

Aplicação de técnicas para avaliação da qualidade acústica de um auditório

Application of techniques to evaluate the acoustic quality of an auditorium

Matheus Silveira Antoniassi¹, Paulo Balduino Flabes Neto², Vinícius Abrão da Silva Marques³; Ricardo Humberto de Oliveira Filho⁴.

RESUMO

Devido à evolução do processamento computacional, estudos relacionados à geração de realidade virtual acústica vêm sendo desenvolvidos com mais detalhes. Com isso, são criados modelos mais eficientes e mais condizentes com a realidade. Tais modelos permitem a avaliação da qualidade acústica de determinados recintos, baseando-se em técnicas de medição experimental e modelagem. Esta avaliação é realizada pela análise de parâmetros mensuráveis que se relacionam diretamente com as características acústicas do recinto. Este trabalho tem como objetivo determinar o tempo de reverberação de um auditório por diferentes métodos. Inicialmente foi feita a estimativa analítica pelos métodos propostos por Sabine (1922), Eyring (1930) e Millington (1932), sendo este último modificado por Sette (1933). Em seguida foram aplicadas técnicas experimentais recomendadas pela ISO 3382-1:2017, sendo elas o método do ruído interrompido e o método de integração da resposta impulsiva (Método de Schroeder). Os resultados obtidos para cada método foram comparados e avaliados como satisfatórios pela proximidade dos valores obtidos.

Palavras-chave: Tempo de Reverberação. Resposta Impulsiva. Método de Schroeder.

ABSTRACT

Due to the evolution of computational processing, studies related to acoustic virtual reality generation have been developed in more detail. As a result, more efficient and more realistic models are created. These models allow the evaluation of the acoustic quality of certain enclosures, based on experimental measurement and modeling techniques. This evaluation is performed by the analysis of measurable parameters that are directly related to the acoustic characteristics of the enclosure. This work aims to determine the reverberation time of an auditorium by different methods. Initially, the analytical estimate was made using the methods proposed by Sabine (1922), Eyring (1930) and Millington (1932), the latter being modified by Sette (1933). Then, experimental techniques recommended by ISO 3382-1:2017 were applied, being the interrupted noise method and the impulse response integration method (Schroeder's method). The results obtained for each method were compared and evaluated as satisfactory by the proximity of the obtained values.

Keywords: Reverberation Time. Impulsive Response. Schroeder's method.

¹ Discente da Universidade Federal do Triângulo Mineiro - UFTM.

E-mail: matheus.mec1@gmail.com

² Docente da Universidade Federal do Triângulo Mineiro - UFTM.

E-mail: paulo.neto@icte.uftm.edu.br

³ Docente da Universidade Federal do Triângulo Mineiro - UFTM.

E-mail: vinicius.marques@uftm.edu.br

⁴ Docente da Universidade Federal do Triângulo Mineiro - UFTM.

E-mail: ricardo.filho@icte.uftm.edu.br

1. INTRODUÇÃO

A acústica arquitetônica é a ciência que se destina ao estudo do condicionamento acústico de ambientes como salas de concerto, salas de aula, teatros, auditórios, igrejas, escritórios, dentre outros.

Segundo De Marco (1982), a acústica arquitetônica pode ser dividida em duas áreas específicas:

- a) Defesa contra o ruído: Sons indesejáveis devem ser eliminados ou então amortecidos;
- b) Controle de sons no recinto: nos locais onde é importante uma comunicação sonora, como salas de aula, teatros, auditórios, necessita-se de uma distribuição homogênea do som que preserve a inteligibilidade da comunicação, evitando defeitos acústicos comuns (ecos, ressonâncias, reverberação excessiva).

Segundo Pereira (2010) a “forma” ou a “qualidade” com que os sons são percebidos por um ouvinte no interior de uma sala dependem, essencialmente, de quatro fatores:

- a) Características físicas da fonte sonora;
- b) Posição relativa entre a fonte sonora e o ouvinte;
- c) Características arquitetônicas do espaço;
- d) Natureza subjetiva com que o ser humano avalia a sensação provocada por um estímulo sonoro.

O primeiro fator corresponde às características da fonte, como por exemplo o nível da potência sonora e direcionalidade. O segundo fator está associado à alteração das características de um campo sonoro no interior de uma sala em relação ao posicionamento entre a fonte sonora e o ouvinte. O terceiro fator diz respeito à forma como as dimensões, a geometria e as características materiais da sala influenciam o campo acústico e por fim o quarto fator depende basicamente da experiência e do conhecimento adquiridos pelo ouvinte acerca do conteúdo das mensagens sonoras (PEREIRA, 2010).

O tempo de reverberação é o parâmetro mais conhecido e importante para a avaliação da acústica de salas. Embora ele isoladamente não seja suficiente para avaliar quesitos subjetivos, ele está fortemente relacionado com as características restantes e conseqüentemente, influencia como um todo as condições acústicas de uma sala.

O presente trabalho tem por objetivo aplicar métodos analíticos e experimentais para determinação do tempo de reverberação em um auditório. Serão avaliados os métodos analíticos de Sabine (1922), Eyring (1930) e o de Millington (1932) que foi reformulado por

Sette (1933), além dos métodos experimentais do ruído interrompido e da integração da resposta impulsiva (método de Schroeder) ambos recomendados pela ISO 3382-1:2017.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Tempo de reverberação de Sabine

O tempo de reverberação é definido como o tempo necessário para que o nível de pressão sonora em uma sala caia 60 dB, como mostra a Figura 1, a partir do momento em que a fonte de ruído é cessada (BISTAFA, 2011).

