

Gustavo Machado Oliveira

**Análise do pulso labial no trompete por  
filtragem inversa**

Belo Horizonte

2020

Gustavo Machado Oliveira

# **Análise do pulso labial no trompete por filtragem inversa**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação da Escola de Música da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Música.

Linha de Pesquisa: Sonologia

Orientador: Prof. Maurício A. Loureiro

Coorientadores: Prof. Davi Alves Mota e Prof. Hani Camile Yehia

Apoio:



C A P E S

Belo Horizonte

2020

O48a

Oliveira, Gustavo Machado.

Análise do pulso labial no trompete por filtragem inversa [manuscrito] / Gustavo Machado Oliveira. - 2020. 50 f., enc.; il.

Orientador 1: Maurício Alves Loureiro.

Coorientador 1: Hani Camille Yehia.

Coorientador 2: Davi Alves Mota.

Linha de pesquisa: Sonologia.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Música.

Inclui bibliografia.

1. Música - Teses. 2. Música para trompete. 3. Música - execução. 4. Música por computador. I. Loureiro, Maurício Alves. II. Yehia, Hani Camille. III. Mota, Davi Alves. IV. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Música. V. Título.

CDD: 788.107



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
ESCOLA DE MÚSICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MÚSICA

## FOLHA DE APROVAÇÃO

Dissertação defendida pelo aluno **Gustavo Machado Oliveira**, em 13 de novembro de 2020, e aprovada pela Banca Examinadora constituída pelos Professores:

---

Prof. Dr. Maurício Alves Loureiro

Universidade Federal de Minas Gerais  
(orientador)

---

Prof. Dr. Hani Camille Yehia

Universidade Federal de Minas Gerais  
(coorientador)

---

Prof. Dr. Davi Alves Mota

CAPES-PRINT UFMG (PDEE)  
(coorientador)

---

Prof. Dr. Leonardo Fuks

Universidade Federal do Rio de Janeiro

---

Prof. Dr. Pedro Francisco Mota Júnior

Universidade Federal de Minas Gerais



Documento assinado eletronicamente por **Hani Camille Yehia**, **Coordenador(a) de curso de pósgraduação**, em 14/11/2020, às 06:35, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Mauricio Alves Loureiro, Professor do Magistério Superior**, em 16/11/2020, às 18:04, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).

---



Documento assinado eletronicamente por **Davi Alves Mota, Usuário Externo**, em 16/11/2020, às 18:29, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).

---



Documento assinado eletronicamente por **Pedro Francisco Mota Junior, Professor do Magistério Superior**, em 16/11/2020, às 19:01, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).

---



Documento assinado eletronicamente por **Leonardo Fuks, Usuário Externo**, em 16/11/2020, às 19:28, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).

---



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.ufmg.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0363021** e o código CRC **F87DF85B**.

---

## RESUMO

O controle do sopro é um elemento essencial da técnica de execução do trompete, principalmente na execução de notas de mesma posição, porém, a medição direta do pulso de ar que passa pelos lábios em vibração é complicada e invasiva. O processo de produção sonora do trompete é, resumidamente, o resultado do som gerado pela vibração dos lábios transformado pelas ressonâncias do tubo do instrumento e a radiação sonora. Este modelo de produção sonora do trompete pode ser comparado ao modelo de produção da fala, referido na literatura como modelo fonte-filtro, em que a fonte é o fluxo de ar que passa pela glote, o filtro são as ressonâncias do trato vocal e a radiação sonora. Este estudo parte da abordagem do modelo filtro-fonte da produção de voz para estimar o pulso de ar que passa pelos lábios em vibração do trompetista. Propomos modelar a produção sonora do trompete por filtragem inversa usando um algoritmo proposto por P. Alku (1992) para análise da produção de voz. Fomos capazes de obter os padrões de excitação produzidos pelos lábios aplicando o inverso da função de transferência do tubo do trompete ao sinal de saída capturado na campana do instrumento para notas executadas com mesma posição. A filtragem inversa foi capaz de realizar uma estimativa do pulso labial de trompetistas de forma não invasiva. Utilizamos o centro das notas (sustentação) como região de análise, onde o sinal apresentou a maior estabilidade espectral e extraímos valores de assimetria e curtose de um ciclo do sinal de pulso labial obtido para analisar e comparar suas características. Os resultados mostraram que a abertura dos lábios em notas agudas executadas no trompete ocorre de forma mais abrupta que em notas graves e que a filtragem inversa pode ser uma grande aliada na obtenção de informações da técnica de trompetistas.

**Palavras-chaves:** Trompete. Flexibilidade. Pulso labial. Modelagem computacional. Filtragem inversa.

# ABSTRACT

Blowing control is an essential element of the trumpet playing technique, especially when playing notes in the same position, however, direct measurement of the air pulse that passes through the lips in vibration is complicated and invasive. The sound production process of the trumpet is, in short, the result of the sum of the sound generated by the vibration of the lips with the resonances of the instrument tube and the sound radiation. This model of sound production of the trumpet can be compared to the model of speech production, referred to in the literature as a source-filter model, in which the source is the air flow that passes through the glottis, the filter is the resonances of the vocal tract and the sound radiation. This study is based on the approach of the source filter model of voice production to estimate the air flow that passes through the trumpet player vibrating lips. We propose to model the sound production of the trumpet by reverse filtering using an algorithm proposed by P. Alku (1992) for the analysis of voice production. We were able to obtain the excitation patterns produced by the lips by applying the inverse of the transfer function of the trumpet tube to the output signal captured in the instrument's bell for notes performed with the same position. The inverse filter was able to estimate the lip pulse of trumpet players in a non-invasive way. We used the middle of the notes (sustain) as the region of analysis, where the signal presented the greatest spectral stability and we extracted values of skewness and kurtosis from a cycle of the lip pulse signal obtained to analyze and compare its characteristics. The results showed that the opening of the lips in high notes performed on the trumpet occurs more abruptly than on low notes and the inverse filtering can be a great ally in obtaining information about the trumpet performance technique.

**Key-words:** Trumpet. Flexibility. Lip-pulse. Computational Modeling. Inverse Filtering.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Diagrama de blocos do modelo fonte-filtro utilizado pela filtragem inversa. .	8
<b>Figura 2.</b> Representação em espectro dos sinais e filtros modelados por LPC presentes no modelo fonte-filtro da filtragem inversa.....	8
<b>Figura 3.</b> Trecho musical executado pelos trompetistas participantes da pesquisa.....	11
<b>Figura 4.</b> Estrutura do algoritmo IAIF (ALKU, 1992).....	14
<b>Figura 5.</b> Saída de cada bloco para a nota Dó 5 (526 Hz) executada por um dos trompetistas.....	16
<b>Figura 6.</b> Resultado final representado por $g_a(n)$ da nota Dó 5 (526 Hz).....	17
<b>Figura 7.</b> Sinal de áudio do trompete captado pelo microfone (painel superior) e pulso labial estimado (painel inferior), referente à nota Dó 4 (263 Hz). ....	19
<b>Figura 8.</b> Um ciclo do pulso labial obtido a partir do sinal de áudio da nota Dó 5 (526 Hz) realizado por um dos participantes da pesquisa.....	20
<b>Figura 9.</b> Um ciclo de onda para cada participante da nota 1 (harmônico 2) executada no trompete em Si bemol.....	20
<b>Figura 10.</b> Um ciclo de onda para cada participante da nota 2 (harmônico 3) executada no trompete em Si bemol.....	21
<b>Figura 11.</b> Um ciclo de onda para cada participante da nota 3 (harmônico 4) executada no trompete em Si bemol.....	21
<b>Figura 12.</b> Um ciclo de onda para cada participante da nota 4 (harmônico 5) executada no trompete em Si bemol.....	22
<b>Figura 13.</b> Um ciclo de onda para cada participante da nota 5 (harmônico 6) executada no trompete em Si bemol.....	22
<b>Figura 14.</b> Um ciclo de onda para cada participante da nota 6 (harmônico 7) executada no trompete em Si bemol.....	23
<b>Figura 15.</b> Um ciclo de onda para cada participante da nota 7 (harmônico 8) executada no trompete Si bemol.....	23
<b>Figura 16.</b> Exemplificação dos valores atribuídos de assimetria e curtose. ....	25
<b>Figura 17.</b> Boxplot de assimetria por harmônicos dos participantes e instrumentos juntos, mostrando a forte correlação positiva entre assimetria do pulso e a altura da nota. ....	26



<b>Figura 18.</b> Boxplot de curtose por harmônicos dos participantes e instrumentos juntos, mostrando a forte correlação negativa entre a curtose e a altura da nota. ....	27
<b>Figura 19.</b> Boxplot dos valores de assimetria para cada nota de cada participante em ambos trompetes. ....	30
<b>Figura 20.</b> Boxplot dos valores de curtose para cada nota de cada participante em ambos trompetes. ....	30
<b>Figura 21.</b> Boxplot dos valores de energia (RMS) do sinal de áudio por nota de ambos os participantes e trompetes. ....	31
<b>Figura 22.</b> Boxplot dos valores de energia (RMS) do pulso labial por nota de ambos os participantes e trompetes. ....	32

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1.</b> Notas executadas no experimento para cada trompete e o correspondente número do harmônico em relação à fundamental do tubo primário do instrumento.....	12
<b>Tabela 2.</b> Desvio padrão dos valores de assimetria e curtose para cada nota para ambos os participantes em os ambos trompetes.....	28
<b>Tabela 3.</b> Desvio padrão dos valores de assimetria e curtose separados por participantes para cada nota em ambos trompetes. ....	29
<b>Tabela 5.</b> Valores médios de energia (RMS) do sinal de áudio atribuídos por nota de ambos os participantes e trompetes. ....	31
<b>Tabela 6.</b> Valores médios de energia (RMS) do pulso labial atribuídos por notas de ambos participantes e trompetes. ....	32

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CEFALA	Centro de Estudos da Fala, Acústica, Linguagem e Música
CEGeME	Centro de Estudos do Gesto Musical e Expressividade
EXPAN	<i>Expressiveness Analysis</i>
GNU	<i>Lesser General Public License</i>
IAIF	<i>Iterative Adaptive Inverse Filtering</i>
LPC	<i>Linear Predictive Coding</i>
RMS	<i>Root Mean Square</i>

# SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	1
<b>1.1. Motivação</b> .....	3
<b>1.2. Objetivos</b> .....	6
<b>1.3. Justificativa</b> .....	7
<b>1.4. Filtragem inversa</b> .....	7
<b>2. METODOLOGIA</b> .....	11
<b>2.1. Material musical</b> .....	11
<b>2.2. Participantes</b> .....	12
<b>2.3. Experimento</b> .....	12
<b>2.4. Aquisição e processamento de dados</b> .....	13
<b>2.5. Segmentação das notas</b> .....	13
<b>2.6. Filtragem inversa</b> .....	13
<b>2.7. Definição da região de análise</b> .....	18
<b>3. RESULTADOS</b> .....	19
<b>3.1. Análise dos dados</b> .....	24
<b>3.1.1. Valores de assimetria</b> .....	25
<b>3.1.2. Valores de curtose</b> .....	26
<b>3.1.3. Variação de assimetria e curtose</b> .....	28
<b>3.1.4. Variação para diferentes participantes</b> .....	28
<b>3.1.5. Valores de energia</b> .....	30
<b>4. CONCLUSÃO</b> .....	33
<b>5. PERSPECTIVAS FUTURAS</b> .....	35
<b>6. REFERÊNCIAS</b> .....	36

# 1. INTRODUÇÃO

Geralmente, na literatura do trompete (ARBAN, 1982; CLARKE, 1984; DULIN; CICHOWICZ, 2011; SCHLOSSBERG, 1948; THOMPSON, 2001) 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, compressão do ar, entre outras. Estes termos fazem referência a ações distintas do trompetista, como a pressão de ar na boca ou a produção do pulso labial gerada pela vibração dos lábios, dando origem ao sinal de excitação<sup>1</sup> (pulso de ar que passa pelos lábios do trompetista em vibração). O controle do sopro é uma habilidade extremamente importante na técnica do trompete e está diretamente relacionado ao controle dos lábios que definirá a qualidade da vibração labial do trompetista. Obter informações acerca da técnica de sopro do trompete pela medição direta do fluxo<sup>2</sup> de ar que passa pelos lábios é complicado e invasivo, pois a oscilação não pode ser examinada diretamente devido os lábios estarem em contato com o bocal ao tocar trompete. Isto posto, é importante a realização de estudos na busca por ferramentas capazes de extrair informações sobre a influência do controle do sopro na execução do trompete.

Há estudos que utilizam métodos que possibilitam análise do sopro no trompete (ADACHI; SATO, 2014; MOORE *et al.*, 2005), 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). Contudo, a aquisição dos dados dos trabalhos supracitados geralmente exige medições invasivas com a inserção de pequenos tubos na boca ou com modelagens que não contam com aspectos da performance em tempo real. O uso dessas técnicas também pode ser limitado devido

---

<sup>1</sup> O sinal de excitação é uma das partes do modelo de produção sonora da voz, composto por sinal de excitação, trato vocal, radiação labial e a fala (DIAS, 2012). Na voz o sinal de excitação é o fluxo de ar que passa entre as pregas vocais vibrantes (MOKHTARI *et al.*, 2018).

<sup>2</sup> Escoamento ou movimento contínuo de algo que segue um curso. Definição de *Oxford Languages*.

ao fato de que elas precisam de equipamentos especiais que geralmente são de difícil acesso.

