

## A MODELAGEM EMPÍRICA DO TRATO VOCAL NA COMPREENSÃO DAS ALTERAÇÕES DE TIMBRE DA FLAUTA

**Fabiana Moura Coelho**

Universidade de São Paulo – USP

Doutorado em Música

*SIMPOM: Subárea de Sonologia*

**Resumo:** A flauta transversal é um dos instrumentos de sopro mais populares e mais tocados em todo o mundo e seu funcionamento tem sido estudado por diversos cientistas, entre físicos, engenheiros e musicólogos. Entretanto, a modificação do timbre do instrumento pelo uso de alterações na configuração do trato vocal ainda não se encontra totalmente estudada pela ciência. Considerando-se que as alterações do timbre são um elemento fundamental para a execução musical, ultrapassando o domínio puramente técnico do instrumento, são propostos no presente trabalho experimentos que, a partir do isolamento de variáveis, como movimentos de lábios e mandíbula, possam determinar como e de que maneira o trato vocal pode influenciar o timbre da flauta. Os experimentos consistem em um modelo empírico do trato vocal e embocadura do instrumento. São considerados elementos como a impedância, uma propriedade física do próprio instrumento que independe do instrumentista. A flauta, por ser um instrumento de embocadura livre, soa com níveis mínimos de impedância, com pouca pressão e grande fluxo, o que pode ser decisivo na determinação da influência do trato vocal sobre o timbre do instrumento. A modelagem empírica pode ainda demonstrar com maior clareza o funcionamento do mecanismo de alteração de timbre na flauta. Os experimentos encontram-se em andamento, com os modelos de trato vocal e de embocadura da flauta construídos com base na bibliografia sobre o tema. Resta ainda realizar as gravações e a efetiva medição da influência. A pesquisa busca também ampliar as possibilidades didáticas de alteração de timbre na flauta, renovando o interesse no estudo e no ensino do instrumento. Acredita-se que tal perspectiva será capaz de estimular tanto a aprendizagem de iniciantes, facilitando uma boa resposta do instrumento, quanto o desenvolvimento de flautistas com nível de estudo mais avançado, com o enriquecimento técnico e melhor desempenho em regiões de maior dificuldade.

**Palavras-chave:** Flauta; Timbre; Trato vocal.

### **Empirical modeling of the vocal tract and its influence on the timbre of the flute**

**Abstract:** Transversal flute is one of the most popular wind instrument around the world and its functioning has been studied by several scientists, including physicists, engineers and musicologists. However, the possibility of changing the timbre of the instrument by using changes in the vocal tract configurations not been fully studied by science. Considering that the changes of timbre are a key element in music performance, going beyond pure technical mastery of the instrument, to integrate the musician on the process of musical creation, are proposed in the present work experiments to determine how and in what way the vocal tract can influence the timbre of the flute. The idea is to isolate variables, such as movements of the lips and jaw. The experiments consist of an empirical model of the vocal tract and the mouth piece of the instrument, which allows the isolated analysis of the variables involved in the production of the sound. One of elements that is considered is the impedance, a physical property of the instrument sound itself, that is independent of the player. The flute, for being an instrument played with the mouth free, sounds with minimal impedance, low pressure and large flow, which can be decisive in determining the influence of the vocal tract on its timbre. The empirical modeling can also be used to demonstrate more clearly other elements that have influence on this alteration. Experiments are in progress, with the models of the vocal

tract already constructed based on the specialized literature. It remains to perform the recording and measurement of effective influence. The research also seeks to expand the educational possibilities of change of timbre on the flute, renewing interest in the study and teaching of the instrument. It is believed that the results will be able to stimulate both beginners learning, facilitating a good response of the instrument, and experts, clarifying the possibilities of enrichment and better technical performance in areas of great difficulty.

