

A PSICOACÚSTICA DO PITCH

CARLOS DOS SANTOS-LUIZ^{1*}

1: Escola Superior de Educação, Instituto Politécnico de Coimbra
Rua Dom João III - Solum, 3030-329 Coimbra, Portugal

Neurocognition and Language research group, Faculdade de Psicologia e de Ciências da Educação, Universidade do Porto
Rua Alfredo Allen, 4200-135 Porto, Portugal
cluis@esec.pt

Palavras-chave: Pitch, Som puro, Som complexo, Harmónicos resolvidos e não resolvidos, Teoria do lugar, Teoria temporal

Resumo. *A psicoacústica, ramo da psicofísica, é a ciência que estuda a ligação entre os estímulos acústicos e os atributos psicológicos do som. Por meio da relação entre acústica, psicologia, música e fisiologia podemos compreender a percepção do som. Este artigo tem por objetivo explorar a percepção do pitch enquanto fenómeno importante em música. Ao tratar-se de um estudo qualitativo, adotou-se como metodologia a revisão narrativa de literatura sobre o pitch. Como resultados, refira-se que as teorias da audição, do lugar e temporal, estarão na base da explicação do pitch saliente, dado os harmónicos resolvidos e não resolvidos terem influência na sua definição. A informação subjacente aos harmónicos resolvidos será extraída por meio dos mecanismos do lugar e do tempo e a informação associada aos harmónicos não resolvidos será codificada através do mecanismo temporal. Os sons periódicos que possuem harmónicos resolvidos terão um pitch forte e os que têm apenas harmónicos não resolvidos terão um pitch fraco. O pitch é dominado pelos harmónicos resolvidos de categoria mais baixa, compreendendo os primeiros cinco a oito componentes de frequência.*

1. INTRODUÇÃO

O som, ao fazer parte do nosso dia-a-dia, permite-nos viver num ambiente sonoro bastante diversificado. Os sons podem ser produzidos por humanos, animais, máquinas e causas naturais. Geralmente, os sons associados à música e à fala são desejáveis, ao passo que os ruídos não o são [1]. Contudo, o ruído pode ser desejável e apreciável em determinadas circunstâncias (ex., composição musical) [2].

Quando nos referimos a som, o mesmo pode ter uma significação física ou psicofísica. A primeira refere-se à fonte sonora e à propagação do som e a segunda à audição [3][4][5]. Em relação à audição, a psicoacústica explica como respondemos subjetivamente aos sinais sonoros [1][6][7].

Entre as principais sensações auditivas encontramos o pitch. A definição de pitch pode ser associada, ou não, à música [8]. A nível musical, refere-se à sensação auditiva segundo a qual os sons serão ordenados numa escala musical [9]. Assim, o pitch associa-se a melodia, harmonia, tonalidade [6][10], notas na partitura, afinação em contexto de performance musical e sistemas de afinação, entre outros aspetos [6].

O “pitch is the perceptual correlate of sound frequency” [11], isto é, quanto mais elevada for a frequência mais aguda será o pitch e vice-versa [6][10]. Frequência é um termo objectivo (físico) e pitch é um parâmetro subjetivo [3][6][12], sendo que a relação entre ambos não é linear [3][5][13]. Para além desta associação, o pitch relaciona-se também com outros parâmetros físicos, tais como a pressão (nível sonoro), o espetro, a duração [1][6], a envolvente e, ainda, com a presença de outros sons [1].

Em geral, vários sons do meio ambiente têm uma variação periódica de pressão acústica ao longo do tempo, os quais são percebidos como tendo um pitch [6][8]. A percepção do pitch destaca-se pela sua importância no âmbito da música e da fala [11][14]. Uma grande parte dos instrumentos musicais usados na performance musical, ao produzirem variações periódicas de pressão acústica, são

percecionados como tendo um pitch [6][8]. No âmbito da linguagem falada, os sons das vogais também podem ser associados a um pitch [7][8][15]. Os sons que não são completamente periódicos, com maior ou menor inarmonicidade (alguns instrumentos musicais e diferentes tipos de ruído), podem proporcionar igualmente a sensação de pitch [15][16]. Entre os instrumentos musicais, refira-se os de corda beliscada (ex., guitarra), de corda percutida (ex., piano) [16] e os instrumentos de percussão (ex., sinos e carrilhões) [6][16][17]. Os sons que não são de todo periódicos (ex., o ruído de banda larga de amplitude modulada) podem também evocar um pitch [15][18][19]. Contudo, o pitch deste último é fraco e corresponde à frequência de modulação [15]. Existe ainda a situação de alguns sons periódicos não proporcionarem a sensação de pitch, como é o caso do infrassom de 10 Hz [20][21].

