

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

José Pedro de Santana Neto

**RADIAÇÃO NORMAL DE DUTOS COM ESCOAMENTO
SUBSÔNICO E DIFERENTES CONDIÇÕES DE
CONTORNO:
ANÁLISE NUMÉRICO-EXPERIMENTAL**

Florianópolis

2016

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	3
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	9
3 METODOLOGIA.....	11
4 RESULTADOS PRELIMINARES.....	13
5 CRONOGRAMA	17
REFERÊNCIAS	19

1 INTRODUÇÃO

A propagação e irradiação de modos normais (ondas planas) é um problema clássico em acústica e continua tendo importância significativa mediante ao advento de novas tecnologias relacionadas a sistemas de exaustão, distribuição de massa, motores aeronáuticos, instrumentos musicais e assim por diante.

Em geral, pode-se utilizar três parâmetros para caracterizar o fenômeno abordado:

- a magnitude do coeficiente de reflexão $\|R\|$, razão entre as componentes refletida e incidente da onda no duto, a qual é dada por

$$R_r = \frac{Z_r - Z_0}{Z_r + Z_0}, \quad (1.1)$$

sendo Z_r a impedância de radiação e Z_0 a impedância característica do meio;

- coeficiente de correção da terminação normalizado pelo raio do duto l/a em que a é o raio do duto. Tal parâmetro representa o comprimento acústico efetivo do duto. Em outras palavras, o fator l é a quantidade adicional medida a partir da abertura do duto a qual deve propagar a onda incidente antes de ser refletida para o interior do duto com fase invertida. Tal coeficiente de correção da terminação l é dado por

$$l = \frac{1}{k} \arctan\left(\frac{Z_r}{Z_0 i}\right) \quad (1.2)$$

sendo k o número de onda;

- diretividade $G(f, \theta)$, que representa o nível de pressão sonora em campo distante distribuído em relação a uma frequência f e a um ângulo θ medido de forma azimutal a partir da linha axial do duto. Tal parâmetro é definido como

$$G(f, \theta) = \frac{P^2(f, \theta)}{\frac{\sum_{n=1}^N P^2(f, \theta)}{N}}. \quad (1.3)$$

tal que N é o número total de pontos adquiridos ao longo da medição com a variação de θ .

Em relação aos parâmetros discutidos acima, a solução exata para o problema de um duto não flangeado na ausência de escoamento foi proposta por Levine e Schwinger (1948). A solução assume que a espessura das paredes do duto são desprezíveis e o fluido é invíscido. A partir destas simplificações, as expressões exatas para $\|R\|$, l e $G(f, \theta)$ são obtidas utilizando-se a técnica de Wiener-Hopf.

Apesar da utilidade do modelo de Levine e Schwinger, em boa parte das aplicações práticas, dutos transportam escoamentos médios. Para tais circunstâncias, Munt (1990) propôs um modelo analítico exato, também baseado na técnica de Wiener-Hopf, em que se considera a presença de um escoamento subsônico no interior do duto. Considera-se nesse modelo as premissas de que o escoamento é uniforme, invíscido e que a camada cisalhante do jato é infinitamente fina. Além disso, o modelo considera a condição de Kutta na borda do duto para lidar com a singularidade da velocidade de partícula nesta região. As Figuras 1, 2 e 3 apresentam as comparação entre casos com e sem escoamento para um duto não flangeado em termos de $\|R\|$, l/a e $G(f, \theta)$.

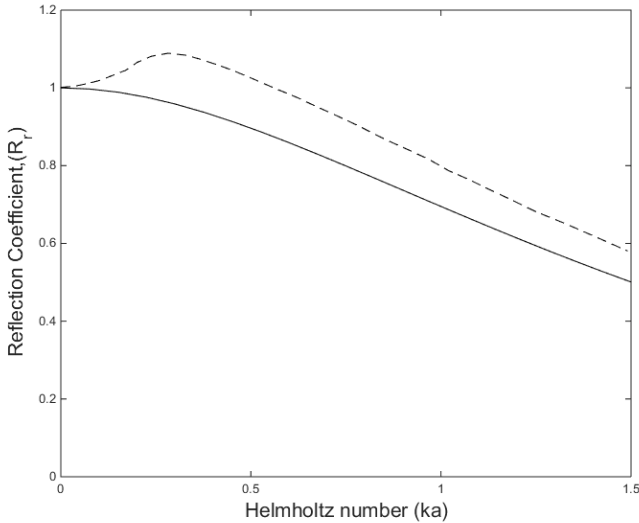


Figura 1: Resultados analíticos exatos para magnitude do coeficiente de reflexão $\|R\|$ ao final de um duto não flangeado. A linha contínua apresenta o resultado sem escoamento de Levine e Schwinger (1948) e a linha tracejada apresenta o resultado com escoamento de Munt (1990).