**Keywords:** Flute; Timbre; Vocal tract.

## 1. Introdução

A pesquisa sobre instrumentos de sopro tem seu início marcado em fins do século XIX, quando aspectos acústicos passam a ser alvo de estudo. O trabalho empírico com instrumentos musicais tem se mostrado como uma ferramenta bastante utilizada e com resultados positivos, como ressalta Oliveira *et al.* (2007, p. 51):

Muitos trabalhos dedicados à síntese sonora de instrumentos musicais, como, por exemplo, Borin *et al.*, Keefe e Smith, abordam o assunto através da modelagem física. Apesar dos avanços tecnológicos na direção de hardwares mais eficientes, o esforço computacional destes modelos ainda é muito alto. Este fato estimulou a condução deste trabalho numa direção oposta, isto é, obter a síntese de tais instrumentos a partir de um modelo totalmente empírico. (OLIVEIRA *et al.*, 2007, p. 51).

## 2. O trato vocal

O trato vocal é a estrutura que compreende, fisiologicamente, a parte superior do aparelho respiratório, incluindo desde as pregas vocais até os lábios. Henrique (2009, p. 667) define o trato vocal como

termo usado para designar o conjunto das cavidades laríngea, faríngea, bucal e nasal que constituem a estrutura ressonadora do órgão da voz.(...) O trato vocal tem uma função acústica semelhante à dos ressoadores de outros instrumentos musicais, como o violoncelo ou o fagote, com a particularidade de ser modificável. (HENRIQUE, 2009, p. 667).

A forma de um trato vocal adulto assemelha-se, de maneira simplificada, a um tubo reto fechado em uma das extremidades. A média de comprimento de um trato vocal masculino é de 17 cm, com 3 cm de diâmetro, e, considerando-se que as frequências de ressonância do tubo são dadas pela fórmula  $F_n = (2n - 1)c / 4l$ , onde  $n$  representa um número inteiro que determina o número da ressonância,  $c$ , a velocidade do som, e  $l$ , o comprimento do tubo, temos que os primeiros picos de ressonância, a partir desse tubo, que, com essa configuração, gera uma vogal determinada, estão ao redor de 500, 1500, 2500, 3500, 4500 Hz. (KENT & READ, SUNDBERG, FANT).

Entende-se, ainda, que o fenômeno da produção vocal, e, em especial, da produção das vogais, pode ser estudado a partir de um modelo teórico denominado *fonte-filtro* (FANT, 1970), no qual os pulsos gerados nas pregas vocais são filtrados pelas cavidades acústicas do trato vocal. A partir desses estudos, permite-se compreender que as vogais sejam modeladas em de interações num tudo reto fechado em uma das extremidades e aberto na outra, representando, assim, o trato vocal, como asseguram Kent & Read (2002, p. 22): *além disso, todas as outras vogais em Inglês podem ser modeladas, pelo menos aproximadamente, por modificações feitas de forma apropriada de um tubo reto*. O modelo, com configuração tridimensional adequada à produção de cada uma das vogais, permite a descrição e a simulação experimental do comportamento do trato vocal.

### 3. Impedância Acústica

A impedância acústica é uma propriedade física do próprio instrumento, que independe do instrumentista. Consiste na resposta acústica do instrumento para todas as possíveis frequências que se possa obter naquele determinado instrumento. É um dos poucos elementos unicamente objetivos na medição dos instrumentos musicais.

Outro aspecto que tem uma grande influência no som é o instrumentista, mas essa é outra história e é um tanto mais complicada. Realmente uma grande vantagem de se medir a impedância acústica é que ela nos dá uma medição objetiva do instrumento propriamente. Nesse sentido, é em alguns casos mais útil para cientistas e construtores de instrumentos que o som do instrumento. (WOLFE, 2009).

De acordo com Wolfe (2009), todo material elástico oferece uma determinada resistência à transmissão de ondas sonoras. A impedância acústica de um sistema vibratório seria a oposição que este oferece à passagem da onda sonora, em função de sua frequência e velocidade.