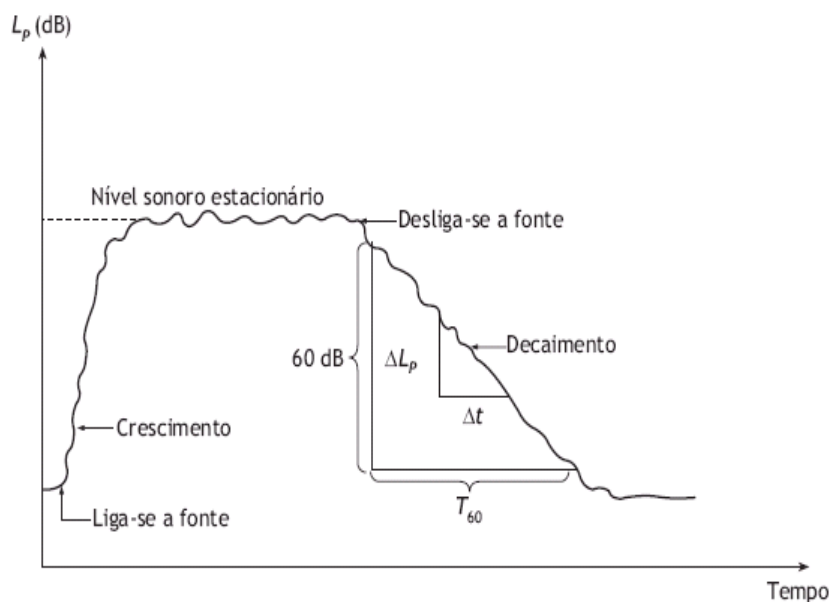


Figura 1. Crescimento e decaimento da energia sonora no interior de uma sala.

Fonte: BISTAFA (2011).

Sabine constatou que o tempo de reverberação, estimado pela Equação 1, é função do volume total e da área equivalente de absorção (FIGUEIREDO, 2005).

$$T_{60} = 0,16 \frac{V}{A} \quad (1)$$

onde T_{60} é o tempo de reverberação do recinto avaliado em segundos, V é o volume total da sala em m^3 e A é a área equivalente de absorção em m^2 Sabine, calculada pela Equação 2 (NEUBAUER e KOSTEK, 2000).

$$A = \sum_{i=1}^N \alpha_i S_i \quad (2)$$

sendo S_i as áreas que compõem as superfícies da sala em m^2 , α_i o coeficiente de absorção sonora de cada área e N a quantidade de superfícies que compõem a sala.

O coeficiente de absorção sonora (α) indica a capacidade de uma superfície absorver ou refletir o som. Uma superfície totalmente absorvente possui $\alpha = 1$, enquanto uma superfície totalmente reflexiva possui $\alpha = 0$.

2.2. Tempo de reverberação de Eyring

Eyring (1930) desenvolveu uma fórmula que considera a queda da energia sonora no interior de uma sala retangular sendo reduzida exponencialmente em relação ao número de reflexões que a onda é submetida, apresentada na Equação 3, para estimar o tempo de reverberação para uma atenuação sonora de 60 dB (SILVA, 2013).

$$T_{60} = \frac{0,16 \cdot V}{-S \cdot \ln(1 - \bar{\alpha})} \quad (3)$$

sendo $\bar{\alpha}$ o coeficiente de absorção médio, calculado pela Equação 4 (NEUBAUER e KOSTEK, 2000).

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{S} \sum_{i=1}^N \alpha_i S_i \quad (4)$$

O uso de um coeficiente médio de absorção sonora, faz com que essa fórmula seja mais adequada quando existem apenas superfícies com coeficientes de absorção sonora semelhantes ou próximos (SILVA, 2013).

2.3. Tempo de reverberação de Millington-Sette

Millington (1932) e Sette (1933) formularam uma equação para estimar o tempo de reverberação baseada nos mesmos princípios da formulação de Eyring, porém prevendo uma melhor solução para os casos em que os coeficientes de absorção são bastante distintos, pois são levados em consideração individualmente, como pode ser visto na Equação 6 (NEUBAUER e KOSTEK, 2000).

$$T_{60} = \frac{0,16 \cdot V}{-\sum_{i=1}^N S_i \cdot \ln(1 - \alpha_i)} \quad (6)$$

2.4. Medição do tempo de reverberação pelo método do ruído interrompido

A norma ISO 3382-1:2017 define dois métodos de medição experimental de tempo de reverberação de salas, o primeiro deles é o método do ruído interrompido.

Este método consiste em excitar a sala com uma fonte sonora por um tempo suficiente para que o nível de energia na mesma tenha atingido um estado estacionário antes de ser cessada a fonte, devendo ser no mínimo metade do tempo de reverberação esperado para a sala.

Após a fonte sonora cessar a emissão, uma instrumentação adequada capta o decaimento de energia do som reverberante e de forma direta retorna o tempo de reverberação da sala. A norma recomenda ainda que sejam feitas várias medições (no mínimo 3 medições para cada combinação de posição fonte-receptor) em diversos pontos espalhados uniformemente pelo ambiente a fim de se diminuir possível erros de medições, gerando resultados mais confiáveis através de uma média geral de todas as medições em todos os pontos da sala (ISO 3382-1:2017; BISTAFÁ, 2011).

De acordo com a ISO 3382-1:2017, as posições da fonte sonora podem ser escolhidas em função do uso do recinto, os microfones (receptores) devem ser dispostos a uma distância mínima de 2 metros, a distância de um microfone até a superfície refletora mais próxima, incluindo o piso, deve ser de 1 metro e a duração de um período de medição não deve ser inferior que 15 segundos.

2.5. Medição do tempo de reverberação pelo método da integração da resposta impulsiva

Uma sala pode ser considerada um sistema físico que recebe um sinal de entrada $x(t)$, que pode ser um estímulo emitido por uma fonte sonora e o transforma em um sinal de saída $y(t)$, que poderá ser captado por um microfone, por exemplo. Este processo é ilustrado na Figura 2.

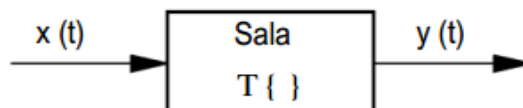


Figura 2. Diagrama que representa o sistema físico de uma sala.

Fonte: PEREIRA, 2010.

Pode-se escrever matematicamente o sinal de saída em função do sinal de entrada da seguinte forma: $y(t)=T\{x(t)\}$, onde $T\{ \}$ é o operador matemático que representa a regra de transformação de sinal do sistema (PEREIRA, 2010).