Como é mostrado na Figura 1, a magnitude do coeficiente de reflexão $\|R\|$ aumenta consideravelmente mesmo na presença de um escoamento de baixo número de Mach. Além disso, pode-se perceber que, em algumas frequências, $\|R\|$ torna-se maior do que a unidade, implicando que a amplitude da onda refletida torna-se maior do que a da onda incidente. Este fenômeno ocorre, sobretudo, pela transferência de energia cinética rotacional do escoamento para o campo acústico. Essa transferência de energia cinética ocorre sobretudo pelo desprendimento periódico de vórtices na borda do duto.

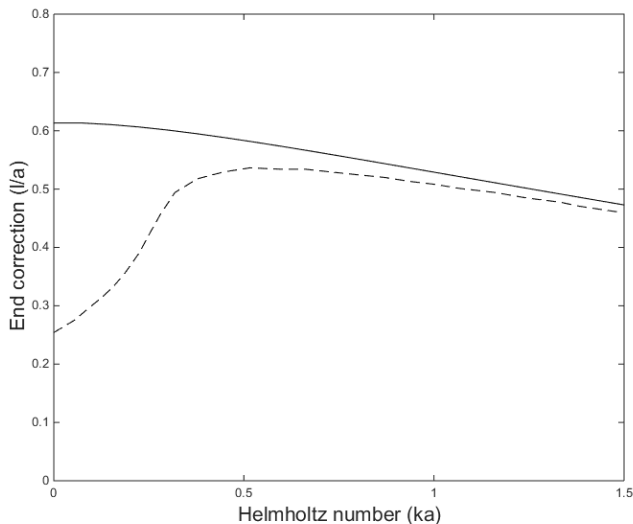


Figura 2: Resultados analíticos exatos para o coeficiente de correção da terminação normalizado pelo raio l/a de um duto não flangeado. A linha contínua apresenta o resultado sem escoamento de Levine e Schwinger (1948) e a linha tracejada apresenta o resultado com escoamento de Munt (1990).

De acordo com a Figura 2, a correção normalizada da terminação l/a torna-se consideravelmente menor do que aquela obtida na ausência de escoamento, sobretudo para baixos números de ka . Em outras palavras, para baixas frequências e na presença de um escoamento a onda acústica é refletida em uma região mais próxima da abertura, em comparação à situação sem escoamento.

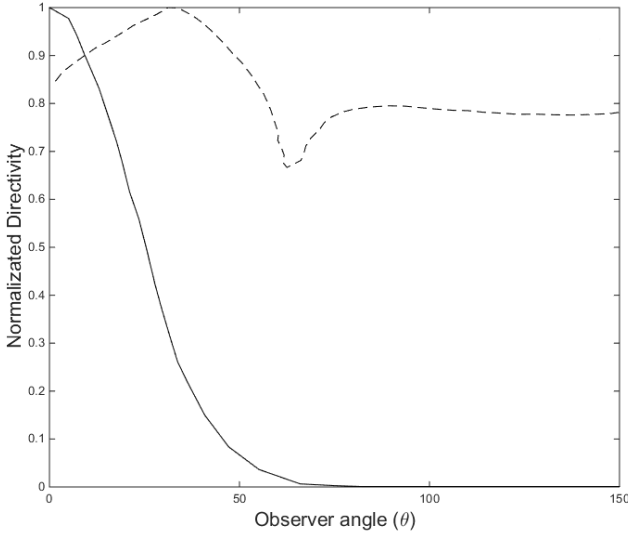


Figura 3: Diretividade $G(f, \theta)$ para os valores de $\text{Mach} = 0,134$ e $ka = 4,58$ para a curva tracejada de Munt (1977) e $ka = 3,87$ para a curva contínua de Levine e Schwinger (1948).

