

ESTUDO DE AEROACÚSTICA NO ESCOAMENTO AO REDOR DE DOIS CILINDROS EM TANDEM

JULIO ZEPPONE CARLOS

juliozep@hotmail.com

JULIO ROMANO MENEGHINI

jmeneg@usp.br

Resumo. A indústria aeronáutica brasileira tem se desenvolvido muito nos últimos anos, devido principalmente ao crescimento da EMBRAER no quadro mundial de produção de aeronaves de pequeno e médio porte. Nesta realidade, novos desafios têm aparecido para empresa no que diz respeito às necessidades de novos conceitos de projeto e de inovação tecnológica. Dentre estas, uma que tem sido crítica, é a necessidade de redução de ruído acústico produzido por aeronaves, para atender às cada vez mais restritivas legislações. Neste contexto, este trabalho de conclusão de curso visa estudar o ruído produzido por trens de pouso, por meio de simulações de aeroacústica computacional em geometrias mais simplificadas, principalmente cilindros em tandem. São apresentadas, além das etapas de revisão bibliográfica, as simulações utilizando o método de Lattice-Boltzmann, do software PowerFlow, para cilindros em tandem com distâncias entre centros de 1,435, 3, 3,7 e 5 diâmetros, para valores de Re de 200, 20000 e 166000, bem como seus resultados aerodinâmicos e aeroacústicos.

Palavras chave: Dispositivos de pouso de aeronaves; Aeronaves; Acústica; Inovações tecnológicas; Aerodinâmica.

1. Introdução

A produção de aeronaves civis no país torna-se, cada vez mais, uma indústria estratégica fundamental para a autonomia e desenvolvimento sustentável da nação. Buscando auto-suficiência no que se refere à concepção, projeto e certificação de aeronaves, o Brasil, liderado pela EMBRAER (Empresa Brasileira de Aeronáutica S.A.), tem alcançado metas de comercialização de aviões crescentes em mercados antes não atingíveis. O sucesso da EMBRAER teve como origem os avanços extraordinários da tecnologia brasileira, motivando e movimentando diversos setores tecnológicos adjacentes ao aeronáutico. Este esforço já rende resultados de sucesso e outros muito promissores, colocando o Brasil na posição mundialmente reconhecida como um dos maiores fabricantes de aeronaves de até 110 passageiros.

Um novo desafio surge para o desenvolvimento do setor aeronáutico: os limites e requisitos para os níveis de ruído externo tanto para certificação quanto para operação de aeronaves em aeroportos têm se tornado cada dia mais restritivos devido, principalmente, a pressões das comunidades preocupadas com a melhoria da qualidade de vida nas cidades. Embora as aeronaves, e especialmente os motores, tenham se tornado cada dia mais silenciosos devido ao progresso tecnológico, a sensação de incômodo tem aumentado devido ao aumento do tráfego aéreo. Dentro deste contexto, novos requisitos para ruído externos, ainda mais restritivos que os atualmente estipulados, já estão em vigor desde janeiro de 2006 (ICAO e RBHA 36) e a discussão para um próximo requisito já prevê outra redução de 5 a 10 EPNdB (*Effective Perceived Noise in Decibels*) para 2015-2020.

Assim, os limites de ruído de operação e certificação, cada vez mais restritivos, têm tornado a tecnologia de projetar aeronaves de baixo ruído um diferencial competitivo importante na disputa por clientes.

O contínuo desenvolvimento de motores tem os tornado mais silenciosos ao longo dos anos, fazendo com que o ruído aerodinâmico torne-se uma importante fonte de ruído comparável ao próprio motor nas condições de pouso. Assim, para as novas aeronaves, deve-se focalizar no ruído aerodinâmico tanto quanto no do motor como fonte importante de ruído. Além disso, a experiência da EMBRAER na concepção de aeronaves demonstra que a empresa precisa ter domínio sobre o quesito ruído de motor para poder discutir e influenciar tecnicamente em pé de igualdade com seus fornecedores.

Atualmente, parte dos estudos e avaliações dos níveis de ruído externo dos aviões EMBRAER são realizados predominantemente por consultores externos internacionais. Tal abordagem traz como consequência algumas dificuldades e até mesmo lentidão de respostas para situações críticas, como é o caso das modificações aerodinâmicas e de motor para melhoria dos níveis de ruído externo. Como exemplo, este procedimento dificulta nas atividades de avaliação da real situação do avião quanto aos requisitos de aeroportos, na avaliação da confiabilidade dos níveis de ruído estimados pelos fornecedores de motores, no conhecimento das contribuições do ruído do motor e aerodinâmico na metodologia utilizada e na avaliação melhorias (motor e aerodinâmico) nos níveis de ruído.

É importante destacar que ainda não existe na concepção e no projeto aerodinâmico das aeronaves e áreas afins a cultura do uso de práticas de projeto para baixo ruído externo. Além disso, não existe ainda uma metodologia de avaliação bem desenvolvida de impacto de melhorias aerodinâmicas no ruído externo. Geralmente, muitas das alterações foram avaliadas e validadas via ensaios em vôo resultando em elevado custo.

Nesse contexto, esse trabalho de conclusão de curso, vinculado à disciplina Projeto Integrado III – PME2600, visa, através do estudo aerodinâmico e aeroacústico do escoamento em torno de cilindros simples e em tandem, colaborar com o desenvolvimento acadêmico/científico e formação pessoal da área de estimativa de ruído aerodinâmico para trens de pouso. Semelhantes estudos podem ser encontrados nos trabalhos de colaboração do *benchmark* da NASA (NASA), para simulações aeroacústicas em cilindros em tandem, trem de pouso frontal e trem de pouso principal simplificado.