Assim, temos que a impedância acústica é a razão entre a pressão acústica e o volume de vazão necessários para se produzir um som em determinado instrumento.

$$Z = \frac{\text{pressão acústica}}{\text{volume da vazão}}$$

Smith, Henrich e Wolfe (1997, p. 315) afirmam que a medição da impedância na flauta impõe vários problemas técnicos. A flauta, por ser um instrumento de embocadura livre, transversal é tocada com o orifício da embocadura aberto para o ambiente. Nesse sentido, a flauta possui uma forma de emissão muito peculiar, que é bastante diferente dos instrumentos de palheta, como a clarineta e o oboé, e dos instrumentos da família dos metais, em que a

vibração dos lábios toma o lugar da palheta. Esses instrumentos soam com muita pressão e pouco volume de ar, ou seja, soam a frequências determinadas por sua impedância máxima (SMITH, HENRICH e WOLFE, 1997, p. 315). A flauta, por outro lado, soa com pouca pressão e muito volume de ar, conseqüentemente, a flauta soa a frequências próximas à impedância mínima (SMITH, HENRICH e WOLFE, 1997, p. 315).

A embocadura da flauta é aberta para o ar, então o instrumento toca aproximadamente com a mínima impedância de entrada na embocadura. O instrumentista seleciona entre possíveis mínimos ajustando a velocidade do jato de ar (COLTMAN, 1973), e conseqüentemente um regime de vibração periódica é estabelecido com a frequência fundamental próximo ao de um mínimo de impedância. (ALMEIDA *et al.*, 2009, p. 1521)

Esse é um aspecto que pode ser decisivo na determinação da influência do trato vocal sobre o timbre do instrumento. Com menos pressão, o jato de ar que incide no instrumento tende a sofrer maior influência dos mecanismos anteriores à sua emissão pela boca. Esse aspecto será discutido mais adiante neste texto.

#### **4. Modelagem empírica do trato vocal**

Diversos trabalhos já se dedicaram à modelagem empírica do trato vocal. Chiba e Kajiyama (1941) realizaram a medição da cavidade oral humana e construíram um modelo mecânico capaz de gerar vogais artificialmente. Uma cuidadosa medição, a partir de diversas imagens de raios-X, foi realizada para criar um modelo simples de um ressonador acusticamente equivalente ao trato vocal humano. Em seguida, Chiba e Kajiyama (1941) simularam vogais artificialmente a partir do trato vocal produzido. Para isso, foi adicionado um emissor de frequências à base do trato vocal. São apresentados tabelas e esquemas das medidas utilizadas na elaboração do trato vocal para cinco vogais distintas.

Arai (2001) avalia e discute os modelos elaborados por Chiba e Kajiyama (1941), com ênfase no processo de construção dos modelos propostos a partir de duas técnicas. A primeira consiste na reprodução precisa das curvas medidas no trato vocal humano, esculpindo a cavidade no interior de um bloco de acrílico. A segunda consiste na reprodução aproximada, com uma sequência de placas de acrílico que compõem, juntas, as formas do trato vocal (ARAI, 2001, p. 32)

Chiba e Kajiyama (1941) discutem, ainda, os efeitos dos materiais utilizados na construção dos tubos. Os modelos originais utilizados eram feitos de Plasticine (espécie de massa de modelagem), mas não se notou diferença considerável quando comparados tubos de diferentes materiais. Em sua avaliação, Arai (2001, p. 32) assume que as alterações acústicas

resultantes dos diferentes materiais seriam mínimas. O autor utiliza acrílico na construção dos modelos, *porque é transparente e fácil de esculpir* (ARAI, 2001, p. 32).

Sobre a rigidez das paredes do trato vocal, Sondhi (1974), ao discutir o modelo de propagação da onda em um trato vocal com perdas e parede irregular, conclui que o efeito da irregularidade das paredes do trato vocal, ainda que mínimo, só pode ser percebido em frequências inferiores a 500 Hz. Acima dessa frequência, as paredes podem ser consideradas rígidas.

Maeda *et al.* (2004) realizam uma comparação dos dois modelos de construção de trato vocal a partir dos resultados de Chiba e Kajiiyama (1941) e de Arai (2001). São realizadas medições com os dois modelos de trato vocal discutidos por Arai (2001), construídos em acrílico e configurados para a vogal /a/. Depois de um experimento perceptivo, Maeda *et al.* (2004) concluem que os dois modelos são capazes de produzir a vogal /a/, embora sejam encontradas diferenças na qualidade do som. A partir de uma análise do espectro resultante por LPC (*linear predictive coding*), os autores notam que os formantes de 1 a 4 são praticamente idênticos, *embora o modelo de placas apresente larguras de banda mais amplas* (MAEDA *et al.*, 2004, p. 64). Assim, concluem que a qualidade da produção de vogais dos dois modelos é praticamente a mesma.