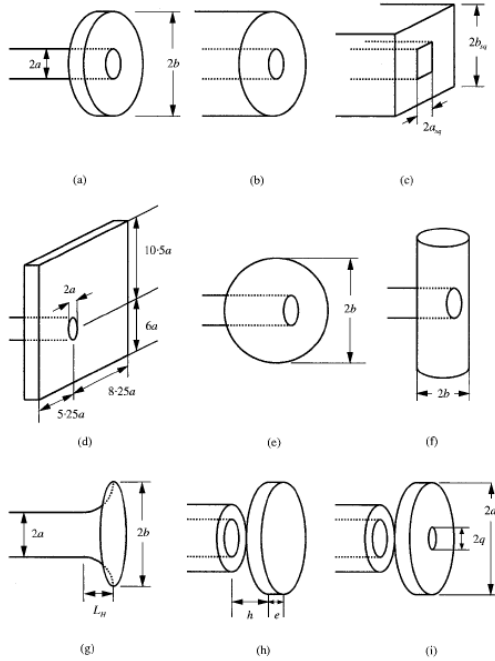
De acordo com a Figura 3, a diretividade $G(f, \theta)$ muda significativamente demonstrando maiores amplitudes em torno do ângulo de 45° e há o fenômeno conhecido como zona de silêncio em torno do ângulo de 10° . Isto ocorre devido à refração de velocidade de fase. Mesmo as duas curvas tendo valores de ka diferentes as diretividades normalizadas nos outros valores de ka obedecem o mesmo padrão.

É importante ressaltar que modelos exatos para os parâmetros de radiação de dutos se limitam às condições geométricas simples. No entanto, observa-se na prática terminações cujas geometrias divergem significativamente daquela associadas a um duto não flangeado. Exemplos comuns destas geometrias são aquelas encontradas em difusores, chaminés, sistemas de exaustão, *nozzles* e instrumentos musicais. A Figura 4 ilustra casos mais realistas de terminação de dutos comumente encontrados na prática. Para estes casos, não existem modelos que considerem a influência do escoamento nas propriedades de radiação. Além disso, a análise numérica considerando os efeitos de escoamento não é trivial.

Considerando a problemática discutida acima, o objetivo principal deste trabalho é investigar, de forma numérica e experimental, o comportamento da magnitude dos coeficientes de reflexão $\|R\|$, correção da terminação l/a e a diretividade $G(f, \theta)$ em dutos transportando escoamentos subsônicos ($Mach < 0,2$), terminados com diferentes geometrias, incluindo cornetas cilíndricas e flanges de diferentes dimensões.

Tem-se como objetivos específicos:

- modelagem numérica do duto não-flangeado sem escoamento;
- modelagem numérica do duto não-flangeado com escoamento;
- modelagem numérica do duto flangeado em cornetas cilíndricas com escoamento;
- validação experimental dos modelos numéricos;
- modelagem numérica do duto flangeado em cornetas cilíndricas com escoamento sugado.



Fonte: (DALMONT et al., 2001)

Figura 4: Exemplos de vários tipos de terminações: (a) flange circular; (b) flange circular com espessura do duto; (c) duto quadrado com flange de espessura quadrada; (d) flange normalizada; (e) flange esférica; (f) flange cilíndrica; (g) corneta; (h) disco não perfurado; (i) disco perfurado.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Vários trabalhos foram feitos no contexto de irradiação normal de dutos, dentre os quais o mais canônico foi o trabalho de Levine e Schwinger (1948), que resolveu analiticamente o problema da radiação e da reflexão para terminação não-flangeada usando a técnica Wiener-Hopf. Munt (1977) fez um trabalho similar desenvolvendo um modelo exato para a diretividade do som irradiado com escoamento subsônico. Posteriormente Munt (1990) complementou o modelo adicionando o coeficiente de reflexão para números de Mach até 0,4. Usando teorias similares e considerando o escoamento como uniforme (*plug*) o mesmo problema foi resolvido de maneira aproximada por Carrier (1955) (usando o método de Prandtl-Glauert), Mani (1973), considerando o movimento transversal de ondas acústicas, e Savkar (1975) considerando variações de temperatura.

