

# Relação entre as características físicas do som e efeitos percetivos

Filipe Vaz 100520

Projeto Integrador de 1º Ciclo em Engenharia Física Tecnológica

Orientado por Isabel Pires e João Seixas

## Resumo

Neste trabalho analisaram-se dois sons distintos. Compararam-se as características físicas dos dois e de seguida fez-se uma análise mais detalhada dos parciais que constituem cada um. De seguida, realizaram-se correspondências entre sensações percetivas e as relações freqüenciais dos parciais. Após isso, cruzou-se os resultados obtidos com dados anteriormente recolhidos em estudos sobre percepção desses mesmos sons. Por fim, manipularam-se os sons de forma a compará-los.

**Palavras-chave:** percepção, dissonância, sensações, batimentos, bandas críticas, parciais

## I Objetivos

Neste trabalho visou-se estudar e caracterizar fisicamente alguns sons, e posteriormente cruzar os resultados dessa caracterização com os dados anteriormente recolhidos em estudos sobre a percepção desses mesmos sons. Por fim, manipularam-se os sons de forma a comparar as suas características físicas para compreender se podemos associar determinada característica física a uma determinada sensação auditiva.

## II Introdução Teórica

### II.1 Consonância e Dissonância

Consonância e dissonância são conceitos que descrevem a relação entre sons audíveis. Dependendo do contexto, a distinção entre sons consonantes e sons dissonantes pode ser feita de maneiras diferentes. No contexto musical, a distinção é geralmente subjetiva, convencional, cultural e dependente do gênero musical ou período temporal. Nomeadamente, na cultura ocidental é comum associar-se consonância a sensações como “agradável” e “tolerável”, e dissonância a sensações como “desagradável” e “intolerável”.

Devido à falta de objetividade na distinção entre os dois conceitos no contexto musical, optaremos por explorar este tema no contexto psicoacústico, na subsecção II.3.2. Em particular, serão descritas as sensações associadas à relação freqüencial entre duas ondas sinusoidais. Antes de o fazermos, contudo, é necessário estar familiarizado com alguns conceitos que serão introduzidos na subsecções abaixo.

### II.2 Parciais, Interferência de Ondas e Batimentos

Em acústica, um som puro ou *parcial* corresponde a um som constituído por uma única frequência. Se traçarmos a amplitude de um parcial em função do tempo, a forma da onda corresponderá a uma onda sinusoidal, semelhante à ilustrada no gráfico seguinte [11]:

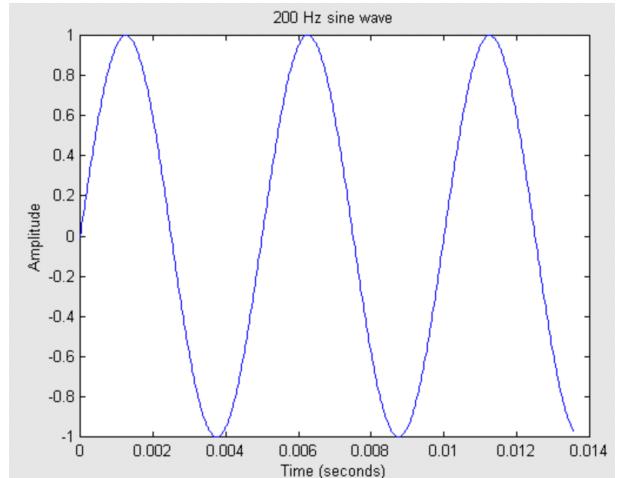
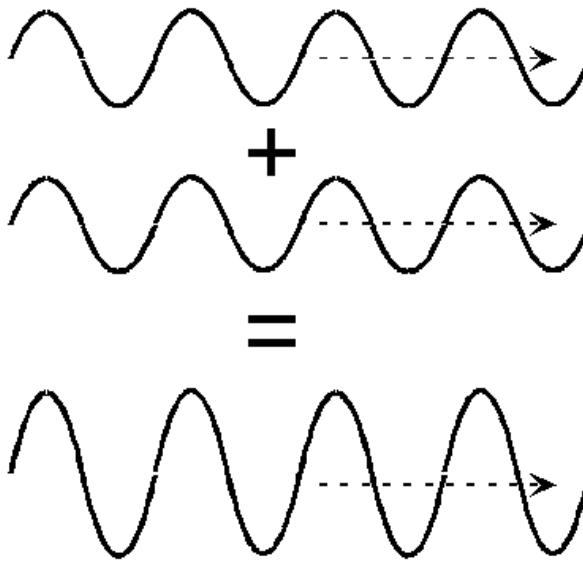
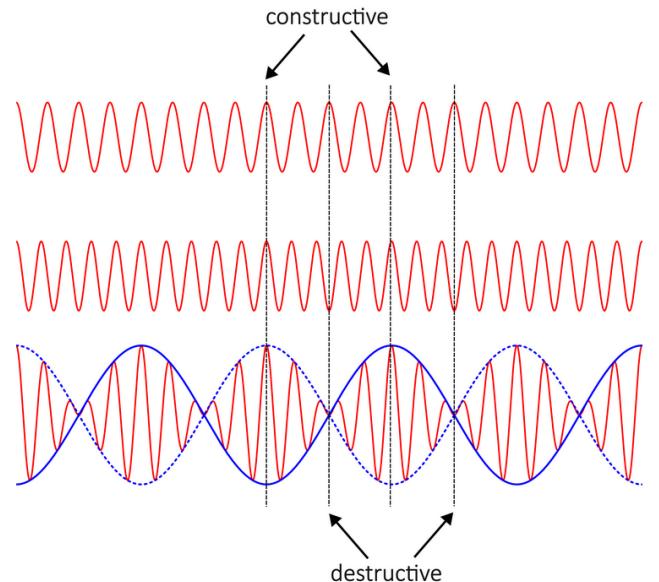