Sempre que um sinal passar por um sistema linear invariante no tempo (é um sistema físico cujo qualquer aumento proporcional à uma constante aplicada no sinal de entrada causará um aumento igualmente proporcional no sinal de saída, o mesmo acontecendo no caso de uma sobreposição de sinais), como uma sala por exemplo, tal sinal certamente sofrerá uma transformação e essa transformação é chamada de convolução. Ela relaciona a saída do sistema a qualquer entrada por meio da resposta impulsiva, através da Integral de Convolução, conforme a Equação 6 (PEREIRA, 2010).

$$y(t) = x(t) * h(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau)h(t - \tau)d\tau \quad (6)$$

sendo $h(t)$ a resposta impulsiva do sistema.

Desta forma, o sinal de saída de um sistema linear invariante no tempo é obtido pela operação de convolução do sinal de entrada com a resposta impulsiva do sistema, ou seja: $y(t)=x(t)*h(t)$ e no caso em que o sinal de entrada for a função Delta de Dirac ($\delta(t)$), o sinal de saída será a própria resposta impulsiva $\delta(t)*h(t)=h(t)$.

Atualmente, várias metodologias de medição de resposta impulsiva podem ser empregadas, diferenciando-se entre elas pelo tipo de sinal de excitação do sistema e pelo tipo de processamento do sinal obtido como resposta.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. O auditório analisado

O auditório utilizado no trabalho fica na Universidade Federal do Triângulo Mineiro, tem capacidade para 129 pessoas, uma área total de aproximadamente 147,15 m², um volume de aproximadamente 525,5 m³. Ele é composto por madeira em seu piso, revestido por carpete em suas paredes laterais, gesso no teto e poltronas estofadas, como pode ser visto na Figura 3.



Figura 3. Interior do auditório Rubi, na Universidade Federal do Triângulo Mineiro.

3.2 Estimativas analíticas do tempo de reverberação

Os métodos analíticos de Sabine (1922), Eyring (1930) e Millington (1932) – Sette (1933), indicam que o tempo de reverberação de uma sala é função do volume total da sala e da área de absorção equivalente, calculada pelo produto da área de cada superfície da sala pelo seu respectivo coeficiente de absorção sonora.

Portanto, foi necessário o levantamento das dimensões de todas as superfícies que compõem o auditório. As áreas foram calculadas e separadas conforme o tipo de material de cada superfície, como pode ser visto na Tabela 1.

Tabela 1: Áreas das superfícies internas do auditório e materiais que as compõem.

Material da superfície	Área da superfície (m ²)
Carpete	175,02
Gesso	149,40
Reboco	23,23
Madeira (piso)	149,40
Vidro (janelas)	27,20
Madeira (porta)	5,12

Os coeficientes de absorção sonora utilizados foram retirados de Bistafa (2011), que fornece os coeficientes distribuídos por bandas de frequência na faixa de 125 a 4000 Hz, como pode ser visto na Tabela 2.

Tabela 2: Coeficientes e absorção sonora de materiais e revestimentos de superfícies.

Material	Frequência central da banda de 1/1 oitava (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000
Reboco liso sobre alvenaria de tijolos	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04	0,04
Tacos de madeira colados sobre contrapiso	0,04	0,04	0,07	0,06	0,06	0,07
Carpete tipo forração alto-tráfego	0,05	0,10	0,15	0,30	0,50	0,55
Vidro comum montado em caixilho	0,35	0,25	0,18	0,12	0,07	0,04
Divisória de gesso tipo <i>dry-wall</i>	0,10	0,08	0,05	0,03	0,03	0,03
Porta de madeira comum pintada	0,24	0,19	0,14	0,08	0,13	0,10

Fonte: Adaptado de Bistafa (2011).

Também foi considerada a absorção das poltronas, mostrada da Tabela 3, retirada de Bistafa (2011).

Tabela 3: Absorção sonora de pessoas e mobiliários.

Pessoas e Mobiliário	Frequência central da banda de 1/1 oitava (Hz)					
	125	250	500	1000	2000	4000

Poltrona de auditório estofada com assento móvel levantado	0,08	0,16	0,22	0,23	0,24	0,24
--	------	------	------	------	------	------

Fonte: Adaptado de Bistafa (2011).

De posse de tais dados, foi estimado o tempo de reverberação do auditório pelos três métodos analíticos já citados.

3.3. Medição do tempo de reverberação pelo método do ruído interrompido

Seguindo as recomendações da Norma ISO 3382-1:2017, no procedimento experimental para obtenção do T_{60} , utilizou-se duas posições para a fonte sonora (F1 e F2) e três posições para o medidor de pressão sonora (M1, M2 e M3) sobre a área de plateia do auditório, como ilustra a Figura 4.

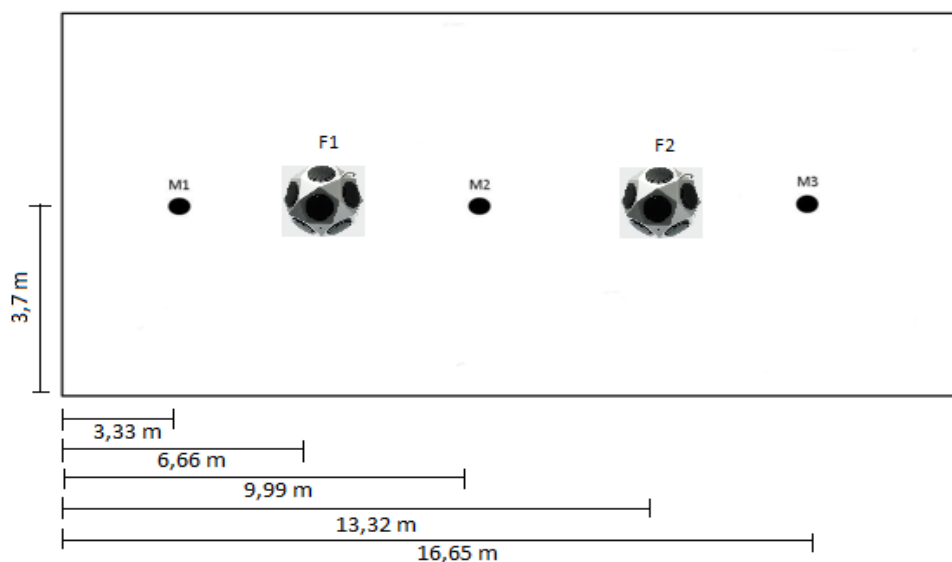


Figura 4. Posicionamento da fonte e do medidor de pressão sonora no auditório.