Os limites do pitch musical são encontrados para uma frequência fundamental (f_0) compreendida entre cerca de 30 Hz [21] e 5000 Hz [22], apesar da série de frequências audíveis se encontrar sensivelmente entre 20 e 20000 Hz [6]. Os valores 30 e 5000 Hz são coincidentes com os limites inferior e superior do som fundamental do piano, 27.5 e 4186 Hz, respetivamente, os quais abrangem as séries de frequências dos instrumentos musicais de orquestra e das vozes de canto [3][6][12]. O limite de 5000 Hz foi encontrado devido à fraca percepção do pitch musical acima daquele valor [6]. De facto, é até cerca de 5000 Hz que percecionamos um pitch saliente e que nos permite entender melodias [23]. Entre outros aspetos, este fenómeno poderá ter por base o JND (*Just Noticeable Difference*), o qual aumenta bastante acima de cerca de 4000 Hz [24].

Este artigo tem por objetivo examinar a percepção do pitch, baseando-se fundamentalmente na psicoacústica e, ainda, na acústica física, acústica musical e neurociência. Serão abordados fenómenos associados aos sons puros e complexos, destacando-se os mecanismos inerentes à percepção dos sons complexos periódicos ao nível do sistema auditivo periférico. Para tal, recorreu-se à metodologia da revisão narrativa, possibilitando a realização de um artigo de investigação, importante em educação, baseado na análise de livros e artigos científicos publicados em jornais [25] concernentes à percepção do pitch.

2. PITCH DE SONS PUROS

O som puro é constituído apenas por uma frequência, possui uma forma de onda sinusoidal [3][7][20] e produz um pitch claro [19] e forte [15]. Nem a música é composta de sons puros, nem os instrumentos musicais os produzem [7], apesar de alguns instrumentos gerarem aproximações dos mesmos, tais como o flautim [6] e o glockenspiel [26]. Refira-se, contudo, que os sons puros são considerados os “*building blocks of sounds*” [13], já que o som real (som complexo) é constituído por sons sinusoidais [20]. Comparativamente com os sons complexos, os sons puros são especiais, assumindo importância na física e na matemática dos sons [10].

De entre as relações do pitch com outros parâmetros físicos, abordamos as que se estabelecem com a frequência e com a intensidade/pressão (nível sonoro).

2.1. Pitch e frequência

Sabendo que a relação entre pitch e frequência não é linear, constata-se que mudanças iguais em frequência podem não corresponder a alterações idênticas em pitch [3][13][26]. Por exemplo, entre 100 e 200 Hz, assim como entre 200 e 400 Hz, temos um intervalo de oitava. Porém, o intervalo entre 100 e 200 Hz é percecionado como mais amplo do que o intervalo entre 200 e 300 Hz [3]. Como o pitch que percecionamos é proporcional ao logaritmo da frequência [27], as frequências representam-se normalmente numa escala logarítmica [3].

Partindo do facto de o pitch ser um pouco diferente da frequência, os psicólogos construíram uma escala de pitch psicofísica, cuja unidade subjetiva é o mel [1][3]. A escala surge de várias tentativas de encontrar, por um lado, uma escala de pitch [1] e, por outro, uma escala idêntica à dos sons, esta referente ao loudness [12][20][26]. Os psicólogos conceberam a escala mel do pitch solicitando a ouvintes que julgassem sobre a metade da sensação do pitch de um som, comparativamente à de um som de referência [28]. O pitch de 1000 mel corresponde a um som de 1000 Hz a um nível de pressão sonora de 60 dB [28][29]. A escala está organizada de modo a que ao duplicar o número de mel o pitch

também duplica [1][20]. Encontra-se compreendida entre 0 e 3000 mel, aproximadamente, gama esta correspondente à série de frequências audíveis de 20 a 20000 Hz [29]. Embora a escala mel do pitch seja interessante para os psicólogos, em termos musicais parece não ser importante [12][26], dado o intervalo de oitava ser a unidade natural da maioria das escalas musicais [7][12]. Isto, para além de os músicos categorizarem a oitava através de uma relação de frequência (2:1) [1][26][27], assim como outros intervalos [3][26].