Como ferramenta para solução, a princípio escolheu-se o *software* comercial CFD++, que utiliza formulações clássicas do método de volumes finitos. Contudo, devido à facilidade de geração de malhas e a crescente aplicação no mercado, utilizou-se o pacote *PowerFLOW*, que se baseia nos métodos de Lattice-Boltzmann para solução do escoamento, para simulação dos casos objetivados para estudo.

Neste trabalho de conclusão de curso, foram simulados casos de interferência para cilindros iguais em tandem para distâncias entre centro (L) de 1,435D, 3D, 3,7D e 5D (D definido como um diâmetro de um cilindro), para valores de número de Reynolds (Re) de 200, 20000 e 166000. Os resultados obtidos serão aqui apresentados.

2. Fundamentos do escoamento ao redor de dois cilindros em tandem

Assim como no problema do escoamento ao redor de apenas um cilindro, em que a existência de forças viscosas é um efeito muito significativo, o número de Reynolds também caracteriza o escoamento ao redor de dois cilindros, determinando a existência dos fenômenos e regimes que nele ocorrem, alterando o estado e a natureza da separação da camada limite e definindo outros adimensionais relativos às forças ou outras grandezas, como a frequência de desprendimento de vórtices. O número de Reynolds, Re, para o caso de cilindro em tandem, é definido pela Eq. (1).

$$Re = \frac{\rho \cdot U \cdot D}{\mu} \quad (1)$$

Em que μ é a viscosidade dinâmica do fluido, U é a velocidade do escoamento ao longe, D é o diâmetro de um dos cilindros (ambos possuem o mesmo diâmetro) e ρ é a massa específica do fluido.

Contudo, a presença de um segundo cilindro, com eixo paralelo ao primeiro e posicionado no plano definido pelo sentido do escoamento, faz com que a distância entre centros destes cilindros tornam-se um fator também determinante para a caracterização dos fenômenos resultantes no escoamento. Existe, portanto, faixas ou regimes definidos pela distância adimensional L/D que foram largamente abordados na literatura

Para pequenas separações dos cilindros, com $L/D < 2,4$, ambos os cilindros se comportam como se fossem apenas um corpo rombudo, em que se observa o descolamento da camada limite do cilindro anterior, no sentido do escoamento, e um logo acoplamento à camada limite do cilindro posterior, ocorrendo a separação da camada limite para a esteira neste último. Para separações muito grandes, como já se é de esperar, a distorção imposta ao fluxo de fluido por um dos cilindros já é dissipada até encontrar o outro cilindro, de forma com que o escoamento se comporte como se fosse ao redor de dois cilindros isolados. Há, por fim, uma faixa intermediária, crítica, na qual o escoamento se torna biestável, com as características do fluxo variando entre cada um dos regimes descritos na literatura (Khorrami et al, 2007).

Sabe-se, pelos estudos de Ljunkrona et al., 1993, que esse valor crítico, que transfere as características de pequena separação para a faixa intermediária, decresce ao se aumentar o número de Reynolds e a intensidade da turbulência do fluxo livre.

Nos resultados obtidos por Khorrami et al, 2007, há a presença de esteira com desprendimento de vórtices em ambos os cilindros, com o estado de desprendimento do cilindro posterior fortemente dependente da esteira do primeiro cilindro,.

Uma classificação mais abrangente é dada por Igarashi, 1981, em que ele agrupa os fenômenos observados da interferência dos cilindros em tandem em seis grupos dependentes da distância entre centros L e do número de Reynolds Re, conforme Fig. 1.

Nesta classificação, cada regime é definido por:

- A. As camadas cisalhantes do cilindro à montante não re-aderem no cilindro à jusante, formando apenas uma esteira.
- B. As camadas cisalhantes do primeiro cilindro são capturadas pelo segundo cilindro, mas não há formação de vórtices no espaço entre os dois cilindros. Também somente uma esteira é identificada.
- C. Formação de vórtices simétricos no espaço entre os cilindros.
- D. Os vórtices são assimétricos e começam alternar seu tamanho nas proximidades do segundo cilindro.
- E. Regime biestável entre os regimes D e F. Anteriormente descrito nas análises de Khorrami como valor crítico. Nota-se um enrolamento periódico da camada cisalhante do cilindro à montante nas proximidades do cilindro à jusante.
- F. A região da esteira próxima do primeiro cilindro termina antes de encontrar o segundo cilindro, de forma a se observar duas esteiras. Vórtices se formam nesta primeira esteira de forma regular. A segunda esteira é chamada de esteira binária, uma vez que ela é formada por uma composição das esteiras dos dois cilindros.

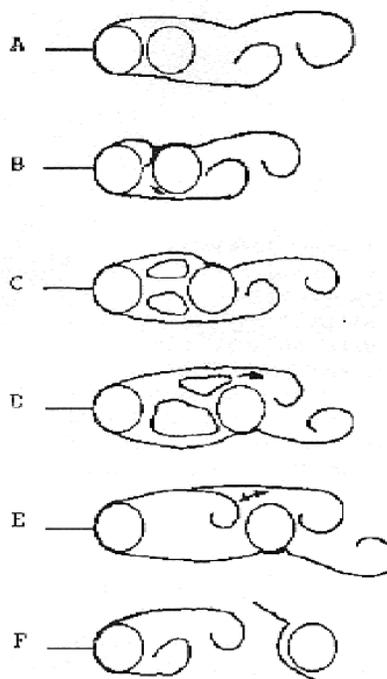


Figura 1. Regimes de interferência do escoamento ao redor de cilindros em tandem (Igarashi, 1981).

