

Redes Neurais Artificiais Aplicadas à Simulação de Cenários Complexos de Ruído Aeronáutico

Revoredo, T.C.*; Slama, J.G.+; Mora-Camino, F.++

*Doutor em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, teorevoredodo@yahoo.com.br

+Laboratório de Acústica e Vibrações, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, julesslama@yahoo.com.br

++Laboratoire d'Automatique et de Recherche Opérationnelle, École Nationale de l'Aviation Civile, França, moracamino@hotmail.fr

Resumo

A intensificação do tráfego aéreo e a intrusão urbana geram situações críticas de incômodo sonoro ao redor dos aeroportos e a estimação do ruído aeronáutico ganha importância na avaliação de cenários de tráfego e na definição de novos procedimentos de pouso e decolagem objetivando a redução deste incômodo. Essa estimação tem sido feita por modelos de segmentação de trajetórias que geralmente não apresentam o histórico temporal dos níveis estimados. Para superar essa limitação e a inexistência de um modelo analítico completo, propõe-se uma abordagem dinâmica e diretamente relacionada às trajetórias 4D das aeronaves. Para tal, a *platitude* diferencial da dinâmica de guidagem das aeronaves é usada para gerar, a partir das trajetórias, os valores de alguns dos fatores causais do ruído que são entradas para o modelo de estimação. Assim, uma rede neural artificial permite a representação da evolução temporal do ruído em pontos da vizinhança dos aeroportos. Os resultados são obtidos e validados com base no Modelo Integrado de ruído (INM). A ferramenta é promissora para análises complexas do cenário de incômodo em particular para problemas associados à dispersão de trajetórias complexas.

Palavras-chave: Estimação do ruído aeronáutico, redes neurais artificiais, sistemas diferencialmente planos, dinâmica do voo.

1. Introdução

A qualidade de vida nas metrópoles depende cada vez mais do ruído ambiental. Uma grande parcela desse ruído provém da operação dos meios de transporte modernos. Com relação às áreas próximas aos aeroportos, a intensificação do tráfego aéreo, assim como a intrusão urbana nessas proximidades, têm levado a situações críticas. Frente a esses problemas, os poderes públicos vêm criando agências especializadas na questão do meio ambiente aeroportuário, ao mesmo tempo em que associações de moradores surgem para defender seus interesses. As regulamentações cada vez mais restritivas estimulam os fabricantes de aeronaves a desenvolver novos projetos e os operadores do tráfego aéreo a desenhar novos procedimentos operacionais para os aeroportos.

Nesse contexto, a estimação dos níveis de ruído nos arredores dos aeroportos ganha importância na avaliação de cenários de tráfego e na definição de novos procedimentos de pouso e decolagem, uma vez que o incômodo sonoro criado sobre a população vizinha ao aeroporto deve ser diminuído, com o objetivo de garantir o crescimento sustentado do transporte aéreo.

Essa estimação tem sido feita através de modelos baseados na segmentação das trajetórias de voo das aeronaves, tais como o *Modelo Integrado de Ruído* (INM), que utilizam uma base de dados de emissão sonora fundamentada nos níveis medidos no processo de certificação das aeronaves. Além disso, os programas baseados nesse tipo de modelo geralmente não determinam o histórico temporal dos níveis estimados.

Ademais, os modelos baseados em segmentação das trajetórias não apresentam uma relação direta com a dinâmica do voo das aeronaves, o que permitiria melhores avaliações de impacto, já que possibilitaria reconstituir de forma dinâmica o ruído gerado pelas aeronaves e percebido em um determinado local.

Nesse contexto, o objetivo deste trabalho é demonstrar a exequibilidade de um modelo de ruído de complexidade aceitável para utilização em atividades quotidianas, que seja diretamente relacionado à dinâmica do voo das aeronaves, de maneira a ultrapassar as capacidades apresentadas pela modelagem por segmentação de trajetórias atualmente preponderante. Este tipo de modelo deverá ser uma ferramenta de avaliação muito útil para avaliação de cenários complexos de ruído, envolvendo problemas de natureza dinâmica tais como a otimização e a dispersão de trajetórias, incluindo execução em tempo real.

A dinâmica de guidagem de uma aeronave é descrita matematicamente por um conjunto de equações diferenciais não lineares e apresenta uma propriedade diferencial aqui definida como *platitude* diferencial. Essa propriedade tem sido aproveitada para o projeto de sistemas de controle dedicados ao seguimento de trajetórias. Neste trabalho, esta mesma propriedade é utilizada, através da inversão dinâmica que ela permite, para gerar, a partir da trajetória seguida pela aeronave, os valores de alguns dos fatores causais do ruído gerado pela mesma. Trata-se especificamente dos ângulos de *roll* e *pitch*, e do empuxo dos motores, aos quais são juntados a velocidade aerodinâmica da aeronave e sua

orientação relativa para a realização da estimativa de ruído.

A geração, a propagação e a recepção do ruído aeronáutico constitui-se num processo extremamente complexo, sujeito a particularidades locais (topografia, construções, etc) e climáticas (umidade, vento, temperatura, etc) variáveis de um local para outro e de um período para outro. Em condições padrão, os fatores causais relacionados com a geração do ruído em um certo local são relativamente poucos. Entretanto, nenhum modelo analítico de complexidade aceitável é hoje disponível. Assim, a alternativa escolhida nesse trabalho é a de verificar a exequibilidade da utilização de uma rede neural artificial (RNA) como sistema de predição do nível de ruído instantâneo em um receptor a partir dos valores dos principais fatores causais.

Tendo em vista a indisponibilidade de dados reais e contínuos para a realização dos procedimentos de treinamento e validação da rede neural, o banco de dados e o módulo de cálculo do INM são utilizados como ponto de partida para validação da proposta.

O trabalho é organizado da seguinte maneira: A Seção 2 apresenta uma breve contextualização da problemática do ruído aeroportuário e as diferentes abordagens utilizadas para a sua redução. Na Seção 3 são expostos os principais tipos de algoritmos para avaliação do impacto sonoro dos aeroportos utilizados pelas principais organizações de avaliação e regulamentação do ruído aeroportuário, com destaque para o programa INM, que é o modelo mais difundido mundialmente. A Seção 4 expõe os conceitos fundamentais e a definição dos sistemas diferencialmente planos e discute algumas aplicações importantes. Na Seção 5 é demonstrado de maneira simplificada que as coordenadas do centro de gravidade de uma aeronave é uma saída plana para sua dinâmica de guidagem, o que permite encontrar os valores de algumas das entradas do modelo de ruído a partir da trajetória desempenhada pela aeronave. A Seção 6 aborda a realização do modelo de estimação de ruído baseado em uma RNA cujos resultados são validados a partir de comparações com o INM. Na Seção 7 são realizadas as considerações finais sobre o trabalho.