2.2. Pitch e intensidade

As várias experiências sobre sons puros de diferentes níveis sonoros têm demonstrado a existência de um efeito limitado do nível sonoro no pitch [10][13][17]. Contudo, as primeiras experiências, como a de Stevens [30], indicaram uma maior dependência relativamente às mais recentes [1].

O trabalho de Stevens [30] permitiu verificar mudanças de pitch de sons puros ao aumentar o nível sonoro de 40 a 90 dB. Observou que nos sons graves o pitch descia, nos sons agudos subia e nos sons de frequência média (1000 a 2000 Hz) havia pouca mudança. Este fenómeno pode ser referido como o efeito de Stevens [1][20] e a sua dimensão depende de pessoa para pessoa [26]. Stevens [30] sugere que a mudança de pitch com o nível sonoro é consequente das ressonâncias do ouvido. Este efeito refere-se a experiências com sons puros e raramente é encontrado em música [6].

É importante que para os músicos, e ouvintes, este fenómeno seja menos perceptível com os sons complexos [1][17], porque a execução musical tornar-se-ia complicada se tal situação se verificasse [1]. Rossing e colegas [1] advertem para uma situação onde a mudança de pitch pode ser evidente. Ao referirem-se ao estudo de Parkin [31], notaram que a mesma pode ocorrer durante o decaimento da reverberação, aquando da audição de música de órgão de tubos em igrejas que possuem elevada reverberação. Depois de um acorde sonoro terminar, o pitch parece aumentar à medida que o nível sonoro diminui.

2.3. Diferença mínima perceptível em pitch

Através da psicofísica é possível determinar a mudança mínima perceptível das sensações (*Just Noticeable Difference* – JND ou *Difference Limen* – DL) tendo por base as características físicas do som, como a intensidade e a frequência [1][6][7]. Podemos julgar dois estímulos como sendo iguais se diferirem menos do que o JND [1].

O JND para o pitch corresponde à mudança mais pequena em frequência detetável por um ouvinte [1][17]. O JND depende da frequência, do nível sonoro, assim como da duração, da rapidez de mudança da frequência e do método usado na medição [1][7][27]. É também natural que os músicos evidenciem um melhor desempenho em relação a pequenas mudanças de frequência comparativamente a não músicos [7][32].

Fastl e Zwicker [33] reportaram que abaixo da frequência de 500 Hz a diferença de 1 Hz, aproximadamente, proporciona uma mudança perceptível em sensação entre dois sons. Em ouvintes altamente treinados, entre cerca de 1000 e 2000 Hz, o JND será 0,2% da frequência, e acima de 4000 Hz, aumenta de modo abrupto [24]. Portanto, o JND aumenta com a frequência [34]. Apesar da discriminação da frequência permanecer mais ou menos constante a baixas frequências, a discriminação do pitch diminui bastante em pitches graves [26].

A avaliação do JND dos sons puros dependerá da teoria temporal e da teoria do lugar. Nesta apreciação, a transição do mecanismo temporal (baixas e médias frequências) para o mecanismo do lugar (altas frequências) será realizada a partir de um limiar de frequência cerca de 8000 Hz, contrariamente ao anteriormente assumido de 4000 a 5000 Hz [35][36].

3. PITCH DE SONS COMPLEXOS

Os sons complexos, ao considerarem-se o somatório de sons puros [13][15][20], podem ser periódicos, no caso de serem constituídos por componentes harmónicos, ou podem ser aperiódicos, quando são

formados por parciais não-harmônicos [13][20]. Os componentes de frequência do som complexo periódico designam-se de harmônicos devido a corresponderem a múltiplos inteiros da f_0 [6][12][26]. Como acima aduzido, a maior parte dos sons musicais corresponde a sons complexos periódicos ou aperiódicos, sendo que a maioria possui um pitch [19]. Nos sons complexos periódicos, o pitch corresponde geralmente à f_0 [1][10][14]. Há situações em que o pitch não é alterado na ausência da f_0 . Este fenómeno é designado de *missing fundamental* (altura virtual) e foi demonstrado por Fletcher [37]. Neste caso, quando se removem os harmônicos inferiores do som, o pitch percebido é muito semelhante ao da fundamental omissa. O fenómeno da altura virtual não é produzido se a componente de frequência mais baixa estiver situada acima de 5000 Hz [15].

