

Análise do fluxo labial no trompete através da filtragem inversa adaptativa interativa

MODALIDADE: COMUNICAÇÃO

SUBÁREA ou SIMPÓSIO: Composição e Sonologia

Gustavo Machado Oliveira

Universidade Federal de Minas Gerais – gustavomacholi@gmail.com

Davi Alves Mota

Universidade Federal de Minas Gerais – davi Alvesmota@gmail.com

Maurício Alves Loureiro

Universidade Federal de Minas Gerais – mauricio.alves.loureiro@gmail.com

Resumo. No trompete, a vibração labial é um parâmetro técnico extremamente fundamental na qualidade sonora do instrumento. Diante disso, este trabalho visa investigar o comportamento do pulso labial no trompete através da utilização de modelagem computacional. Para obter o pulso labial (sinal de excitação) é aplicada a modelagem LPC (Codificação Preditiva Linear) para estimar os efeitos do filtro (instrumento) e então cancelar estes efeitos através da filtragem inversa. Os resultados mostram a existência de características específicas em diferentes sujeitos, instrumentos e condições de performance.

Palavras-chave. Trompete. Modelagem Computacional. Pulso labial.

Analysis of Lip Flow in the Trumpet Through Interactive Adaptive Inverse Filtering

Abstract. In the trumpet, the lip vibration is an essential fundamental technical parameter in the sound quality of the instrument. That said, this work aims to investigate the behavior of the lip pulse in the trumpet through the use of computational modeling. To obtain the lip pulse (excitation signal), the LPC modeling (Linear Predictive Coding) is applied to estimate the effects of the filter (instrument) and then cancel these effects through inverse filtering. The results show the existence of specific characteristics in different peoples, instruments and conditions.

Keywords. Trumpet. Computational Modeling. Lip Air Flow.

1. Introdução

Vários estudos voltados para a execução do trompete mostram grande preocupação com aspectos relacionados ao controle do ar (ARBAN, 1982; CLARKE, 1984; DULIN; CICHOWICZ, 2011; SCHLOSSBERG, 1948; STAMP, 1982; THOMPSON, 2001), apresentando diversas abordagens para a obtenção deste controle, quase sempre subjetivas na maneira de descrever os mecanismos corporais envolvidos, por não serem passíveis de serem visualizados, como por exemplo, a vibração labial. Diante disso, é evidente a necessidade da realização de estudos que possam desvendar a influência do controle do ar na execução do trompete, além do fato da grande diversidade de metáforas utilizadas no ensino de instrumentos de sopro. Essas metáforas são muito utilizadas devido ao bom resultado que

alcançam, porém não estão diretamente comprometidas com os fenômenos físicos que realmente acontecem.

Geralmente, na literatura do trompete e em ambientes informais, diversas terminologias são citadas a fim de fazer referência ao comportamento do sopro, tais como: fluência do ar, coluna de ar, corrente de ar, velocidade de ar, pressão de sopro, fluxo de ar, movimento do ar, entre outras. Diante disso, é possível assumir que estes termos fazem referência a ações distintas do trompetista, como a pressão de ar na boca ou a produção do pulso labial que gera a vibração dos lábios, dando origem ao sinal de excitação. É importante elucidar aqui que as metáforas e analogias, que muitas vezes são subjetivas, possuem o intuito de alcançar os objetivos propostos por professores, mas podem não apresentar correlação direta com os processos físicos e acústicos presentes no ato de tocar.

Para produzir som no trompete é necessário que o instrumentista coloque os lábios em estado de vibração dentro do bocal, gerando assim uma excitação capaz de gerar som através do ar que se move em pulsos dinâmicos com a abertura e fechamento dos lábios. Este processo gera um som onde a vibração sonora produzida pelos lábios é amplificada e modelada pelas características acústicas do tubo do instrumento. A qualidade da vibração labial irá influenciar diretamente na qualidade sonora final do trompete. “Quando um instrumento de metal é tocado, os lábios do instrumentista atuam como uma válvula, introduzindo sopros de ar na hora certa para manter as oscilações da coluna de ar” (ROSSING; MOORE; WHEELER, 1929, p. 225).

Diante do processo citado acima, que explica de forma fiel os fenômenos físicos e acústicos, professores de trompete geralmente utilizam de metáforas para abordar ações internas que moldam um sopro capaz de realizar um som como o desejado, conseguindo bons resultados mesmo que suas metáforas não representem de fato aquilo que está acontecendo, como, por exemplo:

Existe uma alta correlação entre o volume de ar nos pulmões e a rapidez com que o ar é expelido (velocidade do ar). Quanto menos cheios os pulmões, mais rápido sairá o ar para produzir um som, porque será necessário mais esforço para expelir o ar. Por outro lado, quanto mais completamente cheios os pulmões, mais lenta a expulsão do ar pode ser (SCHLUETER, 1996, p. 25).

São comuns professores que recomendam o uso de “ar quente” e soprar como em um “bocejo” no ensino do trompete:

Para "soprar com ar quente" implica primeiro pensar no sentimento que se experimenta soprando um vidro de janela enevado. Depois de algum tempo, tendo em mente esta experiência, sopra-se automaticamente assim, isto é, com uma velocidade lenta do fluxo de ar (SCHLUETER, 1996, p. 36).

Apesar da utilização das metáforas, analogias subjetivas e determinadas terminologias não indicarem o que realmente acontece com o sopro na grande maioria das vezes, é notável como podem produzir resultados muito satisfatórios.