2. Ruído Aeroportuário

O ruído aeroportuário pode ser definido como um som indesejado nos arredores de um aeroporto que perturba as atividades rotineiras das pessoas que habitam estas regiões, e as incomoda de maneira geral. Este ruído é gerado por algumas fontes diferentes, sendo a principal as aeronaves. O ruído aeroportuário, em especial o aeronáutico, é reconhecido como uma das maiores barreiras à expansão das operações aeroportuárias, e vem gerando restrições operacionais mundo afora. Por consequência, estratégias para a sua redução estão sendo buscadas pelos diversos atores envolvidos, sejam elas

medidas locais (procedimentos de pouso e/ou decolagem específicos para um determinado aeroporto, por exemplo) ou globais (redução do ruído na fonte, por exemplo).

Uma vez que é devido a diversos fatores, o ruído em torno de aeroportos 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 fazem parte da frota operada, o horário dos voos, as rotas e os perfis 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 uso 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 Organização internacional de aviação civil, em sua 33ª assembleia em outubro de 2001, definiu uma filosofia para tratar desta questão denominada Abordagem equilibrada, na qual 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 voo 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 à 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 aos tipos de atividades da população. A Figura 1 exemplifica este conceito.

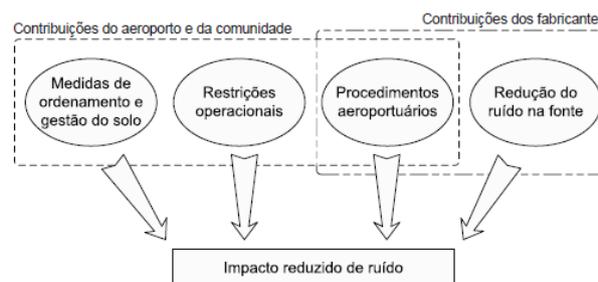


Figura 1: A redução efetiva do ruído depende dos diversos atores envolvidos com a questão.

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 infraestrutura aeroportuária* (Infraero), que administra os principais aeroportos, as companhias aéreas, as fabricantes de aeronaves, as prefeituras, etc.

A complexidade do problema ressalta a importância do desenvolvimento de ferramentas de análise que auxiliem na abordagem desta questão, provendo alternativas para o projeto e a realização de novos procedimentos aeroportuários. A ferramenta proposta neste trabalho está inserida neste contexto.

3. Ferramentas de Avaliação dos Níveis de Ruído Aeroportuário

A modelagem do ruído aeroportuário é fundamental para avaliações do impacto sonoro que os aeroportos produzem nas regiões vizinhas e, por consequência, um instrumento de auxílio às tomadas de decisão por parte das autoridades aeroportuárias ou órgãos relacionados (prefeituras, órgãos ambientais, etc). Menos custosa do que a realização de campanhas de medição ou implantação de sistemas de monitoração de ruído, a modelagem permite não apenas estimar o cenário do incômodo atual de um dado aeroporto, mas, também, avaliar alternativas para a redução dos níveis de ruído em função de diferentes condições, incluindo a previsão do impacto futuro decorrente da modificação da frota operada de aeronaves.

O principal componente do ruído aeroportuário é a movimentação das aeronaves no aeroporto. Desse modo, a avaliação do impacto sonoro criado pelo mesmo pode, na maioria das vezes, ser realizada a partir da modelagem do nível de ruído aeronáutico. Dentre os objetivos desta modelagem, pode-se destacar: A representação do impacto através de curvas de ruído para toda a área ao redor do aeroporto; A análise do impacto atual, histórico ou previsto (crescimento do tráfego aéreo, modificação da frota de aeronaves etc); A busca por alternativas para a avaliação do impacto sonoro devido a modificações realizadas e identificação de soluções para mitigação do ruído.

3.1 Algoritmos para a Modelagem do Ruído

Os algoritmos de modelagem do ruído aeronáutico podem ser classificados em três grupos, de acordo com a maneira pela qual o nível de ruído é calculado [1], a saber: Ponto de aproximação mais próximo (CPA); Segmentação de trajetórias; Simulação.

Os algoritmos CPA foram desenvolvidos para calcular o nível máximo do ruído, antes que a adoção das métricas integradas no tempo fosse bem difundida. Esse tipo de algoritmo é baseado na hipótese de que, para um determinado conjunto de características da fonte, o nível máximo de ruído (L_{Amax}) depende apenas da menor distância entre a aeronave e o receptor. Dessa maneira, o CPA é o algoritmo de cálculo mais rápido e simples.

Os algoritmos CPA tendem a utilizar curvas NPD (distância-potência-ruído) relativas a segmentos de trajetória infinitos e velocidades específicas das aeronaves. Para que a representação dos segmentos em curva e das variações de velocidade da aeronave sejam possíveis, são aplicados ajustes simplificados.

A metodologia do cálculo por segmentação de trajetórias foi desenvolvida a partir de melhorias introduzidas nos algoritmos CPA. Nesta, as contribuições individuais de cada segmento significativo da trajetória de voo é calculada, através da determinação da fração do ruído do segmento infinito que seria irradiada pelo segmento finito. Entretanto, esses modelos realizam apenas uma caracterização simplificada das fontes de ruído, além de não modelar de maneira detalhada os efeitos da propagação das ondas sonoras.

Outra maneira de calcular o ruído aeronáutico é por simulação. Um modelo desse tipo pode descrever com maior exatidão a trajetória da aeronave e os efeitos de propagação do ruído, bem como as características das fontes. O histórico dos níveis de ruído em qualquer local pode ser então calculado através da soma dos níveis emitidos em cada ponto da trajetória. Entretanto, algumas desvantagens existem, tais como a capacidade computacional demandada, o tempo de cálculo, e a necessidade de dados detalhados relativos à acústica e ao desempenho das aeronaves. Esse tipo de informação ainda não está disponível de maneira acessível para a modelagem cotidiana.

Nesse contexto, os modelos de segmentação de trajetórias são atualmente os mais utilizados para a modelagem de ruído aeronáutico/aeroportuário, uma vez que possuem boa relação entre a base de dados necessária (disponível) e a exatidão alcançada nos cálculos.

3.2 Modelo Integrado de Ruído (INM)

O INM é o modelo mais difundido pelo mundo para a estimação do ruído aeronáutico ao redor de aeroportos. Sua principal funcionalidade é a geração de curvas estáticas de níveis de ruído para a região ao redor dos aeroportos devido à operação das aeronaves. Sua utilização tem como principais objetivos o zoneamento do solo e a organização do tráfego aéreo. A previsão do impacto devido à implementação de novos procedimentos operacionais também é possível.