3.1. Harmônicos resolvidos e não resolvidos

Quando ouvimos um som complexo periódico de um instrumento musical, tal como da trompete, trombone [26], piano ou clarinete [13], percebemos uma simultaneidade de sons puros (componentes harmônicos ou quase harmônicos) [26] num único som [13]. Os componentes de frequência relacionados harmonicamente tendem a produzir uma fusão sonora [38]. Contudo, se ouvirmos o som com atenção, podemos ser capaz de detetar auditivamente alguns desses harmônicos [13][26][39]. A escuta individual dos harmônicos chama-se audição analítica [13]. A capacidade para distinguir componentes de sons puros no seio de um som complexo pode variar de pessoa para pessoa [26].

Nos sons complexos, as experiências têm demonstrado que os harmônicos aproximadamente abaixo do quinto serão separados e bem distinguidos pelo sistema auditivo (*resolved harmonics*; harmônicos resolvidos) e os que se encontram acima de cerca do oitavo não o serão (*unresolved harmonics*; harmônicos não resolvidos) [6][40][41]. A transição entre harmônicos resolvidos e não resolvidos encontrar-se-á entre os harmônicos cinco e dez, sensivelmente, dependendo de vários factores, tais como do método utilizado para estimar a resolubilidade [13][40][42] e, até certo ponto, da f_0 [13]. As dúvidas causadas pelo método usado tornam o limite superior de resolubilidade incerto, sabendo contudo que quando aumenta o número do harmónico mais baixo a resolubilidade decresce [40]. De certa forma, a resolubilidade permite que os harmônicos sejam escutados de modo separado e define-se como a capacidade de filtragem que a cóclea possui para isolar individualmente sons puros de um som complexo [10][40].

Esta situação pode ser explicada pelas bandas críticas. A largura da banda crítica varia com a frequência central e torna-se mais ampla em frequências mais agudas [3][6][13][42]. Por conseguinte, e no que respeita aos componentes de frequência mais baixa, “*the lower harmonics in a complex tone are ‘separated out’ or ‘resolved’ on the basilar membrane; each gives rise to a distinct localized peak along the tonotopic axis*” [40]. Estes picos individuais surgem, porque naquela região de frequência os filtros são mais estreitos relativamente ao espaço existente entre os harmônicos sucessivos, sendo que as formas de onda dos harmônicos assumem uma configuração idêntica à dos sons puros [19][43]. Quanto aos componentes de frequência mais elevada, como as larguras da banda crítica dos filtros auditivos se vão tornando mais amplas e o espaço entre os harmônicos vai diminuindo à medida que o número de harmónico aumenta [13][19][43], os “*higher-order harmonics begin to interact within single auditory filters and eventually become unresolved*” [42]. Neste caso, os picos individuais desaparecem do padrão de excitação [19][40]. Do mesmo modo, a forma de onda deixa de se assemelhar a um som puro para passar a reproduzir uma onda complexa, como reflexo da interação dos vários harmônicos [19].

Apesar do exposto, e como acima referido, na audição de uma nota de um instrumento musical não ouvimos os harmônicos mais graves separadamente, mas apenas um único som com um pitch correspondente à f_0 [13][26]. A este tipo de percepção designa-se de audição sintética [13]. A resolubilidade terá também responsabilidade na audição do pitch de um som como um todo [10], sendo que os sons complexos constituídos por sons puros resolvidos terão um pitch forte, ao passo que os que possuem apenas sons puros não resolvidos terão um pitch fraco [10][44].

3.2. Região de domínio

Sabendo, por um lado, que podemos ter a percepção de pitch na presença de sons com componentes ligeiramente inarmônicos e, por outro, a sensação de pitch na ausência da f_0 (altura virtual), foram realizadas experiências no sentido de identificar os componentes de frequência que seriam mais importantes na determinação do pitch.

Vários estudos observaram a existência de uma região de domínio onde se enquadram os componentes que mais influenciam o pitch (ex., [45][46][47][48][49][50]). Dai [47] revelou que, na presença dos doze primeiros harmônicos de um estímulo, a percepção é concedida principalmente pelos componentes de ordem inferior (harmônicos resolvidos), no âmbito da região de domínio. Porém, à medida que os componentes mais baixos vão sendo removidos daquela região, a percepção dependerá dos componentes mais baixo e elevado do espetro.