As informações supracitadas fazem referência de alguma forma ao sopro e suas várias formas de aplicação para gerar a vibração labial, confirmando sua importância no desenvolvimento da técnica do instrumento. Apesar disso, estudos focados no comportamento do sopro ainda carecem de mecanismos capazes de realizar a caracterização do pulso labial. Porém, ao se tratar da voz, que necessita também do controle do ar, são encontradas algumas formas de caracterização de aspectos relacionados à técnica, como por exemplo a estimação do pulso glotal. Tendo isso em vista, “insights interessantes surgem da comparação e contraste dos instrumentos de sopro e a voz: todos envolvem uma válvula vibratória ou corrente de ar (pregas vocais, lábios, palhetas, jato de ar), que converte a energia da respiração em som” (WOLFE; GARNIER; JOHN, 2009, p. 07).

As medições da influência causada pelo sopro nas vibrações labiais são difíceis, pois a oscilação não pode ser examinada diretamente devido os lábios estarem em contato com o bocal ao tocar trompete. No entanto, há estudos que utilizam métodos que possibilitam alguma análise, por exemplo, manômetro inserido na boca do trompetista para aferir a pressão de sopro (FLETCHER; TARNOPOLSKY, 1999), modelagem física de palheta de lábio de instrumento cônico (GIORDANO, 2018), influência da temperatura da coluna de ar (DARLINGTON; SIMPSON, 1992) e utilização de trompete modificado (MACALUSO; DALMONT, 2011). A aquisição de informações sobre o controle do sopro e vibração labial no trompete, no entanto, geralmente exige medições invasivas como a inserção de pequenos tubos na boca. O uso dessas técnicas também pode ser limitado devido ao fato de que eles precisam de equipamentos especiais e geralmente são de difícil acesso.

Além dos métodos abordados no parágrafo anterior, há uma outra possibilidade de analisar o controle do instrumentista em relação ao pulso labial através da modelagem da produção sonora e estimação do sinal de excitação (vibração labial). Diante disso, este estudo tem por objetivo propor o uso da modelagem computacional que parte dos efeitos acústicos da produção sonora no trompete para estimar o pulso labial a partir do sinal sonoro captado por microfone. O uso deste método de modelagem, utilizado em estudos de voz, é justificado pela

similaridade existente entre os instrumentos de metais e a voz, pois ambos apresentam o modelo fonte-filtro (TITZE; WORLEY, 2009).

Pretende-se com a metodologia proposta extrair informações relacionadas ao controle da técnica do instrumentista, uma vez que o resultado da vibração labial está intimamente ligado ao sopro. Esta metodologia já foi utilizada em estudos voltados para modelagem do sinal de excitação em instrumentos de sopro, assim como Tronchin (2000) analisa as características virtuais da sonoridade do trompete, T. Smyth e M. Rouhipour na modelagem do sinal de excitação presente na vibração da palheta da clarineta (2009) e do saxofone (2013).

2. Metodologia

Foram analisadas as notas da série harmônica que parte do Dó 04 (263 Hz) e segue até o Dó 06 (1051 Hz) para o trompete afinado em Dó, e a partir do Si bemol 03 (234 Hz) ao Si bemol 05 (937 Hz) para o trompete afinado em Si bemol, passando por todos os modos de vibração do tubo através das notas ligadas. Justifica-se a escolha da série harmônica para este estudo o fato de que os sujeitos não contam com auxílio dos pistos na mudança de notas, ou seja, os trompetes são executados sem digitação, enfatizando desta forma a manipulação do pulso labial na alteração de notas.

3. Coleta de dados

Dois trompetistas graduados foram recrutados para a pesquisa, com experiência técnico-musicais distintas, um com maior experiência em orquestra e outro com maior experiência na área didática. As gravações foram realizadas em apenas uma única sessão. Cada um dos sujeitos executou as notas em seus próprios instrumentos sob as mesmas condições (tempo de estudo, dinâmica, metrônomo a 60 batimentos por minuto e afinação em 442 Hz). Os músicos foram instruídos a tocarem as notas sem alteração de dinâmica. Foram realizadas três gravações do trecho com cada trompete (Dó e Si bemol), totalizando 12 amostras. Todos os participantes foram gravados com os mesmos equipamentos de áudio e local, no mesmo dia.

O áudio foi capturado utilizando uma interface Firewire 1814, gravado com frequência de amostragem 44.100 Hz, em apenas um canal, utilizando um microfone M Áudio Solaris numa sala sem tratamento acústico. O microfone foi colocado o mais próximo possível do centro da campana do trompete com a finalidade de obter o resultado sonoro

como o mínimo possível de interferência do ambiente. Para este experimento foi necessário realizar a segmentação do áudio em notas, feita através do software Audacity. Os áudios foram reamostrados na frequência de 10.000 Hz com o intuito de excluir ruídos da região aguda e é aplicado uma modelagem a uma janela de 100 amostras (10 milissegundos) selecionando a parte de maior estabilidade de cada nota.

4. Metodologia de análise através da filtragem inversa

Para a estimação do pulso labial foi utilizada a implementação em Matlab do algoritmo de filtragem inversa proposto por ALKU (1992, p. 110), o IAIF (Filtragem Inversa Adaptativa Interativa), “...baseado em um modelo de produção de fala que consiste em três processos separados: a excitação glótica, o trato vocal e o efeito da radiação labial”, tomando como base o sistema de produção sonora apresentado na figura 02:

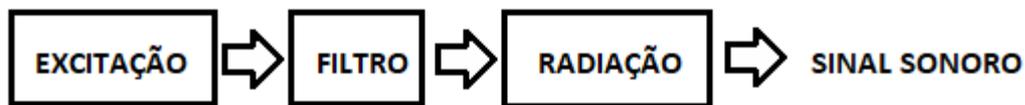


Figura 2. Sistema de produção sonora da fala e dos instrumentos de metais utilizado para realizar a modelagem.

O objetivo do método IAIF é estimar o sinal de excitação, que no caso da voz é resultante da vibração das pregas vocais e no trompete da vibração dos lábios. Sobre o modelo IAIF é importante ressaltar:

O método IAIF é baseado em conhecimento a priori sobre a forma geral da função de transferência do trato vocal. No caso das vogais, isso é de natureza geral, com algumas regiões de alta energia, os formantes. Se o efeito de inclinação da fonte glótica for eliminado do espectro da fala, o trato vocal poderá ser estimado com bastante precisão com a análise preditiva linear (LPC) (ALKU, 1992, p. 111).