Nesta etapa do projeto foi utilizado o sistema de acústica de edifícios da Bruel & Kjaer®, composto pelos seguintes equipamentos:

- Fonte sonora omnidirecional (dodecaedro) modelo 4292-L;
- Medidor de pressão sonora modelo 2250 com microfone pré-amplificado modelo 4189 e programa de cálculo do tempo de reverberação;
- Gerador / Amplificador de sinais modelo 2734;
- Pedestais e cabos de conexão.

Após o posicionamento dos equipamentos, o auditório foi excitado por um ruído rosa gerado pelo próprio sistema da Bruel & Kjaer®. Foram feitas três medições para cada combinação de posição fonte-medidor, encontrando-se como resultado os parâmetros decaimento inicial (EDT), tempo de decaimento de 20 decibels (T_{20}) e tempo de decaimento de 30 decibels (T_{30}). De posse de tais dados, extrapolou-se o tempo de decaimento de 60 decibels, denominado tempo de reverberação (T_{60}).

3.4. Medição do tempo de reverberação pelo método da reposta impulsiva

O primeiro passo foi gerar computacionalmente um sinal de varredura senoidal, que varia exponencialmente com a frequência, que será utilizado para a excitação da sala. O sinal escolhido tem duração de 10 segundos e varia sua frequência de 20 a 20.000 Hz, que é a faixa de frequência onde encontra-se a capacidade humana de percepção sonora. O sinal gerado é dado pela Equação 7 (FARINA, 2000).

$$s(t) = \text{sen} \left[\frac{T \omega_1}{\ln \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} \right)} \cdot \left(e^{\frac{t}{T} \ln \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} \right)} - 1 \right) \right] \quad (7)$$

sendo $\omega_1 = 2\pi f_1$ e $\omega_2 = 2\pi f_2$, onde f_1 e f_2 são as frequências inicial e final da varredura senoidal, respectivamente e T é o tempo de duração do sinal.

A Figura 5 ilustra o sinal no domínio do tempo de 0,0 a 3,0 segundos, para melhor visualização da variação da frequência.

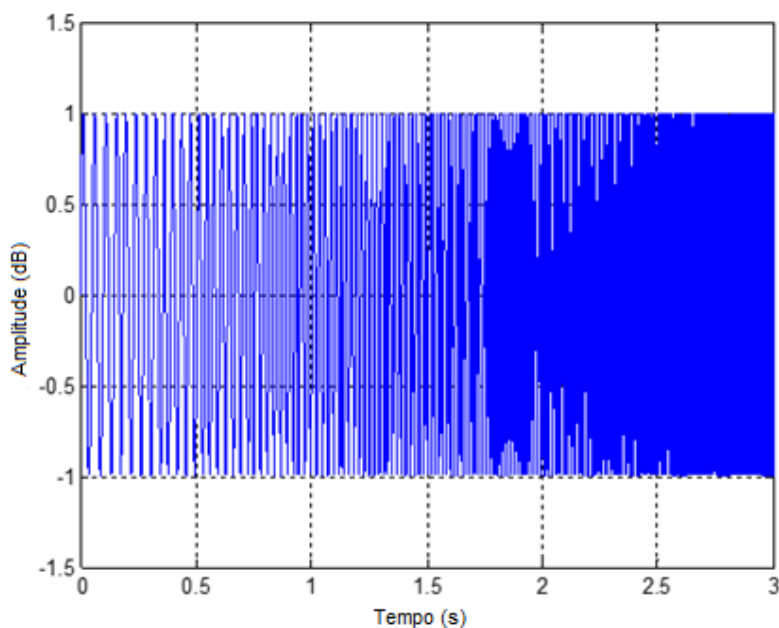


Figura 5. Sinal de varredura no domínio do tempo.

Com o objetivo de obter os resultados de maneira mais próxima à realidade física do ambiente, escolheu-se 8 posições de microfones distribuídas entre as cadeiras no auditório, o que satisfaz o número mínimo de posições recomendado pela norma ISO 3382-1:2017. Todos os microfones foram posicionados a uma altura de 1,2 metros acima do piso da plateia, que é a altura média do ouvido de um espectador sentado (ISO 3382-1:2017).

Utilizou-se apenas uma posição para a fonte sonora, localizada no centro do palco, a uma altura de 1,6 metros do piso, simulando um orador em pé no palco do auditório (ISO 3382-1:2017), como pode ser visto na Figura 6.



Figura 6. Posicionamento da fonte sonora no palco do auditório.

Além disso, os microfones respeitaram a distância mínima de 2 metros entre eles e de pelo menos 1 metro de superfícies reflexivas, como recomenda a norma.

Também se fez necessário o cálculo da distância mínima entre a fonte sonora e o microfone utilizando a Equação 8, para que se evite uma influência muito forte do som direto, como recomenda a ISO 3382-1:2017.

$$d_{\min} = 2 \cdot \sqrt{\frac{V}{c \cdot T_{60}}} \quad (8)$$

onde V é o volume da sala em m^3 , c é a velocidade do som no ambiente em m/s e T_{60} é o tempo de reverberação esperado para o auditório, no caso utilizou-se o valor de 1 segundo, devido aos resultados obtidos pelos métodos analíticos que serão mostrados adiante, resultando numa distância mínima de aproximadamente 2,48 metros.

A disposição da fonte sonora (F1) e dos microfones (M1 a M8) é mostrada na Figura 7.