Esta classificação foi utilizada ao longo do trabalho, para identificar os fenômenos obtidos em cada caso simulado, citando apenas a letra para cada regime nela designado. O estudo deste comportamento e da produção de ruído característico destes regimes são os objetivos principais deste trabalho, a serem estudados em uma faixa de separação entre os centros dos cilindros de $1,435D < L < 5D$.

3. Fundamentos do Método de Lattice-Boltzmann

Para simulações de geometrias complexas, um método que tem ganhado muito espaço na indústria e em áreas de pesquisa é o método de Lattice-Boltzmann (LBM: *Lattice-Boltzmann Method*). Ao contrário dos outros métodos e modelos de CFD, que buscam resolver as equações de Navier-Stokes e outras equações de conservação para parâmetros macroscópicos (tal como quantidade de movimento, energia), o LBM consiste em uma série de colisões e propagações de partículas fictícias, derivado da teoria cinética dos gases. Este método, que já mostra boas aplicações na indústria automotiva, tem sua importância crescente também na indústria aeronáutica, em geometrias complexas, como por exemplo, o trem de pouso.

O método explícito de Lattice-Boltzmann para solução de escoamentos de fluidos consiste em linhas gerais, em uma discretização da função de distribuição de primeira ordem da equação de cinética de gases de Boltzmann, em que o movimento e a interação das partículas são descritos, basicamente, pela mecânica clássica, auxiliado por um tratamento estatístico, uma vez de que se tratam de inúmeras partículas em trânsito. A mecânica deste método pode ser basicamente entendida pelas noções de choques de um fluxo, como se as partículas fossem “bolas de bilhar”, que se chocam umas com as outras e transferem propriedades e grandezas. (Sukop, 2005)

No modelo LBM, o conceito utilizado é bem diferente do método de volumes finitos tradicional. Não se chega a estudar os fenômenos de interação até o nível microscópico, molecular, como sugere a teoria cinética dos gases, devido à enorme exigência para mensurar cada molécula de um escoamento. Trabalha-se, contudo, em um chamado nível mesoscópico, em que se agrupa uma região do espaço de forma probabilística, em partículas com estados descritos por uma função de probabilidade de distribuição (*FPD*) f .

As grandezas macroscópicas de densidade e velocidade (u) no LBM são dadas a partir da definição dessa *FPD*:

$$\rho = \sum_i f_i \tag{2}$$

$$u = \frac{\sum_i f_i \cdot c_i}{\rho} \tag{3}$$

A equação básica que modela um escoamento segundo o LBM é dado pela Eq (4).

$$f_i(x + c_i \Delta t, t + \Delta t) - f_i(x, t) = C_i \quad (4)$$

Em que f_i é a função de distribuição de partículas se movendo na direção i , de acordo com um número finito de direções e vetores de velocidade discretos c_i (dependendo do tipo de método de discretização sendo utilizado); $c_i \Delta t$ e Δt são os incrementos de posição e de tempo, respectivamente. Os termos à esquerda são os termos que descrevem o fluxo do escoamento em questão. O termo a direita representa o termo de colisão entre as partículas. Este termo pode ter diferentes formas, sempre obedecendo às leis de conservação (energia, quantidade de movimento, etc.). Um dos mais simples, e também um dos mais utilizados, é a aproximação de Bhatnagar-Gross-Krook (BGK) (Li et al., 2004), em que:

$$C_i = -\Delta t \cdot \frac{f_i - f_i^{eq}}{\tau} \quad (5)$$

Sendo τ um termo de relaxação associado à viscosidade cinemática do fluido, pela equação:

$$\nu = \left(\tau - \frac{1}{2} \right) \cdot T \quad (6)$$

Em que T é temperatura do lattice (lattice é a nomenclatura dada ao domínio discreto), utilizada como sendo $1/3$ para escoamentos isotérmicos. f_i^{eq} é definido como sendo a função de equilíbrio de colisões locais, e depende da discretização utilizada. Para casos tridimensionais e de baixo número de Mach, utiliza-se comumente o modelo D3Q19 (3 dimensões e 19 vetores de velocidades) mostrado pela Fig. 2:

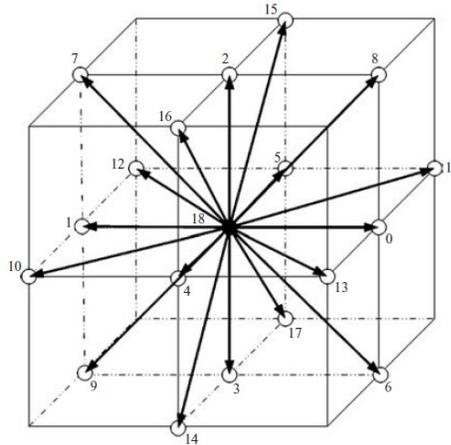


Figura 2. Modelo D3Q19 do método de Lattice-Boltzmann (Li et al., 2004)

Nesta formulação o valor de f_i^{eq} é dado por:

$$f_i^{eq} = \rho \omega_i \left[1 + \frac{c_i \cdot u}{T} + \frac{(c_i \cdot u)^2}{2T^2} - \frac{u^2}{2T} + \frac{(c_i \cdot u)^3}{6T^3} - \frac{c_i \cdot u}{2T^2} u^2 \right] \quad (7)$$