As características acústicas do trato vocal (produção de voz) ou do tubo do instrumento (produção sonora no trompete) são modelados por LPC (Codificação Preditiva Linear). O modelo fonte-filtro, no qual uma fonte sonora (sinal de excitação) é transformada por um filtro (instrumento) para gerar o resultado sonoro é mostrado na Figura 03:

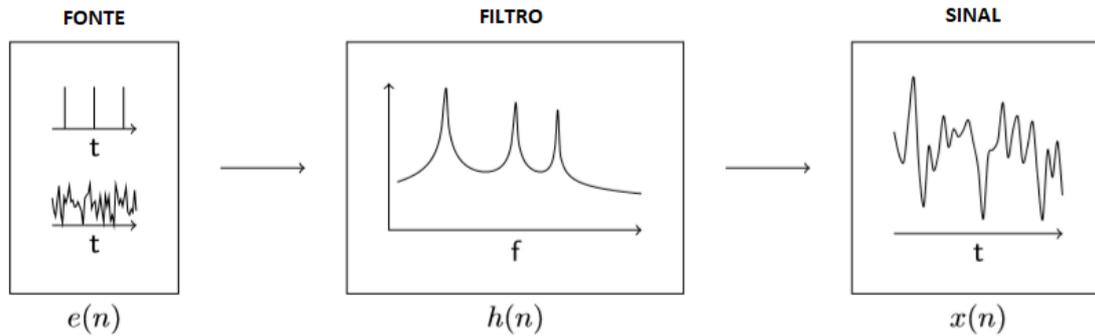


Figura 3. Modelo utilizado pelo LPC para separar as etapas da produção sonora na voz. Adaptado de Kim ([S.d.], p. 02).

Vale ressaltar que o LPC é um método amplamente utilizado para modelar as ressonâncias de sinais de voz. Este estudo propõe verificar sua aplicabilidade na análise do pulso labial no trompete, uma vez que, apesar de ter sido desenvolvido para sinais de fala, o LPC funciona bem em sinais da maioria dos instrumentos tonais (KIM, [S.d.], p. 2).

A filtragem inversa possibilita investigar o funcionamento do mecanismo de produção sonora a partir do cancelamento dos efeitos que o filtro (tubo do instrumento), modelado por LPC, modifica o sinal de excitação. A inversa da LPC é aplicada ao sinal produzido pelo trompete, para estimar o sinal de excitação, como mostra a Figura 04:

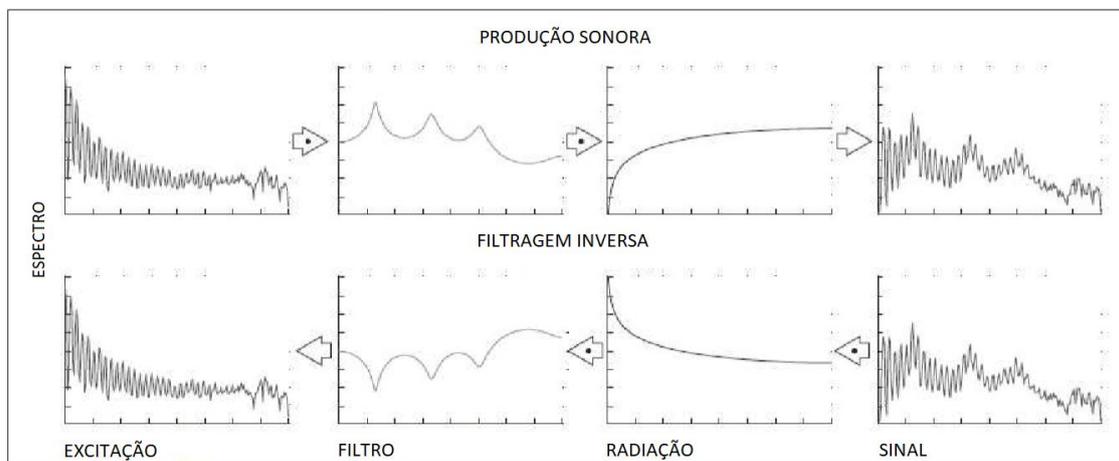


Figura 4. Etapas da produção sonora na parte superior do gráfico e a realização da filtragem inversa na parte inferior. Adaptado de Dias (2012, p. 46).

É importante ressaltar também que os métodos LPC e filtragem inversa são utilizados mais de uma vez no algoritmo IAIF, como apresentado no diagrama de blocos do modelo na figura 5, onde o sinal de excitação a ser analisado é representado por $S(n)$ e o sinal de excitação por $g(n)$.