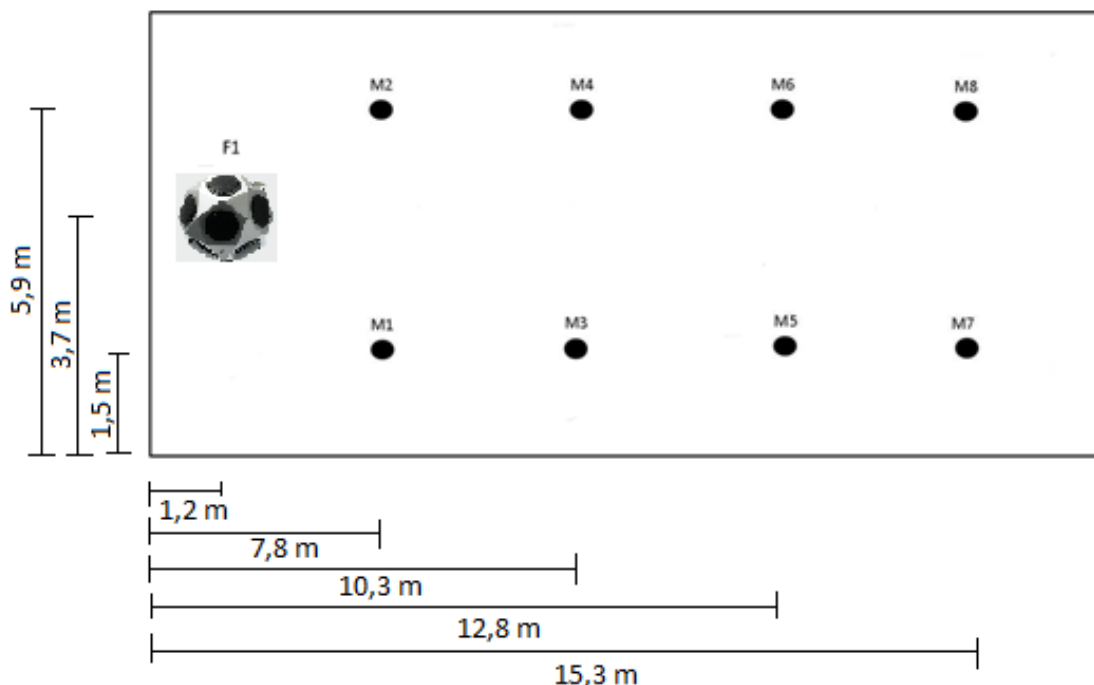


Figura 7. Disposição dos equipamentos no interior do auditório.

Foram feitas 3 medições em cada posição de microfone, totalizando 24 medições efetuadas no interior do auditório. Posteriormente os 24 sinais foram carregados e tratados pelo código em MATLAB®, assim como será descrito adiante.

Com o objetivo de obter a função de transferência do sistema de medição (conjunto de equipamentos utilizados) e assim corrigir o sinal medido no auditório, efetuou-se medições em campo livre, em uma área gramada. É válido considerar que a condição ideal seria realizar medições em uma câmara anecóica, porém como este recurso não estava disponível, realizou-se medições em um espaço aberto com o ruído de fundo mínimo possível e sem a presença de superfícies refletoras, como mostra a Figura 8.



Figura 8. Medições em campo livre.

Foram realizadas 6 medições de modo a utilizar a média entre elas, diminuindo assim os componentes aleatórios.

Sendo $x'(t)$ o sinal a ser reproduzido pelo alto falante e $y'(t)$ o sinal captado pelo microfone em campo livre, a resposta em frequência dos equipamentos $H_s(f)$ é dada pela Equação 9.

$$H_s(f) = \frac{Y'(f)}{X'(f)} \quad (9)$$

onde $Y'(f)$ e $X'(f)$ são os módulos da transformada de Fourier dos sinais $y'(t)$ e $x'(t)$ respectivamente (DALMONTE, 2013).

O primeiro passo no tratamento dos sinais foi carregar todos os 24 sinais coletados no interior do auditório. Em seguida aplicou-se a transformada de Fourier a cada um dos sinais e então foi feita uma média dos espectros de frequências de todos esses sinais. O mesmo procedimento foi feito para todos os 6 sinais coletados nos experimentos em campo livre.

A resposta em frequência do sistema de medição é encontrada dividindo-se a média dos sinais captados em campo livre pelo sinal de varredura também já transformado para o domínio da frequência. A correção do sinal coletado no auditório é feita pela multiplicação do espectro da média dos sinais coletados no auditório por um filtro de correção ($H_c(f)$), dado pela Equação 10 (DALMONTE, 2013).

$$H_c(f) = \frac{1}{H_s(f)} \quad (10)$$

Desta forma, sendo $Y(f)$ o espectro da média dos sinais coletados no auditório, o espectro corrigido $Y_c(f)$ pode ser estimado pela Equação 11.

$$Y_c(f) = Y(f) \cdot H_c(f) \quad (11)$$

O filtro inverso é definido como um sinal que deve ser convoluido com o sinal médio medido experimentalmente no auditório, com o objetivo de compensar o decaimento de - 3 dB por oitava do sinal de excitação (DALMONTE, 2013).

Primeiramente, deve-se inverter o sinal de varredura no tempo, ou seja, gerar um sinal que tenha uma frequência inicial de 20000 Hz e que caia exponencialmente até a frequência de 20 Hz durante os mesmos 10 segundos do sinal de excitação da sala.

Em seguida, o filtro inverso é obtido aplicando-se um decaimento $r(t)$ ao longo do tempo dado pela Equação 12, no sinal invertido no tempo (DALMONTE, 2013).

$$r(t) = \omega_1 \cdot \left(\frac{K}{L} \cdot e^{\frac{t}{L}} \right)^{-1} \quad (12)$$

A última correção a ser efetuada é mostrada na Equação 13, onde é aplicado o filtro inverso através de uma operação de convolução entre a média corrigida pelo sistema de medição e o próprio filtro inverso criado $R(f)$, de modo a compensar o decaimento natural

de 3 dB por banda de oitava, mantendo assim constante o nível de energia em cada banda e resultando na resposta em frequência do auditório (DALMONTE, 2013).

$$H(f) = Y_c(f) \cdot R(f) \quad (13)$$

Finalmente, para se obter a resposta impulsiva $h(t)$, aplica-se a transformada inversa de Fourier utilizando a Equação 13 (DALMONTE, 2013).

$$h(t) = \text{IFFT}(H(f)) \quad (14)$$

De posse da resposta impulsiva do auditório, realizou-se uma filtragem por bandas de frequência de 1/1 oitava de 125 a 4000 Hz. Em seguida aplicou-se o método de Schroeder, que dita o decaimento sonoro é dado pela integração da resposta impulsiva ao quadrado (SCHROEDER, 1964) como mostra a Equação 14.

$$E(t) = \int_t^{\infty} p^2(\tau) d\tau = \int_{\infty}^t p^2(\tau) d(-\tau) \quad (14)$$

Desta forma, obteve-se como resultado as curvas de decaimento sonoro para cada banda de 1/1 oitava, e assim pode-se encontrar os parâmetros EDT , T_{20} , T_{30} e a partir destes dois últimos, por extrapolação linear obtêm-se o T_{60} .

