

# Acústica & Vibrações

SOCIEDADE BRASILEIRA DE ACÚSTICA – SOBRAC

MARÇO 2007 N° 38

Sustentabilidade e o controle acústico do meio ambiente

Impacto sonoro da implantação do metrô de Salvador em edificações adjacentes, considerando os reflexos na saúde da população.

Implementação de Métodos para a Simulação Acústica e Auralização de Salas

Avaliação de integridade utilizando o STI

Avaliação Acústica de Teatros

Avaliação do desempenho acústico de cabinas audiométricas *in situ*

## Expediente

Revista Semestral da  
Sociedade Brasileira de Acústica - SOBRAC

Cx. Postal 476 - CEP 88040-900  
Florianópolis -SC- Brasil  
www.acustica.org.br  
emeio:sobrac@acustica.org.br  
Skype ID: sobrac\_acustica  
Tel/Fax: ++55 48 3269-9882

### Diretoria SOBRAC 2006/2010

Presidente: Marco Antonio Nabuco de Araujo  
nabuco@acustica.org.br  
Vice-Presidente: Ana Claudia Fiorini  
fiorini@acustica.org.br  
1º Secretário: Gilberto Fuchs de Jesus  
gilberto@acustica.org.br  
2º Secretário: Lilian Seligman Graciolli  
lisegra@acustica.org.br  
1º Tesoureiro: Roberto Jordan  
jordan@acustica.org.br  
2º Tesoureiro: Erasmo Felipe Vergara Miranda  
efvergara@acustica.org.br  
Secretaria: Vanessa D. Cardoso  
vanessa@acustica.org.br

### Conselho Consultivo

Prof. Samir Gerges, UFSC  
Prof. Moyses Zindeluk, COPPE/UFRJ  
Prof. Fernando Castro Pinto, COPPE/UFRJ  
Profa Elvira Viveiros, UFSC  
Prof. Marco Vecci, UFMG  
Mauricy C.R. de Souza, UFSC  
David Akerman, Harmonia Acústica Ltda

### Editor

Paulo Medeiros Massarani  
pmmassarani@inmetro.gov.br

## Sumário

Editorial	2
<b>Artigos</b>	
Sustentabilidade e o controle acústico do meio ambiente Baring, J. G. de A.	3
Impacto sonoro da implantação do metrô de Salvador em edificações adjacentes, considerando os reflexos na saúde da população. Barretto, D.M.; Freitas, I.M.	9
Implementação de Métodos para a Simulação Acústica e Auralização de Salas Gomes, M.H.A.; Bertoli, S.R., Dedecca, J.G.	12
Avaliação de integridade utilizando o STI Müller, S.	25
Avaliação do desempenho acústico de cabinas audiométricas in situ Souza, K.; Massarani, P.M.; Nabuco, M. <i>Workshop: Medição de desempenho acústico de cabine audiométrica "in situ" no XXI Encontro da SOBRAC</i>	39
Avaliação Acústica de Teatros Massarani, P.M. <i>Conferência do XXI Encontro da SOBRAC</i>	44
<b>Entrevista</b>	
Moisés Zindeluk e Fernando H. Aidar	56
<b>Informações</b>	
Congressos	58
Ata da Assembléia Geral da SOBRAC	60
Concurso de Logo da Sobrac	61

## Editorial

Um das metas da atual gestão da SOBRAC é a reformulação da revista ACÚSTICA E VIBRAÇÕES. Inicialmente foi montado um Conselho Editorial Provisório, buscando reunir representantes das instituições de ensino, de consultores e de profissionais ligados à empresas que atuam na área. O funcionamento do conselho esbarrou em algumas questões práticas e conceituais de funcionamento. Na última Assembléia Geral Ordinária da SOBRAC, cuja Ata é transcrita nessa edição, foi aprovada a criação de um fórum no novo sítio da SOBRAC na internet ([www.acustica.org.br](http://www.acustica.org.br)) para a reformulação da revista. Para abrir a discussão da nova revista incluímos nesse número 38 uma entrevista com dois dos mais conhecidos membros da Sociedade, Fernando Aidar e Moysés Zindeluk, na qual parte das suas opiniões pode ser conhecida. Também pensando em reformulação da SOBRAC, publicamos as regras de um concurso aberto aos associados para criação de um novo logotipo para a Sociedade.