Além dos métodos abordados no parágrafo anterior, este estudo analisa o controle do sopro do trompetista através da modelagem da produção sonora e estimação do pulso labial<sup>3</sup> pela filtragem inversa. Muitos estudos utilizam da filtragem inversa para estimar o sinal de excitação da voz, confirmando sua relevância (AIRAKSINEN *et al.*, 2014; ALKU, 1992, 2011; ALKU; VILKMAN; LAUKKANEN, 1998; DIAS, 2012; MOKHTARI *et al.*, 2018; NARENDRA; ALKU, 2019; PAIVA, 2008). A abordagem para estimar o pulso labial de trompetistas pela adaptação da filtragem inversa usada na análise de voz é baseada na similaridade entre os processos de produção sonora da voz e do trompete, pois ambos apresentam o modelo de fonte-filtro (HELLER, 2013, p. 357; TITZE; WORLEY, 2009). A aplicação desta metodologia se justifica também pela sua utilização em estudos voltados para a 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 do saxofone (2013) e da clarineta (2009).

Conhecimentos musicais associados a conceitos físicos e matemáticos na investigação de informações musicais é uma das estratégias aqui adotadas na busca por inovações técnicas na análise da performance musical. Enquanto Bacharel em Trompete, Licenciado em Música e admirador das ciências exatas e suas áreas afins, sem formação nas ciências exatas, procuro não complicar minhas explicações com excessivo detalhamento. Espero que este trabalho possa também estimular leitores não especializados nas áreas de conhecimento envolvidas, assim como desejo que estudantes das ciências exatas e tecnologias se interessem pela música e vice versa. O nível matemático deste trabalho é flexível, portanto, o leitor pode pular trechos do texto que tiver dificuldade de compreensão ou muito trivial.

---

<sup>3</sup> Sinal em pulsos dinâmicos com abertura e fechamento dos lábios gerado quando os lábios entram em estado de vibração dentro do bocal.

## 1.1. Motivação

No ensino de instrumentos musicais, alunos são instruídos por professores que transmitem sua própria técnica a partir daquilo que observa e compreende dos processos envolvidos no aprendizado. Uma eventual dificuldade do pleno entendimento da aplicação da técnica do professor pelo aluno pode às vezes dificultar o alcance daqueles resultados que o docente planeja. Sendo assim, o ensino de instrumentos musicais muitas vezes se baseia em imitação, no qual mecanismos de transmissão de determinada técnica são mais eficientemente demonstrados pelo professor em aula.

A execução de qualquer instrumento musical, envolve habilidades na realização de ações, que não podem ser facilmente visualizadas, como por exemplo, mecanismos relacionados à expiração e sustentação da pressão do ar na execução de instrumentos de sopro e do canto. Na maioria das vezes, o professor busca transmitir as técnicas de execução de tais ações de forma subjetiva, às vezes lançando mão de metáforas e exemplos que teriam servido ao seu próprio aprendizado. Diante disso, é importante deixar claro que as metáforas e analogias, que muitas vezes são subjetivas, possuem o intuito de alcançar os objetivos propostos por professores, mas, apesar de muitas vezes eficazes, podem não apresentar relação direta com os processos físicos e acústicos presentes no ato de tocar.

Devido ao fato da técnica de sopro estar relacionada principalmente a aspectos corporais internos, 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:

Para "soprar com ar quente" implica primeiro pensar no sentimento que se experimenta soprando um vidro de janela embaçado. Depois de algum tempo, tendo em mente esta experiência, sopra-se automaticamente assim, ou seja, com uma velocidade lenta do fluxo de ar (SCHLUETER, 1996, p. 36, tradução nossa)<sup>4</sup>.

---

<sup>4</sup> *To blow "with hot air" implies first to think of the feeling one experiences blowing a window glass misty. After some time, keeping this experience in mind, one automatically blows like this, i.e. with slow velocity of the air-flow.*

Apesar do uso das metáforas e analogias subjetivas nem sempre representar os processos físicos e acústicos presentes no ato de tocar, é notável como esta forma de ensino pode produzir resultados satisfatórios na aprendizagem. Nos metais, a técnica de sopro interfere diretamente na vibração labial e por consequência na qualidade da execução, o que demanda domínio dos mecanismos responsáveis pelo controle do sopro. A produção sonora no trompete acontece quando a passagem do ar pela boca produz a vibração dos lábios dentro do bocal, gerando assim um sinal em pulsos dinâmicos<sup>5</sup> com a abertura e fechamento dos lábios. O som produzido pela vibração dos lábios é amplificado e modelado pelas características acústicas do tubo do instrumento para produzir o som do trompete. A qualidade da vibração labial está diretamente relacionada com a qualidade sonora final do trompete (ROSSING; MOORE; WHEELER, 1929, p. 225).

Sobre a produção sonora do trompete, Hickman (2006, p. 13), em seu estudo, deixa um agradecimento a R. Dale Olson pelas informações valiosas sobre o “Conceito de Equilíbrio da Performance do Trompete”<sup>6</sup> que descreve a maneira que os vários elementos físicos no ato de tocar trabalham juntos. O trabalho desenvolvido por R. Dale Olson fundamenta a produção sonora do trompete em 4 bases de igual importância, os “4Ps”:

1. Franzir da embocadura (*Pucker*)
2. Pressão do bocal nos lábios (*Pressure*)
3. Posicionamento da língua dentro da boca (*Placement*)
4. Empurrar o ar (*Push*)

Segundo Hickman (2006), a manipulação dos “4Ps” gera variações tanto na dinâmica, cor do som e altura das notas produzidas. Além disso, a extensa pesquisa realizada por Hickman (2006) trouxe grandes contribuições sobre sua fundamentação nos “4Ps”:

---

<sup>5</sup> Pequenas porções de ar geradas pela abertura e fechamento dos lábios em vibração.

<sup>6</sup> “*Equilibrium Concept of Trumpet Performance*”



“Estudos com centenas de instrumentistas, incluindo profissionais renomados (Maurice André, Bud Brisbois e Gerard Schwarz) indicam conclusivamente que ao subir no registro e aumentar a dinâmica, há um aumento na tensão da embocadura, pressão do bocal e compressão do ar intraoral. Evidências por meio de radiografias, videofluorografias, fotografias e outras técnicas também indicam que esses instrumentistas ajustam o tamanho e a forma de suas cavidades orais ao tocarem os diferentes registros do trompete” (HICKMAN, 2006, p. 17, tradução nossa)<sup>7</sup>.

Na execução do trompete é possível realizar a mudança de notas de duas formas: alterando o comprimento do tubo através da configuração dos pistos ou alterando a configuração dos lábios e a pressão de sopro para produzir notas correspondentes à série harmônica<sup>8</sup> do tubo referente àquela dos pistos. Alterar notas pela mudança de digitação dos pistos demanda menos controle do sopro, a menos que seja em intervalos muito grandes, pois a pressão<sup>9</sup> de sopro varia de acordo com a altura da nota: quanto mais aguda for a nota, maior será a pressão de sopro e vice-versa (FLETCHER; TARNOPOLSKY, 1999). O controle do sopro na mudança de notas de mesma posição demanda habilidade para saltar entre as notas manipulando entre elas a forma de soprar, que se refere ao empurrar (*Push*) do ar relatado por Hickman (2006, p. 13).

Essa habilidade de transição entre notas da série harmônica do tubo é conhecida como “flexibilidade” (COLIN, 1972; SMITH, 1935). É comum encontrar nos métodos de trompete exercícios de flexibilidade que enfatizam seu controle por meio da movimentação do dorso da língua que interfere na cavidade bucal (CAMPOS, 2005; COLIN, 1972; GORDON, 1981; HICKMAN, 2006; SMITH, 1935). Alguns métodos do controle do dorso da língua na manipulação da cavidade bucal relacionam à pronúncia das vogais: A para os graves, E para os médios e I para os agudos (BAPTISTA, 2010, p. 9). Afirmam também que “à medida que o dorso da língua se levanta e diminui a cavidade bucal, é necessário aumentar a velocidade do ar para manter a vibração labial” (BAPTISTA, 2010, p. 9), porém, é difícil comprovar se de fato este é o comportamento

---

<sup>7</sup> *Studies of hundreds of players, including leading professionals (Maurice André, Bud Brisbois, and Gerard Schwarz) indicate conclusively that when ascending in register and increasing dynamics, there is an increase in embouchure tension, mouthpiece pressure, and interoral air compression. Evidence through x-rays, videofluorographics, photographs, and other techniques, also indicates that these players adjust the size and shape of their oral cavities when playing different registers on the trumpet.*

<sup>8</sup> Conjunto de ondas composto da frequência fundamental e de todos os múltiplos inteiros desta frequência. Modos de ressonância correspondentes ao tubo.

<sup>9</sup> Quociente de uma força de módulo constante, perpendicular a uma superfície sujeita à sua ação, pela área dessa superfície. Definição de *Oxford Languages*.

do ar. Hickman (2006, p. 14, tradução nossa), também aponta este processo: “Geralmente, a língua se arqueia mais à medida que o alcance se estende para cima. Isso é como cantar "ah" para notas graves e "ee" para notas agudas”<sup>10</sup>. O posicionamento ou arqueamento da língua na cavidade bucal tem um grande efeito na sonoridade e é um fator muito importante na produção das notas em vários registros, pois “arquear a língua ajuda a direcionar o fluxo de ar para a abertura dos lábios e é uma chave importante para a forma e o ângulo do fluxo de ar ao entrar no bucal” (HICKMAN, 2006, p. 14, tradução nossa)<sup>11</sup>.

A causa da grande atenção por estudos de flexibilidade entre trompetistas é porque sua prática proporciona o fortalecimento dos músculos da embocadura e maior controle do dorso da língua, tornando a técnica mais eficiente na execução do trompete (COLIN, 1972). Diante disso, o ensino e aprendizagem da flexibilidade muitas vezes se torna difícil pelo fato de que a mudança das notas ocorre com pouca ou quase nenhuma movimentação visível, predominando mecanismos corporais internos. Por isso, a principal motivação deste trabalho é a busca por informações de forma não invasiva sobre a manipulação do pulso labial, que em resposta ao sopro confere ao trompetista a habilidade de executar e alternar entre notas.

## 1.2. Objetivos

O estudo desenvolvido neste trabalho tem como objetivo investigar as características do sinal de excitação de trompetistas em notas de mesma posição. Para tal foi utilizado a modelagem computacional da produção sonora do trompete partindo do modelo fonte-filtro utilizado para a voz. Esta investigação se fundamenta na similaridade entre o trompete e a voz partindo da análise do sinal de excitação por filtragem inversa presente em estudos anteriores do comportamento do fluxo glótico na produção da fala (ALKU; VILKMAN; LAUKKANEN, 1998; DIAS, 2012; MOKHTARI *et al.*, 2018; NARENDRA; ALKU, 2019). Para modelagem da produção sonora do trompete

---

<sup>10</sup> *Generally, the tongue arches higher as the range extends upward. This is like singing “ah” for low notes and “ee” for high notes.*

<sup>11</sup> *Arching the tongue helps direct the airstream to the lip aperture and is an important key to the shape and angle of the airstream when entering the mouthpiece.*

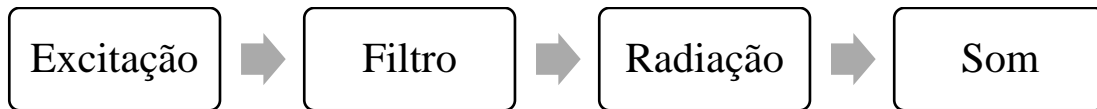
aplicamos o método de filtragem inversa *Iterative Adaptive Inverse Filtering (IAIF)* proposto por P. Alku (1992).

### **1.3. Justificativa**

É importante apontar algumas características do método de filtragem inversa que justificam seu uso na análise do pulso labial de trompetistas. Primeiro, a ideia de estimar o pulso labial pela filtragem inversa usada na análise de voz é baseada na similaridade entre os processos de produção sonora da voz e do trompete. Segundo, ainda temos poucas ferramentas não invasivas para visualizar e analisar aspectos da técnica de sopro no trompete. Terceiro, ainda sabemos pouco sobre o real comportamento do pulso labial na mudança de notas de mesma posição. Enfim, acreditamos que informações valiosas sobre a técnica de pulso labial possam ser encontradas na estimativa do sinal de excitação do trompete.

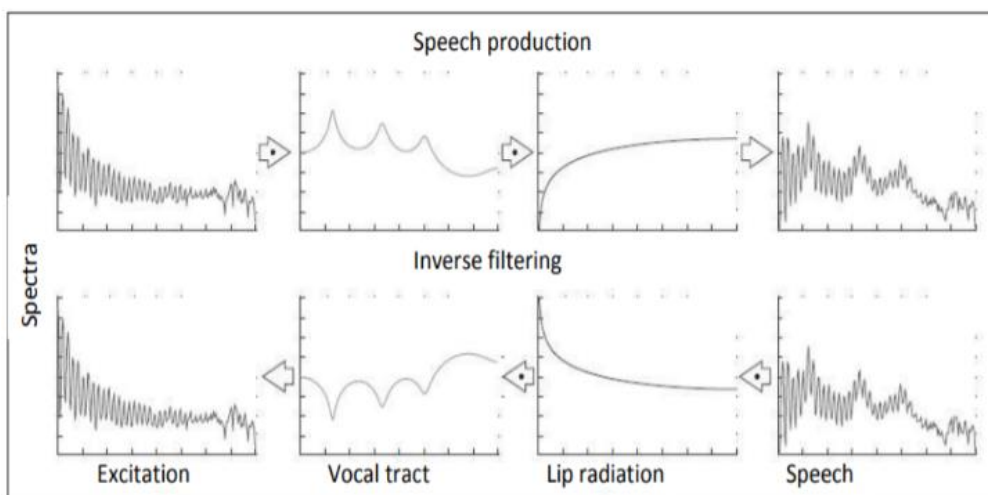
### **1.4. Filtragem inversa**

A ideia de estimar o pulso labial através da filtragem inversa utilizada na voz surgiu na busca por métodos não invasivos e de fácil acesso que apresentam informações ligadas ao comportamento do sopro de trompetistas. Dada a similaridade entre a produção sonora da voz e do trompete, a abordagem da filtragem inversa foi proposta pelo laboratório CEFALA - Centro de Estudos da Fala, Acústica, Linguagem e Música da UFMG, dedicado à pesquisa da fala e coordenado pelo professor Hani Camile Yehia, coorientador deste trabalho. A abordagem adota o modelo fonte-filtro para a produção sonora do trompete, tal como usado em estudos da voz, que consiste em três processos distintos, excitação glótica, filtragem do trato vocal e efeito de radiação labial, que no trompete consistiria em excitação labial, filtragem do tubo do trompete e radiação da campana, como mostra a Figura 1. A filtragem do trato vocal e o efeito da radiação labial é modelada por *Linear Predictive Coding (LPC)*, método desenvolvido para processamento de sinais de fala, mas também amplamente utilizado no processamento de sinais de áudio, como de instrumentos musicais (KIM, [S.d.], p. 2).