Foram utilizados os seguintes equipamentos para realização dos experimentos usando o método da resposta impulsiva:

- Fonte sonora omnidirecional (dodecaedro) Bruel & Kjaer® modelo 4292-L;
- Microfone Pré Amplificado PCB Piezotronics® modelo 378B02;
- Amplificador/gerador de sinal Bruel & Kjaer® modelo 2734;
- Pedestais e cabos de conexão;
- Placa de aquisição de dados National Instruments® Modelo CompactDAQ 9234;
- Notebook com o programa MATLAB®.

4. RESULTADOS

4.1. Resultados dos métodos analíticos

Foram calculados os tempos de reverberação pelos métodos de Sabine (1922), Eyring (1930) e Millington (1932) - Sette (1933), os resultados são mostrados na Tabela 4.

Tabela 4: Tempo de reverberação estimado pelos métodos analíticos, em segundos.

Método	Frequência central da banda de 1/1 oitava (Hz)						Médio
	125	250	500	1000	2000	4000	
Sabine	1,645	1,311	1,070	0,827	0,604	0,541	1,000
Eyring	1,580	1,246	1,004	0,761	0,537	0,474	0,934
Millington-Sette	1,724	0,982	0,894	0,699	0,465	0,427	0,865

A Figura 9 mostra o gráfico do tempo de reverberação para todos os métodos, em função da frequência.

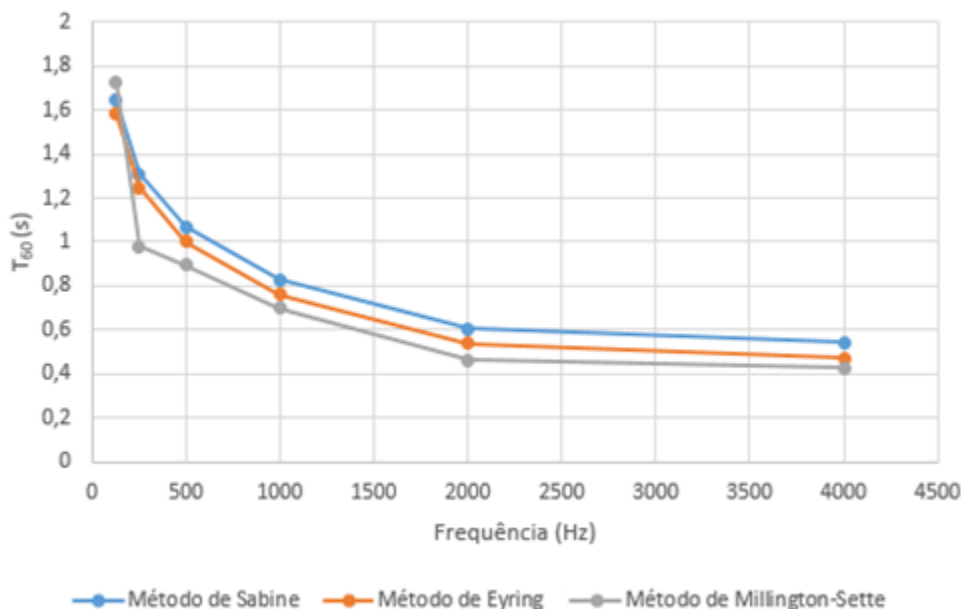


Figura 9. Tempo de reverberação em função da frequência para os métodos analíticos.

Percebe-se pelos três métodos que o tempo de reverberação reduz com o aumento da frequência. Tal comportamento já era previsto, pois os coeficientes de absorção sonora dos materiais ficam cada vez maiores com o aumento da frequência, tornando os tempos de reverberação mais baixos nas altas frequências.

Também é possível notar que o tempo de reverberação estimado para a banda de 500 Hz foi inferior a 1 segundo em todos os métodos, o que é um valor próximo ao recomendado por Bistafa (2011) para salas de conferências com volume de aproximadamente 600 m³.

4.2. Resultados do método do ruído interrompido

As medições experimentais efetuadas no auditório com o uso do sistema de acústica de ambientes da Bruel & Kjaer® pelo método do ruído interrompido, resultaram nos tempos de reverberação mostrados na Tabela 5, classificados em bandas de frequências de 125 a 4000 Hz.

Tabela 5. Tempo de reverberação por banda de oitava pelo método do ruído interrompido, em segundos.

	Frequência central da banda de 1/1 oitava (Hz)						
	125	250	500	1000	2000	4000	Médio
T_{60}	2,490	1,260	1,040	0,900	1,000	0,840	1,255

O gráfico do tempo de reverberação em função da frequência para o método do ruído interrompido é mostrado na Figura 10.

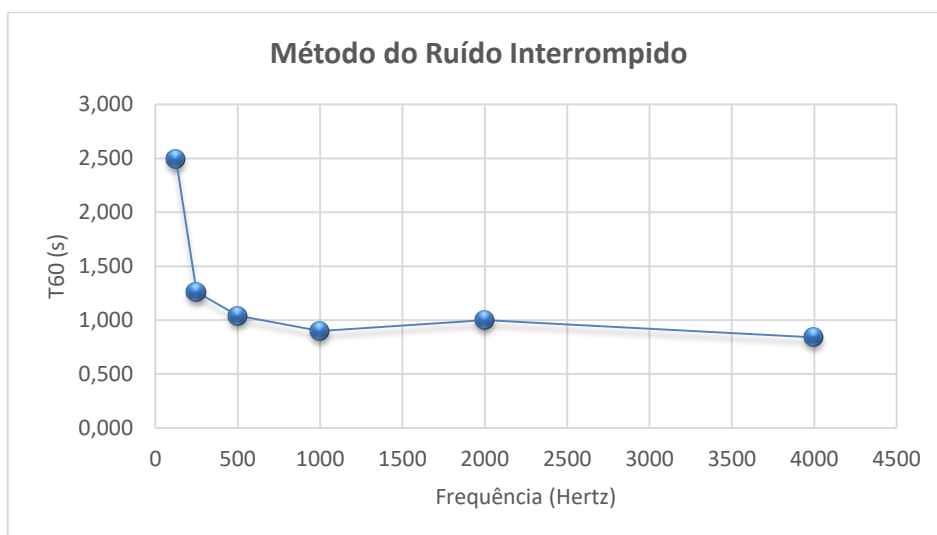


Figura 10. Tempo de reverberação em função da frequência para o método do ruído interrompido.