De facto, e como já aventado, são os componentes harmônicos resolvidos mais graves que influenciam o pitch mais saliente [10][19][44]. Plack e Oxenham [13] referem que, apesar dos diferentes resultados entre os vários estudos, há um consenso generalizado de que os harmônicos dominantes estarão compreendidos entre o primeiro e o quinto harmónico, sendo que o número de harmónico dominante tende a decrescer quando aumenta a f_0 . Para sons com f_0 acima de 1400 Hz, o harmónico dominante corresponde ao componente da frequência fundamental [48]. No que respeita a sons cujas frequências fundamentais estão compreendidas, sensivelmente, entre 1400 e 100 Hz, os harmónicos dominantes encontrar-se-ão entre o segundo e o sexto componentes de frequência [48][49]. Portanto, os harmónicos não resolvidos terão pouca contribuição na determinação do pitch [13][19], pelo menos no que se refere a frequências fundamentais de 100 Hz e acima desta [13][49]. Oxenham [19] enfatiza o facto de muitos dos sons existentes no mundo, tais como os dos instrumentos musicais, possuírem tendencialmente mais energia nas frequências graves em relação às agudas. Para o autor,

“makes sense that the auditory system would rely on the lower numbered harmonics to determine pitch, as these are the ones that are most likely to be audible. Also, resolved harmonics (...) are much less susceptible to the effects of room reverberation than are unresolved harmonics”.

4. TEORIAS DA AUDIÇÃO

A codificação do pitch no sistema auditivo periférico baseia-se em duas teorias clássicas, a teoria do lugar (espectral) e a teoria temporal [5][10][11][17][42]. Uma terceira possibilidade congrega os dois tipos de informação e designa-se modelo lugar-tempo [43][51]. A percepção do pitch dos sons puros e complexos dependerá destas três teorias [43]. Neste trabalho, referir-nos-emos especialmente aos sons complexos.

A teoria do lugar está relacionada com a análise de frequência realizada na membrana basilar, em que lugares distintos da membrana são estimulados por diferentes componentes de frequência do som [6]. Para calcular o pitch, o sistema auditivo periférico recorre aos componentes harmónicos resolvidos de ordem inferior [52][53]. Quanto à teoria temporal, a mesma tem por base o timing dos potenciais de ação gerados no nervo auditivo [43], fazendo uso da autocorrelação [17][54]. Esta informação pode ser obtida tanto a partir dos harmónicos resolvidos como dos não resolvidos [14][19]. A resolubilidade tem um papel reduzido nesta teoria [42]. O pitch dos sons complexos que contêm apenas harmónicos agudos não resolvidos será codificado com base na envolvente temporal, no caso dos harmónicos serem muito agudos, e a partir da estrutura temporal fina, no caso do harmónico mais grave se encontrar entre o nono e décimo terceiro harmónico [35].

Cada uma das teorias tem aspetos importantes [43] e a distinção entre elas é difícil [19][43]. As tentativas efetuadas no sentido de as diferenciar têm-se centrado nos limites inerentes à fisiologia da cóclea e do nervo auditivo [19]. Para testar as teorias, Oxenham [19] refere, como exemplo, os limites de seletividade da frequência e os possíveis limites da *phase locking*. Quando se escuta um pitch e

todos os harmônicos são não resolvidos, o pitch não dependerá em exclusivo da teoria do lugar. Quando se ouve um pitch, no caso de todos os harmônicos resolvidos estarem acima da phase locking, a teoria temporal não contribuirá na percepção do pitch. Não é possível, contudo, argumentar de forma plausível favorecendo uma teoria em relação a outra [43].

Em complemento ao mencionado, refira-se que a teoria temporal será mais importante aos sons abaixo de 5000 Hz e a teoria do lugar aplicar-se-á principalmente aos sons acima de 5000 Hz [6][17][35]. Como os processos neurais não acompanham intervalos de tempo inferiores a cerca de 0,0002 segundos, o mesmo é dizer 5000 Hz (phase locking) [17], a transição do mecanismo temporal para o mecanismo do lugar far-se-á por volta dos 4000-5000 Hz. Estes dados são sugeridos a partir do intervalo musical e da percepção da melodia [35].

5. CONCLUSÕES

O pitch dos sons complexos periódicos é importante no que se refere à percepção da música e da fala [11][14]. Num contexto de performance e audição musical, a percepção do som complexo como uma entidade sonora é designada de audição sintética. Em ambiente experimental, a escuta individual de harmônicos é chamada de audição analítica [13]. A estes últimos harmônicos chama-se habitualmente de harmônicos resolvidos (produzem picos distintos na membrana basilar) e correspondem aos componentes de frequência mais baixa. Os harmônicos que não podem ser escutados separadamente (não produzem picos distintos no padrão de excitação da membrana) possuem frequências mais elevadas e são designados habitualmente de harmônicos não resolvidos [43].