Em que ω_i são parâmetros ponderadores da direção, dados por:

$$\omega_i = \begin{cases} 1/18, & \text{para as 6 direções cartesianas} \\ 1/36, & \text{para 12 direções diagonais} \\ 1/3, & \text{para direção estacionária / parada} \end{cases} \quad (8)$$

O domínio computacional, ou o Lattice, na maioria das vezes, é dividido em regiões menores, para que, definindo níveis diferentes de resolução (espaçamento entre os nós de cada elemento) condizentes com cada fenômeno ou

exigência ocorrendo naquela região, possa-se diminuir o esforço computacional demandado. Essas regiões recebem o nome de VR's (*variable region*: região de variação do tamanho dos elementos, ou dos voxels, como são chamados). Como o método é explícito e deve-se garantir a conservação das grandezas macroscópicas, cada VR possui seu próprio passo de tempo.

Dessa forma, o LBM não necessita de uma malha propriamente dita, como os demais métodos de CFD, mas apenas de uma divisão de sua totalidade em regiões menores de resolução mais uma dada resolução mínima. Um exemplo pode ser visto na divisão de VR's realizada nas formulações do problema, Fig. 5:

Para choques de partículas contra paredes e contornos, o LBM segue duas modelagens possíveis: o choque de retorno (*bounce back*) e o choque de reflexão especular (*specular reflection*). No choque de retorno, a velocidade de propagação pós-choque é contrária à velocidade original. No choque especular, mantém-se a velocidade tangencial e inverte-se a velocidade normal à superfície, conforme Fig. 3.

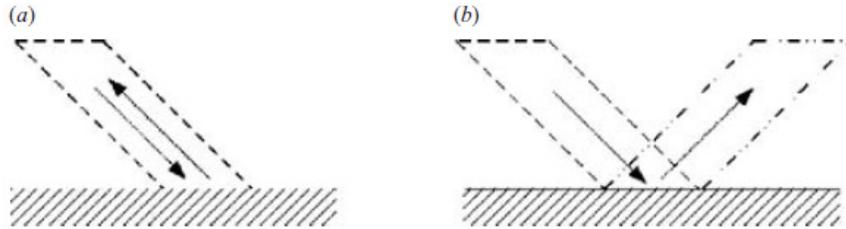


Figura 3. Condições de contorno implementadas no LBM, (a) retorno e (b) reflexão especular (Li et al, 2004).

Essa formulação para choques funciona muito bem para superfícies lisas, alinhadas ao Lattice, contudo, para superfícies com curvaturas e/ou rugosidades, efeitos como o desenvolvimento de camadas limites são prejudicados. Por isso, as superfícies utilizadas, tanto para a geometria quanto para as superfícies de delimitação do lattice são “facetizadas” previamente para a simulação, ou seja, são transformadas em um conjunto de pequenos planos, que aproxima a superfície original.

O encontro dessas faces, ou do inglês *facets*, com os voxels formam os chamados *surfles*, que são os elementos discretizadores computacionais da superfície na simulação. Fig. 4.

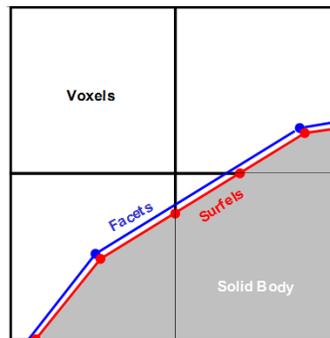


Figura 4. Faces, voxels e a formação dos *surfles*. (Exa)

No PowerFlow, dois modelos são utilizados para as simulações: o modelo DNS, que aplica as formulações aqui apresentadas, e tem seu uso indicado para faixas de Re até 10000, e o modelo de turbulência, que é uma variação do modelo RNG, para número de Reynolds acima de 100000.

A turbulência no PowerFlow é modelada, assim como nos demais modelos de CFD, por ser muito caro computacionalmente resolver fenômenos de escalas da ordem das turbulências. O modelo utilizado no software é conhecido por VLES.

No LBM, os efeitos da turbulência são contabilizados por meio de uma correção no termo de relaxação τ da forma (Exa):

$$\frac{\partial f}{\partial t} = -\frac{1}{\tau}(f - f_{eq}) \quad (9)$$

O modelo ainda conta com uma simplificação, semelhante ao modelo DES, para consideração do *swirl*, levando em conta o rotacional, e modelagem de grandes vorticidades (“*large eddies*”), para melhorar a precisão de regiões de escoamento separado. O termo de relaxação turbulenta, neste caso, é dado por:

$$\tau'_{turb} = \frac{\tau_{turb}}{\sqrt{1 + b\tau_{turb}^2\Omega^2}} \quad (10)$$

Em que Ω é o *swirl* local e b é uma constante de ordem O(10).

4. Simulações

4.1. Geometrias e formulação do problema

Para o caso de cilindros em tandem, a “filosofia” de crescimento de voxels utilizando VR’s foi aplicada. O domínio variava um pouco, dependendo da distancia L do caso em questão, mas possuía valores próximos de 270D x 255D. A envergadura utilizada foi de 4D. Foram utilizadas sete VR’s. A resolução da camada mais refinada foi de 128 voxels por diâmetro de cilindro ($4,46 \times 10^{-4}$ m). O total equivalente de voxels foi de, aproximadamente, 16 milhões de voxels.