## 5. Modelagem do trato vocal

Para o modelo de trato vocal, escolhemos seguir as medidas propostas por Chiba e Kajiiyama (1941). O trabalho de Chiba e Kajiiyama (1941), além de encontrar respaldo na bibliografia, tendo sido amplamente testado e estudado, apresenta medidas de fácil reprodução, sem necessidade de adaptação ou aproximação, o que confere maior confiabilidade aos modelos.

Foram construídos os modelos das cinco vogais medidas por Chiba e Kajiiyama (1941), a partir das medidas apresentadas na Tabela 1. Dessa maneira, foram encomendados 80 discos de acrílico com 50 mm de diâmetro externo e furação central de acordo com as medidas explicitadas por Arai (2001).

Para unir os discos de forma definitiva e sem frestas foi utilizado um processo de soldagem química, com aplicação de solvente específico de acrílico (S-320). Após esse processo, foram formados cinco tubos de acrílico, com cerca de 50 mm de diâmetro externo. No interior dos tubos, são formados, de acordo com a furação dos discos, os modelos de trato vocal.

## 6. Experiências sobre a influência do trato vocal em instrumentos

São encontrados na literatura específica diversos trabalhos que tratam da relação entre o trato vocal e o timbre dos instrumentos de sopro. O estudo Fritz e Wolfe (2005) aborda os ajustes do trato vocal feitos por clarinetistas para obter diferentes efeitos em seus instrumentos. A partir de um modelo experimental que considera as configurações dos clarinetistas, afirmam: *os efeitos acústicos do trato vocal não podem ser negligenciados e têm significativa influência musical no som produzido.* (FRITZ e WOLFE, 2005, p. 3315)

Wolfe *et al.* (2003), em artigo intitulado *Alguns efeitos da língua e do trato vocal no som de instrumentos de sopro*, analisam o efeito de duas posições do trato vocal na produção do som no didjeridu (instrumento típico australiano) e no trombone. Os autores explicitam o porquê da utilização de aparatos experimentais para explicar os efeitos das alterações estudadas: primeiro, há as complicações que, quando um instrumentista muda a forma da boca, ele/ela também pode, inconscientemente, mudar a tensão e a geometria do lábio. Em segundo lugar, é difícil explicar o efeito. (WOLFE *et al.*, 2003. p. 307). Os autores apresentam ainda a modelagem de um trato vocal geometricamente simples, a partir de duas posições usualmente usadas pelos instrumentistas: a primeira, representando a língua totalmente abaixada; a segunda, representando a língua levantada.

Fritz (2004) desenvolve, em sua tese de doutorado, um estudo completo sobre a influência do trato vocal na produção do som no clarinete. Após um estudo teórico sobre o trato vocal, no qual são analisados aspectos da impedância e do comportamento de modelos matemáticos que explicam suas funções, é empreendido um experimento para determinar a influência de duas formas do trato vocal (correspondentes às vogais “ee” e “aw” do idioma inglês) no som do instrumento. As vogais são escolhidas após uma entrevista com dezessete clarinetistas, que também participaram da medição do trato vocal em situação semelhante à de execução do instrumento.

O experimento realizado por Fritz (2004) contou com um trato vocal artificial composto por discos de diferentes diâmetros que, colocados lado a lado, formam um tubo em seu interior, e lábios artificiais feitos de tubos de látex.

Fritz (2004, p. 121) conclui que a influência do trato vocal não pode ser resumida a apenas um componente acústico, tendo as medições de impedância reforçado essa conclusão. Embora as formas de trato vocal testadas tenham provocado um efeito quase nulo sobre a frequência, o espectro resultante mostra que alguns harmônicos foram acentuados ou atenuados com a mudança na configuração do trato vocal.