Nota-se um comportamento semelhante ao dos métodos analíticos, com o tempo de reverberação reduzindo com o aumento da frequência. Estes resultados confirmam que o

tempo de reverberação nas baixas frequências é mais alto, superior até ao recomendado por Bistafa (2011), que diz, por exemplo, que o tempo de reverberação na banda de oitava de 125 Hz deve ser aproximadamente 45% maior que o da banda de 500 Hz, porém, no caso do auditório esse valor é de aproximadamente 139% maior, ficando evidente a falta de um projeto acústico adequado para o auditório.

4.3. Resultados do método da resposta impulsiva

Após análise dos sinais coletados e a aplicação metodologia, obtém-se a resposta impulsiva do auditório (Figura 11).

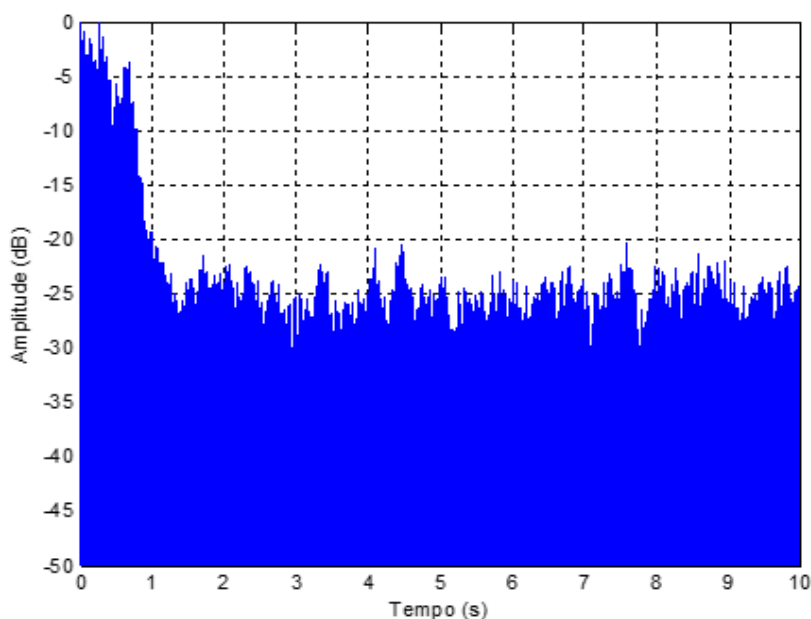


Figura 11. Resposta impulsiva do auditório.

De posse da resposta impulsiva do auditório, aplicou-se o método de Schroeder de integração da resposta impulsiva ao quadrado para fornecer a curva de decaimento para cada banda de 1/1 oitava. As curvas de decaimento de Schroeder para as frequências de 125, 250, 500, 1000, 2000 e 4000 Hz são mostradas na Figura 12.

A partir das curvas de decaimento sonoro, foi possível encontrar os parâmetros EDT , T_{20} e T_{30} e então, por extrapolação linear, estimar o T_{60} para cada banda de 1/1 oitava. Os resultados são mostrados na Tabela 6

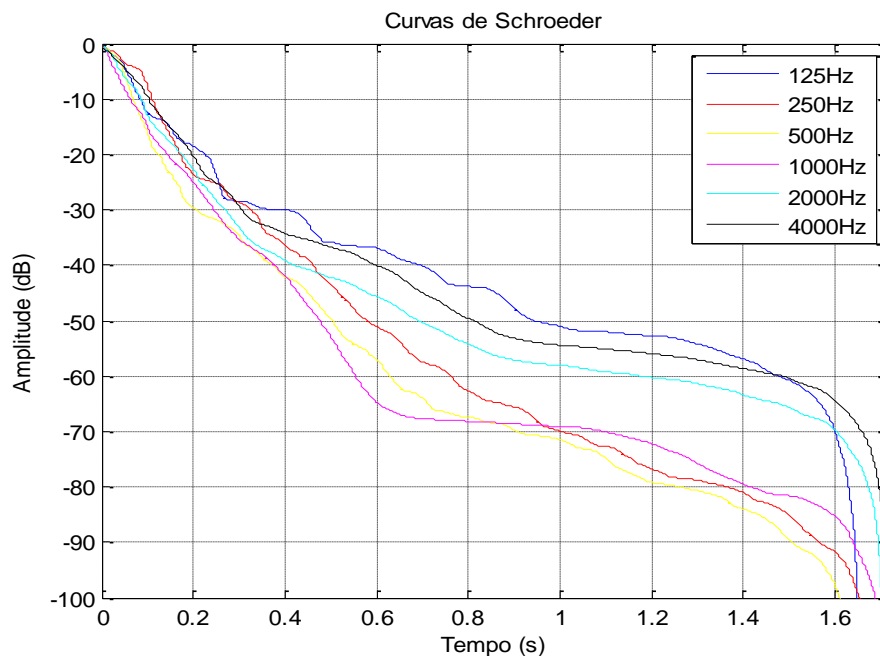


Figura 12. Curvas de decaimento de nível sonoro obtidas pelo método de Schroeder.

Tabela 6. Resultados obtidos pelo Método de Schroeder.

Parâmetro	Frequência central da banda de 1/1 oitava (Hz)						T_{60} Médio
	125	250	500	1000	2000	4000	
EDT	0,185	0,227	0,143	0,131	0,165	0,206	-
T_{20}	0,430	0,365	0,253	0,297	0,344	0,393	-
T_{30}	0,752	0,619	0,456	0,489	0,535	0,652	-
T_{60}	1,716	1,378	1,063	1,065	1,108	1,431	1,294

O gráfico do tempo de reverberação estimado pelo Método de Schroeder em função da frequência pode ser visto na Figura 13.