O programa é estruturado de tal forma que o usuário trabalha com estudos de caso criados através da inserção de parâmetros tais como a quantidade e a localização das pistas de pouso e decolagem, os tipos de aeronave que operam no aeroporto, a movimentação da frota, dentre outros. A Figura 2 ilustra este processo.

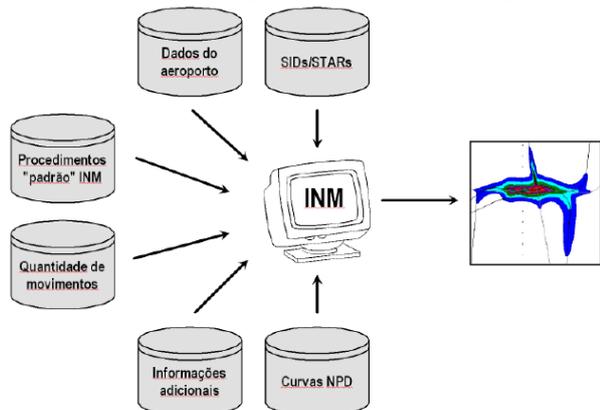


Figura 2: Entradas para o cálculo de ruído pelo INM.

Para calcular o ruído efetivo em uma dada distância, o INM, assim como os outros modelos fundamentados em segmentação de trajetórias, realiza diversos ajustes nos níveis de ruído em função dos níveis NPD de referência. Uma descrição detalhada da metodologia utilizada, bem como o método de cálculo para as diferentes métricas, pode ser encontrada em [2]. Além disso, ressalta-se que os fundamentos para os cálculos realizados são oriundos da norma [3].

3.2.1 Limitações

Embora a modelagem realizada pelo INM e os resultados que o programa pode fornecer sejam ferramentas importantes para a avaliação do ruído aeroportuário, ela apresenta algumas limitações, das quais as principais serão destacadas a seguir.

Em primeiro lugar, a base de dados do programa é adaptada à utilização da metodologia de segmentação de trajetórias, o que significa que as informações nela contidas são adaptadas para o uso das simplificações empregadas nesta metodologia. No que diz respeito ao ruído, as tabelas NPD possuem, em geral, apenas dois valores diferentes para o empuxo bruto dos motores, que são relacionados a apenas 10 distâncias distintas. Além disso, os pontos de medição são todos situados sob uma trajetória de voo infinita, em linha reta. No mais, as informações não são disponibilizadas para todos os tipos de aeronaves possíveis e, com isso, são consideradas substituições de aeronaves no cálculo, em função da semelhança que elas possuem com relação às características espectrais.

O método de segmentação de trajetórias no qual se baseia o INM representa as trajetórias 3D da aeronave como sendo compostas de vários segmentos em linha reta, nos quais a mudança de estado da aeronave não

seja significativa segundo os critérios da metodologia. Dessa maneira, a quantidade de segmentos utilizados para descrever as trajetórias é limitada se comparada às possibilidades dos modelos de simulação.

Por fim, uma limitação significativa reside na impossibilidade de representar o ruído de maneira dinâmica. Uma representação desse tipo, que possua uma relação direta com a trajetória desempenhada e os estados da aeronave em cada instante de tempo, permitiria análises mais complexas do cenário de ruído do aeroporto e seria particularmente interessante para aplicação em problemas de natureza dinâmica tais como a avaliação de trajetórias complexas e da dispersão de trajetórias.

Nesse contexto, e tendo em vista a inexistência de um modelo analítico completo, é interessante buscar alternativas de modelagem que sejam capazes de suplantar essas necessidades. Tais modelagens devem ser adequadas à dinâmica do problema, porém possuir complexidade aceitável, de maneira que seja possível aplicá-las em avaliações quotidianas, da mesma maneira que o INM o é. Além disso, é interessante que o modelo seja computacionalmente rápido o suficiente para que possa prover possibilidades de integração/interação com outras ferramentas tais como os sistemas de modelagem do tráfego aéreo nos aeroportos.

4. Elementos Sobre Sistemas Diferencialmente Planos

O crescimento do tráfego de aeronaves nos principais aeroportos do mundo nas últimas décadas têm resultado em problemas de saturação do espaço aéreo e têm aumentado a exposição sonora nas comunidades vizinhas a estes aeroportos. Autoridades civis em diversos países vêm estabelecendo regulamentações relativas à exposição sonora que tendem a aumentar os custos operacionais das companhias aéreas. Portanto, é importante que estas companhias satisfaçam de maneira eficiente às restrições impostas. Nesse contexto, e tendo em vista que o pouso e a decolagem são as etapas do voo críticas com relação à exposição sonora, a busca por trajetórias cuja realização diminua o incômodo em torno do aeroporto ganha importância. Mais do que isso, a capacidade da aeronave realizar este tipo de trajetória é fundamental, e a avaliação de técnicas de controle que permitam o seguimento mais exato possível destas trajetórias é de grande interesse.

A estimativa dos níveis de ruído gerados pelas aeronaves na vizinhança dos aeroportos provê as bases para avaliações de trajetórias que possam reduzir o impacto sonoro nesses locais. Tendo em vista a natureza dinâmica do problema, é interessante buscar técnicas de estimativa que sejam relacionadas a essa dinâmica e permitam, dessa maneira, a realização de estimativas mais adequadas ao projeto de trajetórias realizáveis e eficazes com relação à redução do ruído. Uma

abordagem promissora é a utilização do conceito de *platitude* diferencial, que será descrito a seguir.

4.1 Definição

Seja um sistema cuja dinâmica é representada pelas seguintes equações de estado:

$$\dot{x} = f(x, u) \quad x \in \mathfrak{R}^n, u \in \mathfrak{R}^m \quad (1)$$

Uma saída y , $y \in \mathfrak{R}^m$ do sistema é dita diferencialmente plana (ou, simplesmente, plana) se ela é tal que:

1. O vetor das saídas planas pode ser escrito na forma:

$$y = (y_1, y_2, \dots, y_m) \quad (2)$$

$$y_i = h_i(x, u_1, \dots, u_1^{\delta_1}, \dots, u_m, \dots, u_m^{\delta_m}) \quad (3)$$

nas quais $i=1$ a m são inteiros naturais e δ_i é a ordem da derivada de u_i .

2. As componentes de y_i são analiticamente independentes.
3. As componentes de estado, x , e entrada, u , podem ser expressas em função de componentes das saídas planas, y , e um número finito das suas derivadas, tal como segue:

$$x_i = \Phi_i(y_1, y_1^1, \dots, y_1^{\mu_{i,1}}, \dots, y_m, \dots, y_m^{\mu_{i,m}}) \quad (4)$$

$$u_j = \Psi_j(y_1, y_1^1, \dots, y_1^{v_{j,1}}, \dots, y_m, \dots, y_m^{v_{j,m}}) \quad (5)$$

Nas quais $i=1$ a n e $j=1$ a m e $u_{i,j}$ e $v_{i,j}$ são inteiros naturais.