O modelo analítico (MUNT, 1990) dos coeficientes de reflexão $\|R\|$ e correção de terminação l/a foi validado experimentalmente por Allam e Åbom (2006), utilizando um sistema de medição superdeterminado para a decomposição de onda. Mais recentemente esses resultados foram validados numericamente por Silva et al. (2009) e Yong et al. (2013), usando método de lattice Boltzmann (LBM) com a condição de axissimetria proposta por Halliday et al. (2001).

Para modelos com diferentes terminações mas sem escoamento, Dalmont et al. (2001) determinaram o coeficiente de correção de terminação l/a de forma experimental e numérica usando métodos de elementos de contorno e diferenças finitas, e Selamet et al. (2001) determinaram os coeficientes de reflexão $\|R\|$ e correção de terminação l/a usando método de elementos de contorno. Focando especificamente em flanges circulares, Silva et al. (2012) determinaram os coeficientes de reflexão $\|R\|$ e correção de terminação l/a usando método de elementos de contorno.

Para a problemática de dutos com escoamentos e diferentes terminações, os métodos convencionais como elementos de contorno e diferenças finitas possuem várias limitações. Como alternativa de método, o LBM se mostra mais adequado quando se diz respeito a interações entre escoamentos e campos acústicos (YONG et al., 2013). Isto se deve à capacidade do método de resolver, numa mesma estrutura computacional, tanto o campo acústico quanto o campo fluido-dinâmico. Alguns trabalhos foram realizados para a aplicação do LBM em problemas acústicos e aeroacústicos. Um exemplo que possui aderência com o

contexto desse trabalho é a validação do modelo de Levine e Schwinger (1948) por Silva e Scavone (2006). Crouse et al. (2006) demonstraram, através de quatro problemas canônicos em acústica, a aplicabilidade do LBM bem como a recuperação dos parâmetros macroscópicos da equação semi-compressível de Navier-Stokes. Um outro problema clássico de aerocústica para validação do LBM foi implementado por Lew et al. (2010), que investigaram o som em campo distante a partir de um jato turbulento subsônico. Viggen (2013) demonstrou a possibilidade de incluir fontes multipolos acústicos no LBM e os efeitos nos parâmetros macroscópicos relacionados a Navier-Stokes. Outro trabalho de Viggen (2014) foi propor diferentes equações de estado em LBM para poder simular efeitos de escoamentos de mais alta compressibilidade.

Ainda no contexto do LBM, Yong et al. (2013) usaram o método para validar os resultados de diretividade de Munt (1977). Todavia o campo acústico processado era de campo próximo. A forma mais apropriada então para a captura de pressão é em campo distante. No entanto, isto demanda a construção de um domínio computacional relativamente grande para a captura da irradiação acústica em campo distante, o que, por sua vez, implica em alto custo computacional. Uma alternativa de solução para esse problema é a aplicação da superfície de Ffwocs Willians-Hawkings (FW-H) proposta por Lockard (2000). Um exemplo de aplicação dessa formulação junto com o LBM é o trabalho de Silva et al. (2015), que constituiu o campo distante de um ruído oriundo da instalação de uma placa próximo a um jato.

Outra problemática relativa à modelagem numérica usando LBM é a implementação de uma condição anecóica. Essa condição consiste em, além de absorver o som gerado pelos processos aerodinâmicos, absorver também o escoamento e a vorticidade gerada. Algumas opções de condições anecóicas são a condição ABC de Kam et al. (2006) que se baseia numa região de amortecimento redirecionando os valores de densidade e velocidade das partículas para um valor alvo, e a condição de Najafi-Yazdi e Mongeau (2012) que implementa uma formulação de *Perfectly Matched Layer* (PML) para LBM.