Com o intuito de explicar a forma como o pitch é extraído a partir dos sons complexos, têm sido propostas teorias da audição [10][47], cujas principais são a teoria do lugar e a teoria temporal [11]. Embora o pitch dos sons complexos periódicos tenha correspondência geralmente com a f_0 [11][14], a informação para a sua percepção será conduzida, em teoria, pelos diferentes componentes constituintes do som. A informação transmitida ao sistema nervoso central será realizada, no entanto, de maneiras distintas por estes componentes [47]. No que diz respeito aos componentes harmônicos resolvidos de ordem inferior, a informação da f_0 será extraída por meio da teoria do lugar [14][52][53] e da teoria temporal [14][47]. Quanto aos componentes harmônicos não resolvidos de ordem superior, a informação do pitch será codificada temporalmente [14], seja a partir da periodicidade na envolvente temporal, seja por meio da estrutura temporal fina da forma de onda do output [35][47].

Pelo mencionado, é possível inferir que os componentes individuais do som terão a sua importância na percepção do pitch [44][47]. A existência do pitch e a força do mesmo dependem do conteúdo espectral [15][44]. Portanto, a sensação de pitch de um som pode ser classificada como sendo fraca ou forte, cujos extremos podem ser encontrados entre o ruído passa alto com baixas frequências de corte (não proporciona pitch) e o som puro (o pitch mais saliente). A força do pitch dos sons complexos aproxima-se da dos sons puros, mas a evocada por diferentes tipos de ruído é muito menor. Sintetizando, os sons que possuem espectros de linha [15] e que são perfeitamente harmônicos [38] provocam geralmente um pitch forte, ao passo que os sons caracterizados por espectros contínuos permitem perceber um pitch fraco [15].

O pitch que percebemos como mais saliente [10][19], que é discriminável com precisão [10] e que associamos à música [19], provém dos harmônicos de ordem inferior [10][19][44]. Aqui, a teoria do lugar terá um papel relevante [19]. No que concerne a sons que são constituídos apenas por harmônicos de ordem superior [44] e a certos ruídos, como o ruído de banda larga de amplitude modulada (não possui picos espectrais), o pitch é mais fraco. Nestes dois últimos casos, a informação será extraída por meio da teoria temporal [19].

Coletivamente, refira-se que o pitch do som complexo periódico é definido principalmente pelos componentes resolvidos de ordem mais baixa [10][19], compreendendo os primeiros cinco a oito harmônicos [19].

A explicação sobre a percepção do pitch vai para além dos estudos cuja base é psicofisiológica. Recentemente, investigação na área da neurociência tem demonstrado que o processamento do pitch

ocorre também no sistema nervoso central. Isto é, a codificação e o processamento iniciados na membrana basilar [14] e no nervo auditivo [55][56] continuam num patamar mais elevado, ao nível do tronco cerebral [14][55] e do cérebro [14][55][57]. Bidelman [55] refere que *“while cortical mechanisms are no doubt critical to the perception, production, and enjoyment of music, the contribution of subcortical structures implicates a more integrated, hierarchically organized network underlying music processing within the brain”*.

