71,9
9:51	74,6	73,1
10:26	79,7	77,2
11:23	79,5	76,0
11:42	69,4	67,7
11:43	72,6	70,4

- Ponto 2 – Alojamento

- Airbus A320

Tabela C.3 – Horários dos movimentos de aterrisagem e decolagem e LAeq antes e depois da suavização matemática por ponto flutuante das aeronaves Airbus A320 no Ponto 2

Hora	LAeq antes da suavização	LAeq depois da suavização
09:02	77,4	75,0
09:18	79,7	78,3
09:28	78,1	76,3
09:42	75,5	72,8
09:45	78,6	76,5
09:53	80,1	78,9
09:54	76,9	74,9
09:56	83,6	82,3
10:31	79,3	78,0
10:35	80,9	78,2
10:45	87,9	84,5
11:12	78,7	76,0
11:19	82,1	80,0
11:34	73,9	72,4
11:51	84,3	81,2
11:53	74,3	73,2
12:22	80,2	77,7
12:25	76,1	73,3
12:47	81,0	78,8

- Boeing 737-700 (737)

Tabela C.4 – Horários dos movimentos de aterrisagem e decolagem e LAeq antes e depois da suavização matemática por ponto flutuante das aeronaves B737 no Ponto 2

Hora	LAeq antes da suavização	LAeq depois da suavização
21:24	67,4	69,26619

21:31	78,5	76,99253
09:38	80	78,6027
10:20	69,2	66,57154
11:22	67,9	65,70713
11:30	81	78,33564
11:37	78,6	76,63998
11:42	79,6	78,23048

- Ponto 3 – CIEP João Mangabeira

- Airbus A320

Tabela C.5 – Horários dos movimentos de aterrissagem e decolagem e LAeq antes e depois da suavização matemática por ponto flutuante das aeronaves Airbus A320 no Ponto 3

Hora	LAeq antes da suavização	LAeq depois da suavização
9:14	66,3	64,94146
9:17	66,5	66,31137
9:19	63	62,89705
9:27	66,8	64,70938
9:29	61,3	63,4171
9:38	63,9	62,44694
9:40	67,9	65,53323
9:43	64,4	63,2724
10:24	66	65,47294
10:29	64,1	64,41917
10:33	64,4	63,77613
10:43	65,7	65,0267
10:52	63,6	63,47853
11:19	74	65,09226
11:41	64,6	64,22146
11:49	64,1	64,41505
12:06	67,8	66,25522
12:31	63,2	65,40277
13:56	68	66,03886
13:59	65,7	66,78157
15:29	67,2	67,97847
15:40	66,1	65,15088
15:52	68,3	68,1236
15:54	68,9	65,50847
16:29	68,3	66,58747
16:42	66,6	64,3635
17:04	66,1	65,52481

17:13	65,5	65,47518
17:39	67,1	66,9573
18:22	67,4	66,36784
18:37	67,5	67,91136
18:39	66,1	65,55604
19:13	70,2	69,24634
19:43	68,2	65,65533
19:58	68,6	66,91027
20:16	66,7	65,42619
20:21	67,1	65,53111
20:41	53,5	65,80582
21:17	66,7	66,76017
21:46	68	66,06204
21:52	68,3	65,61565
22:38	66,2	64,46464
22:41	68,6	66,6263
22:43	66,6	64,4858
22:45	66,7	64,9527
22:55	65,8	66,22756
22:56	63,2	61,84936
23:09	67,6	66,71099
23:37	64,9	63,67269
23:41	67,3	66,48969
23:44	65,9	65,76518
7:32	68,7	66,16256
7:48	68,6	67,55273

- Boeing 737-700 (B737)

Tabela C.6 – Horários dos movimentos de aterrisagem e decolagem e LAeq antes e depois da suavização matemática por ponto flutuante das aeronaves B737 no Ponto 3

Hora	LAeq antes da suavização	LAeq depois da suavização
9:30	68,9	67,30978
10:39	68,1	67,32795
10:55	66,5	64,33482
11:00	66,8	65,07927
11:14	64,9	63,79663
11:23	69,4	67,32829
14:40	65,8	64,16973
14:51	67,8	66,72263
15:13	68	66,87129
17:57	71	68,10557
18:51	68,1	66,59976

19:10	71,7	69,3012
20:52	72,7	70,99814
21:29	63,2	62,79039
21:36	71	68,36508
21:43	69,6	67,69729
21:57	70,1	69,38188
22:15	68,3	67,51613
5:13	54	55,48887
5:31	55,5	59,51525
5:33	72	69,27653
6:45	68,6	66,49347
7:41	70,4	68,16165