O caso de 3,7D, como dito, foi realizado de acordo com o benchmark de cilindros em tandem da NASA. Os demais casos foram, simplesmente, variações da distância L entre eles, e, no caso de Re 200, alterada a viscosidade do fluido. Logo, as distribuições de VR’s e mesmo o diâmetro do cilindro, de 0,05715 m, são iguais em todos os casos. O cilindro foi “facetizado” com 720 planos ao longo de sua circunferência,.

Foi utilizada uma camada absorvedora (*anechoic layer*), para se evitar reflexões de distúrbios provocados pelo escoamento com as paredes do lattice. Essa camada, em vermelho, bem como as distribuições das VR’s e contornos podem ser vistos na Fig. 5 e 6.

Os modelos utilizados dentro do *PowerFLOW*, para solução dos casos, foram DNS para Re 200 e com modelo de turbulência para Re 166000.

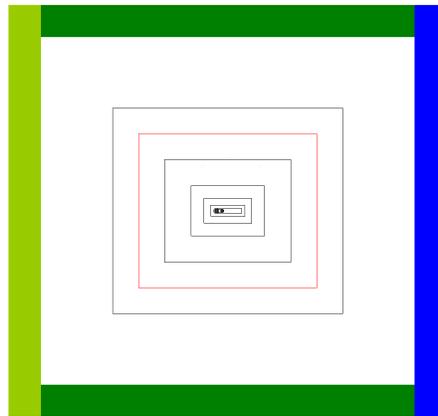


Figura 5. Domínio para cilindros em tandem.

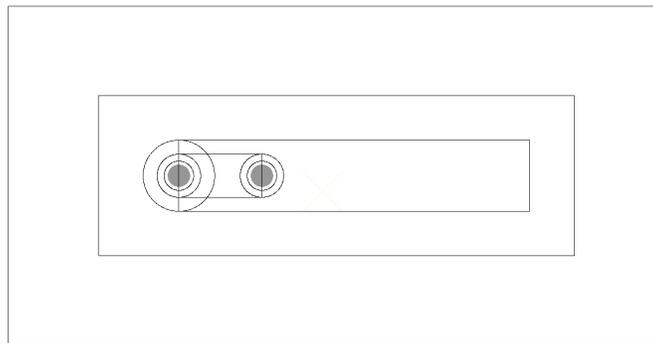


Figura 6. Detalhe do domínio para cilindros em tandem.

O caso de cilindros em tandem com $L = 3,7D$ e $Re = 166000$ possui vasto estudo na parte aeroacústica. Para comparação de resultado, foram posicionadas escutas em pontos do Lattice. Sendo X e Y os eixos referentes às direções longitudinal e transversal do escoamento, respectivamente, com origem no centro do cilindro à montante. Estas coordenadas ficam posicionadas no lattice conforme Fig. 7.

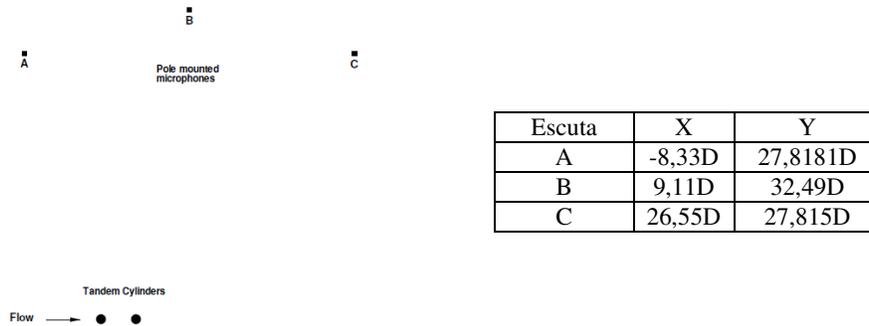


Figura 7. Posicionamento dos microfones para o caso de cilindros em tandem $L = 3,7D$ (Lockard et al., 2007)

Utilizou-se, como já dito, distâncias entre centro de $1,435D$, $3D$, $3,7D$ e $5D$. O diâmetro de cada cilindro é de $0,05715$ m, a velocidade de entrada e inicial do domínio de 44 m/s, a 21 °C (que equivale a $Ma = 0,128$), pressão de 101325 Pa, resultando em um Re de 166000 . Foi adicionada uma velocidade inicial vertical de $0,01$ m/s apenas para desestabilizar o escoamento inicial, e acelerar o fenômeno de desprendimento de vórtices.

Após as simulações de Re 166000 , foram realizadas as simulações para Re 200 e Re 20000 , alterando-se apenas a viscosidade cinemática necessária para se alcançar tal valor, sem alterar as demais condições iniciais.

4.2. Resultados

Na Fig. 8, podem-se observar as fatias dos campos de vorticidade em z para os casos simulados. Podem-se notar as diferentes estruturas obtidas conforme se altera tanto a distância L quanto o número de Reynolds, Re . Para Re 200 , primeiramente com $L = 1,435D$ observa-se que se trata de um regime B, uma vez que há uma re-aderência das camadas desprendidas o primeiro cilindro. Para $L = 3D$ e $3,7D$ observam-se os regimes C e D respectivamente, com a formação de “bolhas” simétricas, no primeiro caso, e assimétricas, com o aumento de L . Já com $L = 5D$, nota-se a chamada esteira binária, tratando-se portanto do regime F. Com Re 20000 os regimes já se alteram: para $L = 1,435D$ o regime C é observado, para $L = 3D$ o regime D, para $L = 3,7D$ já se pode notar a presença da esteira saindo do cilindro à montante, e com um vórtice menor do que o *gap*, de modo com que ele possa ora re aderir ao segundo cilindro ora formar vórtice. Trata-se, portanto do regime F ou E, devendo-se observar o histórico instantâneo dessa fatia. Para Re 20000 e $L = 5D$ temos um regime do tipo F, com duas esteiras bem visíveis. Para Re 166000 , como já se era de esperar, o aumento do número de Reynolds ocasiona um efeito que se assemelha a um aumento de L , por exemplo, para a distância $L = 1,435D$, já se nota a formação de bolhas no interior do vão entre os cilindros, o que não ocorre para Re 200 .