Figura 1: Onda Sinusoidal de frequência 200 Hz [8]

Consideremos agora um som complexo constituído por dois parciais iguais, ou seja, duas ondas sinusoidais com a mesma amplitude, frequência e fase. Se, em cada instante de tempo, somarmos as amplitudes das duas ondas, a onda resultante terá a mesma forma mas o dobro da amplitude. Este fenômeno chama-se *interferência construtiva* e encontra-se representado no seguinte esquema:

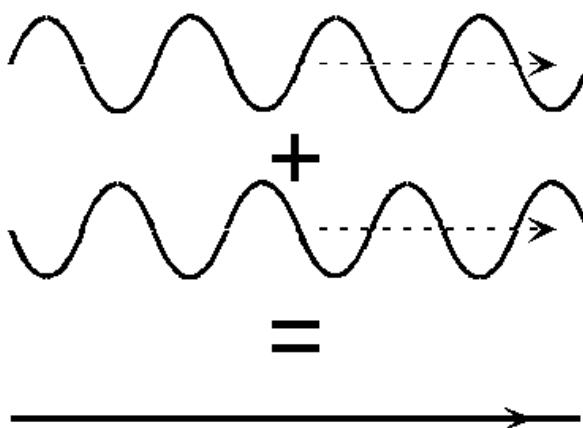


**Figura 2:** Interferência Construtiva de Ondas [1]



**Figura 4:** Batimentos [12]

Alternativamente, se essas mesmas ondas tiverem fases opositas, as somas das respetivas amplitudes em cada instante de tempo serão todas 0. Este fenómeno chama-se *interferência destrutiva* e está esquematizado abaixo:



**Figura 3:** Interferência Destrutiva de Ondas [1]

Agora consideremos duas ondas com frequências diferentes. Esta diferença implica que as *cristas* e/ou os *vales* das respetivas ondas não coincidirão em todos os instantes, contrariamente às duas situações anteriores. Consequentemente, se repetirmos o processo de soma das amplitudes, a onda resultante terá uma forma diferente das anteriores. Na figura 4 estão representadas os dois parciais, seguidos da onda resultante. Observando a mesma, é possível verificar três comportamentos distintos: instantes em que as ondas estão em fase (interferência construtiva); instantes em que as ondas estão em oposição de fase (interferência destrutiva); instantes em que as ondas nem estão em fase nem em oposição de fase.

A contribuição de cada um destes comportamentos faz com que o módulo da amplitude da onda resultante varie com o tempo, evidenciado pela curva azul. Nos instantes em que ocorre interferência construtiva, a amplitude da onda resultante é máxima. Analogamente, nos instantes em que ocorre interferência destrutiva, a amplitude da onda resultante é nula. Para além disso, o intervalo de tempo entre dois máximos (ou dois nulos) é constante. Se a diferença entre as frequências dos parciais for pequena, ao reproduzirmos este som, verificaremos que o volume do mesmo vai oscilando ao longo do tempo. Em acústica, este fenômeno é designado de *batimentos* e a sua frequência pode ser calculada através da seguinte expressão:

$$f_{\text{batimentos}} = \Delta f = |f_2 - f_1| \quad (1)$$

onde  $f_1$  e  $f_2$  são as frequências das ondas componentes e  $\Delta f$  é a diferença entre as duas. [2]

### II.3 Equalizador e Filtros

Equalização é um tipo de processamento de áudio frequentemente usado em produção musical. A função de um equalizador é ajustar o volume de uma ou mais frequências presentes num sinal de áudio. Para chegar ao resultado pretendido, o equalizador utiliza filtros, que são funções que amplificam ou atenuam uma determinada gama de frequências [6]. As descrições de cada tipo de filtro, juntamente com a suas representações gráficas, encontram-se nos tópicos e na figura 5 abaixo [6]:

- Filtro passa-baixo/passa-alto — deixa passar somente as frequências que estiverem abaixo/acima da *frequência de cutoff*, atenuando as restantes;
- Filtro *passa-banda* — deixa passar somente as frequências que estiverem dentro de uma dada gama (ou *banda*), atenuando as restantes. A banda é definida através da frequência central e da *largura de banda* (medida em intervalo de frequências);
- Filtro de *rejeição-de-banda* — atenua as frequências que estiverem dentro de uma dada banda, deixando passar as restantes. Análogo ao filtro *passa-banda* mas com o funcionamento oposto.

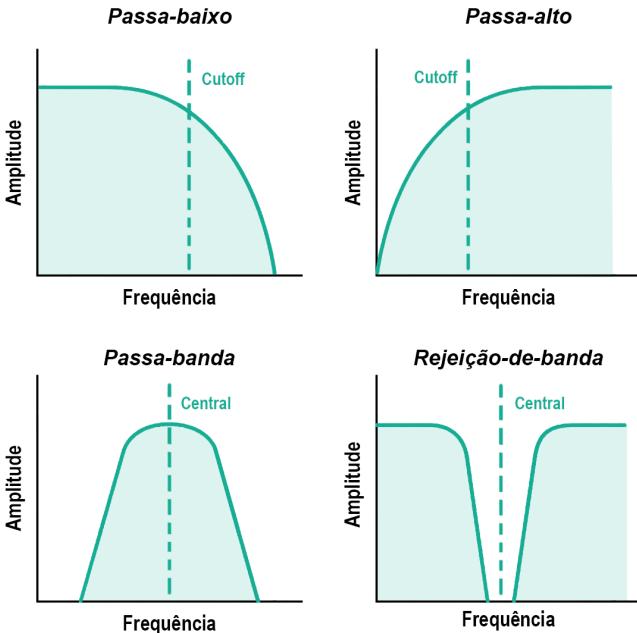


Figura 5: Vários tipos de filtros (adaptado de [5])