**Figura 1.** Diagrama de blocos do modelo fonte-filtro utilizado pela filtragem inversa.

A partir de métodos de filtragem inversa, o sinal de excitação na voz é estimado pelo cancelamento dos efeitos causados pelas ressonâncias do trato vocal no sinal produzido pela vibração das pregas vocais. A Figura 2 mostra o modelo de filtragem inversa para sinais de fala.



**Figura 2.** Representação em espectro dos sinais e filtros modelados por LPC presentes no modelo fonte-filtro da filtragem inversa. O painel superior mostra os processos separados da produção de fala e o painel inferior mostra o correspondente processo de filtragem inversa, no qual a radiação sonora e os filtros do trato vocal são invertidos para estimar a forma de onda do fluxo glótico (DIAS, 2012).

A ideia de calcular uma estimativa da excitação glótica, alimentando o sinal de fala através de ferramentas que cancelam os efeitos do trato vocal foi publicada pela primeira vez em 1959, por Miller (1959). O estudo de Miller (1959) foi realizado na busca por valores que produzissem fluxo zero após o instante do fechamento da glote por meio de métodos analógicos. Já no final da década de 60 foram publicados estudos utilizando processamento digital na estimativa da fonte glótica com intuito de cancelar os efeitos acústicos do trato vocal separando-o da fonte glótica. Estes estudos foram significantes no desenvolvimento de técnicas mais refinadas e precisas que atualmente são frequentemente utilizadas.

“A filtragem inversa glótica se refere ao processo de estimar a origem dos sons da fala sonora, a velocidade do volume do fluxo de ar que passa pelo orifício entre as pregas vocais em vibração” (MOKHTARI *et al.*, 2018, p. 3). Sua aplicação no trompete estima uma aproximação da velocidade do volume do fluxo de ar que passa pelos lábios em vibração. Para aplicação da filtragem inversa neste estudo decidimos usar o algoritmo *Iterative Adaptive Inverse Filtering* (IAIF) proposto por P. Alku (1992). A escolha deste algoritmo se deu pelo fato de estar hospedado em um repositório online (DEGOTTEX *et al.*, 2014) e com licença *Lesser General Public License* (GNU)<sup>12</sup>. O funcionamento do método IAIF será descrito na sessão 2.6.

De acordo com Heller (2013, p. 357), a voz humana e o trompete são semelhantes, pois “ambos são tubos ressonantes conduzidos por uma palheta vibrante”<sup>13</sup>, o que nos motivou a aplicar a filtragem inversa no trompete. Porém, há algumas diferenças, pois há uma pressão de ar na taça do bocal que permite os lábios colaborarem com as ressonâncias do trompete, o que não acontece no caso da voz (HELLER, 2013, p. 330). Além disso, segundo Heller (2013, p. 330), o comportamento dos lábios também não imita fielmente uma palheta, “que ajusta seu comportamento de acordo com as ondas refletidas. A colaboração é não linear – os lábios decidem o que fazer somente depois de obter uma resposta da coluna de ar”<sup>14</sup> (HELLER, 2013, p. 330, tradução nossa). Em suma, o movimento das pregas vocais é quase inalterado por qualquer feedback (HELLER, 2013, p. 361), porém o trompete possui alterações devido ao feedback.

É importante ressaltar que o acoplamento entre fonte e filtro é mais acentuado no trompete do que na voz, porém, decidimos não levar este fato em consideração, pois nosso objetivo aqui foi verificar o comportamento da filtragem inversa aplicada ao trompete. Heller (2013) compara acoplamento fonte-filtro na voz humana com o que ocorre no trompete:

---

<sup>12</sup> A GNU *Lesser General Public License*, escrita em 1991 (e atualizada em 1999), é uma licença de software livre aprovada pela FSF e escrita como um meio-termo entre a GPL e licenças mais permissivas, tais como a licença BSD e a licença MIT.

<sup>13</sup> *both are resonant tubes driven by a vibrating reed.*

<sup>14</sup> *which adjusts its behavior according to the reflected waves. The collaboration is nonlinear—the lips decide what to do only after getting a response from the trumpet air column.*

A frequência vocal e a forma de onda são amplamente determinadas pelos músculos da laringe que controlam o espaçamento e especialmente a tensão nas pregas. Em outras palavras, o sistema de pregas vocais é um condutor de alta impedância que não vibra de forma considerável por causa de seu acoplamento ao trato vocal. Em contraste, os lábios de um trompetista estão sujeitos a feedback não linear das ressonâncias do tubo do trompete, levando à cooperação iterativa (HELLER, 2013, p. 357, tradução nossa)<sup>15</sup>.

---

<sup>15</sup> *The vocal frequency and waveform are largely determined by the muscles of the larynx controlling the spacing and especially the tension in the folds. In other words, the vocal fold system is a high-impedance drive that does not vibrate appreciably differently because of its coupling to the vocal tract. In contrast, the lips of a trumpet player are subject to nonlinear feedback from the resonances of the trumpet tube, leading to interactive cooperation.*

## 2. METODOLOGIA

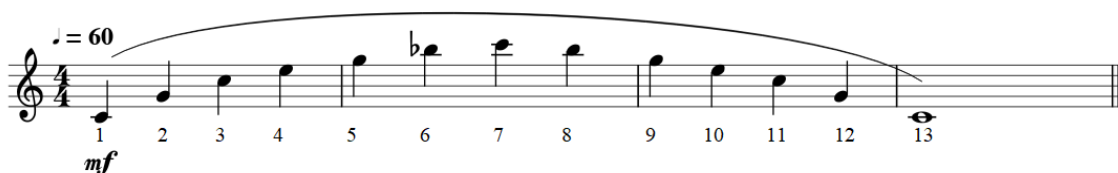
O estudo proposto neste trabalho contou com as seguintes etapas:

1. Definição do material musical a ser gravado que comprometa aos participantes da pesquisa manipular as mudanças de notas de mesma posição;
2. Selecionar os trompetistas participantes para realizar as gravações do material musical;
3. Realização do experimento com os trompetistas participantes da pesquisa envolvendo a gravação do material musical selecionado;
4. Aquisição e processamento dos dados coletados através da segmentação das notas, filtragem inversa e definição da região das notas a serem analisadas;

Nas seções a seguir a metodologia será discutida detalhadamente.

### 2.1. Material musical

As sete notas da série harmônica do tubo primário do trompete (sem pressionar os pistos), produzidas pelos sete modos de vibração do instrumento, foram selecionadas, conforme mostrado na Figura 3: de Dó 4 (263 Hz) a Dó 6 (1051Hz) para trompete em Dó, e de Si bemol 3 (234 Hz) ao Si bemol 5 (937 Hz) para o trompete em Si bemol. Estas notas são produzidas na mesma configuração do tubo sem pressionar qualquer um dos pistos, o que permite o trompetista se concentrar no controle do sopro. As notas correspondentes a todos os modos de vibração do tubo foram executadas em sequência em legato como mostrado na Figura 3.



**Figura 3.** Trecho musical executado pelos trompetistas participantes da pesquisa.

A Tabela 1 apresenta as frequências (Hz) das notas executadas no experimento para cada trompete e o correspondente número do harmônico em relação à fundamental do tubo primário do instrumento.

NOTAS	TROMPETE EM SI BEMOL		TROMPETE EM DÓ		HARMÔNICOS
1	Si bemol 3	234 Hz	Dó 4	263 Hz	2
2	Fá 4	351 Hz	Sol 4	394 Hz	3
3	Si bemol 4	468 Hz	Dó 5	526 Hz	4
4	Ré 5	590 Hz	Mi 5	662 Hz	5
5	Fá 5	702 Hz	Sol 5	787 Hz	6
6	Lá bemol 5	819 Hz	Si bemol 5	920 Hz	7
7	Si bemol 5	937 Hz	Dó 6	1051 Hz	8

**Tabela 1.** Notas executadas no experimento em cada trompete e o correspondente número do harmônico em relação à fundamental do tubo primário do instrumento<sup>16</sup>.

## 2.2. Participantes

Para a realização das gravações foram recrutados dois trompetistas com experiência técnico-musicais distintas, um deles com experiência em execução de orquestra e o outro no ensino de trompete. Ambos trompetistas obtiveram orientação do mesmo professor.

## 2.3. Experimento

As gravações foram realizadas em apenas uma única sessão. Cada um dos dois participantes tocou as notas em seus próprios instrumentos em condições semelhantes de tempo de prática, dinâmica, andamento em 60 BPM executado em fone de ouvido,

<sup>16</sup> O Si bemol 5 (nota 6) não é uma nota regular no trompete e é geralmente usada como uma posição alternativa em passagens rápidas. Esta nota está cerca de 30 cents abaixo do Si bemol 5 tocada na terceira posição (primeiro pisto pressionado).



afinação, equipamento de áudio e local. A afinação foi ajustada com a execução da nota Dó 4 para ambos trompetes sem contato visual dos participantes com o afinador em 442 Hz. Eles foram instruídos a tocar todas as notas sem alteração de dinâmica, três vezes em cada trompete (em Dó e em Si bemol), resultando num total de doze gravações.

## 2.4. Aquisição e processamento de dados

O áudio das gravações foi capturado por meio de uma interface Firewire 1814, com frequência de amostragem de 44100 Hz, em apenas um canal, com um microfone M Áudio Solaris em sala com reverberação moderada. O microfone foi posicionado o mais próximo possível do centro da campana do trompete (aproximadamente 5cm) para eliminar o máximo possível de interferência do ambiente.

## 2.5. Segmentação das notas

A segmentação das notas foi realizada no software Audacity<sup>17</sup>, resultando um total de 156 notas separadas, treze notas de cada uma das doze gravações obtidas<sup>18</sup>. Este estudo faz referência às notas tocadas no trompete em Si bemol como notas escritas, ou seja, um tom inteiro acima da nota que soa.

## 2.6. Filtragem inversa

Para aplicação da filtragem inversa no material musical coletado usamos a implementação no Matlab<sup>19</sup> do algoritmo de filtragem inversa proposto por Alku (1992), *Interactive Adaptive Inverse Filtering* (IAIF), que aplica iterativamente o LPC e filtragem inversa. O diagrama de blocos do algoritmo IAIF, mostrado na Figura 4, apresenta cada

---

<sup>17</sup> Audacity é um software livre de edição digital de áudio sob a licença *Generical Public License* (GNU) desenvolvido na universidade norte-americana Carnegie Mellon University.

<sup>18</sup> Três gravações obtidas do trompete afinado em Si bemol e três gravações obtidas do trompete afinado em Dó para cada um dos dois participantes.

<sup>19</sup> Matlab é um software interativo desenvolvido pela Mathworks utilizado para fazer análise de dados, desenvolvimento de algoritmos e criação de modelos matemáticos.

etapa do método, onde  $S_a(n)$  é o sinal sonoro analisado, e  $g_a(n)$  a estimativa do sinal de excitação.

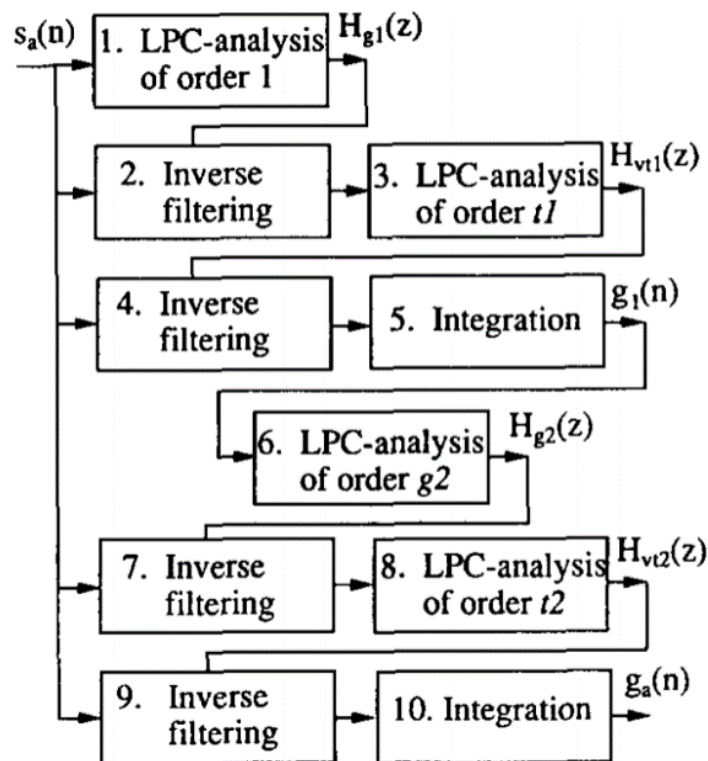


Figura 4. Estrutura do algoritmo IAIF (ALKU, 1992).