4. As funções Φ e Ψ satisfazem à seguinte equação:

$$\dot{\Phi} = f(\Phi, \Psi) \quad (6)$$

Para as saídas planas y , o sistema é dito equivalente Lie-Backlund [4] ao seguinte sistema trivial:

$$y_k^{\delta_k} = v_k \quad (7)$$

Na qual:

$$k = 1, \dots, m \therefore \delta_k = \max(v_{jk}, j = 1, \dots, m) \quad (8)$$

Nos casos em que as condições (4) e (5) não são satisfeitas, mas as componentes dos vetores de estado, comando e saída e um número finito de suas derivadas satisfazem a uma relação tal como a apresentada em (9), na qual f é avaliada em \mathfrak{R}^{n+m} e é localmente inversível em um domínio D , diz-se que o vetor de saídas y é implicitamente plano para o sistema no domínio D . No primeiro caso, quando as condições (4) e (5) são satisfeitas, diz-se que y é, também, explicitamente plano para este sistema.

$$f(x, u, y, \dot{y}, \dots, y^{(\delta)}) = 0 \quad (9)$$

Alguns sistemas possuem saídas planas, outros não. Se do ponto de vista da matemática é interessante estudar as propriedades que garantam a existência de saídas planas para um sistema, do ponto de vista da dinâmica e controle a questão é saber se as saídas que se propõe seguir ou controlar são planas ou não.

4.2 Aplicações

A *platitude* diferencial tem sido fonte de muitas aplicações na área de sistemas dinâmicos não lineares. A propriedade de inversão causal entre as saídas planas e as entradas de um sistema (Equação (5)) permite, por exemplo, que, dada a trajetória das saídas planas, seja possível reconstruir, para cada instante, o valor das entradas. Esta mesma propriedade permite, considerando que as entradas independentes são sinais de controle, estabelecer uma lei de controle em malha aberta cujo objetivo seja fazer com que as saídas planas sigam uma determinada trajetória. Deve-se notar que a propriedade de inversão local garante a controlabilidade teórica do sistema, porém se os sinais de controle calculados através da inversão vão além dos limites físicos dos atuadores que os implementam, esta trajetória não será exequível.

Geralmente o modelo matemático da dinâmica de um sistema apresenta aproximações. Além disso, o sistema físico pode ser submetido a perturbações não consideradas na modelagem. Desse modo, o controle plano deve também conter um elemento corretor das diferenças entre a saída efetiva e a saída esperada, devido ao efeito dos erros de modelagem e das perturbações.

A propriedade de inversão interna que permite representar as variáveis de estado em função das saídas e suas derivadas (Equação (4)) dá origem a aplicações interessantes. Por exemplo, há muitos casos nos quais as variáveis internas apresentam limitações operacionais tais como temperatura e pressão máximas, dentre outras. Nesses casos, é possível verificar a exequibilidade de uma trajetória de saída em relação a estas restrições. Considerando também que a relação (5) constitui uma redundância analítica, uma vez que as saídas planas e algumas componentes do vetor de estados sejam medidas, a comparação entre os valores obtidos com os valores calculados a partir da Equação (5) pode ser uma base para a detecção de falhas do sistema dinâmico.

5. Inversão da Dinâmica de Guiagem de uma Aeronave

O impacto sonoro devido à operação das aeronaves ao redor dos aeroportos já se enquadra hoje como um dos fatores determinantes nas políticas de expansão aeroportuária que permitam acompanhar de maneira adequada o aumento do tráfego aéreo. Nesse contexto, vários estudos vêm sendo realizados com o objetivo de

determinar novos procedimentos de pouso e decolagem que reduzam o incômodo sonoro da população vizinha aos aeroportos. Para que o desenvolvimento de tais procedimentos seja efetivo, dois fatores são importantes, a saber:

1. A estimação do ruído aeronáutico de maneira dinâmica e da forma mais exata possível em pontos ao redor dos aeroportos, em função das trajetórias desempenhadas pelas aeronaves.
2. A capacidade do sistema de guidagem das aeronaves de fazê-las seguir trajetórias complexas, desenhadas com o objetivo de minimizar os níveis de ruído gerados na vizinhança dos aeroportos.

O primeiro item trata da estimação adequada do ruído gerado pelas aeronaves ao redor dos aeroportos. Uma estimação exata e dinâmica permitiria a avaliação de diferentes cenários de maneira adequada e abriria caminho para a implementação de procedimentos de otimização do projeto de trajetórias, condicionando-as aos níveis de ruído estimados em função dos parâmetros de desempenho da aeronave e das condições ambientais locais.

O segundo item diz respeito à necessidade das aeronaves serem capazes de desempenhar novas trajetórias complexas geradas dinamicamente.

Ambos os itens dependem do conhecimento (ou estimação adequada) dos parâmetros que são as entradas do sistema de guidagem das aeronaves. São esses parâmetros que fazem com que elas sigam a trajetória definida e, junto a ela, definem os níveis de ruído na vizinhança dos aeroportos.

Para realizar a estimação das entradas da dinâmica de guidagem de uma aeronave a partir do conhecimento da trajetória desempenhada, o conceito de *platitude* diferencial pode ser aplicado.

Para avaliação do seguimento de trajetória de uma aeronave, é suficiente focar os estudos em sua dinâmica lenta. Esta dinâmica relaciona os parâmetros de pilotagem θ (ângulo de *pitch*), ϕ (ângulo de *roll*), e N_1 (velocidade do rotor dos motores em baixa pressão), à trajetória seguida pela aeronave. A partir de um modelo no espaço de estados da dinâmica do voo, e considerando algumas equações adicionais, é possível escrever as equações dinâmicas como segue.

$$\dot{v} - \frac{-D + T \cos(\theta - \gamma) - \text{sen}(\gamma)mg}{m} = \Gamma_{N_1} \quad (10)$$

$$\dot{\gamma} - \frac{-L + T \text{sen}(\theta - \gamma) - \text{cos}(\gamma)mg}{m} = \Gamma_{\theta} \quad (11)$$

$$\dot{\psi} - \frac{g}{v_T} \tan(\phi) \cos(\gamma) = 0 \quad (12)$$

Nas quais D e L são as forças de arraste e sustentação, respectivamente, T é o empuxo dos motores, m é a massa da aeronave, g o vetor de gravidade local, γ é o ângulo de *pitch* aerodinâmico, ψ é o ângulo de *yaw*, v é a velocidade real da aeronave e v_T é a velocidade expressa no sistema de coordenadas da Terra. Desse modo, a platitude diferencial das saídas x_T, y_T e z_T , que são as coordenadas do centro de gravidade da aeronave com referência ao sistemas de coordenadas da Terra, será estabelecida se as seguintes condições forem satisfeitas:

$$\phi = \arctan\left(\frac{v_T \psi}{\text{cos}(\gamma)g}\right) \quad (13)$$

$$\det \begin{bmatrix} \frac{\partial \Gamma_{N_1}}{\partial \theta} & \frac{\partial \Gamma_{N_1}}{\partial N_1} \\ \frac{\partial \Gamma_{\theta}}{\partial \theta} & \frac{\partial \Gamma_{\theta}}{\partial N_1} \end{bmatrix} \neq 0 \quad (14)$$

A solução corresponde ao esquema apresentado na Figura 3.