Tal como no caso dos filtros, existem vários tipos de equalizadores, entre os quais o *Equalizador Gráfico*, que será mencionado novamente na subsecção III.1.4. Este equalizador é constituído por vários filtros passa-banda/rejeição-de-banda, o que permite a amplificação/atenção de várias bandas de frequências em simultâneo. O número de bandas depende do equalizador. [6]

### II.3.1 Bandas Críticas e Modelo de Fletcher

O conceito de *bandas críticas* foi proposto pelo físico norte-americano Harvey Fletcher. Segundo Fletcher, o sistema auditivo processa sons através de filtros passa-banda relativamente estreitos [4]. É importante realçar que este modelo é somente teórico. Uma esquematização simplificada deste modelo encontra-se representada a seguir:

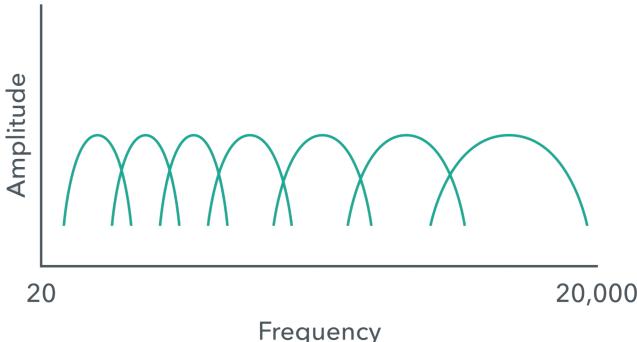


Figura 6: Simplificação do Modelo de Bandas Críticas [10]

Tal como a figura sugere, a largura de cada banda não é constante, mas sim dependente da sua frequência central. Esta dependência pode ser visualizada no gráfico 7. O importante a reter é que, para frequências abaixo de 500 Hz, a largura da banda é aproximadamente 100 Hz, enquanto que para frequências acima de 500 Hz, é cerca de 20% do valor da frequência central. Estas aproximações encontram-se representadas a tracejado.

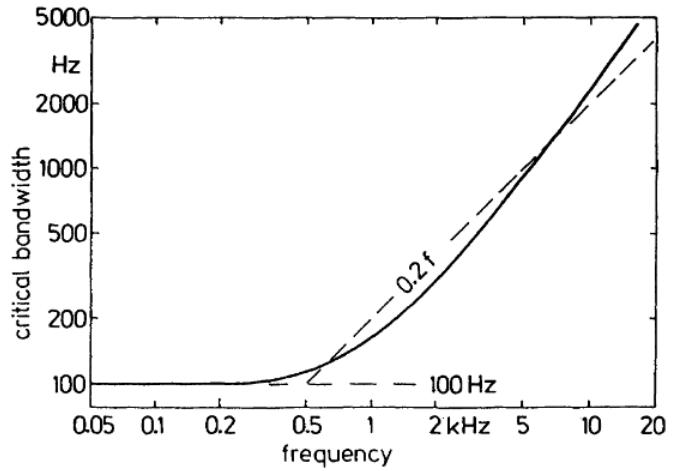
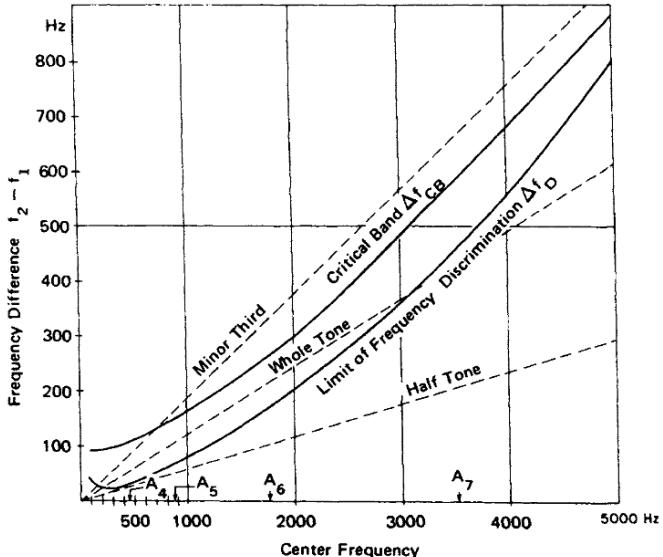


Figura 7: Largura da Banda Crítica em função da frequência central [4]

### II.3.2 Descrição das sensações associadas à relação freqüencial entre duas ondas sinusoidais

Voltemos à situação de duas ondas sinusoidais iguais descrita na secção II.2, mas vamos assumir que mantemos uma das frequências,  $f_1$ , constante enquanto aumentamos a outra,  $f_2$ . No início, ambas as frequências são iguais ( $\Delta f = 0$ ) e percecionamos um único som. Ao aumentarmos ligeiramente  $f_2$ , continuamos a percecionar um único som mas com uma frequência ligeiramente acima da original (correspondente à *frequência intermédia*  $f = \frac{f_1+f_2}{2}$ ) e com uma amplitude modulada pelos batimentos, com frequência  $f_{batimentos} = \Delta f$ . Desde que  $\Delta f$  seja igual ou inferior a cerca de 10 Hz, os batimentos são claramente percecionados. Quando  $\Delta f$  excede cerca de 15 Hz, a percepção dos batimentos desaparece, dando lugar a uma sensação de “rugoso”, “áspero” ou “grosseiro”. Se  $\Delta f$  ultrapassar o *limite de discriminação de frequências*,  $\Delta f_D$ , passamos a percecionar os dois sons, de frequências  $f_1$  e  $f_2$ , juntamente com a sensação rugosa anteriormente mencionada. Só quando  $\Delta f$  ultrapassa a largura da banda crítica,  $\Delta f_{CB}$ , é que esta sensação desaparece e os dois sons soam suaves. Esta largura da banda crítica é dependente da sua frequência central, tal como referido na subsecção II.3.1; neste caso a frequência a ser considerada é a frequência intermédia dos dois sons. [9]