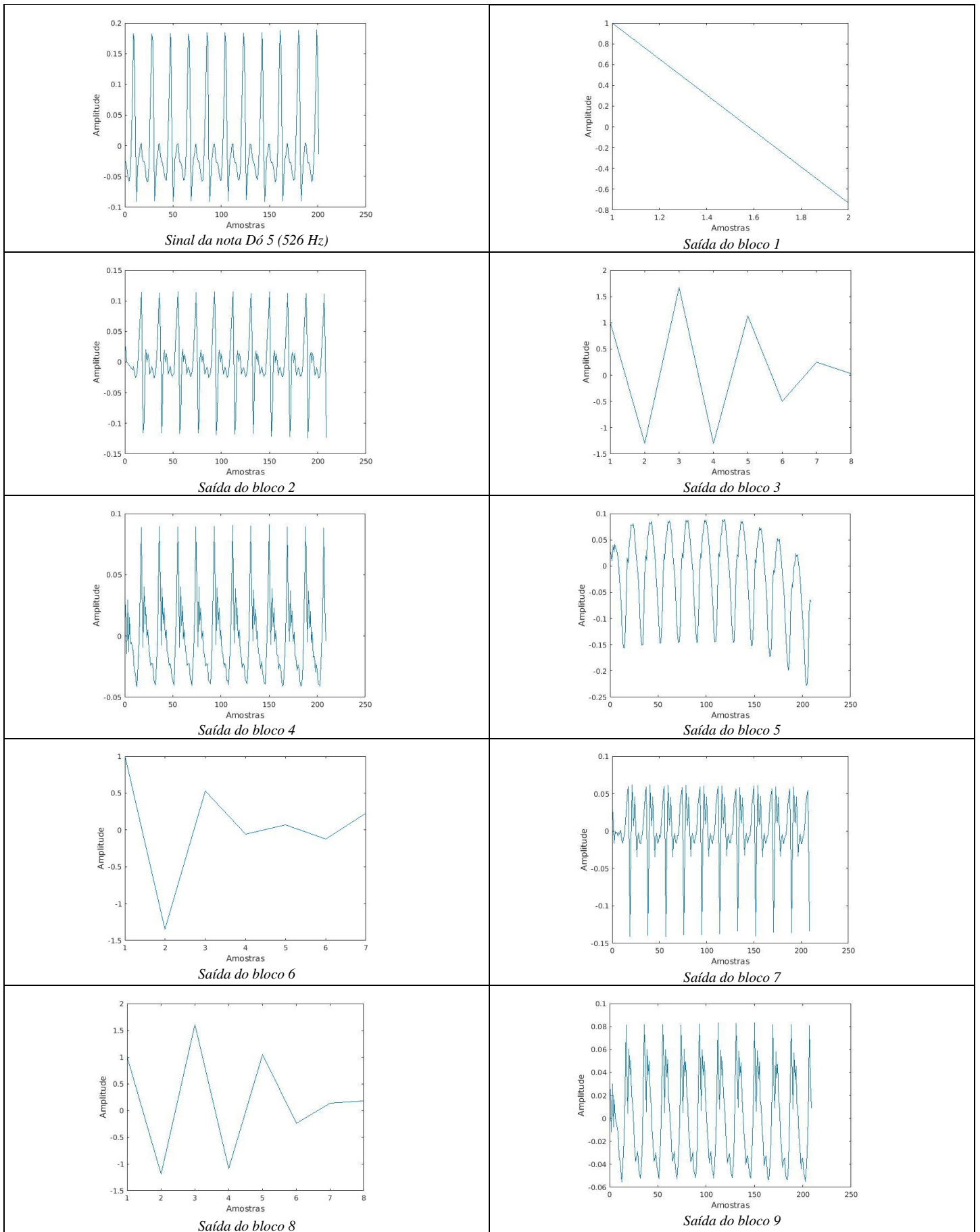
A seguir apresentamos a descrição de cada bloco do diagrama da Figura 4:

- Bloco 1: O efeito da forma de pulso glotal do espectro da fala é estimado preliminarmente pela análise LPC de primeira ordem.
- Bloco 2: A contribuição glotal é eliminada filtrando  $S_a(n)$  por  $H_{a1}(z)$ .
- Bloco 3: A primeira estimativa para o trato vocal é computada aplicando a análise LPC à saída do bloco anterior.
- Bloco 4: O efeito do trato vocal é eliminado do sinal  $S_a(n)$  pela filtragem inversa.
- Bloco 5: A primeira estimativa para a excitação glotal,  $g_1(n)$ , é obtida pelo cancelamento do efeito da radiação labial por integração.

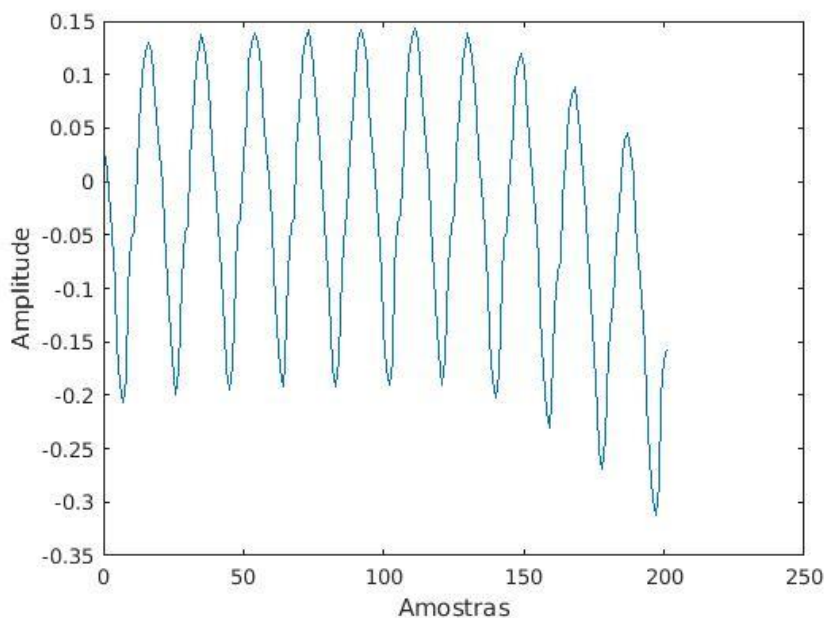
- Bloco 6: A segunda interação começa computando uma nova estimativa para o efeito da fonte no espectro da fala. Desta vez, a análise LPC de ordem  $g_2$  é usada. O sinal pelo qual a contribuição glotal foi estimada é  $g_1(n)$ .
- Bloco 7: O efeito da contribuição glotal é eliminado.
- Bloco 8: O modelo final para o trato vocal é obtido aplicando a análise LPC de ordem  $t_2$  à saída do bloco anterior.
- Bloco 9: O efeito do trato vocal é eliminado da fala pela filtragem de  $S_a(n)$  por meio de  $H_{vt2}(z)$ .
- Bloco 10: O resultado,  $g_a(n)$ , é obtido pelo cancelamento do efeito da radiação pela integração da saída do Bloco 9.

(ALKU, 1992, tradução nossa)

Os resultados da saída para cada um dos blocos para a nota Dó 5 (526 Hz) executada por um dos trompetistas são apresentados na Figura 5 e seu correspondente resultado na Figura 6.



**Figura 5.** Saída de cada bloco para a nota Dó 5 (526 Hz) executada por um dos trompetistas



**Figura 6.** Resultado final representado por  $g_a(n)$  da nota Dó 5 (526 Hz).

É importante ressaltar que o LPC é utilizado para estimar formantes<sup>20</sup> 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 correspondente ao bloco 6 da Figura 4 determina o número de polos do filtro, que é determinado a partir da taxa de amostragem, normalmente estimado a partir de um valor inicial ajustado por tentativa e erro (DIAS, 2012, p. 203; VALLABHA; TULLER, 2004). O valor da ordem do filtro é também inverso ao valor da frequência da fundamental. Neste estudo a ordem do filtro variou entre 1 e 13, de acordo com o valor da frequência da nota analisada. A altura de cada nota foi estimada por detecção automática utilizando o sistema EXPAN (CAMPOLINA; LOUREIRO; MOTA, 2009), desenvolvido no laboratório CEGeME (Centro de Estudos do Gesto Musical e Expressividade).

Para verificar a aplicação da metodologia proposta calculamos o número de ciclos presentes no pulso labial e o resultado foi bem próximo da frequência fundamental,

<sup>20</sup> Picos de energia em uma região do espectro sonoro. Cada harmônico reforçado por um ressonador.

por exemplo, uma nota com aproximadamente 263 Hz apresenta um pulso labial com aproximadamente 263 ciclos por segundos. Este fato nos leva a acreditar que o método de filtragem inversa pode estar sendo apto para estimação do sinal de excitação do trompete.

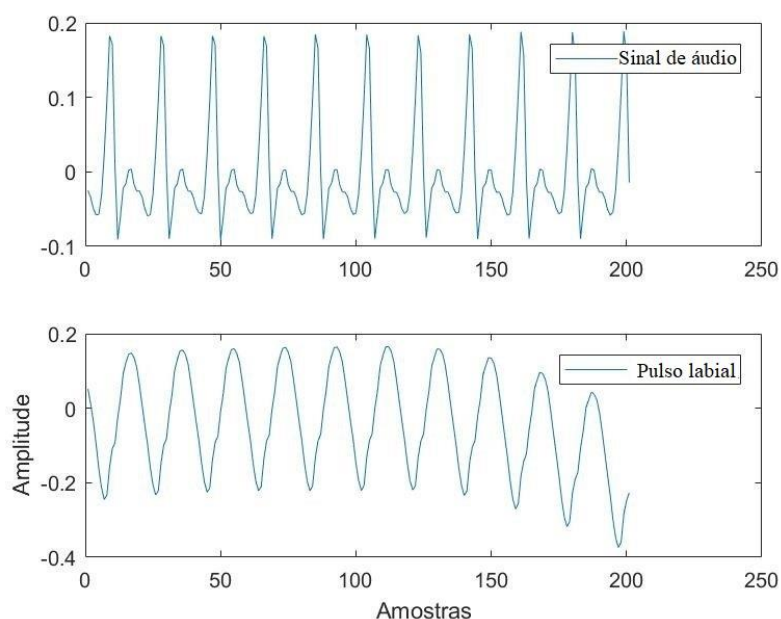
## **2.7. Definição da região de análise**

Para realização das análises e comparações do resultado obtido do pulso labial foi necessário encontrar o centro de cada nota (sustentação) a partir de vales no sinal e selecionar 100 pontos anteriores ao centro e 100 pontos posteriores ao centro, para então obter um ciclo do pulso labial de cada nota. Para a estimação do pulso labial, foi realizada uma reamostragem do sinal para 10.000 Hz, a fim de retirar ruídos na região aguda. Um segmento da região central do sinal de duração de aproximadamente 10 milissegundos foi selecionado para análise, onde o sinal apresentou a maior estabilidade da distribuição espectral.

### 3. RESULTADOS

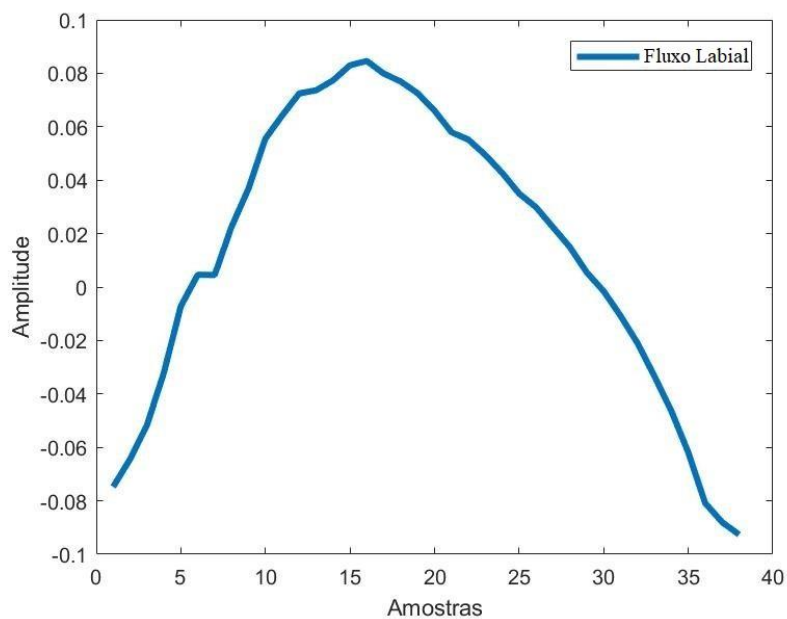
Os resultados deste trabalho serão apresentados pela análise dos dados em 5 subtópicos. A sessão 3.1 Análise dos dados descreve os parâmetros de análise assimetria e curtose. No primeiro subtópico descrevemos os valores de assimetria (seção 3.1.1) e na segunda parte apresentamos os valores de curtose (seção 3.1.2). Já na terceira parte são apresentados as variações dos valores de assimetria e curtose (seção 3.1.3). Na quarta parte apresentamos variações dos valores de assimetria e curtose para diferentes participantes (seção 3.1.5). Na quinta e última parte apresentamos os valores de energia do sinal de áudio e pulso labial (seção 3.1.5).

A Figura 7 apresenta o sinal de áudio do trompete captado pelo microfone (painel superior) e pulso labial estimado (painel inferior), referente à nota Dó 4 (263 Hz).