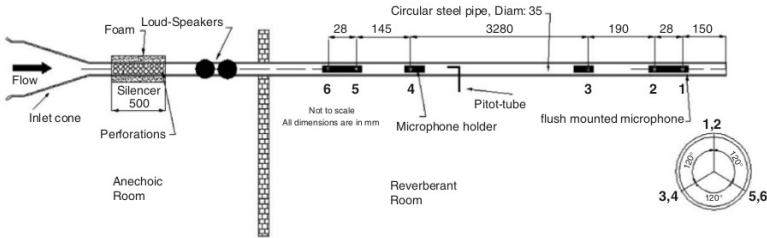
3 METODOLOGIA

Além da revisão bibliográfica apresentada, a condução do presente trabalho dar-se-á pelas seguintes etapas:

1. Modelagem numérica do duto não-flangeado sem escoamento. Para tal fim é preciso definir o domínio fluido-dinâmico de tal forma que o campo acústico possa ser corretamente definido sem muitas distorções, também é preciso definir o duto com paredes rígidas com condição *bounce back* e sua forma de excitação sonora e, por fim, definição de condições de contorno anecóicas para o campo acústico não sofrer contaminações oriundas das reflexões. Para tanto, serão feitos os seguintes procedimentos:
 - (a) implementação da condição anecóica em 3 dimensões proposta por Najafi-Yazdi e Mongeau (NAJAFI-YAZDI; MONGEAU, 2012) no *software* Palabos;
 - (b) validação da condição anecóica no *software* Palabos determinando $\|R\|$ e l/a num duto simples;
 - (c) validação do modelo comparando com os resultados de Levine e Schwinger (LEVINE; SCHWINGER, 1948) através dos parâmetros $\|R\|$ e l/a ;
 - (d) implementação da superfície de FW-H no software Palabos;
 - (e) validação da superfície de FW-H para diretividade $G(f, \theta)$ com os resultados de Levine e Schwinger (LEVINE; SCHWINGER, 1948).
2. Modelagem numérica do duto não-flangeado com escoamento. A partir do modelo sem escoamento, será inserido um termo fonte baseado na formulação de Kam et al. (2006) que criará um escoamento no interior do duto. Dado esse contexto é preciso realizar as seguintes etapas:
 - (a) determinação e validação com os resultados de Munt (MUNT, 1990) de $\|R\|$ e l/a para números de Mach 0,05, 0,1 e 0,15;
 - (b) determinação de $G(f, \theta)$ e validação com os resultados de Munt (MUNT, 1990) e Shi Yong et al. (YONG et al., 2013).
3. Modelagem numérica do duto com cornetas cilíndricas com escoamento. Para a definição de cornetas em LBM é preciso definir

uma condição de paredes curvas não-alinhadas como por exemplo a de Bouzidi et al. (2001). Para tal fim deverá ser feito:

- (a) simulação para cornetas $2r$ e $4r$, tal que r é o raio de curvatura da corneta, determinando $\|R\|$, l/a e $G(f, \theta)$ segundo o trabalho (SILVA et al., 2009).
4. Validação experimental dos modelos numéricos. Essa etapa será realizada no rig de jato do laboratório de vibrações e acústica e será baseada no experimento de Allam e Åbom (2006) de acordo com a configuração mostrada na Figura 5. Dado o exposto, para essa etapa os seguintes procedimentos deverão ser feitos:
 - (a) projeto e implantação do *rig* de jato de acordo com o estudo (ALLAM; ÅBOM, 2006);
 - (b) projeto e confecção das cornetas cilíndricas para terminação do duto;
 - (c) determinação de $\|R\|$ e l/a com os microfones internos;
 - (d) determinação de $G(f, \theta)$ com o *array* de microfones externos.



Fonte: (ALLAM; ÅBOM, 2006)

Figura 5: Esquema de configuração do duto.

5. Modelagem numérica do duto flangeado em cornetas cilíndricas com escoamento sugado. Dado o modelo numérico validado, pode-se agora redimensionar os parâmetros alvos de pressão e velocidade da condição de Kam et al. (2006) de tal forma que o escoamento mude de sentido. Esse fato possibilitará a realização da seguinte etapa:

- (a) determinação de $\|R\|$, l/a e $G(f, \theta)$;

6. redação da dissertação.

4 RESULTADOS PRELIMINARES

No que diz respeito aos resultados preliminares, foi implementado e simulado o modelo numérico descrito no estudo de Yong et al. (2013). Basicamente é um duto com a terminação aberta não-flangeada que teve os modos excitados junto com escoamento. A Figura 6 mostra os resultados comparados para $\|R\|$ e correção da terminação l/a . Percebe-se que os resultados apresentam boa convergência com os resultados da literatura.