As pesquisas envolvendo as particularidades da flauta transversal têm apresentado ponto de vista um pouco diferente, com maior foco na didática e execução do instrumento. Lamkin (2005) escreve sobre as relações entre as práticas lingüísticas dos flautistas e sua sonoridade na flauta. Walker (1995) trata do uso da técnica de inflar as bochechas com ar em diversas escolas de ensino de flauta: inflar as bochechas é quando o flautista permite bolsas de ar formadas na parte superior ou inferior das bochechas enquanto toca. (WALKER, 1995, p. 2). O autor conclui que a técnica de inflar as bochechas pode ajudar a uniformizar as mudanças na pressão do ar e, assim, controlar a afinação e a qualidade do som.

Coltman (1973) analisa os efeitos da ressonância da boca no som da flauta. A partir das predições matemáticas de Benade e French (1965), que analisaram a expectativa do que acontece quanto se acopla a ressonância da boca na coluna de ar que atinge o bocal do instrumento. O autor afirma que

é possível que os efeitos do movimento da língua descritos por Benade e French nesse região sejam causados pela atuação da cavidade bucal no segundo harmônico do som da flauta, o qual é ligeiramente proeminente no espectro. Naturalmente, os tamanhos das bocas variam com os indivíduos, então a Fig. 1 representa apenas um exemplo singular, mas não há razão para acreditar que é atípico. (COLTMAN, 1973, p. 417).

## 7. Modelo de embocadura

Encontramos na bibliografia especializada alguns modelos de embocadura de instrumentos de sopro elaborados para experimentos empíricos. A maior parte desses modelos relaciona-se a instrumentos que utilizam palheta, em especial a clarineta e o saxofone, e outros que fazem uso da vibração dos lábios do instrumentista, como trombone, trompete. Apresentam-se os que analisam especificamente a flauta.

Coltman (1973) analisa os efeitos da cavidade oral no som da flauta. A partir do estudo de Benade e French (1965), que prevê, com análises matemáticas, o comportamento do instrumento ao se acoplar a ressonância da cavidade oral. No modelo de Coltman (1973), os lábios foram simulados com um tubo de metal de 6mm de comprimento com massa de modelar para imitar a parte externa dos lábios do instrumentista.

Sawada e Sakaba (1980), em artigo sobre a transição de modos na flauta, ressaltam a experiência dos músicos na obtenção da melhor sonoridade do instrumento: *eles sabem por treino qual o melhor arranjo físico para obter as notas de transição para expressar sua música* (SAWADA e SAKABA, 1980, p. 1790). Os autores propõem um modelo experimental com uma embocadura feita de metal, com exceção do lábio inferior, feito com uma folha fina de borracha.

O modelo que elaboramos foi construído em látex galvanizado, material comumente utilizado na confecção de moldes, modelos e máscaras. O primeiro molde foi elaborado em silicone de condensação (nome comercial Speedex), material odontológico utilizado para confecção de moldes e modelos, com uma camada de tela metálica no centro.

Foi adquirido também um modelo de embocadura em látex maleável, distribuída por uma empresa de comércio eletrônico, ainda em teste. O modelo apresenta boa adaptação ao bocal da flauta, com a parte inferior bastante próxima ao bocal, como recomendado nos métodos de flauta tradicionais (TAFFANEL e GAUBERT, 1958; MOYSE, 1934)

## **8. Gravação e análise preliminar do experimento**

Foi realizada uma gravação em estúdio para medição e análise preliminar dos possíveis resultados do experimento. A gravação foi feita no estúdio do Departamento de Música da ECA/USP, utilizando dois microfones posicionados à esquerda e à direita do instrumentista. Foram gravadas, ao todo, 33 amostras. As primeiras amostras foram organizadas de acordo com a região do instrumento (grave, média e aguda) e a posição do trato vocal, correspondente aos modelos já elaborados, com duas gravações de cada modelo. As últimas 3 amostras foram gravadas aplicando-se a alteração do trato vocal com a nota sustentada, em cada uma das 3 regiões do instrumento.