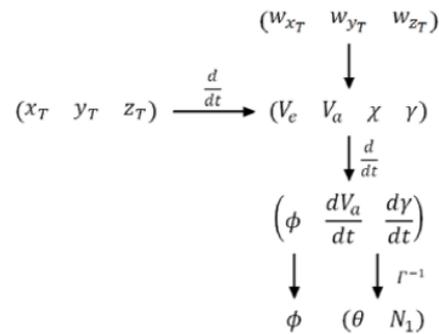


Figura 3: Obtenção de θ , ϕ e N_1 .

Pode ser demonstrado que a condição de inversibilidade é satisfeita para condições normais de voo [5]. Portanto, a posição do centro de gravidade de uma aeronave é uma saída plana para sua dinâmica de guidagem. Logo, a partir do conhecimento da trajetória, é possível estimar valores para os ângulos de *roll* e *pitch* da aeronave, bem como para o empuxo (regime) dos motores. Entretanto, o procedimento implica na realização de uma inversão dinâmica, que é difícil de ser alcançada de forma analítica, devido à complexidade do modelo. Desse modo, uma solução numérica é adequada. Uma solução desse tipo é apresentada em [6].

6. Estimação dos Níveis Instantâneos de Ruído Via Rede Neural

O nível sonoro instantâneo gerado pela movimentação de uma aeronave em um determinado local é relacionado ao tipo da aeronave e à sua configuração, à sua velocidade e ao regime dos motores, bem como às suas distância e atitude com relação ao receptor.

Entretanto, não há um modelo analítico confiável para esta relação.

Nesse contexto, é interessante buscar alternativas para essa estimativa de ruído que condigam com a natureza dinâmica do problema, permitindo, assim, uma aplicação mais adequada em estudos dessa natureza, tais como otimização e dispersão de trajetórias 4D e modelos que incluam a dinâmica da aeronave. Com esse objetivo, a presente seção apresenta uma ferramenta fundamentada em uma estrutura de rede neural artificial (RNA) multicamada sem realimentação, desenvolvida para estimar o nível sonoro instantâneo produzido pela movimentação de uma aeronave em um local específico. O principal propósito é demonstrar a exequibilidade de tal ferramenta e sua potencialidade para avaliações do impacto sonoro ao redor de aeroportos, especialmente se treinada com base em dados reais de desempenho da aeronave e medições de ruído.

Utilizando a *platitudo* diferencial da dinâmica de guidagem de uma aeronave é possível estimar a evolução temporal dos parâmetros que são as entradas para o modelo de estimação de ruído. Em seguida, utilizando uma malha de pontos adequada, os níveis de ruído em um ou mais locais na vizinhança do aeroporto podem ser calculados numericamente.

As redes neurais artificiais multicamadas já são famosas por sua impressionante capacidade de realizar tarefas de aproximação de funções utilizando uma quantidade adequada de neurônios e de dados para o seu treinamento [7]. Neste trabalho, uma RNA multicamada sem realimentação é treinada para estimar numericamente os níveis de ruído em pontos determinados próximos ao aeroporto, baseado em dados de desempenho da aeronave, bem como na sua posição com relação ao ponto em questão (receptor).

As entradas impostas a rede neural para que esta realize a estimação dos níveis de ruído são: A distância entre a aeronave e o receptor, $d_{ARecep}(t)$; A velocidade inercial da aeronave, $v_T(t)$; O Empuxo dos motores da aeronave, $T(t)$; A atitude da aeronave, ângulos $\theta(t)$, $\phi(t)$ e $\psi(t)$; A orientação do receptor, ângulos $\theta_{Recep}(t)$ e $\psi_{Recep}(t)$ (ângulos de incidência das ondas sonoras no plano horizontal e vertical, respectivamente). A saída da RNA é o nível de ruído instantâneo, $l(t)$, no ponto onde se encontra o receptor. Neste estudo, a rede neural artificial é composta de apenas uma camada interna de maneira a reduzir a complexidade da sua estrutura. O número de neurônios nesta camada é determinado empiricamente e depende fortemente do volume de dados para o treinamento.

Ambos, o número de neurônios e a quantidade de dados para o treinamento, afetam seriamente a capacidade de generalização da RNA, que é a capacidade da rede de tratar satisfatoriamente dados os quais nunca viu antes,

desde que eles sejam da mesma classe daqueles utilizados no processo de aprendizagem. Entretanto, não existem critérios ou princípios específicos para determinar, a priori, o número efetivo de neurônios e/ou um ponto de parada apropriado para o treinamento. Portanto, a rede neural utilizada neste trabalho é ainda determinada de maneira empírica em função do volume de dados disponível para o seu treinamento.

6.1 Treinamento da RNA

A base de dados usada para o treinamento da RNA é construída a partir do INM. Para obtenção de um conjunto adequado de informações, é necessária a realização de diversos estudos de caso diferentes no INM, de maneira que seja possível gerar uma grande quantidade de padrões diferenciados para serem apresentados a RNA ao longo do treinamento, aumentando, assim, sua capacidade de generalização. Entende-se, aqui, por padrões de treinamento, um conjunto de estados diferentes da aeronave, associados à sua posição com relação aos receptores, bem como o nível de ruído esperado nesses pontos em função desses estados. O objetivo é formar uma base de dados organizada tal como apresentado na Equação (15). Para tal, alguns cálculos adicionais são necessários.

$$\begin{bmatrix} d_{ARecep_1}(t) & \theta_1(t) & \phi_1(t) & \psi_1(t) & \theta_{Recep_1}(t) & \phi_{Recep_1}(t) & T_1(t) & v_1(t) \\ d_{ARecep_2}(t) & \theta_2(t) & \phi_2(t) & \psi_2(t) & \theta_{Recep_2}(t) & \phi_{Recep_2}(t) & T_2(t) & v_2(t) \\ \vdots & \vdots \\ d_{ARecep_n}(t) & \theta_n(t) & \phi_n(t) & \psi_n(t) & \theta_{Recep_n}(t) & \phi_{Recep_n}(t) & T_n(t) & v_n(t) \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} l_1(t) \\ l_2(t) \\ \vdots \\ l_n(t) \end{bmatrix} \quad (15)$$

Deve-se ressaltar que para cenários reais, as informações para o treinamento da RNA devem ser obtidas de outras maneiras. Os dados de desempenho das aeronaves podem proceder de voos de teste ou mesmo comerciais. Deve-se destacar que os sistemas de navegação das aeronaves modernas são capazes de estimar com boa exatidão a posição da aeronave e sua velocidade inercial, bem como a velocidade do vento, e registrá-los de maneira que o pré-processamento das informações para o treinamento da RNA possa ser minimizado por intermédio do uso dos registros de voo disponíveis. Os níveis de ruído podem ser obtidos através de medições de voos de teste e/ou de certificação das aeronaves, ou ainda de sistemas de monitoração.