Os coeficientes adimensionais das forças obtidos em cada cilindro podem ser vistos nas Tab. 1 e 2. São notáveis que as forças atuantes sejam menores para os escoamentos com os cilindros mais próximos, e a tendência de se aumentar essas forças conforme se aumenta a distância entre os cilindros. As maiores forças de sustentação ocorrem para os cilindros à jusante, independente do caso em análise, enquanto que as forças de arrasto são maiores nos cilindros à montante.

Os resultados encontrados para as escutas (*probes*) obtidas para o caso de cilindros em tandem com distância entre centros de $3,7D$ e Re 166000 foram comparados com os resultados obtidos pelo experimento do QFF (“Quiet Flow Facility”) e com os resultados de CFD de Lockard, 2007, Fig. 9. Notou-se que, mesmo sem utilizar as ferramentas de FW-H (Ffowks Williams e Hawkings) ou a analogia de Lighthill, podem-se obter resultados muito próximos dos esperados. A frequência principal é muito bem definida para as três escutas, e precisa em relação à bibliografia, próxima de 230 Hz. Pode-se notar uma segunda frequência principal para as três escutas, também vistas nos resultados bibliográficos.

Contudo, pode-se notar que, para altas frequências as escutas não capturam bem as amplitudes. Isto se deve ao fato de que, como as escutas estão relativamente longe dos cilindros, as ondas sonoras de alta frequência, pequeno comprimento de onda, são dissipadas pelas malhas mais grosseiras das VR’s externas. Estima-se que para uma boa transmissão de ondas pelo lattice são necessários, pelo menos, 12 voxels por comprimento de onda.

Nas figuras 10,11 e 12 são mostrados gráficos comparativos do SPL (*Sound Pressure Level*) obtidos para as *probes* do localizadas no ponto A, para diferentes valores paramétricos simulados ao longo do trabalho, de forma a se obter conclusões a respeito das interferências e as gerações de ruído por elas desenvolvidas. Alguns pontos devem ser ressaltados. Primeiramente, nota-se a tendência de surgirem tonais em alguns dos casos do escoamento. Para Re 200 , todas as simulações apresentam picos próximos da frequência do Strouhal característico do desprendimento de vórtices. Com o aumento de Reynolds, as menores distâncias entre centros começam a não ter um pico tão bem definido, como as distâncias de $1,435$ e $3D$ para Re 166000 . A não ser pelas distâncias de $3,7D$ e $5D$, esse fenômeno não foi observado.

Nos escoamentos turbulentos os picos para $L = 3,7D$ tiveram níveis superiores ao do escoamento com $L = 5D$. Esse é um dos fatores da escolha desta distância para estudo de *benchmark*, por ser um escoamento crítico do ponto de

vista acústico. Nota-se, em casos de tonais, a presença de um segundo pico preponderante. Este fato, como já descrito, ocorre pela presença da esteira binária e de outras interferências, ocasionadas pelas reações de um segundo cilindro.