REFERÊNCIAS

- [1] Rossing, T. D.; Moore, F. R.; Wheeler, P. A., 2002. “The Science of Sound” (3rd ed.), Addison-Wesley, San Francisco, CA.
- [2] Rakowski, A., 2014. “Noise as music”, *Archives of Acoustics* 21, 267 – 274.
- [3] Everest, F. A.; Pohlmann, K. C., 2015. “Master Handbook of Acoustics” (6th ed.), McGraw-Hill, New York, NY.
- [4] Sethares, W. A., 2005. “Tuning, Timbre, Spectrum, Scale” (2nd ed.), Springer, London, UK.
- [5] Yost, W. A., 2006. “Fundamentals of Hearing: An Introduction” (5th ed.), Academic Press, San Diego, CA.
- [6] Howard, D. M.; Angus, J. A. S., 2009. “Acoustics and Psychoacoustics” (4th ed.), Focal Press, Oxford, UK.
- [7] Roederer, J. G., 2008. “The Physics and Psychophysics of Music: An Introduction” (4th ed.), Springer, New York, NY.
- [8] Plack, C. J.; Oxenham, A. J., 2005. “Overview: The Present and Future of Pitch”, *Pitch: Neural Coding and Perception*, Springer, New York, NY.
- [9] American Standards Association., 1960. “American Standard Acoustical Terminology. ASA S1.1-1960”, Author, New York, NY.
- [10] de Cheveigné, A., 2010. “Pitch Perception”, *The Oxford Handbook of Auditory Science: Hearing*, Oxford University Press, Oxford, UK.
- [11] Saeedi, N. E.; Blamey, P. J.; Burkitt, A. N.; Grayden, D. B., 2016. “Learning pitch with STDP: A computational model of place and temporal pitch perception using spiking neural networks”, *PLoS Computational Biology* 12, e1004860.
- [12] Backus, J., 1977. “The Acoustical Foundations of Music” (2nd ed.), Norton, New York, NY.
- [13] Plack, C. J.; Oxenham, A. J., 2005. “The Psychophysics of Pitch”, *Pitch: Neural Coding and Perception*, Springer, New York, NY.
- [14] Plack, C. J.; Barker, D.; Hall, D. A., 2014. “Pitch coding and pitch processing in the human brain”, *Hearing Research* 307, 53 – 64.
- [15] Fastl, H.; Zwicker, E., 2007. “Pitch and Pitch Strength”, *Psychoacoustics: Facts and Models* (3rd ed.), Springer, Berlin, Germany.
- [16] Leipp, E., 2011. “Acoustique et Musique”, Presses de l’Ecole des Mines, Paris, France.
- [17] Heller, E. J., 2013. “Why You Hear What You Hear: An Experiential Approach to Sound, Music, and Psychoacoustics”, Princeton University Press, New Jersey, NJ.
- [18] Burns, E. M.; Viemeister, N. F., 1981. “Played-again SAM: Further observations on the pitch of amplitude-modulated noise”, *The Journal of the Acoustical Society of America* 70, 1655 – 1660.
- [19] Oxenham, A. J., 2013. “The Perception of Musical Tones”, *The Psychology of Music* (3rd ed.), Academic Press, London, UK.

- [20] Henrique, L. L., 2014. "Acústica Musical" (5ª ed.), Fundação Calouste Gulbenkian, Lisboa, Portugal.
- [21] Pressnitzer, D.; Patterson, R. D.; Krumbholz, K., 2001. "The lower limit of melodic pitch", *The Journal of the Acoustical Society of America* 109, 2074 – 2084.
- [22] Semal, C.; Demany, L., 1990. "The upper limit of 'musical' pitch", *Music Perception: An Interdisciplinary Journal* 8, 165 – 175.
- [23] Attneave, F.; Olson, R. K., 1971. "Pitch as a medium: A new approach to psychophysical scaling", *The American Journal of Psychology* 84, 147 – 166.
- [24] Moore, B. C., 1973. "Frequency difference limens for short-duration tones", *The Journal of the Acoustical Society of America* 54, 610 – 619.
- [25] Rother, E. T., 2007. "Revisión sistemática X revisión narrativa", *Acta Paulista de Enfermagem* 20, 5 – 6.
- [26] Campbell, M.; Greated, C., 2001. "The Musician's Guide to Acoustics", Oxford University Press, New York, NY.
- [27] Sethares, W. A., 2005. "Tuning, Timbre, Spectrum, Scale" (2nd ed.), Springer, London, UK.
- [28] Stevens, S. S.; Volkman, J.; Newman, E. B., 1937. "A scale for the measurement of the psychological magnitude pitch", *The Journal of the Acoustical Society of America* 8, 185 – 190.
- [29] Stevens, S. S.; Volkman, J., 1940. "The relation of pitch to frequency: A revised scale", *The American Journal of Psychology* 53, 329 – 353.
- [30] Stevens, S. S., 1935. "The relation of pitch to intensity", *The Journal of the Acoustical Society of America* 6, 150 – 154.
- [31] Parkin, P. H., 1974. "Pitch change during reverberant decay", *Journal of Sound and Vibration* 32, 530.
- [32] Micheyl, C.; Delhommeau, K.; Perrot, X.; Oxenham, A. J., 2006. "Influence of musical and psychoacoustical training on pitch discrimination", *Hearing Research* 219, 36 – 47.
- [33] Fastl, H.; Zwicker, E., 2007. "Just-noticeable Sound Changes", *Psychoacoustics: Facts and Models* (3rd ed.), Springer, Berlin, Germany.
- [34] Sek, A.; Moore, B. C., 1995. "Frequency discrimination as a function of frequency, measured in several ways", *The Journal of the Acoustical Society of America* 97, 2479 – 2486.
- [35] Moore, B. C., 2014. "Pitch: Mechanisms Underlying the Pitch of Pure and Complex Tones", *Perspectives on Auditory Research*, Springer Handbook of Auditory Research, New York, NY.
- [36] Moore, B. C.; Ernst, S. M., 2012. "Frequency difference limens at high frequencies: Evidence for a transition from a temporal to a place code", *The Journal of the Acoustical Society of America* 132, 1542 – 1547.
- [37] Fletcher, H., 1924. "The physical criterion for determining the pitch of a musical tone", *Physical Review* 23, 427 – 437.
- [38] Thompson, W. F., 2013. "Intervals and Scales", *The Psychology of Music* (3rd ed.), Academic Press, London, UK.
- [39] Helmholtz, H. F., 1885/1954. "On the Sensations of Tone as a Physiological Basis for the Theory of Music", Dover, New York, NY.
- [40] Moore, B. C.; Gockel, H. E., 2011. "Resolvability of components in complex tones and implications for theories of pitch perception", *Hearing Research* 276, 88 – 97.