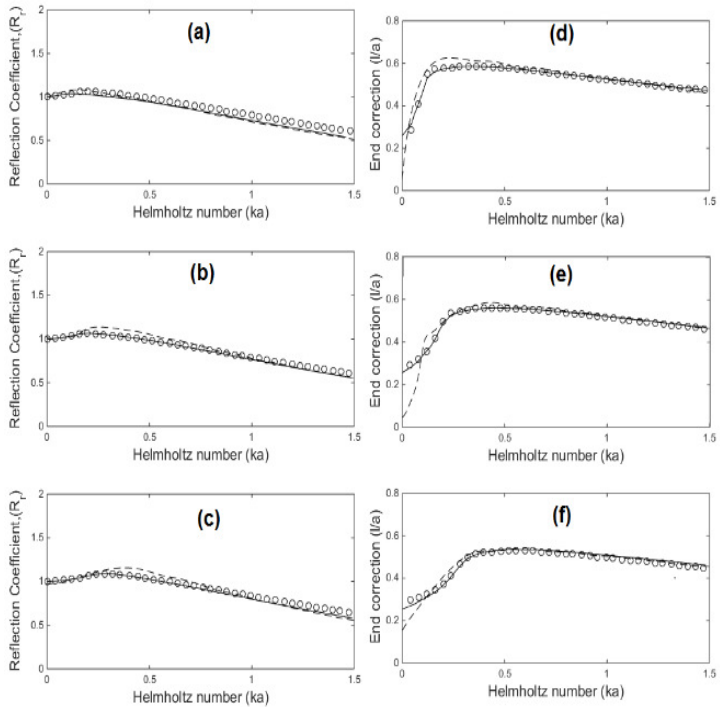


Figura 6: Comparação entre resultados analítico de Munt (1990) (linha sólida), resultados de Silva et al. (2009) (círculo vazio) e a presente modelagem numérica (linha traçada) para magnitude de $\|R\|$ com números de Mach 0,05 (a), 0,1 (b) e 0,15 (c) e correção da terminação l/a normalizado pelo raio do duto com números de Mach 0,05 (d), 0,1 (e) e 0,15(f).

As Figuras 7, 8, 9 e 10 mostram os resultados comparados com estudos anteriores para a diretividade $G(f, \theta)$. É perceptível que os resultados da presente modelagem numérica com a superfície de FW-H estão com uma boa convergência.

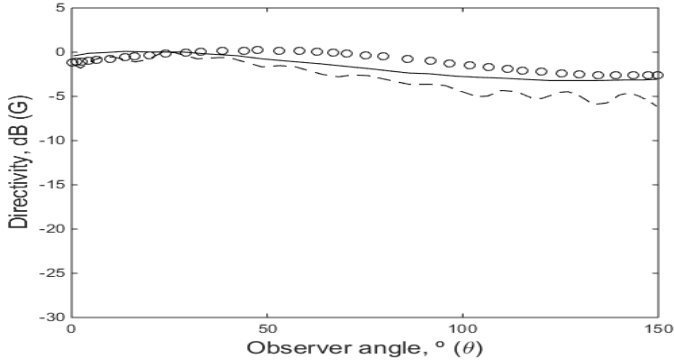


Figura 7: Comparação entre resultados analíticos de Munt (1990) (linha sólida), numéricos de Yong et al. (2013) (linha traçada) e a presente modelagem numérica (círculos vazios) para diretividade $G(f, \theta)$, em dB, para o caso $ka = 0,74$ e $Mach = 0,036$.

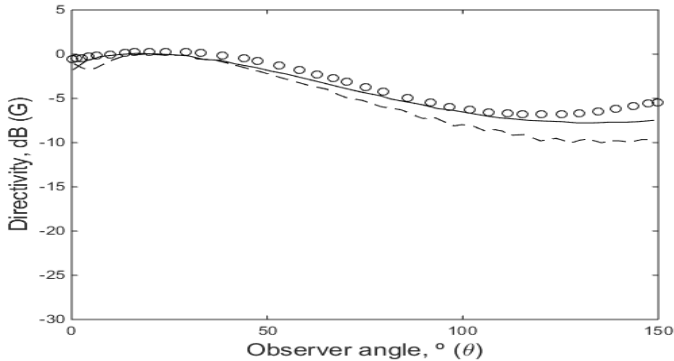


Figura 8: Comparação entre resultados analíticos de Munt (1990) (linha sólida), numéricos de Yong et al. (2013) (linha traçada) e a presente modelagem numérica (círculos vazios) para diretividade $G(f, \theta)$, em dB, para o caso $ka = 1,48$ e $Mach = 0,036$.