Os parâmetros para análise das gravações ainda não foram claramente definidos. A análise inicial foi realizada a partir do centroide espectral. O centroide espectral é um componente sonoro relacionado à ideia de brilho do som. É calculado como o centro de gravidade do espectro de amplitude medido para cada quadro de tempo (LOUREIRO, 2006, p. 22). Os valores médios mensurados em cada amostra revelam uma possível correlação do centroide com a alteração do trato vocal, embora ainda sejam necessários testes mais aprofundados.

Estima-se que a falta de clareza das primeiras análises se deva a fatores como a influência de outras variáveis diferentes do trato vocal, tais como alteração na posição da mandíbula e/ou lábios, correção instintiva do músico de qualquer alteração na frequência da nota, entre outras. Espera-se que tais influências sejam atenuadas na execução do experimento proposto.

## Referências

- ALMEIDA, A. CHOW, R. SMITH, J. WOLFE, J. The kinetics and acoustics of fingering and note transitions on the flute. In: *Journal Acoustic Soc. Am*, 2009
- ARAI, T. The Replication of Chiba and Kajiyama's Mechanical Models of the Human Vocal Cavity. In: *Journal of the Phonetic Society of Japan*, 2001
- CHIBA T. KAJIYAMA M. *The Vowel: Its Nature and Structure*. Tokyo: Tokyo-Kaiseikan Publishing Company Ltd, 1941.
- COLTMAN, J. Mouth resonance effects in the flute. In: *Journal Acoustic Soc. Am*, 1973
- FANT, Gunnar. *Acoustic Theory of Speech Production*. Paris: Mouton De Gruyter, 1970.
- FRITZ, Claudia. *La clarinette et Le clarinettiste: Influence Du conduit vocal sur la production du son*. Tese de doutorado. Paris: Université Paris 6, 2004.
- FRITZ, Claudia. WOLFE, Joe. How do clarinet players adjust the resonances of their vocal tracts for different playing effects? In: *Journal Acoustic Soc. Am.*, 2005
- HENRIQUE, L. *Acústica Musical*. 3. ed. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 2009.
- KENT, R. READ, C. *The Acoustic Analysis of Speech*. 2. ed. Madison: Singular, 2002.
- LAMKIN, Linda Landeros. An Examination of Correlations between Flutists' Linguistic Practices and Their Sound Production on the Flute. In: *Proceedings of the Conference on Interdisciplinary Musicology*, Montreal, 2005.
- LOUREIRO, Maurício Alves. A pesquisa empírica em expressividade musical: métodos e modelos de representação e extração de informação do conteúdo expressivo musical. In: *Opus - Revista da Associação Nacional de Pesquisa e Pós-Graduação em Música / Anppom*, 2006.
- MAEDA, Eri *et al.* Comparing the characteristics of the plate and cylinder type vocal tract models. In: *Acoust. Sci. & Tech*, 2003.
- MOYSE, M. *De la Sonorité – Art e Technique*. Paris: Alphonse Leduc, 1934.
- OLIVEIRA, L. FURLANETE, F. GOLDEMBERG, R. MANZOLLI, J. Modelo Empírico da Sonoridade da Clarineta: Análise e Síntese Sonora. In: *Anais do 5º Congresso / 11ª Convenção Nacional da AES Brasil*, 2007.
- SAWADA, Y. SHIEGEO, S. On the transition between the sounding modes of a flute. In: *Journal Acoustic Soc. Am*, 1980
- SMITH, J.; HENRICH, N.; WOLFE, J. The acoustic impedance of the boehm flute: standard and some non-standard fingerings. In: *Proc. Inst. Acoustics*, 1997.
- SUNDBERG, J. Perception of Singing. In: *Musical Acoustics*, 1979.

TAFFANEL, P.; GAUBERT, P. *Méthode Complete de Flûte*. Paris: Alphonse Leduc, 1958.

WOLFE, J; TARNOPOLSKY, A.Z; FLETCHER, N.H; HOLLENBERG, L.C.L; SMITH, J.  
Some effects of the player's vocal tract and tongue on wind instrument sound. In:  
*Stockholm Music Acoustics Conference*, Estocolmo, 2003.