Enquanto as reformulações são discutidas pelos membros da SOBRAC, no prazo que for necessário, este número apresenta alguns artigos técnicos. A primeira idéia foi a de publicar os artigos das conferências e dos Workshops apresentados no XXI Encontro da SOBRAC, São Paulo (novembro de 2006). Entretanto, devido ao prazo apertado, conseguimos reunir somente dois desses trabalhos para a edição de número 38. No início de janeiro de 2007 a atual administração convocou aos associados que enviassem artigos originais para a composição do número atual. Recebemos e publicamos as muito valiosas contribuições de nomes como João Baring, Débora Barreto, Márcio Avelar Gomes e Swen Müller.

Neste número optou-se por publicar em encarte separado as páginas com os anúncios dos membros institucionais que se interessaram em veicular suas empresas na revista ACÚSTICA E VIBRAÇÕES. Esperamos que o conteúdo do número cumpra o seu propósito informativo e que as próximas edições já contenham as reformulações elaboradas com a participação dos associados.

Paulo Medeiros Massarani

# Sustentabilidade e o controle acústico do meio ambiente

Baring, J. G. de A.

Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da USP jbaring@uol.com.br

## Resumo

A poluição sonora no ecossistema urbano é inevitável. Mas a sustentabilidade desse sistema requer contenção dos excessos, mediante ação participativa da sociedade, vigilância do Poder Público e disponibilização do conhecimento prático para prevenir e corrigir as distorções mais generalizadas. Para tanto, as normas técnicas têm importância crucial, porque nelas se baseiam as leis que irão instaurar os processos de contenção, colocando o que medir, como medir e quais limites deverão ser respeitados. A efetividade dessas normas representa pujança e engajamento cívico para a Acústica Aplicada. A sua debilidade representa retrocesso para essa ciência vital para a convivência equilibrada em sociedade.

Tais premissas são abordadas neste artigo, especulativo, de início e propositivo, ao seu final, procurando-se mostrar a trama de inter-relações, para o caso da cidade de São Paulo, o maior celeiro de conflitos por poluição sonora do país.

**Palavras-chave:** Poluição sonora, meio ambiente, sustentabilidade, normalização, legislação.

## 1. Introdução

No Brasil, quando o leigo ouve as palavras “acústico”, ou “acústica”, logo imagina que se esteja tratando de um show com instrumentos musicais convencionais, ou de algum equipamento de sonorização.

No meio técnico, o engenheiro ou arquiteto costuma ver a acústica como uma necessidade circunstancial, em um projeto de auditório, ou de uma instalação para controlar barulho. Em outras palavras, a situação melhora um pouco, mas não chega a ser satisfatória.

Isso é quase nada, face ao vasto repertório de conhecimentos da Acústica Aplicada, uma ciência pouco conhecida, sobretudo por aqueles que, em casa, ou no trabalho, não se consideram prejudicados pelos problemas da poluição sonora do meio ambiente. Falar em controlar barulho para essas pessoas, chega a ser paradoxal, na medida em que muitas delas o praticam, ou o procuram, como forma de lazer, ou o aceitam no espaço público, como uma inconveniência inerente às grandes metrópoles.

Isso ocorre por ignorância, o pior inimigo do meio ambiente, desde o micro-contexto da residência de alguém até o macro-contexto do espaço público e da natureza.

A EDUCAÇÃO é fundamental em Acústica do Meio Ambiente, como em qualquer outra modalidade das ciências ambientais. Depois, em ordem de importância, vem o EMPENHO em fiscalizar, em fazer cumprir os regulamentos específicos. Por último, resta o recurso à ENGENHARIA, no caso, à Engenharia

Acústica, quando os procedimentos conscientes e corretos não bastam para solucionar os problemas e o aporte técnico faz-se necessário. Esse é o famoso tripé dos “3 Es”, que sustenta as ciências aplicadas.

Como a regulamentação em Acústica Ambiental, no Brasil, depende muito das normas técnicas, o ESFORÇO NORMATIVO é um quarto “E”, embutido no Empenho em fiscalizar, destinado ao fracasso, se as normas forem de má qualidade.

As leis sobre poluição sonora, baseadas em normas, estão no centro do processo. São elas que enunciam os problemas e os quantificam, possibilitando seu controle:

### O QUE NÃO SE MEDE, NÃO SE ADMINISTRA

A engenharia acode o que não é possível resolver apenas através de mudanças de atitude provocadas pela educação bem sucedida. As normas então funcionam como interface com a engenharia, com base nas soluções disponíveis, estimulando-a a ir além e oferecer alternativas cada vez mais eficazes e acessíveis.