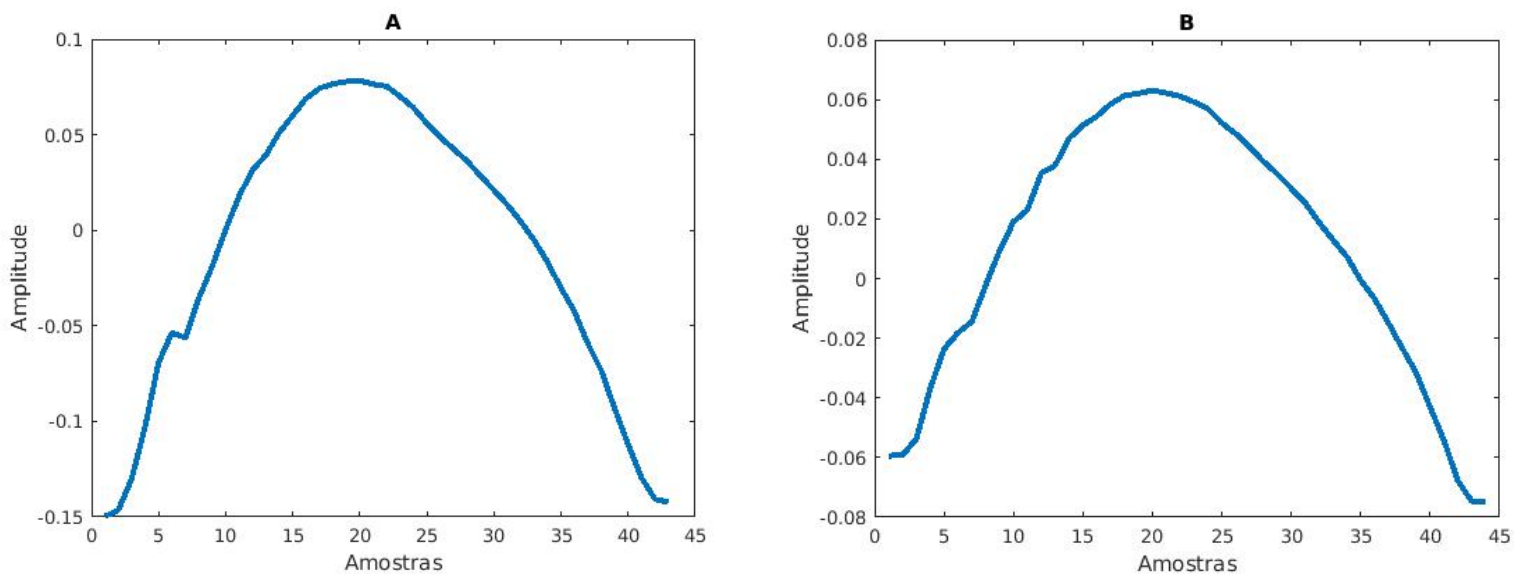
**Figura 7.** Sinal de áudio do trompete captado pelo microfone (painel superior) e pulso labial estimado (painel inferior), referente à nota Dó 4 (263 Hz).

A Figura 8 apresenta um ciclo do pulso labial estimado, referente à nota Dó 5 (528 Hz).



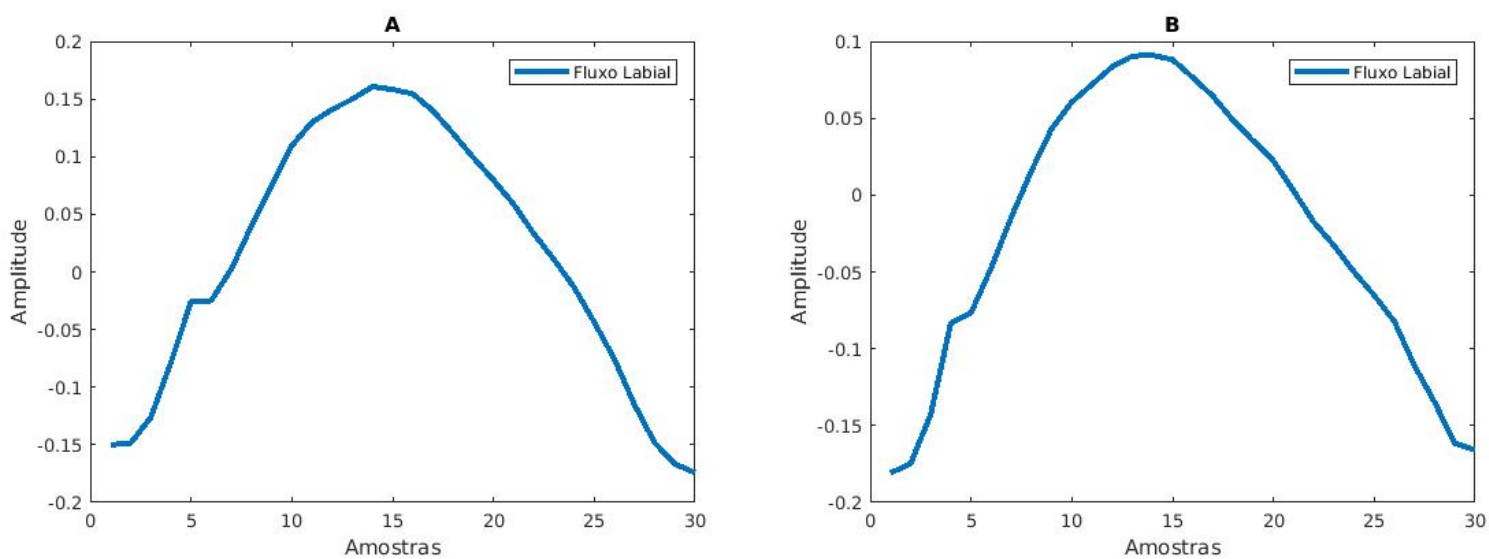
**Figura 8.** Um ciclo do pulso labial obtido a partir do sinal de áudio da nota Dó 5 (526 Hz) realizado por um dos participantes da pesquisa.

As Figuras 9 a 15 mostram um ciclo extraído do pulso labial estimado de cada nota executada no trompete em Si bemol de cada participante. A forma dos pulsos não revela com clareza se há características individuais em cada pulso.

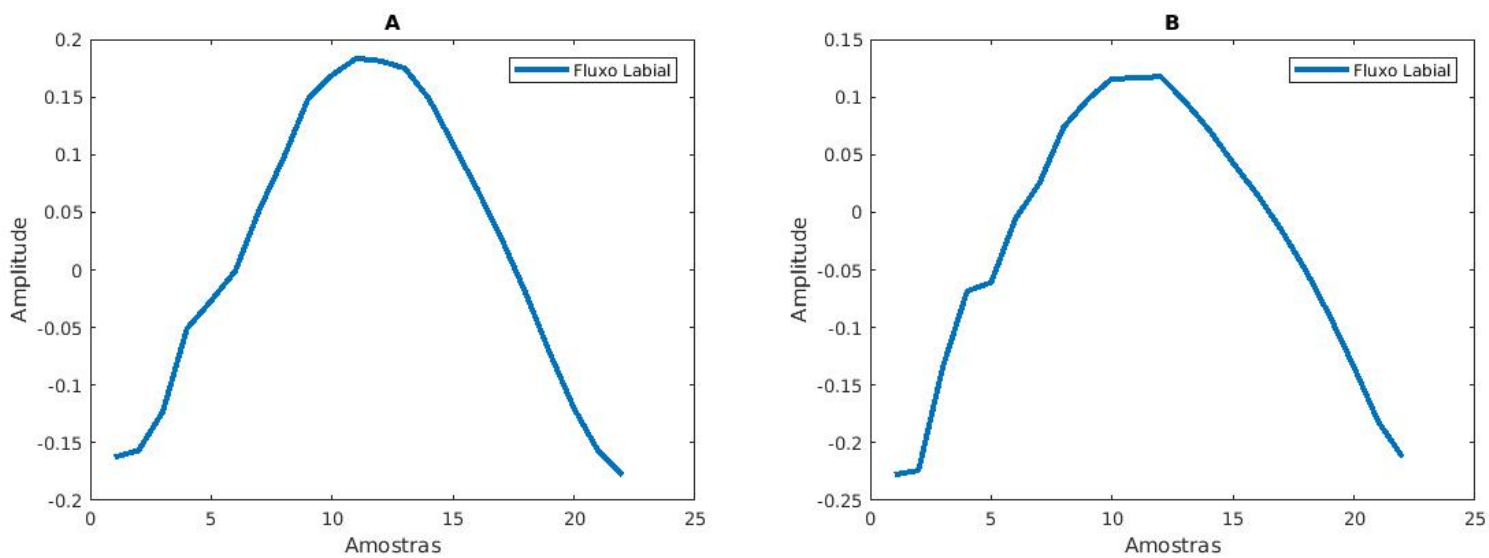


**Figura 9.** Um ciclo de onda de cada participante da nota 1 (harmônico 2) executada no trompete em Si bemol.

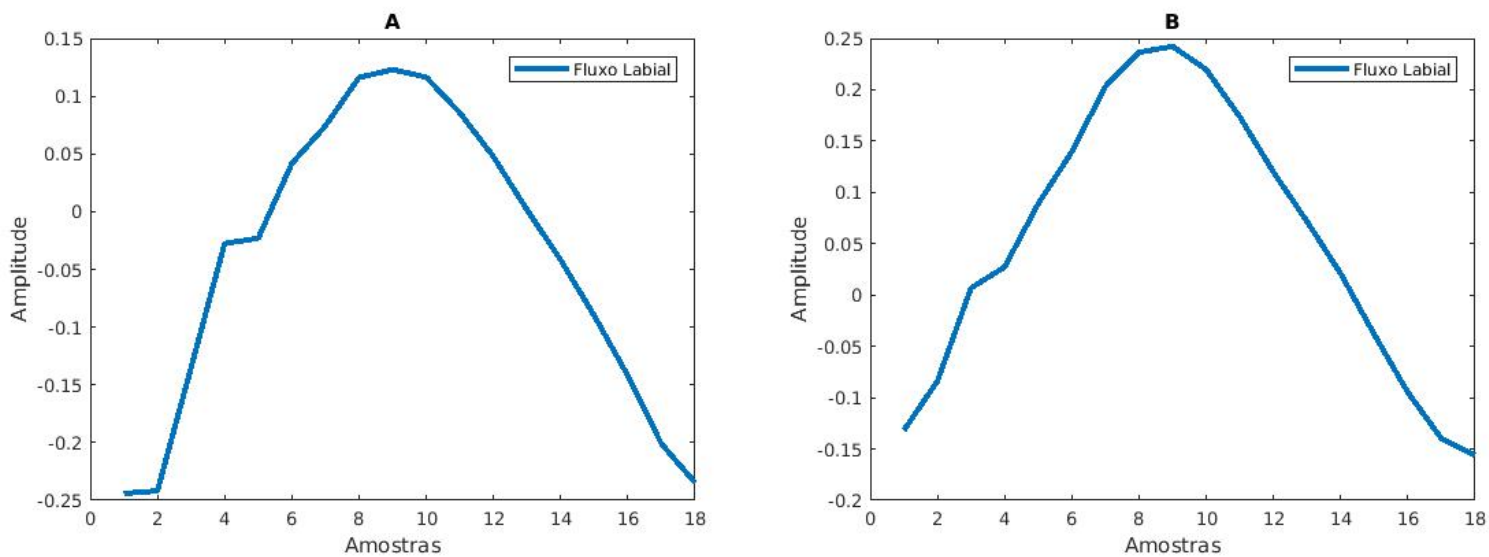




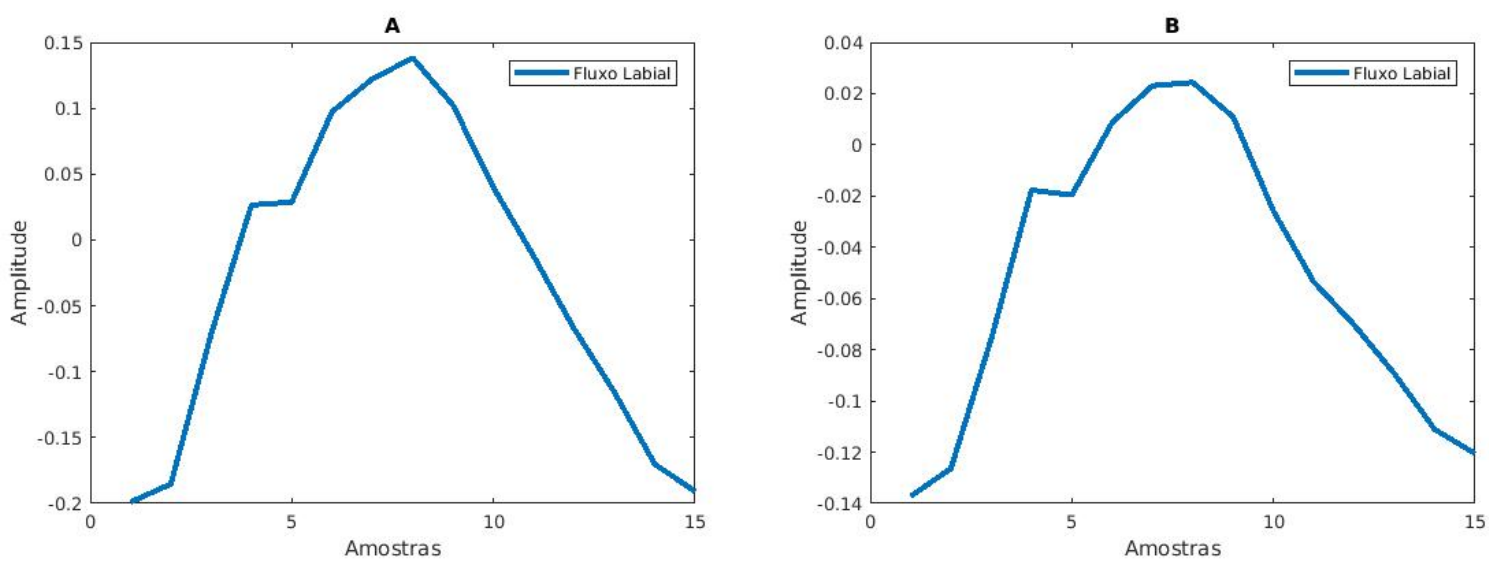
**Figura 10.** Um ciclo de onda de cada participante da nota 2 (harmônico 3) executada no trompete em Si bemol.