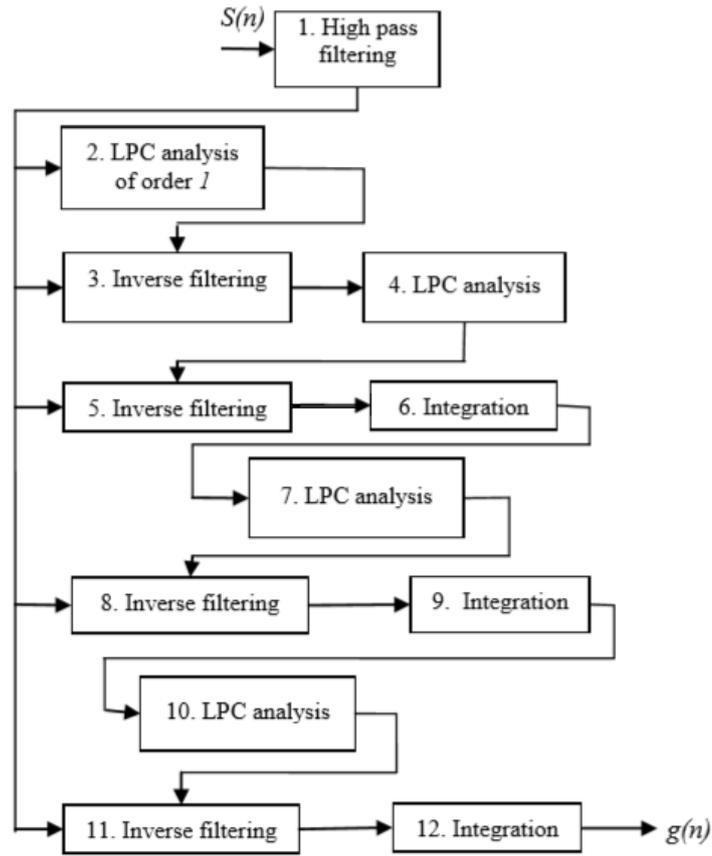


Figura 5. Diagrama do algoritmo IAIF utilizado para realizar a metodologia. Adaptado de Chittora (2014, p. 02).

Após a realização deste processamento, é possível, a partir do sinal sonoro original, apresentar o pulso labial apresentado na figura 6.

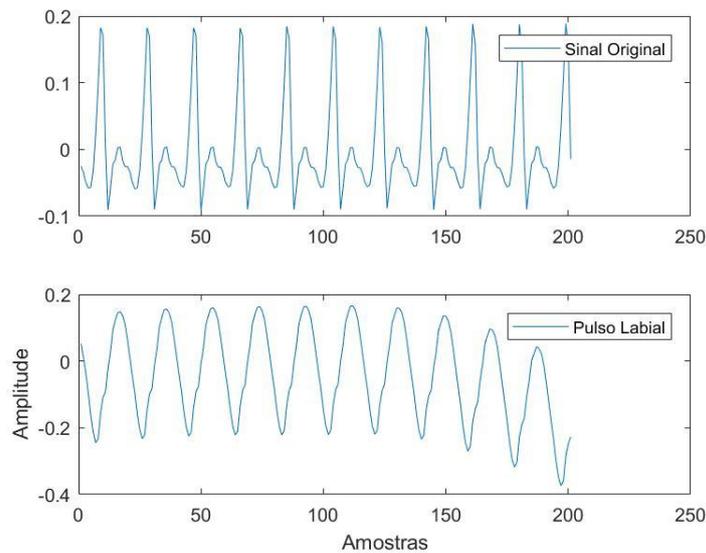


Figura 6. Sinal sonoro da nota Dó 5, 526 Hz (gráfico superior) e pulso labial (gráfico inferior).

É importante ressaltar que o LPC é geralmente utilizado para estimar formantes no sinal, ou seja, mapear o contorno espectral através do número de polos ou formantes no filtro (VALLABHA; TULLER, 2004, p. 203). A escolha da ordem do filtro presente no bloco 7 determina o número de polos que resultam no filtro e é determinada pela taxa amostragem (DIAS, 2012, p. 27). Sendo assim, a ordem do filtro LPC é normalmente estimada iniciando com um valor heurístico e ajustando-o de maneira por tentativa e erro (VALLABHA; TULLER, 2004, p. 203). A ordem do filtro utilizada para o trompete varia entre 1 e 13, sendo que a ordem do filtro é inversamente proporcional à frequência, ou seja, quanto mais aguda for a nota, menor será o número do filtro e vice-versa. Com a finalidade de exemplificar a aplicação da ordem correta para o filtro são apresentadas duas figuras. Na figura 7 são mostrados o sinal original e o pulso labial para a nota Dó 4 (263 Hz) com a utilização do filtro de ordem 2. Em seguida é apresentada a figura 8 onde o mesmo sinal original e fluxo labial é mostrado utilizando o filtro de ordem 10.

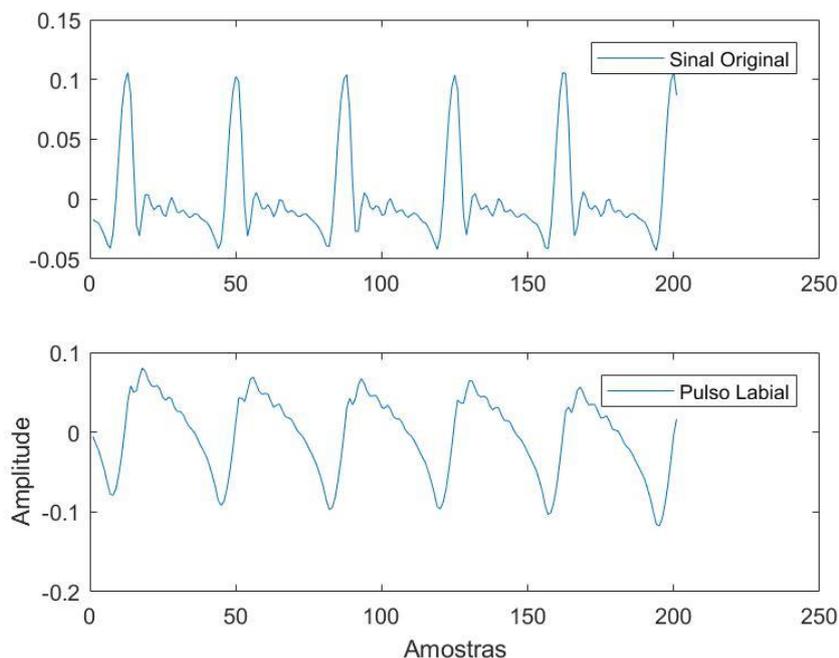


Figura 7. Sinal sonoro da nota Dó 4, 263 Hz (gráfico superior) e pulso labial (gráfico inferior) com a utilização do filtro LPC de ordem 2.