A Figura 4 resume o processo de preparação dos dados para o treinamento da RNA.

6.1.1 Treinamento e Validação dos Resultados

O treinamento, a validação e a simulação da rede neural artificial são realizados no ambiente computacional do Matlab®. Em se tratando de uma RNA com estrutura simples, com uma camada interna e sem realimentação, aplicada em problema de aproximação de função, o algoritmo de Levenberg-Marquardt de retropropagação do erro é usado. A função de ativação empregada nos neurônios da camada interna é do tipo sigmoideal e, na camada de saída, uma função linear. O objetivo do

treinamento é encontrar o menor erro médio quadrático (EMQ) entre a saída estimada pela RNA e a saída esperada (padrão apresentado como objetivo do treinamento).



Figura 4: Preparação dos dados para o treinamento da rede neural artificial.

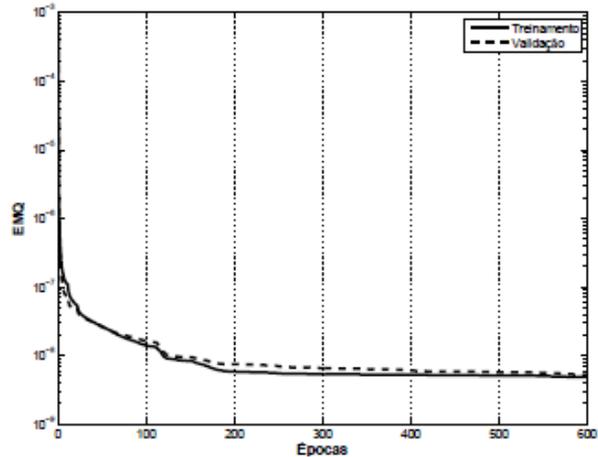
A quantidade de neurônios na camada interna tem influência determinante na exatidão alcançada nas estimativas feitas pela rede neural. Para destacar este comportamento, a Figura 5 apresenta a evolução dos erros de validação e treinamento, ao longo do processo de aprendizagem, para duas RNAs com tamanhos distintos. A RNA com 80 neurônios na camada interna provê resultados melhores para a etapa de treinamento, porém a validação dos dados não acompanha esta exatidão, e o EMQ_V obtido é pior do que o alcançado com a utilização de apenas 20 neurônios nesta mesma camada.

O tamanho (e a qualidade) da base de dados utilizada no processo de aprendizagem também influencia na eficácia do treinamento. Nem sempre uma base de dados maior significa maior exatidão nos resultados. Entretanto, deve-se ressaltar que a qualidade e a coerência das informações que ela contém são mais importantes, pois devem permitir a caracterização da relação de causalidade existente entre os sinais de entrada e saída. As entradas apresentadas à rede neural durante o processo de aprendizagem devem ser da mesma classe dos dados da aplicação para qual a rede é treinada, além de abranger uma quantidade de padrões suficientes para que a generalização realizada pela RNA seja adequada à sua utilização.

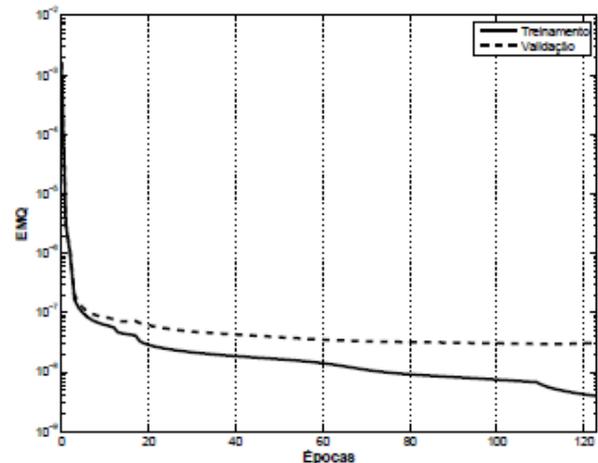
6.2 Correção em Função do Tempo de Propagação do Som

Uma vez treinada, a rede neural artificial é capaz de estimar os níveis de ruído em pontos ao redor de um aeroporto em função da movimentação de uma aeronave. Entretanto, as estimativas são feitas sem considerar o tempo de propagação das ondas sonoras

entre esta e o receptor. Dessa maneira, o histórico temporal do ruído estimado pela RNA em um local de referência é encontrado para os instantes de tempo em que foram gerados e, não, para os instantes nos quais o ruído foi percebido no receptor. A Figura 6 ilustra essa questão. Nesta, S_i ($1 \leq i \leq 3$) é a posição da aeronave nos instantes t_i , e t_{pi} é o tempo de propagação do som entre a aeronave e o receptor.



(a) 20 Neurônios.



(b) 80 Neurônios

Figura 5: EMQ_V e EMQ_T obtidos com diferentes tamanhos da camada interna.

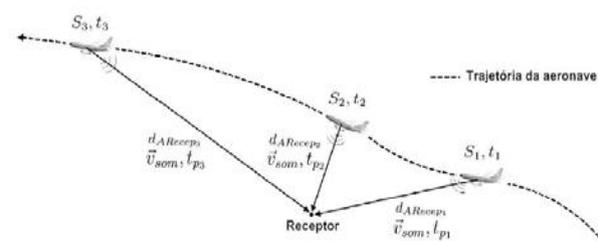


Figura 6: A distância influi no instante em que o ruído é percebido no receptor.

O instante de tempo, t_{Ri} , em que o ruído é percebido no receptor após ter sido gerado pela aeronave na posição S_i é dado pela Equação (16).

$$t_{Ri} = t_i + t_{p_i} = t_i + \frac{d_{ARecep_i}}{v_{som}} \quad (16)$$

6.3 Validação e Exemplos de Aplicação

Para exemplificar o uso da ferramenta de estimação de ruído, esta seção apresenta resultados de validação e um exemplo de aplicação para um aeroporto fictício de uma RNA treinada com objetivo de avaliar mudança de rotas de decolagem. A Figura 7 apresenta o erro médio quadrático obtido durante o treinamento, bem como nas etapas de validação e teste da RNA.