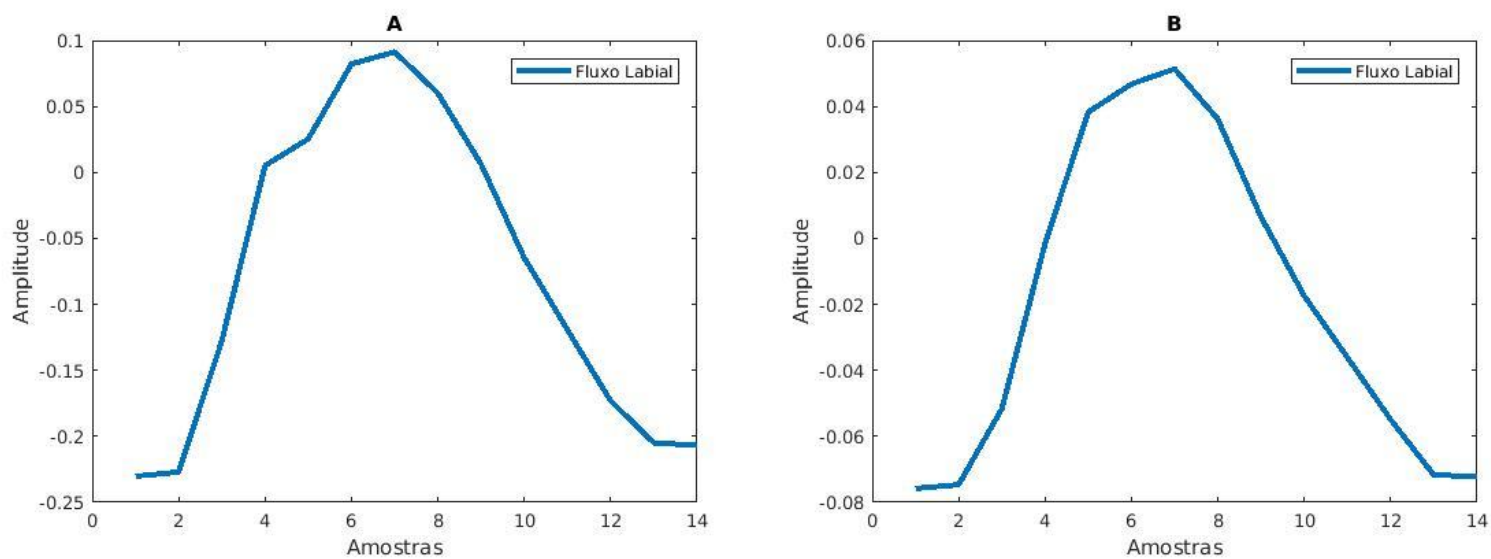
**Figura 11.** Um ciclo de onda de cada participante da nota 3 (harmônico 4) executada no trompete em Si bemol.



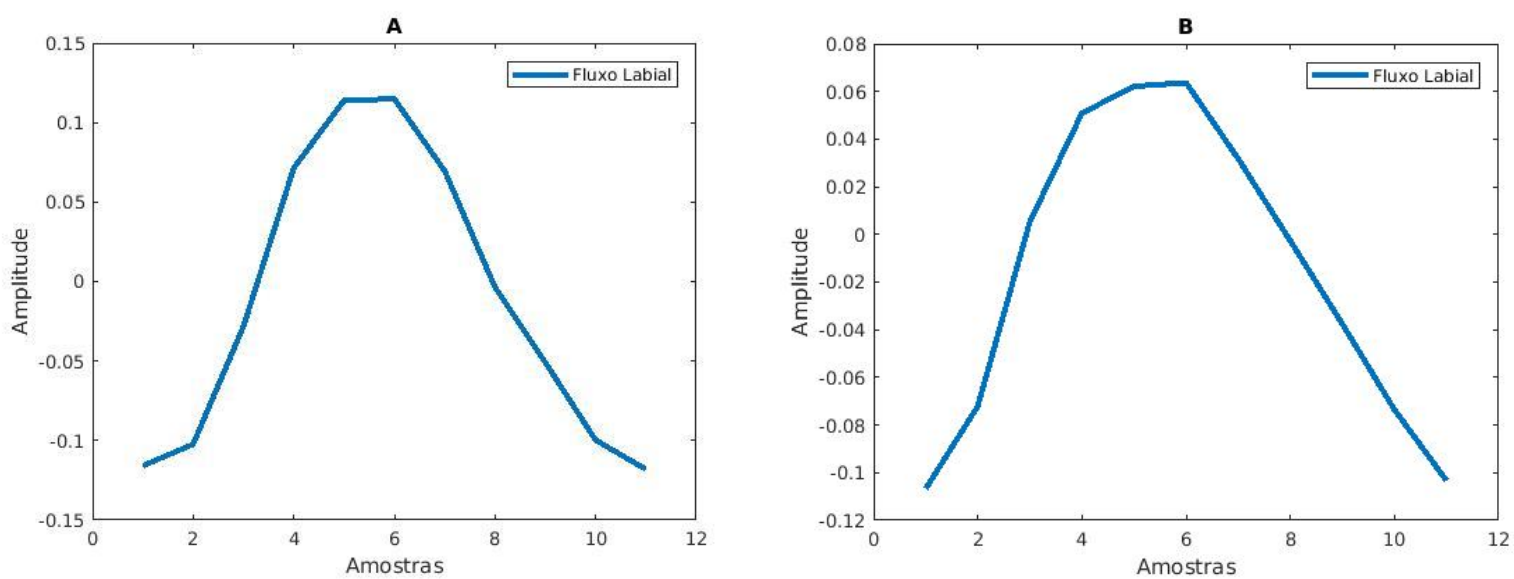
**Figura 12.** Um ciclo de onda de cada participante da nota 4 (harmônico 5) executada no trompete em Si bemol.



**Figura 13.** Um ciclo de onda de cada participante da nota 5 (harmônico 6) executada no trompete em Si bemol.



**Figura 14.** Um ciclo de onda de cada participante da nota 6 (harmônico 7) executada no trompete em Si bemol.



**Figura 15.** Um ciclo de onda de cada participante da nota 7 (harmônico 8) executada no trompete Si bemol.

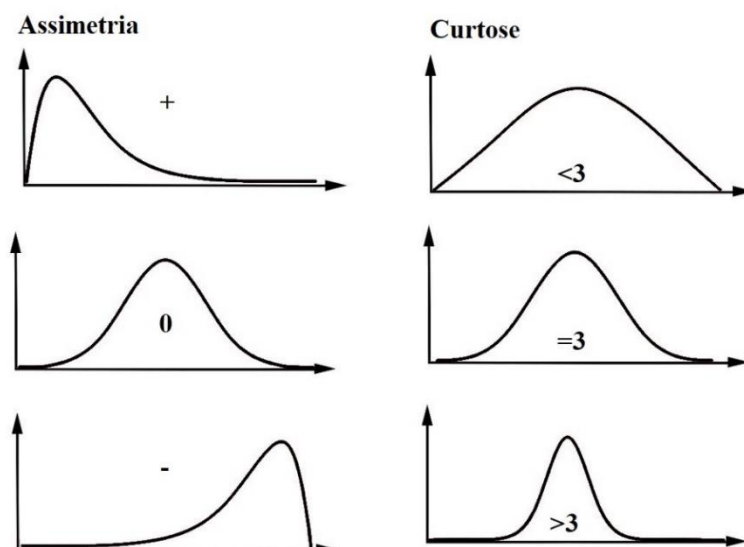
### 3.1. Análise dos dados

Em estudos de produção de fala, medidas de assimetria e curtose (achatamento) geralmente são usadas para analisar o comportamento do fluxo glótico (BACKSTROM *et al.*, 2005; NARENDRA; ALKU, 2018, 2019; STANEK; SIGMUND, 2016), por isso adotamos investigar o comportamento do pulso labial através destes parâmetros. A Figura 16 apresenta exemplos do formato de curvas para as quais são atribuídos valores de assimetria e curtose. Valores positivos de assimetria se referem a curvas com uma “calda” mais alongada para a esquerda e valores negativos para a direita, sendo o valor zero atribuído quando a curva é simétrica. Os valores de curtose menores que 3 indicam um achatamento platicúrtico da curva, enquanto que para valores maiores que 3, diz-se que o achatamento é leptocúrtico, e mesocúrtico quando o valor é igual a 3<sup>21</sup>.

Em estudos de fala, os valores de assimetria do pulso glótico revelam sobre a duração de abertura e fechamento das pregas vocais (DIAS, 2012, p. 11), que, neste estudo, podem estar relacionados ao tempo de abertura e fechamento dos lábios do trompetista. Valores de assimetria negativos podem indicar uma duração de abertura mais longa, enquanto grandes valores de assimetria positivos podem corresponder a uma duração de abertura mais curta.

---

<sup>21</sup> Disponível em: <http://www.portalaction.com.br/estatistica-basica/26-curtose>

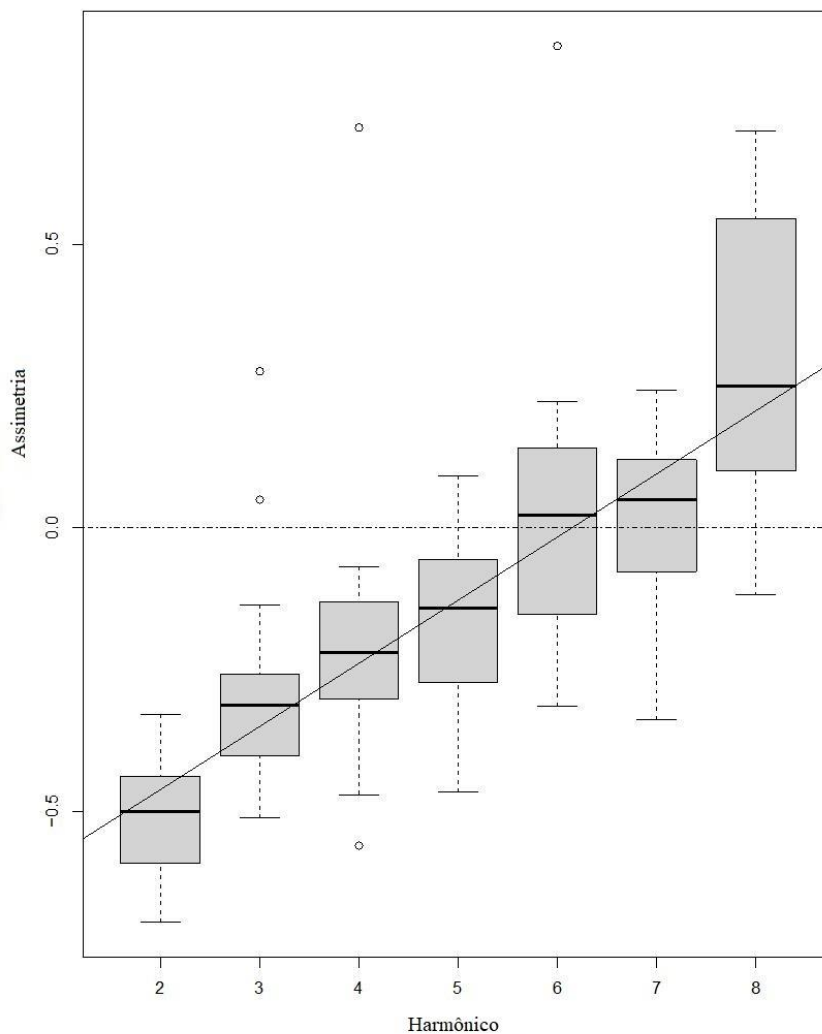


**Figura 16.** Exemplificação dos valores atribuídos de assimetria e curtose. Assimetria positiva se refere à curva que tem uma “calda” alongada para a esquerda e negativa para a direita, sendo o valor igual a zero atribuído para uma curva simétrica. Valores de curtose indicam que o “achatamento” da curva é platicúrtica quando é menor que três, mesocúrtica quando é igual a três e leptocúrtica quando é maior que três<sup>22</sup>.

### 3.1.1. Valores de assimetria

A Figura 17 mostra forte correlação entre assimetria e a altura da nota, representado por número do harmônico correspondente (eixo x) e os valores de assimetria estimado para cada nota executada por ambos os participantes em ambos os trompetes (em Dó e em Si bemol). Os valores de assimetria crescem à medida que a altura da nota aumenta. A assimetria próxima a zero (pulso simétrico) foi observada para as execuções do sexto e sétimo harmônico. Observamos que à medida que os ciclos tendem para simetria os valores de assimetria decrescem, pois vai de negativo a zero, ou seja, o sinal antes assimétrico com alturas inferiores a zero passa a ser simétrico com o aumento da altura até zero e depois a assimetria cresce, mas agora positivo.