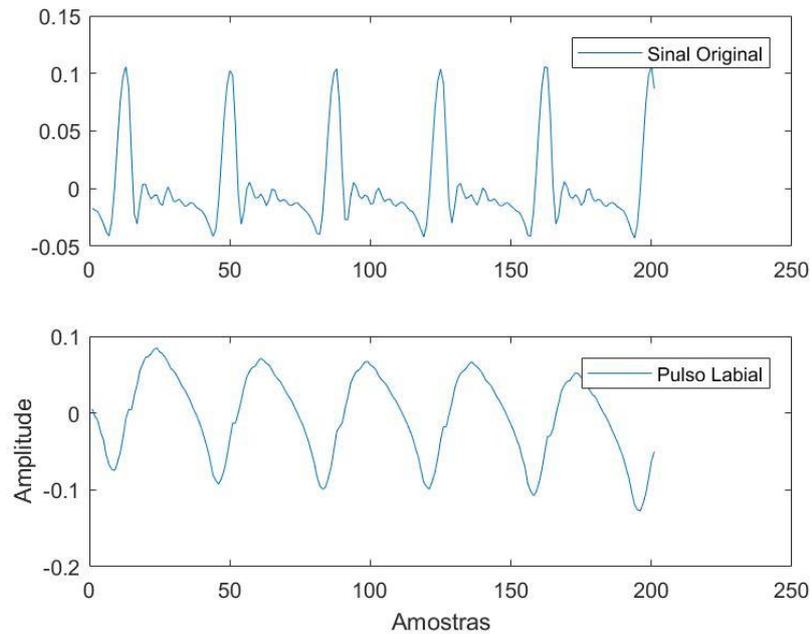


Figura 8. Sinal sonoro da nota Dó 4, 263 Hz (gráfico superior) e pulso labial (gráfico inferior) com a utilização do filtro LPC de ordem 10.

5. Parametrização do pulso labial

Para realização das análises e comparações do resultado obtido do pulso labial foi necessário encontrar o meio de cada nota, a partir de vales no sinal e selecionar 100 pontos anteriores ao centro e 100 pontos posteriores ao centro, para então obter o fluxo labial de um ciclo de cada nota.

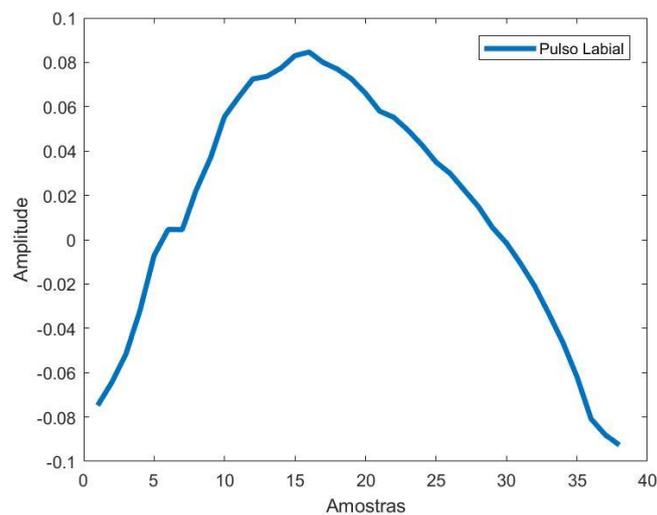


Figura 9. Pulso labial da nota Dó 4, 263 Hz.

Após obter a curva resultante é realizada uma parametrização com a finalidade de avaliar a assimetria e curtose em cada uma das amostras. O intuito desta parametrização é comparar o quão similar são as curvas em tomadas distintas, tanto com diferentes participantes quanto com eles mesmos, nas diversas notas tocadas nos registros apresentados.

6. Resultados e Discussão

Para comparar as diferenças na forma de onda do sinal de excitação foram utilizados um ciclo de cada nota executada por cada participante para analisar o quão assimétrico e achatada (curtose) são os pulsos, onde é possível observar o movimento de abertura e fechamento dos lábios. Separando os ciclos ao meio, a partir do valor mais alto, a parte esquerda da curva faz referência à abertura dos lábios e a parte direita se refere ao fechamento dos lábios.

Vale ressaltar que o ponto mais alto da curva é onde o lábio encontra-se no seu momento mais aberto, logo, no ponto mais baixo da curva se refere onde o lábio está totalmente fechado. Já a curtose (achatamento) mostra que quanto mais aguda for a nota, mais achatada será. A figura 10 exemplifica o formato do pulso labial e permite observar que sua forma de onda varia para diferentes participantes nas mesmas notas. É importante abordar que o formato da onda nem sempre é igual para os mesmos participantes, porém, sua similaridade é muito grande.