Analisando a Figura 13 é verificado um crescimento do tempo de reverberação nas bandas de frequência de 2000 e 4000 Hz, comportamento diferente do apresentado em relação aos outros métodos.

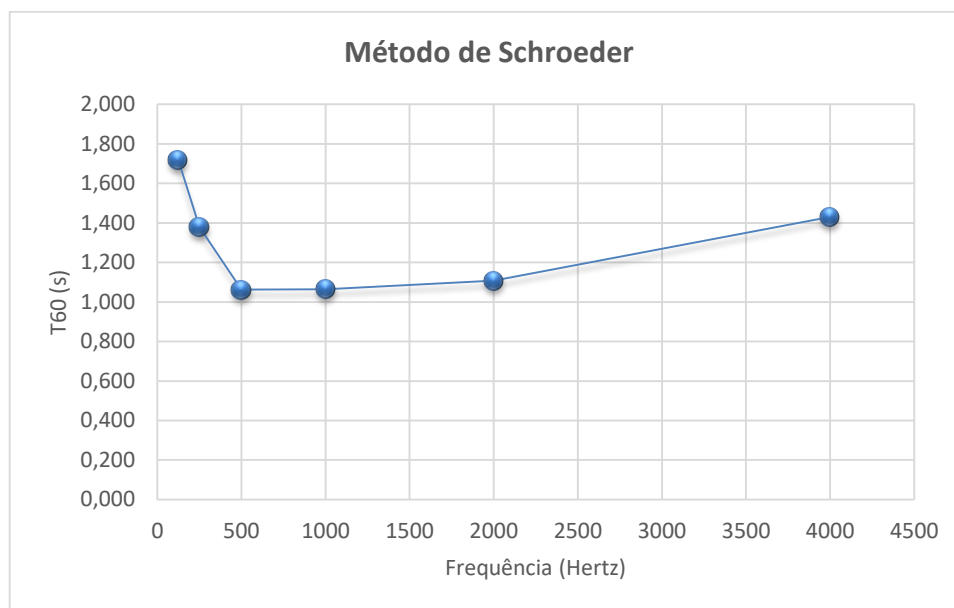


Figura 13. Comportamento do T₆₀ obtido pelo método de Schroeder.

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho, foram utilizadas 3 abordagens analíticas e 2 abordagens experimentais para obtenção do tempo de reverberação de um auditório.

Pelos resultados dos métodos analíticos, foi visto que o tempo de reverberação reduz com o aumento da frequência. Tal comportamento era esperado, pois os coeficientes de absorção sonora dos materiais aumentam com o aumento da frequência, tornando os tempos de reverberação mais baixos nas altas frequências.

O método experimental do ruído interrompido apresentou comportamento semelhante ao descrito para os métodos analíticos, com a redução do tempo de reverberação com o aumento da frequência. Contudo os valores do tempo de reverberação foram superiores aos encontrados com os métodos analíticos. Tal fato era esperado, uma vez que os métodos analíticos não levam em consideração os fenômenos físicos inerentes à propagação sonora no meio.

O método experimental da resposta impulsiva apresentou uma diferença no comportamento do tempo de reverberação em relação aos outros métodos, com um aumento deste parâmetro nas bandas de frequência de 2000 e 4000 Hz. Tal fato pode ter sido ocasionado pela falta de energia sonora durante a excitação do auditório. Devido ao grande volume do recinto é recomendado então a utilização de uma fonte sonora com maior potência, ou mais fontes sonoras acionadas simultaneamente. Nenhuma das duas soluções estavam disponíveis para a continuação das análises.

REFERÊNCIAS

- BISTAFA. S. R. **Acústica Aplicada ao Controle do Ruído**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2011.
- DALMONTE. J. **Caracterização Acústica de Salas Através da Medição da Resposta Impulsiva**. Monografia (Graduação) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2013. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/78514/000898549.pdf?sequence=1>>
- DE MARCO. S. C. **Elementos de Acústica Arquitetônica**. Editora Nobel. 2. ed. São Paulo, 1982.
- EYRING, C. F. Reverberation time in "dead rooms". **The Journal of the Acoustical Society of America**, vol. 1, no. 2A, 1930, p. 217-241.
- FARINA. A. **Simultaneous measurement of impulse response and distortion with a swept-sine technique**. Università di Parma. 2000. Disponível em: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.33.1614&rep=rep1&type=pdf>>
- FIGUEIREDO. F. L. **Parâmetros Acústicos Subjetivos: Critérios para Avaliação da Qualidade Acústica de Salas de Música**. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo. 2005. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/27/27140/tde-16102006-105834/pt-br.php>>.
- ISO 3382-1:2017. **Acoustics - Measurement of room acoustic parameters - Part 1: Performance spaces**. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland (2017).
- MILLINGTON, G. A. Modified Formula for Reverberation. **The Journal of the Acoustical Society of America**, vol. 4, no. 1A, 1932, p. 69-82.
- NEUBAUER. R; KOSTEK. B. Prediction of the Reverberation Time in Rectangular Rooms with NonUniformly Distributed Sound Absorption. **Archives of Acoustics**, vol. 23 no. 3, 2001, p. 183-201.
- PEREIRA. R. N. **Caracterização Acústica de Salas**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Técnica de Lisboa. 2010. Disponível em: <<https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/395142240629/Tese.pdf>>.
- SABINE, W. C. **Collected Papers on Acoustics**. London: Harvard University Press. 1922.
- SCHROEDER. M. R. New Method of Measuring Reverberation Time. **The Journal of the Acoustical Society of America**, vol. 37, no. 3, 1965, p. 409-412.
- SETTE, W. H. A New Reverberation Time Formula. **The Journal of the Acoustical Society of America**, vol. 4, no. 3, 1933, p. 193-210.
- SILVA. C. M. F. **O Tempo de Reverberação e a Inteligibilidade da Palavra**. Dissertação (Mestrado) - Universidade do Porto, 2013. Disponível em: <https://sigarra.up.pt/reitoria/pt/pub_geral.show_file?pi_gdoc_id=350760>.