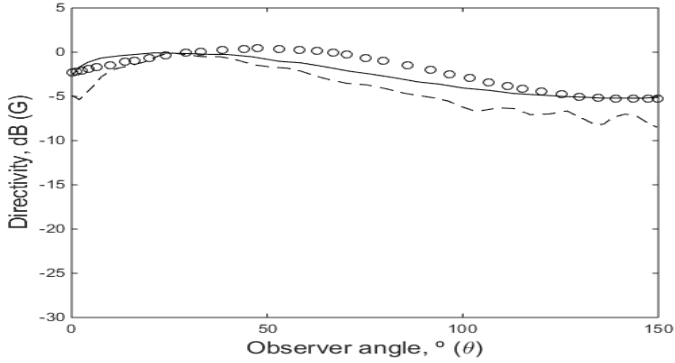


Figura 9: Comparação entre resultados analíticos de Munt (1990) (linha sólida), numéricos de Yong et al. (2013) (linha traçada) e a presente modelagem numérica (círculos vazios) para diretividade $G(f, \theta)$, em dB, para o caso $ka = 0,74$ e $Mach = 0,15$.

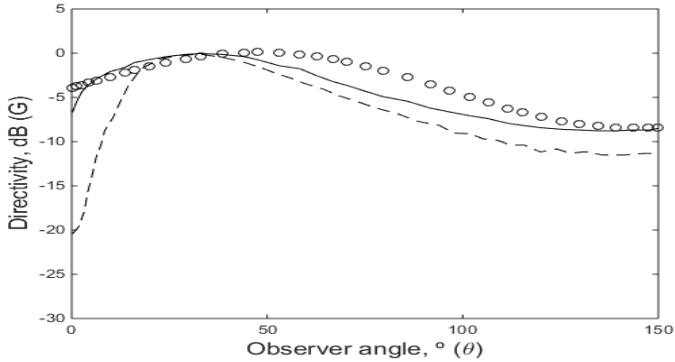


Figura 10: Comparação entre resultados analíticos de Munt (1990) (linha sólida), numéricos de Yong et al. (2013) (linha traçada) e a presente modelagem numérica (círculos vazios) para diretividade $G(f, \theta)$, em dB, para o caso $ka = 1,48$ e $Mach = 0,15$.

Em vista das simulações abordadas, pode-se verificar que a implementação dos modelos em LBM estão coerentes e gerando boas concordâncias com estudos anteriores, todavia ainda pode-se melhorar os resultados com o uso da superfície de FW-H aplicando-a num contexto de modelagem numérica em 3 dimensões.

5 CRONOGRAMA

Tabela 1: Cronograma de Atividades

Atividades	2016							2017					
	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6
1	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x			
2.a	x	x											
2.b		x											
2.c		x											
2.d			x										
2.e			x										
3.a				x									
3.b				x									
4.a					x								
5.a					x	x							
5.b					x	x	x						
5.c							x	x					
5.d							x	x	x				
6.a									x	x			
7								x	x	x	x	x	x