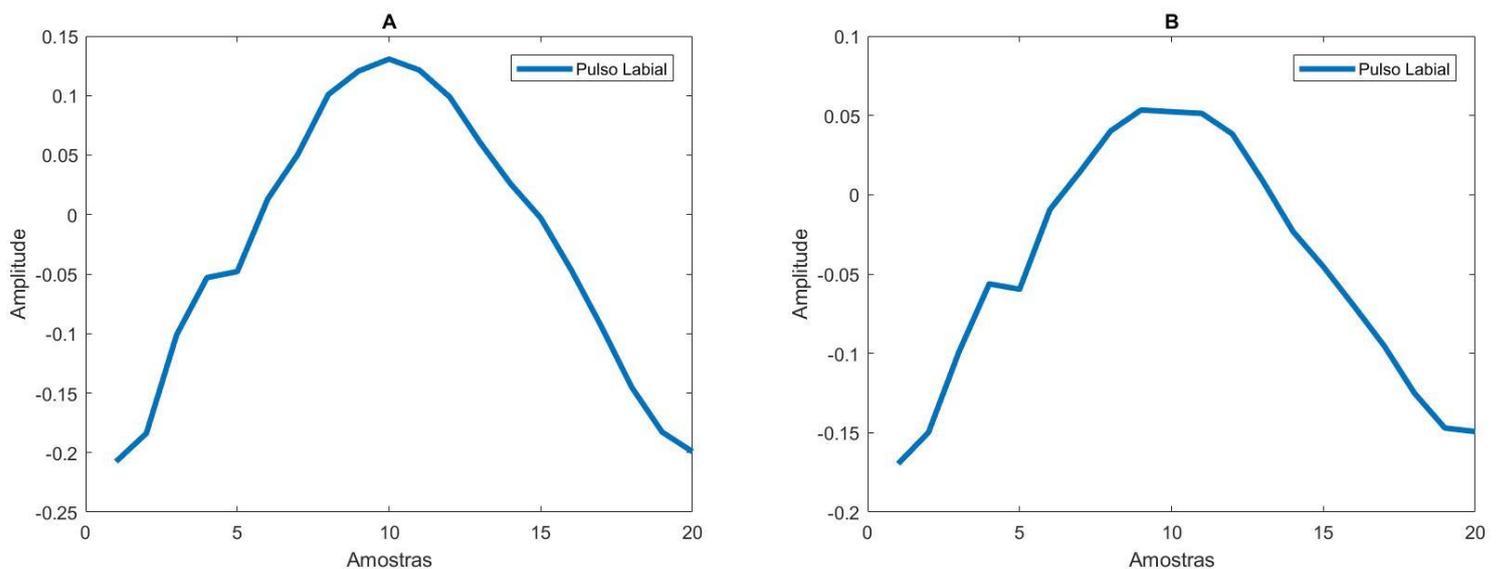


Figura 10. Um ciclo do pulso labial da nota Dó 5 (526 Hz) para o participante A (gráfico à esquerda) e B (gráfico à direita).

O resultado apresentado na Figura 11 se refere à variação de cada participante em relação à assimetria e curtose na nota mais aguda tocada em ambos trompetes. Dó 6 (1051 Hz) para o trompete em Dó e Si bemol 5 (937 Hz) para o trompete em Si bemol. A figura 11 mostra a variação de assimetria e curtose da nota Dó 6 (1051 Hz) executada por cada participante, na qual nota-se que o participante B possui menor variação nas notas mais agudas, o que pode ser um indicativo de maior controle na técnica do pulso labial. Em relação ao participante A, é percebido que tanto em assimetria quanto em curtose são apresentados valores mais elevados quando comparados aos valores do participante B.

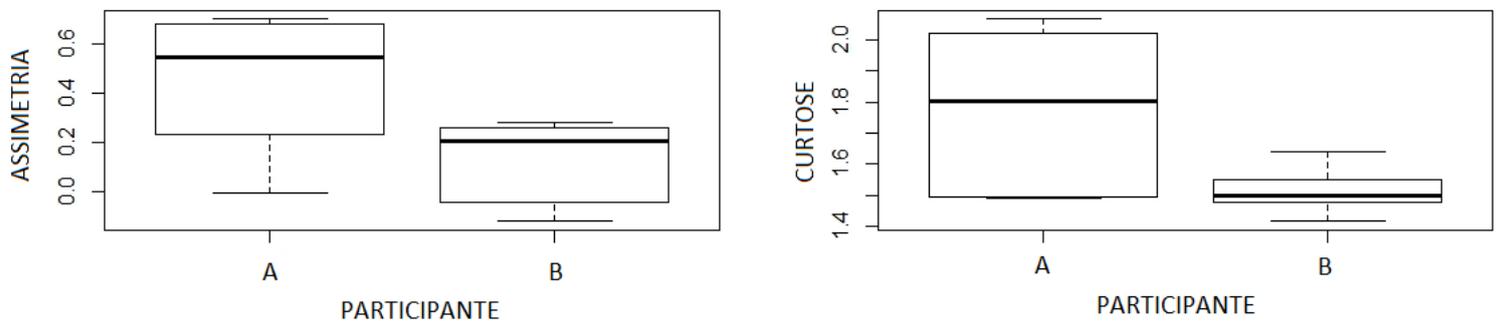


Figura 11. Boxplot da variação de assimetria e curtose por participante das notas Dó 06 (1051 Hz) e Si bemol 05 (937 Hz) executadas em ambos trompetes.

Outro fator interessante a ser observado pela análise das características de assimetria e curtose é a variação entre as mesmas notas produzidas em diferentes trompetes. Os participantes envolvidos nesta pesquisa possuem maior afinidade como o trompete afinado em Si bemol, uma vez que a maior parte de suas práticas interpretativas e estudos técnicos, não se utiliza o trompete afinado em Dó. As figuras 12 e 13 apresentam a variabilidade da assimetria e curtose dos pulsos produzidos em cada um dos trompetes.

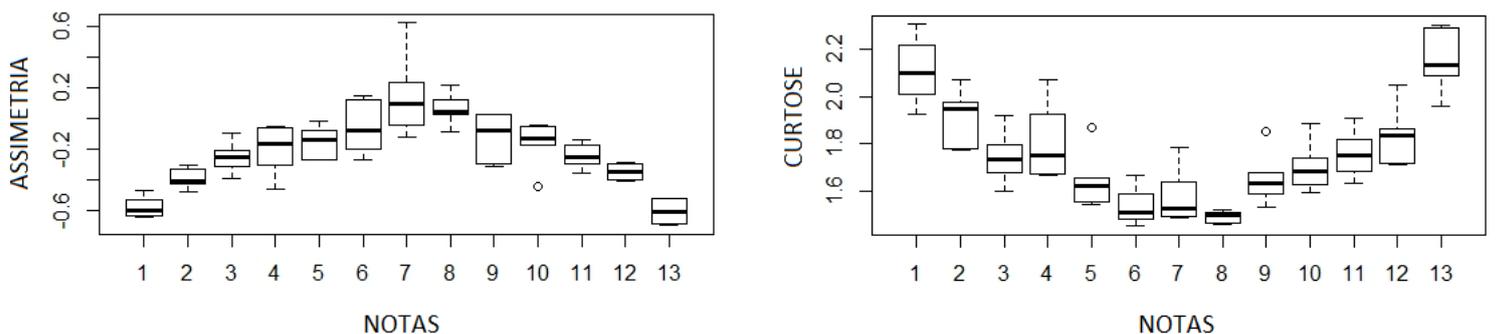


Figura 12. Boxplot de todas as notas executadas pelos participantes no trompete afinado em Si Bemol.