Por fim, é importante realçar que a transição de batimentos, para rugosidade e para suavidade não é abrupta mas sim gradual. A largura da banda crítica serve apenas como uma aproximação de quando esta transição ocorre [9]. Abaixo encontra-se um gráfico que serve como uma sistematização das informações mais importantes desta subsecção:



**Figura 8:** Limite de discriminação de frequências e largura da banda crítica em função da frequência central [9]

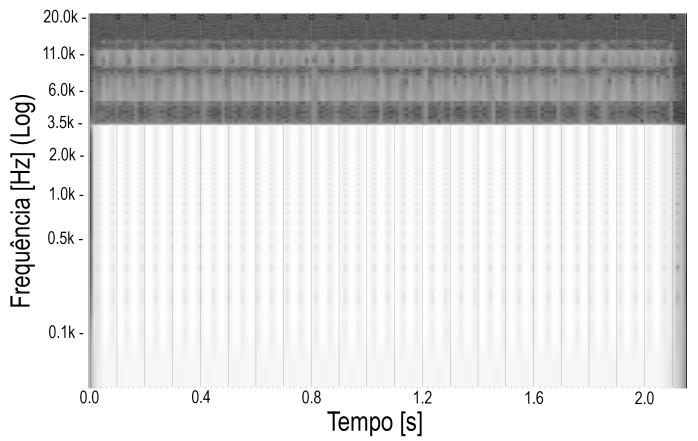
Na figura 8 podemos observar a curva da largura da banda crítica em função da frequência central, igual à que está representada na figura 7. Para além disso, podemos observar a curva do limite de discriminação de frequências. Esta indica-nos, para dois sons com uma dada frequência intermédia/central, qual é a diferença de frequência entre os dois a partir da qual deixam de ser percecionados como apenas um som. Por exemplo, se considerarmos dois sons cuja frequência intermédia é 2 kHz, a diferença de frequência entre os dois terá de ser maior ou igual a 200 Hz para que estes deixem de ser percecionados como um único som.

### III Análise e Discussão dos Resultados

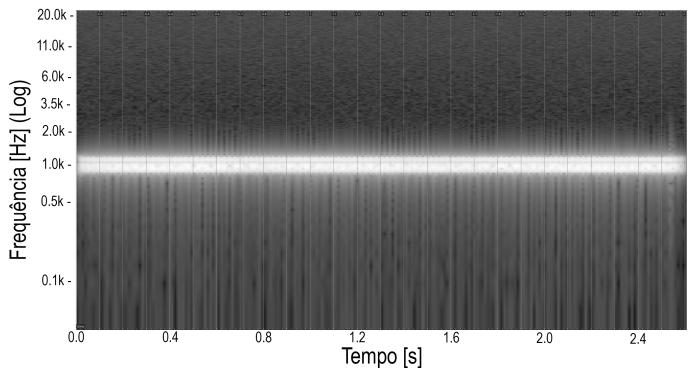
#### III.1 Análise das características dos sons

Neste trabalho, foram analisados 2 sons identificados por “SEQR7” e “SEQR12”, respetivamente. Estes sons foram escolhidos devido à sua relativa simplicidade, de forma facilitar a sua análise. Os sons “SEQR7” e “SEQR12” têm a duração aproximada de 2.1 e 2.6 segundos, respetivamente.

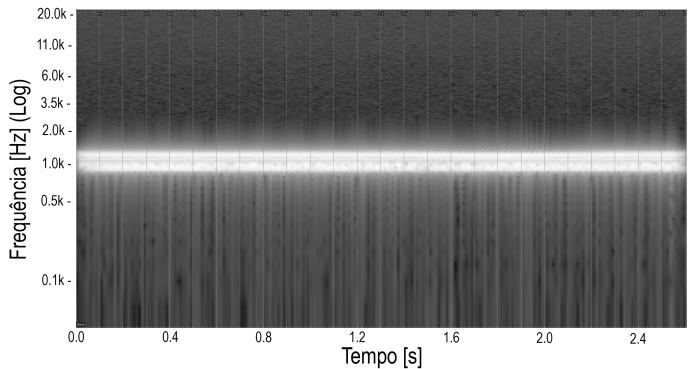
O som “SEQR12” é *estéreo*, ou seja, é constituído por dois canais de áudio. Isto significa que, ao ser reproduzido por auscultadores, os canais *esquerdo* e *direito* reproduzirão sons diferentes (embora, neste caso, muito semelhantes). O som “SEQR7”, pelo contrário, é *mono*. Ou seja, é constituído por um único canal de áudio, e ao ser reproduzido por auscultadores, ambos os canais reproduzirão o mesmo som. Abaixo encontra-se o espetrograma do som “SEQR7” na figura 9, seguido dos espetroogramas dos canais *esquerdo* e *direito* do som “SEQR12” nas figuras 10 e 11, respetivamente. Em todos os espetroogramas, as frequências estão em escala logarítmica. A escala de cores, na qual branco representa o valor máximo e preto representa o mínimo, corresponde à amplitude em dB. Em todos os espetroogramas, a escala de cores está normalizada.