- [41] Plomp, R., 1964. "The ear as a frequency analyzer", *The Journal of the Acoustical Society of America* 36, 1628 – 1636.
- [42] Bernstein, J. G.; Oxenham, A. J., 2003. "Pitch discrimination of diotic and dichotic tone complexes: Harmonic resolvability or harmonic number?" *The Journal of the Acoustical Society of America* 113, 3323 – 3334.
- [43] Oxenham, A. J., 2008. "Pitch perception and auditory stream segregation: Implications for hearing loss and cochlear implants", *Trends in Amplification* 12, 316 – 331.
- [44] Laudanski, J.; Zheng, Y.; Brette, R., 2014. "A structural theory of pitch", *eNeuro* 1, ENEURO-0033.
- [45] Bilsen, F. A., 1973. "On the influence of the number and phase of harmonics on the perceptibility of the pitch of complex signals", *Acta Acustica united with Acustica* 28, 60 – 65.
- [46] Dai, H., 2000. "On the relative influence of individual harmonics on pitch judgment", *The Journal of the Acoustical Society of America* 107, 953 – 959.
- [47] Dai, H., 2010. "Harmonic pitch: Dependence on resolved partials, spectral edges, and combination tones", *Hearing Research* 270, 143 – 150.
- [48] Plomp, R., 1967. "Pitch of complex tones", *The Journal of the Acoustical Society of America* 41, 1526 – 1533.
- [49] Moore, B. C.; Glasberg, B. R.; Peters, R. W., 1985. "Relative dominance of individual partials in determining the pitch of complex tones", *The Journal of the Acoustical Society of America* 77, 1853 – 1860.
- [50] Ritsma, R. J., 1967. "Frequencies dominant in the perception of the pitch of complex sounds", *The Journal of the Acoustical Society of America* 42, 191 – 198.
- [51] Cedolin, L.; Delgutte, B., 2010. "Spatiotemporal representation of the pitch of harmonic complex tones in the auditory nerve", *The Journal of Neuroscience* 30, 12712 – 12724.
- [52] Goldstein, J. L., 1973. "An optimum processor theory for the central formation of the pitch of complex tones", *The Journal of the Acoustical Society of America* 54, 1496 – 1516.
- [53] Terhardt, E., 1974. "Pitch, consonance, and harmony", *The Journal of the Acoustical Society of America* 55, 1061 – 1069.
- [54] Meddis, R.; O'Mard, L., 1997. "A unitary model of pitch perception", *The Journal of the Acoustical Society of America* 102, 1811 – 1820.
- [55] Bidelman, G. M., 2013. "The role of the auditory brainstem in processing musically relevant pitch", *Frontiers in Psychology* 4, Article 264.
- [56] Bidelman, G. M.; Heinz, M. G., 2011. "Auditory-nerve responses predict pitch attributes related to musical consonance-dissonance for normal and impaired hearing", *The Journal of the Acoustical Society of America* 130, 1488 – 1502.
- [57] Allen, E. J.; Burton, P. C.; Olman, C. A.; Oxenham, A. J., 2016. "Representations of pitch and timbre variation in human auditory cortex", *Journal of Neuroscience*, 2336-16.