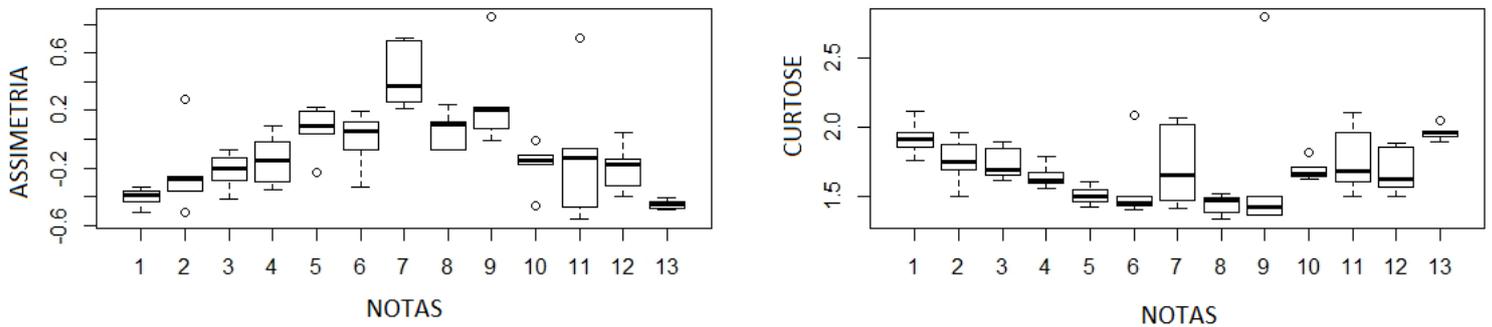


Figura 13. Boxplot de todas as notas executadas pelos participantes no trompete afinado em Dó.

Observa-se que os pulsos labiais nas execuções no trompete Si bemol variam menos em relação à assimetria, mas não em relação à curtose, o que pode ser melhor observado na Figura 14, que mostra o índice de variação em relação à assimetria e curtose dos participantes A e B em todas as notas executadas em ambos os trompetes.

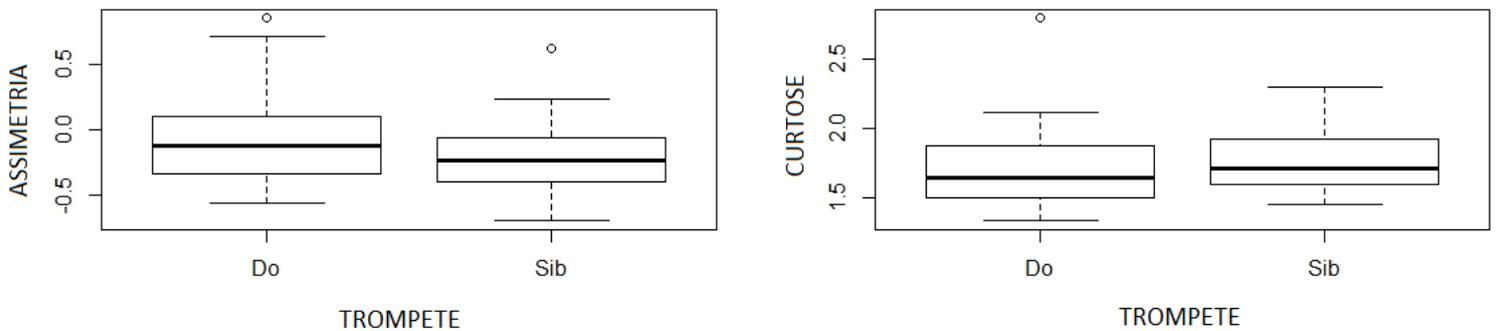


Figura 14. Boxplot da variação de assimetria (gráfico da esquerda) e curtose (gráfico da direita) em relação a utilização dos trompetes afinados em Dó e Si bemol em todas as notas.

Além do índice de variação em ambos os trompetes, vale ressaltar que, de acordo com a figura 15, a nota que exige maior controle do instrumentista, a mais aguda, possui melhores resultados ao serem executadas no trompete em Si bemol, pois sua variação em relação à assimetria e curtose é menor.

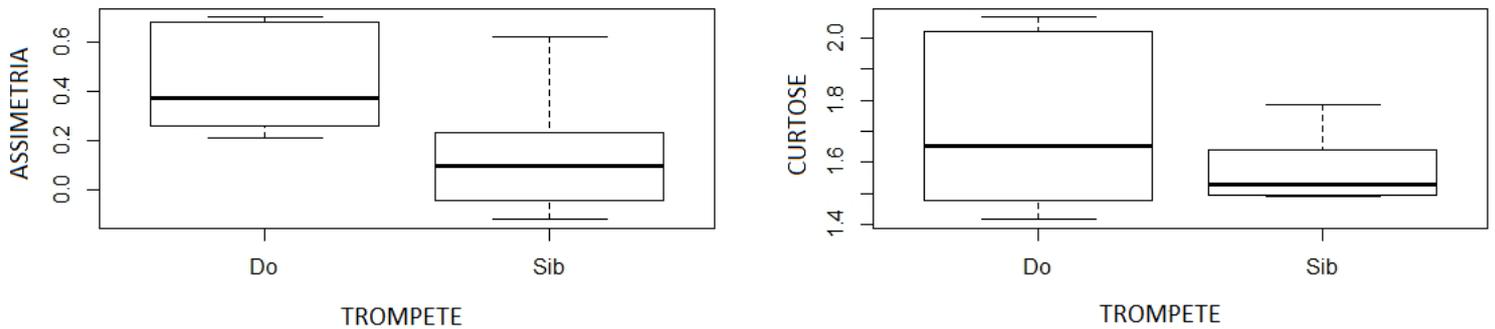


Figura 15. Boxplot da variação da nota mais aguda em relação a utilização dos trompetes afinados do Dó (1051 Hz) e Si bemol (937 Hz).