**Figura 9:** Espetrograma “SEQR7”



**Figura 10:** Espetrograma “SEQR12” Canal *Esquerdo*



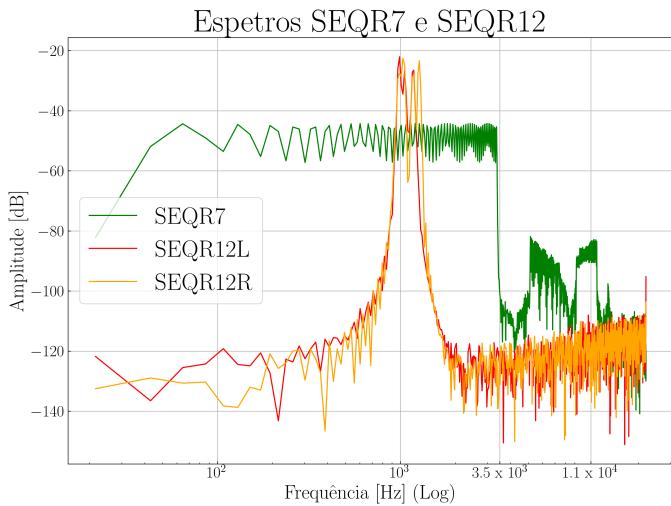
**Figura 11:** Espetrograma “SEQR12” Canal *Direito*

Relativamente ao som “SEQR7”, em primeira análise da figura 9 é possível verificar que as frequências entre 0 e 3.5 kHz apresentam todas a mesma amplitude, e esta mantém-se aproximadamente constante até ao final. Igualmente, as frequências entre 6 e 11kHz apresentam todas aproximadamente a mesma amplitude (com exceção de uma gama estreita a meio), e esta mantém-se aproximadamente constante. Por fim, a amplitude da gama 0-3.5kHz é superior à amplitude da gama 6-11kHz.

No caso do som “SEQR12” torna-se imediatamente óbvio que os dois canais de áudio são praticamente idênticos. Tanto na figura 10 como na 11, é possível verificar que a gama estreita de frequências em torno de 1kHz apresenta toda a mesma amplitude, e esta mantém-se aproximadamente constante até ao final. Para além disso, a amplitude desta gama é superior às restantes frequências.

Para corroborar as análises feitas, podemos ainda observar o espetro de frequências de cada um dos sons, representado

na figura 12. Na figura encontram-se um espetro para o som “SEQR7” e dois para o som “SEQR12”, um para cada canal de áudio. Os dados utilizados para a elaboração de cada um dos espetros foram obtidos analizando um curto intervalo de tempo de cada som. Uma vez que os sons são ”estáticos”, esta é uma aproximação razoável.



**Figura 12:** Espetros de Frequências de “SEQR7” e “SEQR12”

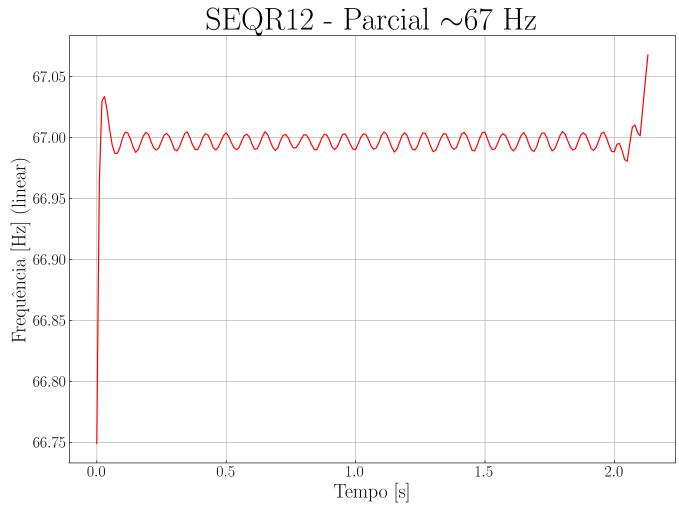
No que diz respeito ao som “SEQR7”, através do espetro é fácil verificar que as frequências abaixo de 3.5 kHz apresentam uma amplitude significativamente superior, e como tal colocou-se a hipótese de desprezar as frequências acima desta. Para testar esta hipótese, aplicou-se um filtro passa-baixo com a frequência de cutoff em 3.5 kHz e reproduziu-se o som com altifalantes. Desta forma verificou-se que, embora a diferença tenha sido perceptível, as características do som permaneciam, no geral, inalteradas. Logo, daqui em diante, as frequências acima de 3.5 kHz não serão consideradas para o som “SEQR7”.

Quanto ao som “SEQR12”, observando o espetro verificou-se que as frequências na gama em torno de 1 kHz têm amplitude significativamente superior às restantes, daí que considerou-se desprezar todas as frequências fora desta gama. Analogamente à situação anterior, testou-se esta hipótese com um filtro passa-banda com uma frequência central em 1 kHz, e verificou-se que a diferença era imperceptível. Logo, daqui em diante para o som “SEQR12” apenas serão consideradas as frequências dentro desta gama.

### III.1.2 Análise dos parciais

De modo a fazer uma análise mais precisa dos sons, utilizou-se o software *SPEAR* para extrair informação dos parciais de cada som. Este software permite não só observar individualmente os parciais que constituem um dado som, como a variação da frequência e da amplitude de cada um ao longo do tempo.