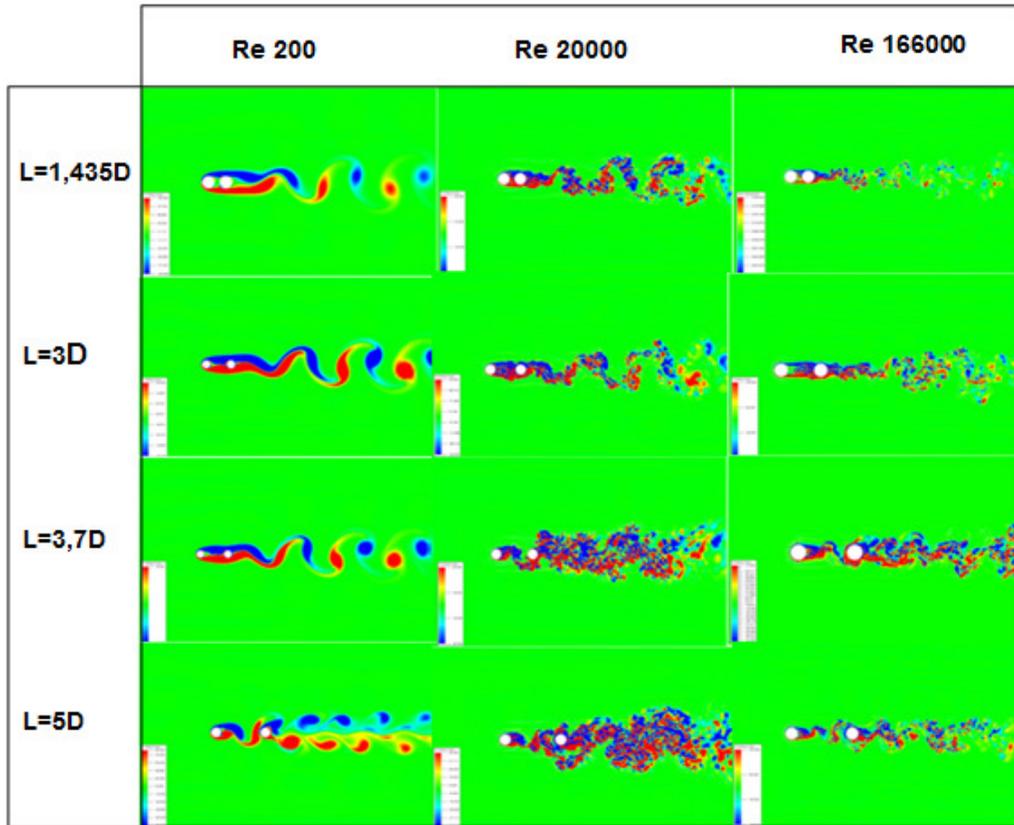


Figura 8: Fatia do campo de vorticidade em z para os diferentes casos simulados

Tabela 1: C_L r.m.s. obtido para as simulações de cilindros em tandem
 C_L' obtido nas simulações

Distância entre centros L	Re 200		Re 20000		Re 166000	
	Cilindro à montante	Cilindro à jusante	Cilindro à montante	Cilindro à jusante	Cilindro à montante	Cilindro à jusante
1,435D	0,009	0,022	0,0282	0,053	0,019	0,054
3D	0,018	0,199	0,0266	0,253	0,0073	0,088
3,7D	0,019	0,257	0,487	0,926	0,045	0,337
5D	0,469	1,10	0,521	0,870	0,042	0,271

Tabela 2: C_D médio obtido para as simulações de cilindros em tandem
 C_D obtido nas simulações

Distância entre centros L	Re 200		Re 20000		Re 166000	
	Cilindro à montante	Cilindro à jusante	Cilindro à montante	Cilindro à jusante	Cilindro à montante	Cilindro à jusante
1,435D	1,05	-0,208	0,966	-0,499	0,223	0,114
3D	1,01	-0,131	0,817	-0,027	0,210	0,199
3,7D	0,980	-0,058	1,10	0,438	0,295	0,324
5D	1,25	0,443	1,17	0,435	0,326	0,311

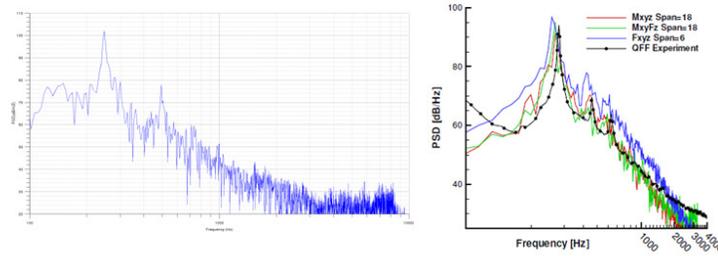


Figura 9: Comparação do PSD para a escuta A. Resultados de Lockard, 2007 à direita

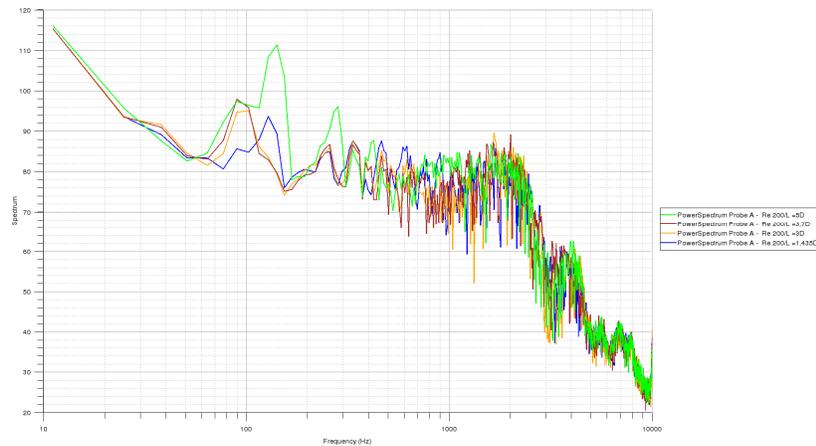


Figura 10: Espectro de pressão, em dB, para a *probe* A, nos casos de Re 200.

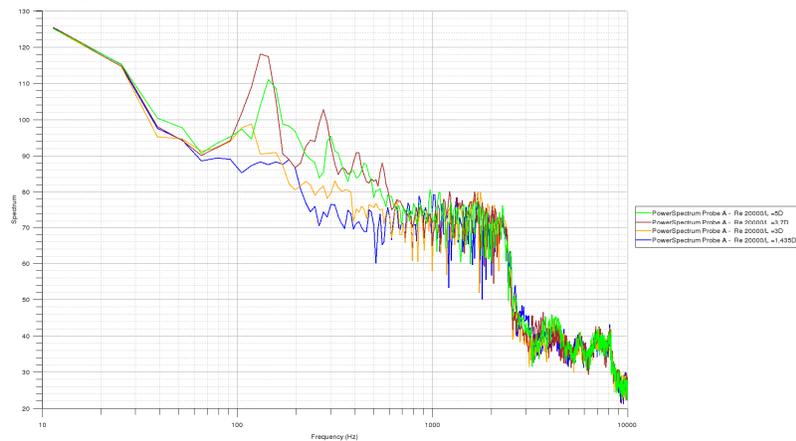


Figura 11: Espectro de pressão, em dB, para a *probe* A, nos casos de Re 20000

5. Conclusões

Para as simulações realizadas no *PowerFLOW* pode-se notar, a princípio, a rapidez com que se pode resolver os casos estudados, devido, principalmente, à rapidez do método e a elevada escalabilidade. As simulações tridimensionais levaram cerca de 30 horas para serem resolvidas, utilizando 128 processadores. Para simulações bidimensionais, o esforço foi bem menor, cerca de 4,5 horas utilizando 8 processadores.