7. Considerações finais

O método apresentou resultados promissores para a modelagem da produção sonora do trompete e estimativa do fluxo labial, que pode ser usado como um método não invasivo para a análise da técnica de performance no trompete. No entanto, são necessários mais testes para verificar a aplicação desta metodologia sob diferentes condições de performance.

Um dos objetivos deste estudo foi a exploração de uma modelagem computacional utilizada para estimar o sinal de excitação (pulso labial) presente na técnica de execução do trompete. Em parte, este objetivo foi atingido, pois, os procedimentos utilizados foram capazes de apresentar características específicas em relação ao controle do pulso labial em diferentes instrumentistas, condições e instrumentos.

O presente trabalho ressalta a necessidade de diversificar a modelagem proposta, talvez focando em outras partes das notas obtidas que não sejam o centro, assim como o início de cada nota, uma vez que a transição de notas pode ser considerada o local com maiores informações da aplicação técnica.

A parametrização do pulso labial de um instrumentista pode apresentar informações específicas do seu controle, logo, estima-se que seja relevante realizar tal análise em diferentes instrumentistas com diferentes experiências e condições. Para finalizar, é importante ressaltar que a complexidade computacional do algoritmo não é muito alta, possibilitando a implementação do algoritmo em aplicações de tempo real, podendo trazer contribuições efetivas para a pedagogia do instrumento.

Referências

- ALKU, Paavo. Glottal wave analysis with Pitch Synchronous Iterative Adaptive Inverse Filtering. *Speech Communication*, v. 11, n. 2–3, p. 109–118, 1992.
- ARBAN, Jean Baptiste. *Complete Conservatory Method for Trumpet (Cornet)*. . [S.l: s.n.] , 1982
- CLARKE, Herbert. L. Technical Studies for the Cornet. p. 56, 1984.
- DARLINGTON, Paul; SIMPSON, Anthony. Technical Note Cooling Rates of the Bb Trumpet Michael Hrachovec. v. 36, p. 145–157, 1992.
- DIAS, Sandra de Oliveira. *Estimation of the glottal pulse from speech or singing voice*. 2012. 140 f. 2012. Disponível em:
<http://paginas.fe.up.pt/~voicestudies/artts/doc/reports/msc_dissertations/TESE_SANDRA_DIAS_vf_MEB04006.pdf>.
- DULIN, Mark; CICHOWICZ, Michael. *Long Tone Studies*. . United States of America: Studio 259 Productions. , 2011
- FLETCHER, Neville H; TARNOPOLSKY, A. Blowing pressure, power, and spectrum in trumpet playing. *J. Acoust. Soc. Am.*, v. 105, n. 2, p. 874–881, 1999.
- GIORDANO, N. Physical modeling of a conical lip reed instrument The mechanism producing initial transients on the clarinet. *Citation: The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 143, p. 3376, 2018. Disponível em: <<http://asa.scitation.org/toc/jas/143/1>>.
- KIM, Hyung-suk. Linear Predictive Coding is All-Pole Resonance Modeling. *Center for Computer Research in Music and Acoustics, Stanford University*, n. Figure 1, p. 1–7, [S.d.]. Disponível em: <<https://ccrma.stanford.edu/~hskim08/lpc/>>.
- MACALUSO, Charles A.; DALMONT, Jean-Pierre. Trumpet with near-perfect harmonicity: Design and acoustic results. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 129, n. 1, p. 404–414, 2011. Disponível em: <<http://asa.scitation.org/doi/10.1121/1.3518769>>.
- ROSSING, Thomas D.; MOORE, Richard F.; WHEELER, Paul a. *The Science of Sound*. 3. ed. [S.l: s.n.], 1929.
- SCHLOSSBERG, Max. *Daily Drills and Technical Studies for Trumpet*. . [S.l: s.n.] , 1948
- SCHLUETER, Charles. *Zen and the Art of the Trumpet*. . Boston-MA, U.S.A: [s.n.] , 1996
- SMYTH, Tamara; ABEL, Jonathan S. Estimating the reed pulse from clarinet recordings. *Proceedings of the 2009 International Computer Music Conference, ICMC 2009*, p. 235–238, 2009.
- SMYTH, Tamara; ROUHIPOUR, Marjan. Saxophone modelling and system identification.



Proceedings of Meetings on Acoustics, v. 19, n. 2013, 2013.

STAMP, James. *The Buzzing Book*. . [S.l: s.n.]. , 1982

THOMPSON, James. *The Buzzing Book - Complete Method*. . [S.l: s.n.]. , 2001

TITZE, Ingo R.; WORLEY, Albert S. Modeling source-filter interaction in belting and high-pitched operatic male singing. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 126, n. 3, p. 1530–1540, 2009.

TRONCHIN, Lamberto; FARINA, Angelo; COCCHI, Alessandro. The natural trumpet and its virtual sound. *Angelofarina.It*, p. 1–8, 2000.

VALLABHA, Gautam; TULLER, Betty. Choice of Filter Order in LPC Analysis of Vowels. *From Sound to Sense, MIT*, n. 1, p. 203–208, 2004.

WOLFE, Joe; GARNIER, Maeva; JOHN, Smith. Vocal tract resonances in speech , singing , and playing musical instruments. 2009.