REFERÊNCIAS

- ALLAM, S.; ÅBOM, M. Investigation of damping and radiation using full plane wave decomposition in ducts. *Journal of sound and vibration*, Elsevier, v. 292, n. 3, p. 519–534, 2006.
- BOUZIDI, M.; FIRDAOUSS, M.; LALLEMAND, P. Momentum transfer of a boltzmann-lattice fluid with boundaries. *Physics of Fluids (1994-present)*, AIP Publishing, v. 13, n. 11, p. 3452–3459, 2001.
- CARRIER, G. *Sound transmission from a tube with flow*. [S.l.], 1955.
- CROUSE, B.; FREED, D.; BALASUBRAMANIAN, G.; SENTHOORAN, S.; LEW, P.-T.; MONGEAU, L. Fundamental aeroacoustic capabilities of the lattice-boltzmann method. *AIAA paper*, v. 2571, 2006.
- DALMONT, J.-P.; NEDERVEEN, C.; JOLY, N. Radiation impedance of tubes with different flanges: numerical and experimental investigations. *Journal of sound and vibration*, Elsevier, v. 244, n. 3, p. 505–534, 2001.
- HALLIDAY, I.; HAMMOND, L.; CARE, C.; GOOD, K.; STEVENS, A. Lattice boltzmann equation hydrodynamics. *Physical review E*, APS, v. 64, n. 1, p. 011208, 2001.
- KAM, E.; SO, R.; LEUNG, R. Non-reflecting boundary for one-step lbm simulation of aeroacoustics. In: *27th AIAA Aeroacoustics Conference*. [S.l.: s.n.], 2006. p. 1–9.
- LEVINE, H.; SCHWINGER, J. On the radiation of sound from an unflanged circular pipe. *Physical review*, APS, v. 73, n. 4, p. 383, 1948.
- LEW, P.-T.; MONGEAU, L.; LYRINTZIS, A. Noise prediction of a subsonic turbulent round jet using the lattice-boltzmann method. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Acoustical Society of America, v. 128, n. 3, p. 1118–1127, 2010.
- LOCKARD, D. P. An efficient, two-dimensional implementation of the flowcs williams and hawkins equation. *Journal of Sound and Vibration*, Elsevier, v. 229, n. 4, p. 897–911, 2000.
- MANI, R. Refraction of acoustic duct waveguide modes by exhaust jets. 1973.

MUNT, R. The interaction of sound with a subsonic jet issuing from a semi-infinite cylindrical pipe. *Journal of Fluid Mechanics*, Cambridge Univ Press, v. 83, n. 04, p. 609–640, 1977.

MUNT, R. Acoustic transmission properties of a jet pipe with subsonic jet flow: I. the cold jet reflection coefficient. *Journal of Sound and Vibration*, Elsevier, v. 142, n. 3, p. 413–436, 1990.

NAJAFI-YAZDI, A.; MONGEAU, L. An absorbing boundary condition for the lattice boltzmann method based on the perfectly matched layer. *Computers & fluids*, Elsevier, v. 68, p. 203–218, 2012.

SAVKAR, S. Radiation of cylindrical duct acoustic modes with flow mismatch. *Journal of Sound and Vibration*, Elsevier, v. 42, n. 3, p. 363–386, 1975.

SELAMET, A.; JI, Z.; KACH, R. Wave reflections from duct terminations. *The Journal of the Acoustical Society of America*, Acoustical Society of America, v. 109, n. 4, p. 1304–1311, 2001.

SILVA, A. D.; SCAVONE, G. Lattice boltzmann simulations of the acoustic radiation from waveguides. *Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical*, IOP Publishing, v. 40, n. 3, p. 397, 2006.

SILVA, A. D.; SCAVONE, G.; LEFEBVRE, A. Sound reflection at the open end of axisymmetric ducts issuing a subsonic mean flow: A numerical study. *Journal of Sound and Vibration*, Elsevier, v. 327, n. 3, p. 507–528, 2009.

SILVA, A. R. D.; MAREZE, P. H.; LENZI, A. Approximate expressions for the reflection coefficient of ducts terminated by circular flanges. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, SciELO Brasil, v. 34, n. 2, p. 219–224, 2012.

SILVA, F. D. da; DESCHAMPS, C. J.; SILVA, A. R. da; SIMÕES, L. G. Assessment of jet-plate interaction noise using the lattice boltzmann method. In: *21st AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 2207.

VIGGEN, E. M. Acoustic multipole sources for the lattice boltzmann method. *Physical Review E*, APS, v. 87, n. 2, p. 023306, 2013.

VIGGEN, E. M. Acoustic equations of state for simple lattice boltzmann velocity sets. *Physical Review E*, APS, v. 90, n. 1, p. 013310, 2014.

YONG; SILVA, A. R. da; SCAVONE, G. P. Lattice boltzmann simulations of sound directivity of a cylindrical pipe with mean flow. *Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical*, IOP Publishing, v. 46, n. 31, p. 315501, 2013.