As simulações de cilindro em tandem foram satisfatórias no que se refere à obtenção e comparação dos fenômenos de interferência entre dois cilindros e tandem. Foi possível observar as duas fases de interferência levantadas na bibliografia: ambos os cilindros se comportando como um só corpo rombudo e os dois cilindros como corpos separados, com a influência da esteira do primeiro cilindro sobre o cilindro à jusante, e os regimes descritos por Igarashi, 1981. Sobre o modelo de turbulência e função de parede, podemos verificar, nos casos de cilindros em tandem em que foram usados, o surgimento de uma esteira turbulenta logo no começo do escoamento ao redor do primeiro cilindro. Como essa esteira é muito energética, ela posterga a sua separação afetando o arrasto causado no cilindro, e, por consequência, a sustentação medida. Em relação aos resultados acústicos, o *PowerFLOW*, mesmo não utilizando nenhuma ferramenta de predição de ruído no *farfield* obteve resultados satisfatórios.

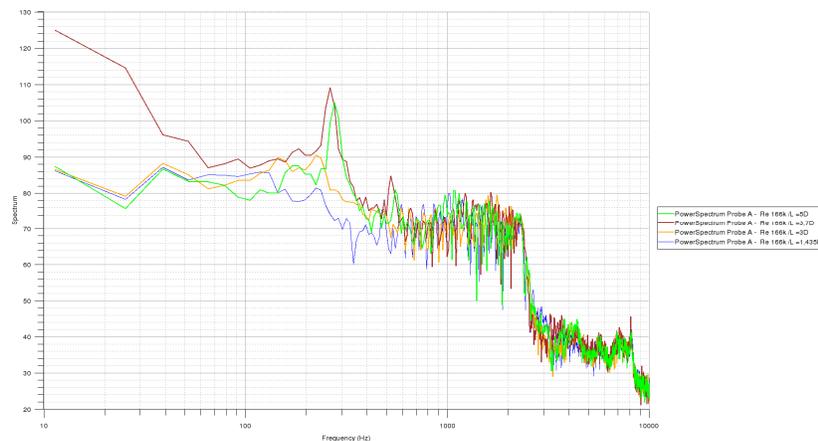


Figura 12: Espectro de pressão, em dB, para a *probe* A, nos casos de Re 166000

7. Referências

- EXA Corporation, PowerFlow Basic Training Introduction, Presentation.
- Federal Aviation Regulation - FAR-36 Stage 4.
- Igarashi, T., Characteristics of the flow around two circular cylinders arranged in tandem. *Bulletin of JSME*, v.24, n.188, p323-331, 1981.
- International Civil Aviation Organization – ICAO, Chapter 4.
- Khorrami, M. R., Choudhari, M. M., Lockard, D. P., Jenkins, L. N. e McGinley, C. B., Unsteady Flowfield Around Tandem Cylinders as Prototype Component Interaction in Airframe Noise. *AIAA Journal*, 2007, p. 1930-1941.
- Li, Y., Shock, R., Zhang, R., Chen, H., Numerical study of flow past an impulsively started cylinder by lattice-Boltzmann method, *Journal of Fluids Mechanics*, vol 519, p. 273-300, 2004.
- Ljungkrona, L. e Sunden, B., Flow Visualization and Surface Pressure Measurement on Two Tubes in a Inline Arrangement. *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 9, No. 1, 1993, p. 15 – 27.
- Lockard, D. P., Khorrami, M. R., Choudhari, M. M., Hutcheson, F. V., Brooks, T. F., Stead, D. J., Tandem Cylinders Noise Predictions. *AIAA Journal*, 2007.
- NASA, Tandem Cylinders Benchmark Problem Statement, v 1.08.
- Sukop, M. C. e Thorne Jr., D. T., Lattice Boltzmann Modeling: An Introduction for Geoscientists and Engineers. *Springer*, 2005, Miami-Florida.

STUDY OF AEROACUSTIC OF THE FLOW PAST TWO TANDEM CYLINDERS AS A SIMPLIFICATION OF THE FLOW AROUND A LANDING GEAR

JULIO ZEPPONE CARLOS

juliozep@hotmail.com

JULIO ROMANO MENEGHINI

jmeneg@usp.br

Abstract. The Brazilian aeronautical industry has developed in recent years mainly to the growth of the EMBRAER in the world-wide production of small and medium airlines. In this reality, new challenges have appeared for the company as the necessities of new concepts of project and technological innovation. Among these, one that has been critical is the necessity of reduction of the acoustic noise produced by an aircraft, to certify to the each time more restrictive laws. In this context, this work wants to study the noise produced by landing gears, by computational aeroacoustics simulation of simplified geometries, mainly tandem cylinders. It will be presented the simulation using the method of Lattice-Boltzmann, PowerFLOW software, for tandem cylinders with distances between centers of 1,435, 3, 3,7 and 5 diameters, for values of Reynolds number of 200, 20000 and 166000.

Keywords: Aircraft landing devices; Aircrafts; Acoustics; Technological innovation; Aerodynamics.