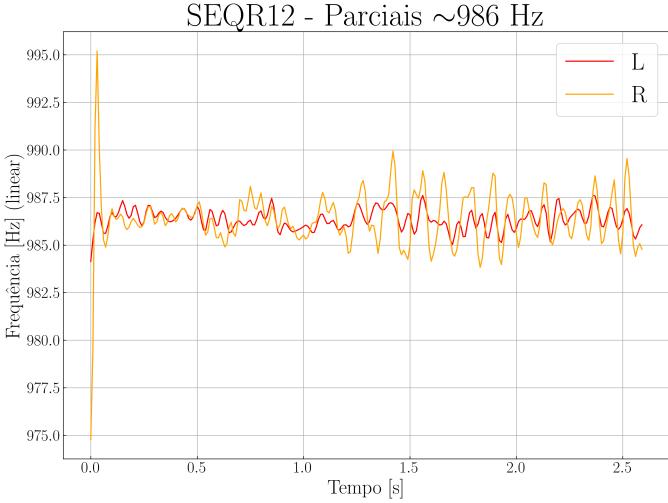
Começando pelo som “SEQR7”, verificou-se que este é constituído por 50 parciais desde 67 até 3350 Hz, espaçados de forma aproximadamente igual por uma diferença de 67 Hz. Todos os parciais têm a mesma amplitude e esta é constante no tempo. A frequência de cada parcial, como veremos a seguir, é praticamente constante no tempo. No gráfico abaixo encontra-se a variação da frequência ao longo do tempo do primeiro parcial:



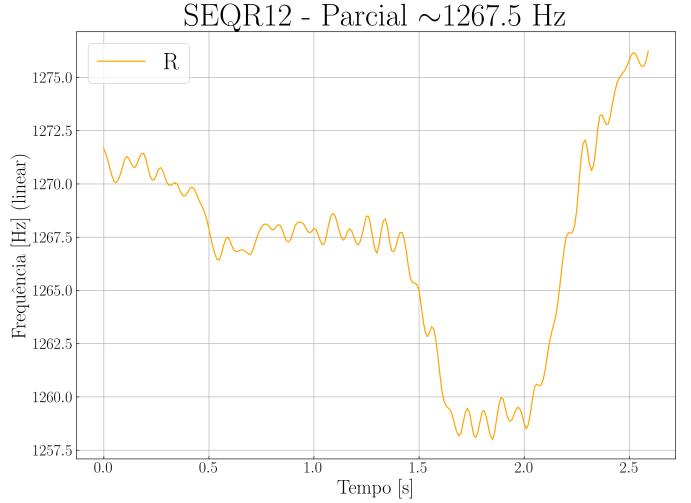
**Figura 13:** Parcial “~67 Hz” do som “SEQR7”

Através da figura, é possível verificar um acréscimo rápido de frequência nos primeiros e últimos instantes. Estes acréscimos não só são relativamente pequenos, como têm duração inferior a 0.1 segundos. Como tal, contribuem pouco ou nada para a percepção sonora do som no seu todo, daí que podem ser desprezados. Para além disso, são observáveis flutuações no valor da frequência nos instantes entre 0.1 e 2 segundos. No entanto, estas flutuações são de magnitude inferior a 0.05 Hz, daí que são naturalmente desprezáveis. Com base nesta análise, é razoável considerar este parcial como tendo uma frequência constante de 67 Hz. Os restantes parciais apresentam características idênticas, daí que a análise que acabou de ser feita é aplicável a todos eles. Logo, é razoável dizer que o som “SEQR7” é constituído por 50 parciais com frequências e amplitudes constantes no tempo, desde 67 até 3350 Hz, igualmente espaçados por uma diferença de 67 Hz.

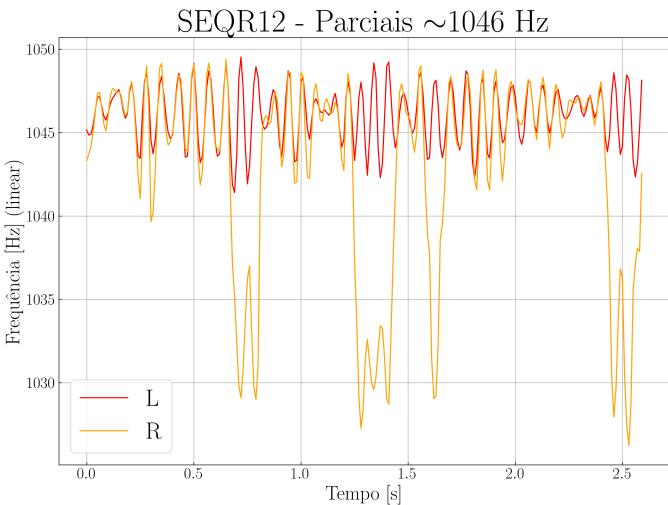
Passando agora para o som “SEQR12”, verificou-se que este é constituído por vários parciais com amplitudes distintas. No canal *esquerdo*, existem 7 parciais, entre os quais 3 têm amplitudes significativamente superiores aos restantes. Ao reproduzir apenas estes 3 parciais por auscultadores, verificou-se que a diferença era praticamente imperceptível. Como tal, os parciais de amplitudes inferiores foram desprezados. No canal *direito*, existem 10 parciais, entre os quais 4 têm amplitudes significativamente superiores aos restantes. Pela mesma lógica aplicada na situação anterior, os parciais de amplitudes inferiores foram desprezados. Os 7 parciais a serem considerados têm amplitudes aproximadamente iguais e constantes no tempo. Para além disso, as frequências dos 3 parciais do canal *esquerdo* têm uma correspondência um-para-um com 3 dos parciais do canal *direito*. Este último canal apresenta um 4º parcial cuja frequência não corresponde a nenhum outro parcial. As variações das frequências ao longo do tempo dos ”pares” de parciais (*esquerdo* e *direito*) encontram-se representadas nas figuras seguintes:



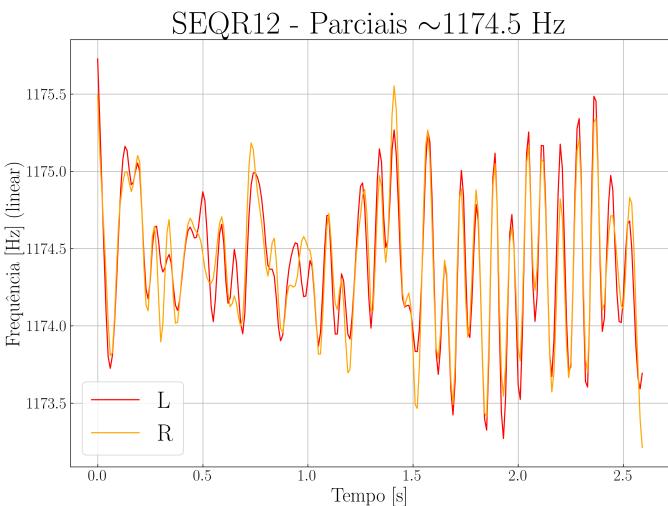
**Figura 14:** Parciais “~986 Hz” do som “SEQR12”



**Figura 17:** Parciais “~1267.5 Hz” do som “SEQR12”



**Figura 15:** Parciais “~1046 Hz” do som “SEQR12”



**Figura 16:** Parciais “~1174.5 Hz” do som “SEQR12”

Observando a figura 14, é possível observar no parcial do canal *direito* um acréscimo rápido de frequência nos primeiros instantes. No entanto, tal como anteriormente, este acréscimo tem duração inferior a 0.1 segundo, e como tal será desprezado. Para além disso, as frequências dos dois parciais aparecem flutuar em torno de 986 Hz. O maior desvio relativamente a esta frequência foi 990 Hz, do parcial do canal *direito* no instante 1.4 segundos. Se recorremos à figura 8 e considerarmos as frequências  $f_1 = 986$  Hz e  $f_2 = 990$  Hz, a diferença de frequências será  $\Delta f = 4$  e a frequência central será  $f = 988$  Hz, o que está muito abaixo do limite de discriminação de frequências.

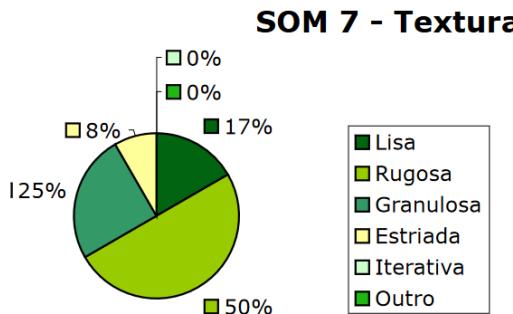
Nas figuras 15, 16 e 17, as frequências dos parciais aparecem rondar 1046, 1174.5 e 1267.5 Hz, respectivamente. Nos casos em que existem desvios relativamente a estas frequências, é simples verificar que eles encontram-se muito abaixo do limite de discriminação de frequências. Com base nesta análise, é razoável considerar estes parciais como tendo frequências constantes. Consequentemente, podemos considerar cada “par” de parciais (entre os canais *esquerdo* e *direito*) como sendo um único parcial. Logo, é razoável dizer que o som “SEQR12” é constituído por 4 parciais com frequências e amplitudes constantes no tempo.

### III.1.3 Sensações associadas à relação frequencial entre os parciais

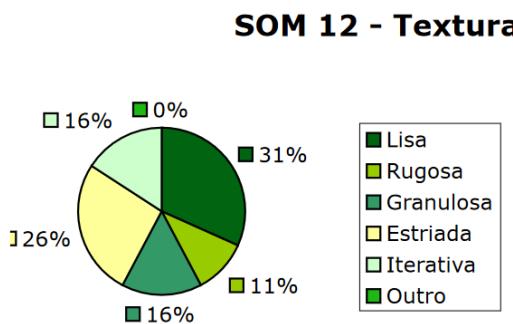
Agora que a caracterização dos parciais de cada som está bem definida, podemos remeter à subsecção II.3.2 e analisar as relações freqüenciais entre eles, e as sensações associadas às mesmas. Começando pelo som “SEQR12”, podemos analisar o par de parciais de frequências  $f_1 = 986$  Hz e  $f_2 = 1046$  Hz. A diferença de frequências é  $\Delta f = 60$  Hz e a frequência central é  $f = 1016$  Hz. Através da figura 8 podemos verificar que, para estes parâmetros, a largura da banda crítica  $\Delta f_{CB}$  é cerca de 160 Hz. Como a diferença de frequências entre os parciais está bastante abaixo deste valor, verificar-se-ia uma sensação de “rugoso”, “áspero” ou “grosseiro”, se estes fossem reproduzidos por altifalantes. Seguindo esta mesma lógica, é simples de verificar que os pares de parciais com frequências (1046 Hz, 1174.5 Hz) e (1174.5, 1267.5) também apresentam diferenças de frequências abaixo da largura da banda crítica, e como tal apresentariam as mesmas sensações de rugosidade. No caso do som “SEQR7” a mesma análise pode ser feita de maneira imediata. Uma vez que os parciais estão todos espaçados por uma diferença de 67 Hz, e a largura de banda crítica é no mínimo 100 Hz, é simples verificar que cada par de

parciais com frequências (67 Hz, 134 Hz), (134 Hz, 201 Hz), (201 Hz, 268 Hz), etc., apresentariam as mesmas sensações de rugosidade.

Por fim, podemos cruzar os resultados das análises realizadas aos sons “SEQR7” e “SEQR12” com dados anteriormente recolhidos em estudos sobre a percepção desses mesmos sons. Abaixo encontram-se os dados relativos à percepção da *textura* dos sons “SEQR7” e “SEQR12” nas figuras 18 e 19, respetivamente:



**Figura 18:** Dados relativos à percepção da textura do som “SEQR7” [7]



**Figura 19:** Dados relativos à percepção da textura do som “SEQR12” [7]

Através dos dados da figura 18, é possível observar uma percentagem considerável de 50% correspondente à textura “rugosa”. Para além disso, verificam-se percentagens de 25% e 8% correspondentes às texturas “granulosa” e “estriada”, respetivamente. Todos estes adjetivos descrevem sensivelmente o tipo de textura previsto pelas análises realizadas anteriormente. No entanto, existe também uma percentagem de 17% que corresponde à textura “lisa”, que descreve o tipo de textura oposto.