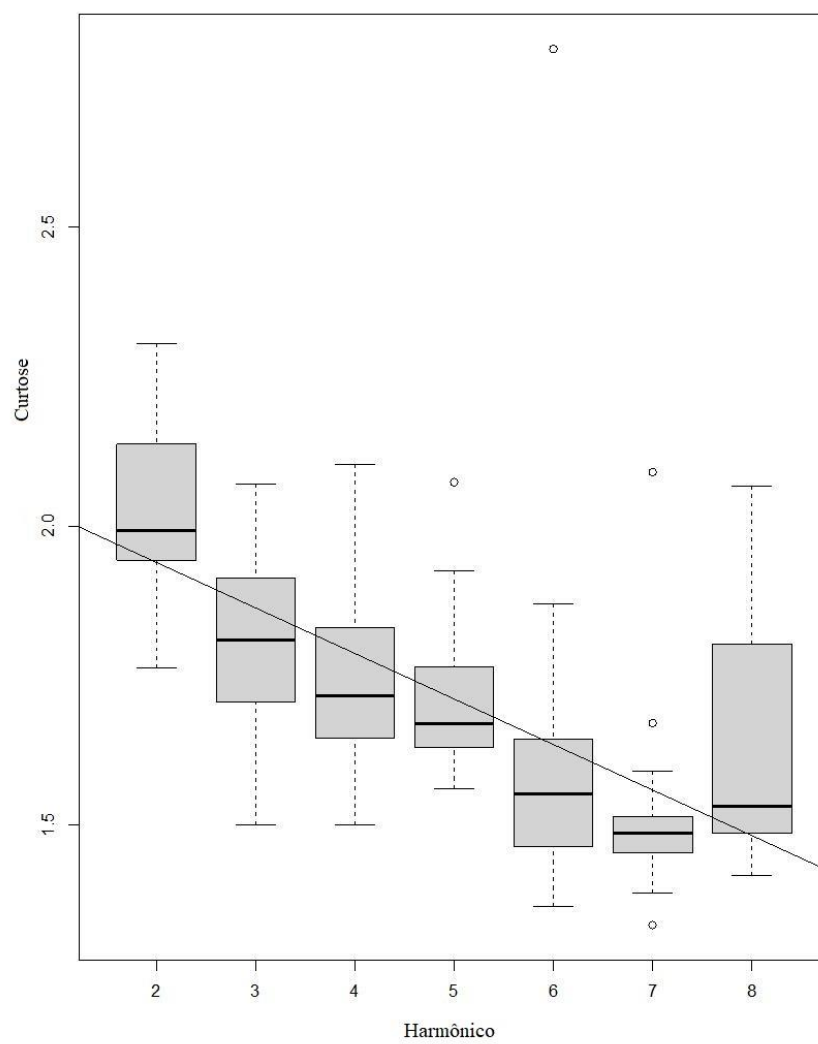
<sup>22</sup> Disponível em: <http://www.portaaction.com.br/estatistica-basica/26-curtose>



**Figura 17.** Boxplot de assimetria por harmônicos dos participantes e instrumentos juntos, mostrando a forte correlação positiva entre assimetria do pulso e a altura da nota.

### 3.1.2. Valores de curtose

Os valores de curtose mostram forte correlação negativa com a altura da nota, como apresentado na Figura 18.



**Figura 18.** Boxplot de curtose por harmônicos dos participantes e instrumentos juntos, mostrando a forte correlação negativa entre a curtose e a altura da nota.

### 3.1.3. Variação de assimetria e curtose

A Tabela 2 mostra os valores do desvio padrão de assimetria e curtose de cada nota representadas por seus respectivos harmônicos. Observamos que a variabilidade de assimetria e curtose do pulso labial é maior para notas mais agudas, com exceção da nota correspondente ao harmônico 7, o que pode indicar menor grau de habilidade de controle na execução das notas mais agudas, que também pode ser observado nas Figuras 17 e 18. É importante lembrar que as notas referentes aos harmônicos 7 e 8 são as mais agudas dentro do material musical utilizado e essas exigem um grande controle do trompetista para executá-las, justificando assim a instabilidade nestas notas.

HARMÔNICO	DESVIO PADRÃO	
	Assimetria	Curtose
2	0,104	0,146
3	0,171	0,159
4	0,232	0,139
5	0,150	0,122
6	0,247	0,284
7	0,149	0,141
8	0,277	0,224

**Tabela 2.** Desvio padrão dos valores de assimetria e curtose de cada nota de ambos os participantes e ambos trompetes.

### 3.1.4. Variação para diferentes participantes

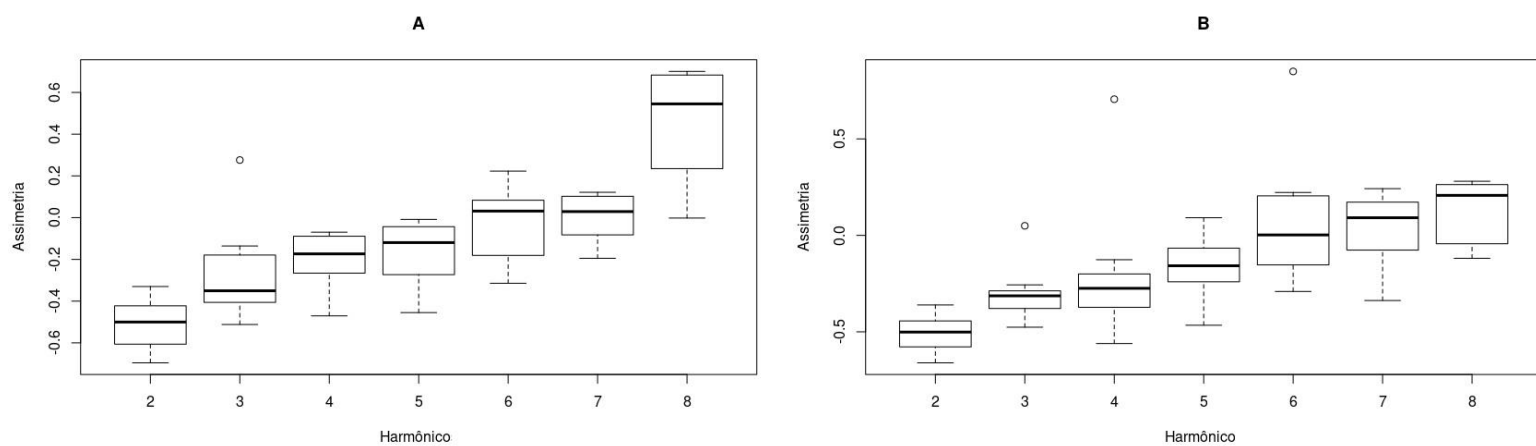
A variabilidade dos valores de assimetria e curtose podem indicar também o grau de habilidade de controle de mais de uma execução de uma mesma nota. Um instrumentista capaz de executar várias vezes o mesmo trecho com menor variabilidade do comportamento do pulso labial pode indicar que detém um maior domínio sobre sua técnica instrumental. Com a finalidade de inferir sobre o grau de habilidade de cada participante na execução destas notas a partir da variabilidade da assimetria e curtose do pulso labial, a Tabela 3 e as Figuras 19 e 20 mostram a variabilidade dos valores de



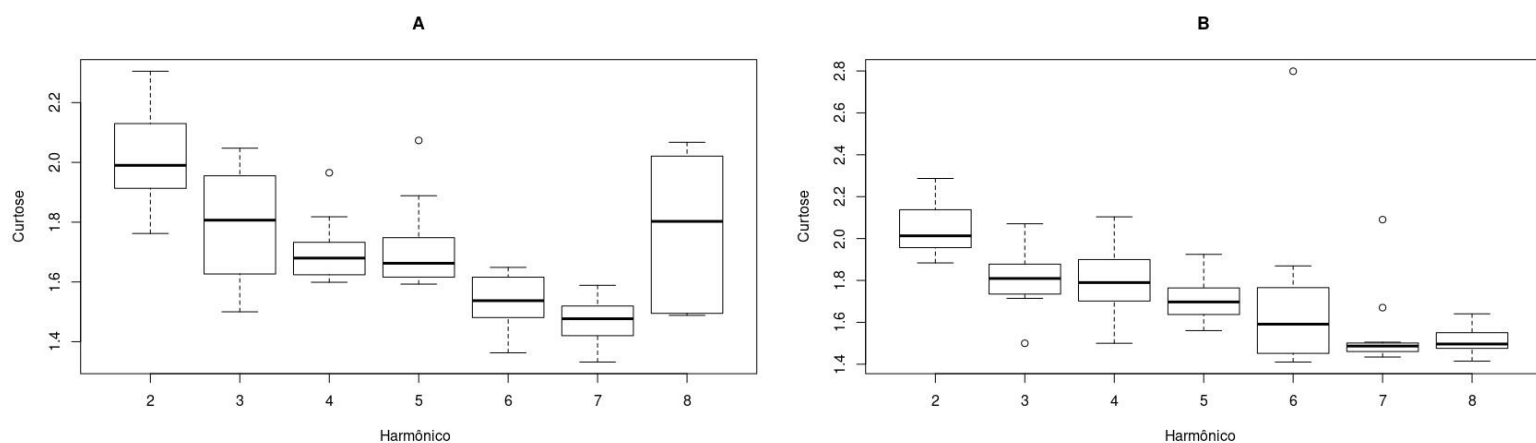
assimetria e curtose para cada participante. Observa-se que o participante A apresentou maior variabilidade nos valores de assimetria nas notas correspondentes aos harmônicos 3 e 8, enquanto que o participante B variou mais nas notas dos harmônicos 4 e 6. Em relação à variação dos valores de curtose observa-se maior variabilidade na nota do harmônico 8 para o participante A e do harmônico 6 para o participante B. De acordo com estes dados ainda é cedo para dizer se o método de filtragem inversa pode ser utilizado como uma ferramenta para discriminar instrumentistas através de uma assinatura individual específica, porém, a aquisição de mais dados poderá contribuir para a verificação de tal aplicação para o método de estimação de pulso labial.

HARMÔNICO	DESVIO PADRÃO			
	Participante A		Participante B	
	Assimetria	Curtose	Assimetria	Curtose
2	0,117	0,168	0,093	0,126
3	0,210	0,180	0,128	0,142
4	0,119	0,106	0,313	0,155
5	0,156	0,145	0,148	0,099
6	0,174	0,096	0,307	0,380
7	0,104	0,072	0,186	0,182
8	0,282	0,248	0,169	0,076

**Tabela 3.** Desvio padrão dos valores de assimetria e curtose separados por participantes de cada nota em ambos trompetes.



**Figura 19.** Boxplot dos valores de assimetria de cada nota de cada participante em ambos trompetes.



**Figura 20.** Boxplot dos valores de curtose de cada nota de cada participante em ambos trompetes.

### 3.1.5. Valores de energia

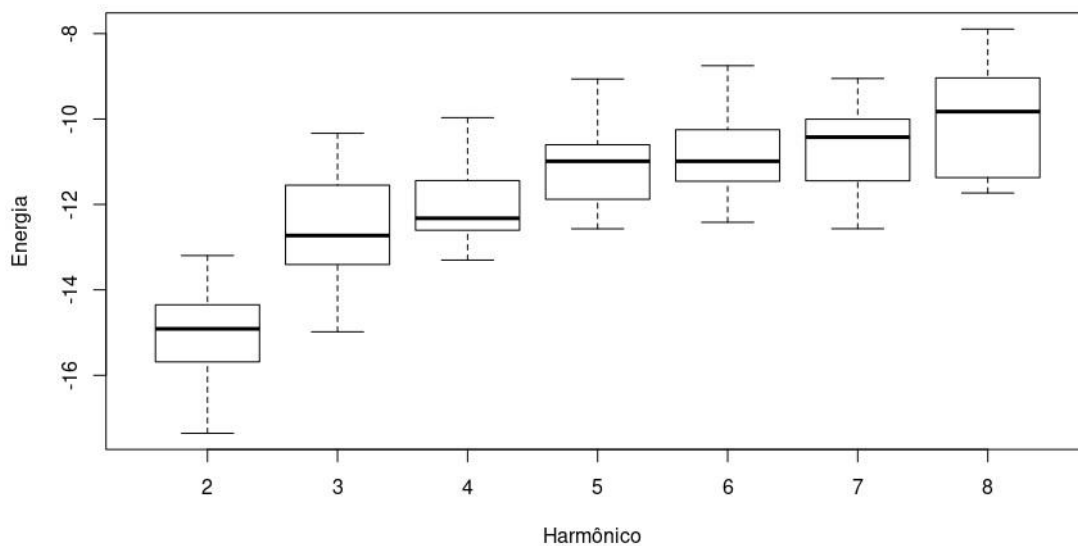
Além das medidas de assimetria e curtose, a energia RMS<sup>23</sup> (*Root Mean Square*) também foi usado para comparar o valor da energia do sinal de áudio e pulso labial de cada nota. A energia RMS é o valor médio do sinal, geralmente utilizado para medição de intensidade (energia) sonora (HUBER; RUNSTEIN, 2005, p. 36).

<sup>23</sup> Valor máximo da energia RMS é 1 que equivale a 0 decibéis.

Como esperado, a energia de cada nota do sinal de áudio aumenta em relação a frequência, ou seja, notas mais agudas possuem valores de energia maiores, assim como é apresentado na Tabela 4 e Figura 21.

HARMÔNICO	RMS
2	-15,0
3	-12,5
4	-12,0
5	-11,0
6	-10,8
7	-10,6
8	-10,0

**Tabela 4.** Valores médios de energia (RMS) do sinal de áudio atribuídos por nota de ambos os participantes e trompetes.