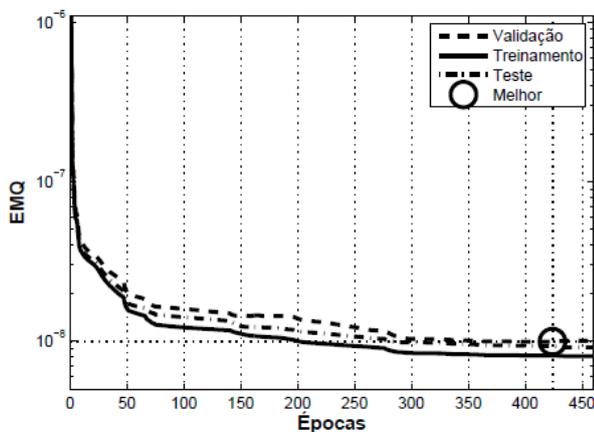


Figura 7: EMQs obtidos no treinamento, na validação e no teste da RNA para avaliação de rotas.

A aplicação da ferramenta é realizada no seguinte cenário: Três trajetórias de decolagem distintas, sendo a diferença entre elas a curva realizada após o primeiro trecho (em linha reta). Dois receptores são considerados, ambos no nível do solo, sendo um próximo à trajetória 01 e outro aproximadamente sob a trajetória 03. A Figura 8 apresenta as trajetórias e os pontos considerados. A aeronave de referência para o estudo é o Airbus A319.

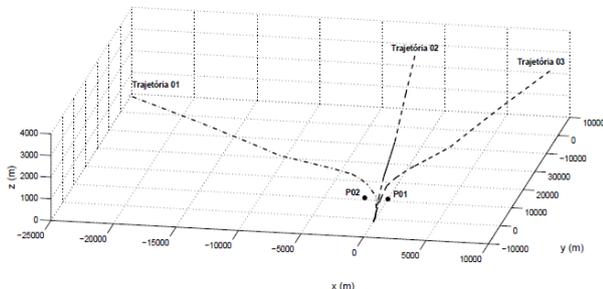
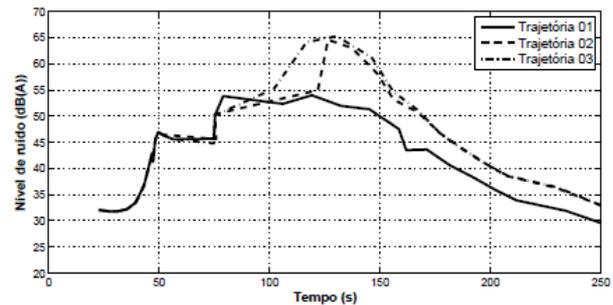


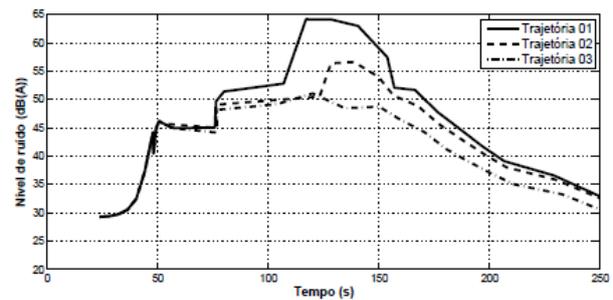
Figura 8: Três rotas diferentes utilizando o mesmo perfil de decolagem.

Os níveis de ruído estimados para o ponto P01 são apresentados na Figura 9(a). O padrão observado é adequado ao procedimento realizado. O nível aumenta a

medida em que a aeronave se aproxima do ponto de avaliação, região na qual atinge seu pico, e diminui gradativamente a medida em que a aeronave se afasta do local. A realização da trajetória 01 é a que implica nos menores níveis de ruído no ponto em questão, uma vez que esta mantém a aeronave substancialmente mais distante do ponto P01 do que as outras duas opções, a partir do ponto de início da curva à esquerda. Uma consideração importante ao observar a evolução do nível de ruído devido à realização desta trajetória é a existência de um nível muito próximo do L_{Amax} que ocorre em um instante de tempo bem diferente deste último, aproximadamente 50 segundos depois. Este tipo de verificação não é possível utilizando o INM. Das três trajetórias consideradas, a de número 03 é a que gera níveis de ruído mais elevados no ponto P01 na maior parte do tempo, sendo também a que proporciona o maior nível de ruído alcançado no local. Pode-se, também, observar que os níveis obtidos nos instantes iniciais são os mesmos para a realização das três trajetórias. Isso se deve ao fato de que o trecho inicial da decolagem, que corresponde à partida, arremetida e ao primeiro trecho de voo ainda em linha reta, é o mesmo para todas elas.



(a) Ponto P01



(b) Ponto P02

Figura 9: Níveis de ruído em função da realização das três trajetórias (rotas) diferentes.

Os níveis de ruído estimados pela RNA no ponto P02 devido à realização das trajetórias 01, 02 e 03 são apresentados na Figura 9(b). Como esperado, a trajetória 03 é a que implica em maiores níveis de ruído no local.

As comparações entre os níveis máximos de ruído estimados pela RNA e os calculados pelo INM para

condições semelhantes para os pontos P01 e P02 são apresentadas nas Tabelas 1(a) e 1(b), respectivamente.

Tabela 1: L_{Amax} estimados pela RNA e calculados pelo INM.

(a)

Trajetória	L_{Amax} dB(A)		Diferença	
	INM	RNA	dB(A)	%
01	53.90	53.97	0.07	0.13
02	64.80	64.57	-0.23	-0.35
03	65.20	65.26	0.06	0.09

(b)

Trajetória	L_{Amax} dB(A)		Diferença	
	INM	RNA	dB(A)	%
01	64.50	64.16	-0.34	-0.53
02	55.90	56.61	0.71	1.27
03	51.00	51.05	0.05	0.10

6.4 Avaliação do Ruído em Períodos Contínuos

Em grandes aeroportos os procedimentos de pouso e decolagem das aeronaves acontecem frequentemente em intervalos de tempo coincidentes. Um tempo curto entre uma decolagem (ou pouso) e outra em uma mesma pista, ou a movimentação simultânea de aeronaves em pistas diferentes implica, com frequência, que o ruído instantâneo gerado nos pontos ao redor do aeroporto seja o resultado da combinação do ruído emitido por duas ou mais fontes. Portanto, é importante que seja possível combinar esses níveis de maneira a obter o valor total nos pontos considerados.