Na figura 19, observa-se uma percentagem considerável de 31% correspondente à textura “lisa”, que contraria as análises realizadas anteriormente. No entanto, verificam-se percentagens de 11%, 16% e 26% correspondentes às texturas “rugosa”, “granulosa” e “estriada”, respetivamente. Estes adjetivos conciliam com as análises realizadas.

### III.1.4 Comparação e manipulação dos sons

Através dos espetros de frequências da figura 12 e das características dos parciais exploradas na subsecção III.1.2, podemos comparar os dois sons que foram estudados. A partir do espetro, podemos afirmar a distribuição de frequências do som “SEQR12” está concentrada em torno de 1 kHz, ao contrário da distribuição do som “SEQR7”, que está disperso entre 0 e 3.5 kHz. Isto é corroborado pelo facto de o som “SEQR12”

ser constituído somente por 4 parciais cujas frequências estão entre 986 e 1267.5 Hz, enquanto que o som “SEQR7” é constituído por 50 parciais cujas frequências estão entre 67 e 3350 Hz. Também há que relembrar que na subsecção III.1.1, começou-se por distinguir os dois sons, devido ao facto do som “SEQR7” ser *mono* e o som “SEQR12” ser *estéreo*.

Por fim, manipulou-se a distribuição de frequências dos sons e fez-se uma análise. Para isso, utilizou-se a funcionalidade *Match EQ* do plugin *Ozone Elements 11*, que é um equalizador gráfico digital com 8000 bandas de frequências [3]. Esta funcionalidade permite analisar um som, e criar uma curva de equalização que corresponde ao espetro de frequências desse mesmo som. Posteriormente, essa curva pode ser aplicada noutro som distinto. Neste caso, analisou-se o som “SEQR12” e aplicou-se a curva de equalização resultante ao som “SEQR7”, e verificou-se que o som reproduzido era praticamente idêntico ao original. Isto é expectável uma vez que, sendo o som “SEQR12” constituído por apenas 4 parciais, a curva de equalização produzida corresponderá a quatro picos nas frequências de cada um dos parciais. Uma vez que o som “SEQR7” tem uma distribuição dispersa de frequências, os parciais cujas frequências mais se aproximem dos picos serão amplificados, e os restantes serão atenuados.

## IV Conclusões

Neste trabalho, começou por analisar-se dois sons relativamente às suas características físicas. Concluiu-se que os sons apresentavam amplitudes e distribuições de frequências constantes no tempo. De seguida, fez-se uma análise mais detalhada dos parciais que constituem cada som, e corroborou-se a análise anterior. Fizeram-se considerações quanto às variações das frequências de cada um dos parciais, e fez-se correspondências entre sensações percetivas e as relações freqüenciais entre os parciais. Após isso, cruzou-se os resultados obtidos com dados anteriormente recolhidos em estudos sobre percepção desses mesmos sons. Constatou-se que no som “SEQR7”, havia uma grande compatibilidade entre as análises feitas e os dados dos estudos. No som “SEQR12” a compatibilidade não foi tão elevada, mas ainda foi substancial. No entanto, ainda houveram percentagens relativamente altas (17% no som “SEQR7” e 31% no som “SEQR12”) de dados que contrariam os resultados obtidos. Estas discrepâncias poderão ser explicadas pelas aproximações feitas nas subsecções III.1.1 e III.1.2, ou por fatores fisiológicos específicos a cada indivíduo que participou nos estudos anteriormente realizados.

Em suma, podemos dizer que os objetivos do trabalho foram alcançados.

## Referências

- [1] Constructive and destructive interference.
- [2] Interference beats and tartini tones. <https://www.animations.physics.unsw.edu.au/jw/beats.htm#sounds>.
- [3] Ozone 11 features. <https://www.izotope.com/en/products/ozone/features.html>.
- [4] E. Fastl, H. e Zwicker. *Psychoacoustics: Facts and Models*. Springer series in information sciences. Springer Berlin Heidelberg, 2007.
- [5] Dusti Miraglia. Unlock the magic of low pass filters: The definitive guide to transforming your mixes. <https://unison.audio/low-pass-filters/>, Março 2023.

- [6] Brad Pack. Types of equalizers and their applications. <https://www.sonarworks.com/blog/learn/types-of-equalizers-and-their-applications>, Março 2023.
- [7] Isabel Pires. Desenvolvimento de módulos informáticos para a manipulação de entidades sonoras.
- [8] W. M. Robertson. Pure and complex tones. <https://w1.mtsu.edu/faculty/wroberts/teaching/purecomp.php>.
- [9] J.G. Roederer. *The Physics and Psychophysics of Music: An Introduction*. Springer New York, 2008.
- [10] Susan Susan Rogers. Psychoacoustics: Critical bands and auditory filters. <https://www.youtube.com/watch?v=KZj1YjwJ7sE>, Fevereiro 2019.
- [11] A.J. von Helmholtz, H. e Ellis. *On the Sensations of Tone as a Physiological Basis for the Theory of Music*. Longmans, Green, 1885.
- [12] Dina Zhabinskaya. Beats. [https://phys.libretexts.org/Courses/University\\_of\\_California\\_Davis/UCD%3A\\_Physics\\_7C\\_-\\_General\\_Physics/8%3AWaves/8.6%3A\\_Beats](https://phys.libretexts.org/Courses/University_of_California_Davis/UCD%3A_Physics_7C_-_General_Physics/8%3AWaves/8.6%3A_Beats), Fevereiro 2024.