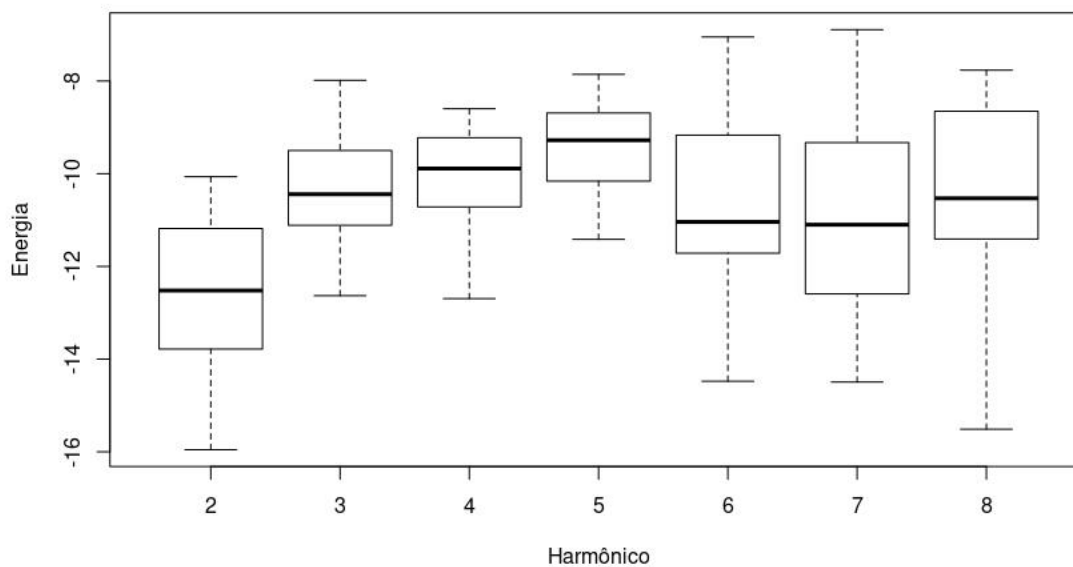


**Figura 21.** Boxplot dos valores de energia (RMS) do sinal de áudio por nota de ambos os participantes e trompetes.

A Tabela 5 e a Figura 22 apresentam os valores de energia do pulso labial. Os valores médios da energia do pulso labial referente às notas 5, 6, 7, 8 e 9 (harmônicos 6, 7 e 8) apresentaram valores de energia mais altos do que apenas o Dó 4 (harmônico 2), ou seja, a energia do pulso labial, diferente da energia do sinal, cresce até o harmônico 5 e decresce novamente até o harmônico 8.

HARMÔNICO	RMS
2	-12,6
3	-10,3
4	-10,0
5	-9,4
6	-10,5
7	-10,8
8	-10,4

**Tabela 5.** Valores médios de energia (RMS) do pulso labial atribuídos por notas de ambos participantes e trompetes.



**Figura 22.** Boxplot dos valores de energia (RMS) do pulso labial por nota de ambos os participantes e trompetes.

## 4. CONCLUSÃO

Neste estudo investigamos a utilização da filtragem inversa como ferramenta de análise do pulso labial de dois trompetistas. Para tal, foi analisado o comportamento do pulso labial de notas de mesma posição do trompete. No experimento realizado, os músicos foram instruídos a executarem notas de mesma posição em trompetes afinados em Dó e em Si bemol de forma que focassem na manipulação do controle da vibração labial e do ar na alteração das notas. Neste estudo consideramos apenas a região central (sustentação) das notas, onde o sinal apresenta maior estabilidade do conteúdo espectral, diferente de outras regiões que apresentaram dificuldades de calibração.

O objetivo deste estudo foi investigar os padrões de pulso labial utilizados pelos trompetistas em diferentes notas de mesma posição de apenas uma configuração de tubo do trompete, partindo de três parâmetros: assimetria, curtose e energia. Esta investigação partiu da análise do sinal de excitação apresentadas em estudos anteriores do comportamento do fluxo glótico na produção sonora da fala. Estes estudos, que se restringiram à voz, verificaram que a filtragem inversa se mostrou uma grande aliada na técnica de análise não invasiva do comportamento do sinal de excitação. Partindo destas informações, este estudo propôs verificar se esta metodologia de análise do sinal de excitação da fala poderia apresentar resultados relevantes sobre a técnica de trompetistas por meio da estimação do pulso labial. Durante a realização desta pesquisa a escolha da metodologia se mostrou bastante desafiadora, uma vez que é difícil analisar a técnica de instrumentos de bocais por métodos não invasivos e ainda não contamos com muitas possibilidades.

Vale a pena ressaltar que a filtragem inversa é uma estimativa, não representando fielmente o comportamento do pulso labial, ou seja, seu resultado é uma aproximação. Como ainda não temos informações da resposta do trompete (filtro) nem do pulso labial medidas de forma direta e independente, a falta de dados verdadeiros torna difícil a validação dos resultados da filtragem inversa.

Uma das principais características observadas com a realização desta pesquisa foi o tempo de abertura dos lábios em relação à altura de cada nota. O comportamento do movimento de abertura dos lábios é expressado pelo valor de assimetria atribuído para

cada ciclo das notas coletadas. Na maioria das execuções do oitavo harmônico foi onde apresentou os maiores valores de assimetria, indicando uma abertura de lábio mais abrupta quando as notas são mais agudas. A indicação de menor duração da abertura dos lábios em notas agudas pode ser explicada pelo fato de que essas notas requerem maior pressão de sopro em comparação com as notas mais graves, causando uma abertura labial mais rápida em resposta à grande pressão de sopro (FLETCHER; TARNOPOLSKY, 1999). Além disso, outro fato a ser relacionado com a abertura abrupta dos lábios é que as “notas agudas requerem um impulso mais forte de ar devido ao aumento da resistência da língua e dos lábios” (HICKMAN, 2006, p. 17, tradução nossa)<sup>24</sup>.

A investigação do comportamento do pulso labial utilizado na execução de notas de mesma posição na performance do trompete pode no futuro ajudar a esclarecer o processo desta técnica. Os resultados obtidos da aplicação preliminar da filtragem inversa como método de análise no trompete motivaram a continuação desta pesquisa. Em primeiro lugar, como foi mostrado nesta proposta, o algoritmo de filtragem inversa foi capaz de fornecer uma estimativa para o pulso labial. Em segundo lugar, o algoritmo é totalmente automático e o método não é invasivo. Finalmente, 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. Mais testes são necessários para verificar a aplicação desta metodologia em diferentes condições, em outros materiais musicais e com um grupo maior de participantes. Ademais, acreditamos no potencial da filtragem inversa na modelagem do processo de produção sonora da maioria dos instrumentos da família dos metais.

---

<sup>24</sup> *High notes require a stronger push of air due to increased resistance by the tongue and lips.*

## 5. PERSPECTIVAS FUTURAS

Um dos objetivos deste estudo foi a exploração da filtragem inversa utilizada em estudos da voz na análise do comportamento do pulso labial de trompetistas. A filtragem inversa se mostrou capaz de modelar o processo de produção sonora do trompete e realizar uma estimativa do pulso labial. Portanto, de acordo com a proposta da filtragem inversa utilizada neste estudo para análise em voz, sabemos da importância em realizar mais estudos focados em uma adaptação da filtragem inversa para o trompete, levando em consideração suas características acústicas específicas. Ao contrário do trato vocal, onde não se conhece a função de área que muda continuamente durante o processo de produção da fala, é importante investigar a possibilidade de substituir a função de transferência do trato vocal na filtragem inversa pela função de área para as sete configurações básicas do trompete (sete posições de pistos). As sete configurações básicas do trompete podem ser definidas como uma configuração (tamanho) de tubo para cada posição de pisto do trompete, sendo assim, passíveis de serem medidas com precisão, ao contrário do trato vocal.

A necessidade de diversificar a modelagem proposta se faz necessário para trabalhos futuros, talvez focando em outras partes das notas que não sejam o centro (sustentação), assim como o momento inicial e final de cada nota, uma vez que o momento da transição das notas é onde pode estar as informações mais valiosas sobre a técnica de controle de mudança de notas. Uma eventual dificuldade de analisar as notas em outras regiões se deu pela instabilidade do conteúdo espectral no momento inicial e final das notas, gerando grandes dificuldades para calibragem nestes locais.

Os resultados encontrados neste estudo são preliminares, portanto, somente a reprodução do experimento e dos procedimentos realizados em um grupo maior de trompetistas poderá no futuro validar as suposições feitas. Ademais, planejamos em breve expandir este estudo utilizando diferentes materiais musicais, diversificando as condições de performance e testando outras implementações de filtragem inversa. Por fim, com o desenvolvimento deste trabalho esperamos que os resultados associados aos de outros estudos possam contribuir positivamente para o avanço na compreensão do pulso labial utilizado por trompetistas.

## 6. REFERÊNCIAS

ADACHI, Seiji; SATO, Masa-aki. Trumpet sound simulation using a two-dimensional lip vibration. v. 99, n. 2, p. 1200–1209, 2014.

AIRAKSINEN, Manu *et al.* Quasi closed phase glottal inverse filtering analysis with weighted linear prediction. *IEEE Transactions on Audio, Speech and Language Processing*, v. 22, n. 3, p. 596–607, 2014.

ALKU, Paavo. Glottal inverse filtering analysis of human voice production - A review of estimation and parameterization methods of the glottal excitation and their applications. *Sadhana - Academy Proceedings in Engineering Sciences*, v. 36, n. 5, p. 623–650, 2011.

ALKU, Paavo. Glottal wave analysis with Pitch Synchronous Iterative Adaptive Inverse Filtering. *Speech Communication*, v. 11, n. 2–3, p. 109–118, 1992.

ALKU, Paavo; VILKMAN, Erkki; LAUKKANEN, Anne-Maria. Estimation of amplitude features of the glottal flow by inverse filtering speech pressure signals. v. 24, p. 123–132, 1998.

ARBAN, Jean Baptiste. Complete Conservatory Method for Trumpet (Cornet). p. 348, 1982.

BACKSTROM, Tom *et al.* OBJECTIVE QUALITY MEASURES FOR GLOTTAL INVERSE FILTERING OF SPEECH PRESSURE SIGNALS. *Signal Processing*, p. 897–900, 2005.

BAPTISTA, Paulo Cesar. Metodologia de Estudo para Trompete. 2010.

CAMPOLINA, Thiago; LOUREIRO, Maurício; MOTA, Davi. Expan: a tool of musical expressiveness analysis. *Proceedings of the Second Conference of Students of Systematic Musicology*, 2009.

CAMPOS, Frank Gabriel. Trumpet Technique. *The Musical Times*, p. 126, 2005.

CLARKE, Herbert. L. Technical Studies for the Cornet. p. 56, 1984.

COLIN, Charles. Trumpet Advanced Lip Flexibilities. 1972.



DARLINGTON, Paul; SIMPSON, Anthony. Technical Note Cooling Rates of the Bb Trumpet Michael Hrachovec. v. 36, p. 145–157, 1992.

DEGOTTEX, Gilles *et al.* COVAREP – A COLLABORATIVE VOICE ANALYSIS REPOSITORY FOR SPEECH TECHNOLOGIES. *IEEE International Conference on Acoustic, Speech and Signal Processing*, p. 960–964, 2014.

DIAS, Sandra de Oliveira. *Estimation of the glottal pulse from speech or singing voice*. 2012. 140 f. 2012.

DULIN, Mark; CICHOWICZ, Michael. Long Tone Studies. 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>>.

GORDON, Claude. Tongue Level Exercises for Trumpet. 1981.

HELLER, Eric J. *Why You Hear What You Hear*. [S.l.]: Princeton University Press, 2013.

HICKMAN, David R. *Trumpet Pedagogy: A Compendium of Modern Teaching Techniques*. [S.l.]: Hickman Music Editions, 2006.

HUBER, David Miles; RUNSTEIN, Robert E. Modern Recording Techniques. *Modern Recording Techniques*. [S.l.: s.n.], 2005. .

KIM, Hyung-suk. Linear Predictive Coding is All-Pole Resonance Modeling. *Center for Computer Research in Music and Acoustics, Stanford University*, 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>>.

- MILLER, R L. Nature of the Vocal Cord Wave. v. 203, n. 1940, p. 858–865, 1959.
- MOKHTARI, Parham *et al.* Estimation of the glottal flow from speech pressure signals: Evaluation of three variants of iterative adaptive inverse filtering using computational physical modelling of voice production. *Speech Communication*, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.specom.2018.09.005>>.
- MOORE, Thomas R. *et al.* The effects of bell vibrations on the sound of the modern trumpet. *Acta Acustica united with Acustica*, v. 91, n. 3, p. 578–589, 2005.
- NARENDRA, N. P.; ALKU, Paavo. Dysarthric speech classification from coded telephone speech using glottal features. *Speech Communication*, v. 110, n. March, p. 47–55, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.specom.2019.04.003>>.
- NARENDRA, N. P.; ALKU, Paavo. Dysarthric speech classification using glottal features computed from non-words, words and sentences. *Proceedings of the Annual Conference of the International Speech Communication Association, INTERSPEECH*, p. 3403–3407, 2018.
- PAIVA, Rafael Cauduro Dias De. Transformações em Sinais de voz: morphing e modificação de pitch. 2008.
- 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. p. 68, 1948.
- SCHLUETER, Charles. *Zen and the Art of the Trumpet*. 1996.
- SMITH, Walter M. Lip Flexibility on the Trumpet - 41 Studies for Embouchure Development. 1935.
- 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.
- STANEK, Miroslav; SIGMUND, Milan. Analysis of Closing-To-Opening phase ratio

in top-to-bottom glottal pulse segmentation for psychological stress detection.

*Elektronika ir Elektrotechnika*, v. 22, n. 5, p. 79–83, 2016.

THOMPSON, James. *The Buzzing Book - Complete Method*. 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.