Embora a soma de níveis dos ruído não possa ser realizada diretamente, uma vez que a escala em decibéis não é linear, uma soma logarítmica resolve o problema. Portanto, a Equação (17) deve ser empregada, na qual $L_{total}(t)$ é o resultado da soma e $L_n(t)$ é o n-ésimo nível de ruído.

$$L_{total}(t) = 10 \log_{10} \sum_{1}^n 10^{\frac{L_n(t)}{10}} \quad (17)$$

Uma extensão natural da avaliação do impacto da movimentação simultânea é a avaliação do impacto sonoro contínuo ao longo de um determinado período do dia (ou períodos maiores). Uma vez conhecida a movimentação das aeronaves no período desejado, ou seja, o horário da decolagem (ou pouso), o tipo de aeronave e a trajetória realizada, é possível combinar o efeito do ruído de toda a movimentação através da Equação (17).

Para exemplificar esta questão, a Figura 10 apresenta os níveis de ruído estimados para um intervalo de 1 hora que compreende a decolagem de 16 aeronaves, com intervalos distintos, que fazem uso das rotas apresentadas na Figura 8.

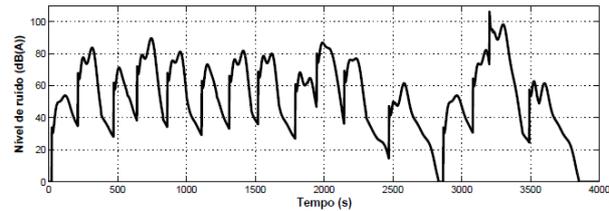


Figura 10: Níveis de ruído ao longo de uma hora.

Todas as aeronaves aqui consideradas são do tipo A319. Entretanto, a metodologia é válida para a combinação de níveis de ruído provenientes de tipos de aeronaves diferentes, desde que estes tenham sido corretamente estimados para um ponto determinado. Para tal, um processamento da RNA dedicado a cada aeronave pode ser suficiente.

Este tipo de informação equivale, em termos de simulação, aos registros de uma medição realizada por um sistema de monitoração de ruído, por exemplo. Caso dados reais sejam disponíveis para o treinamento da ferramenta de estimação de ruído, é possível validar as estimativas utilizando essas informações e, uma vez validada, a ferramenta se tornaria uma alternativa de complexidade e custo aceitáveis para realizar simulações da exposição sonora em pontos ao redor do aeroporto sem a necessidade da realização de campanhas de medição, ou, ainda, em pontos onde a medição é difícil de ser realizada.

A Figura 11 ilustra o modelo completo para a estimação dinâmica do ruído aeronáutico. A partir da trajetória da aeronave, utilizando a inversão dinâmica que a *platitude* diferencial permite, é possível encontrar parte entradas do modelo de ruído, que são juntadas a outras variáveis calculadas. A RNA, em seguida, realiza a estimação dos níveis de ruído em pontos ao redor do aeroporto, níveis esses que podem ser combinados para representar a influência de múltiplas fontes em períodos de tempo distintos.

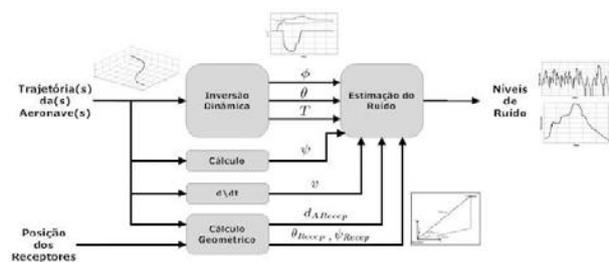


Figura 11: Modelo de estimação do ruído.

7. Conclusão

Este trabalho abordou o problema do desenvolvimento de uma ferramenta de previsão do impacto sonoro em locais na vizinhança dos aeroportos em consequência da movimentação de aeronaves. A metodologia proposta converge com a natureza dinâmica do problema de maneira mais adequada do que a estimação baseada na segmentação de trajetórias que é empregada nos

principais modelos utilizados atualmente. Para tal, os conceitos de *platitude* diferencial e estimação numérica através de redes neurais artificiais foram utilizados.

O modelo desenvolvido supera a dificuldade de uma modelagem analítica completa, e muito complexa, para a estimação do ruído aeronáutico e emerge como uma alternativa de baixa complexidade aos modelos baseados em segmentação de trajetórias, com possibilidade de aplicação nas avaliações quotidianas realizadas pelas organizações envolvidas com o ambiente aeroportuário. A ferramenta desenvolvida representa a evolução temporal dos níveis de ruído devido à movimentação de uma única aeronave ou, se combinados da maneira adequada, ao longo de um período de tempo que compreenda vários movimentos. Em outras palavras, as estimativas obtidas podem assumir um formato tal como o alcançado a partir dos sistemas de monitoração de ruído.

Outra característica importante do modelo desenvolvido é sua relação direta com a trajetória desempenhada e os estados da aeronave ao longo da mesma, o que deve permitir análises mais complexas de cenários de ruído de aeroportos, sendo particularmente interessante para aplicação em problemas tais como a avaliação dos níveis de ruído em função da dispersão de trajetórias reais, mesmo que complexas.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) por seu apoio na realização deste trabalho e a Escola Nacional de Aviação Civil da França pela colaboração no desenvolvimento deste trabalho.

Referências

- [1] CONFERENCE, E.C.A.: Document 29 – Report on Standard Method of Computing Noise Contours Around Airports – Volume 1: Applications Guide, Relatório Técnico, ECAC.CEAC, 2005.
- [2] BOEKER, E.R., DINGES, E., HE, B., et al. Integrated Noise Model (INM) Version 7.0 Technical Manual. Federal Aviation Administration, 2008.
- [3] [3] COMMITTEE A-21, A.N., SAE AIR 1845 – Procedure for the Calculation of Airplane Noise in the Vicinity of Airports. Relatório Técnico, Society of Automotive Engineers, 1986.
- [4] FLIES, M., LÉVINE, J., MARTIN, P., et al.: A Lie-Backlund Approach to Equivalence and Flatness of Nonlinear Systems, 1999.
- [5] LU, W.C.: Contribution au Suivi Automatique de Trajectoires par un Avion: Commande Plate et Réseaux de Neurones. Tese de Doutorado, Université de Toulouse II – Le Mirail, 2005.
- [6] REVOREDO, T.C.: Estimação Dinâmica do Ruído Aeronáutico Utilizando Sistemas Diferencialmente Planos e Redes Neurais Artificiais, Tese de Doutorado,

Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2011.

- [7] HAYKIN, S.: Neural Networks – A Comprehensive Foundation. Prentice Hall, 1999.