## 2. Educação sensorial

Tenhamos em conta o que aconteceu com os automóveis, mesmo os dos modelos mais populares, que hoje são muito mais confortáveis para o usuário, do ponto de vista do ruído e das vibrações, do que os de duas décadas atrás. Com a entrada de modelos importados no mercado brasileiro, a maioria com melhor padrão de conforto do que o dos similares nacionais, as pessoas conheceram o prazer de dirigir com os vidros fechados, podendo conversar, ou usufruir da qualidade do sistema de som do veículo, com baixa

interferência por ruídos externos ou internos. Quem experimentava essas novas sensações, passava a buscá-las nas novas aquisições e as montadoras passaram a investir nesse quesito.

Essa é a educação sensorial, onde os benefícios almeçados não são apenas explicados por palavras, mas proporcionados às pessoas, para que os experimentem e adotem.

A recíproca é verdadeira. Se deixarmos a poluição sonora sem controle, os padrões de quietude do meio ambiente serão progressivamente rebaixados, até o caos, como profetizados nos filmes de ficção científica, sobre um mundo futuro em desordem total, em que as pessoas não têm outra alternativa senão submeter-se às circunstâncias adversas, com as conseqüências daí oriundas, como sofrimento e violência.

A poluição sonora ambiental é um fato das grandes cidades, ou a elas relacionado. É inevitável, pois decorre do adensamento de atividades e de fontes de ruído. E em ambientes cada vez mais pulsantes, aos nossos ouvidos, até os padrões culturais, como os de musicalidade, por exemplo, acabam se ajustando, muitas vezes alimentando o processo de degradação.

Mas, padrões essenciais de quietude precisam ser mantidos, para não perdermos nossas referências. Em meio a tanta agitação, precisamos de ilhas de tranquilidade, nos nossos parques públicos, nos nossos lares, nas escolas, nos locais de trabalho intelectual, clínicas, etc. É preciso educar as pessoas, desde tenra idade, para essa preservação.

#### O MAIOR DESAFIO PARA A EDUCAÇÃO AMBIENTAL ESTÁ NA ESCOLA PÚBLICA

Sintomaticamente, foi na escola pública que surgiu uma iniciativa pioneira, graças a uns poucos professores da Escola Municipal de Ensino Fundamental Desembargador Amorim Lima, em São Paulo e aos programas lá instituídos, de educação ambiental, utilização racional de recursos naturais e preservação do espaço escolar.

Motivados e atentos ao desenvolvimento dos programas, deram-se conta dos excessos de ruído na escola e passaram a estudar o problema (Ref. 5). Encontraram a norma NBR 10152 da ABNT (Ref. 1.2). Para entender a norma e fazer as medições dos níveis de ruído, recorreram ao pessoal da Secretaria do Verde e do Meio Ambiente que vinha apoiando o programa de educação ambiental da escola, num parque público próximo ao local.

Começaram a conscientizar os alunos, optando inicialmente, pelos da 6ª série, mais adiantados nos estudos de ciências. Valeram-se de meios improvisados, mas eficazes, como o código de luzes dos semáforos de trânsito, simulados em cartolina colorida, para sinalizar excessos de ruído nas salas de aula.

Foram além. Incluíram a escola no programa de saúde auditiva, conduzido por fonoaudiólogas da Secretaria Municipal da Saúde, que buscaram correlações dos níveis de ruído com os resultados de alterações auditivas constatadas entre os alunos da 6ª série.

Finalmente, voltaram sua atenção para a reforma que estava sendo feita no prédio escolar, outro fato oportuno, e procuraram investigar, com o engenheiro responsável, quais eram as implicações das características construtivas e dos acabamentos, no agravamento do ruído.

Tiveram então a idéia de procurar o IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas, para montar um programa amplo de pesquisa sobre todos os aspectos do problema. Essa iniciativa acabou resultando na aprovação pela FAPESP – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, de um projeto de pesquisa em políticas públicas intitulado “Conscientização para a diminuição do ruído nas escolas: uma preocupação do Poder Público com a saúde auditiva das crianças e a melhoria do rendimento escolar”.

O projeto tinha três fases. Além de criar a metodologia de como lidar com o problema, deveria testá-la e aplicá-la em várias escolas, iniciando o processo da sua disseminação. A FAPESP porém exigia que os participantes, não só do IPT, mas das instituições parceiras, respondessem pelo projeto até o seu término, salvo alguma substituição por motivo de força maior. Desastrosamente, com a mudança da administração municipal, todos os participantes da Secretaria Municipal da Saúde, foram remanejados e passaram a exercer funções inconciliáveis com as suas missões no projeto que, assim, teve que ser encerrado.

Mas a Fase 1 do projeto ficou pronta, configurando todo um programa, que poderá ser retomado quando condições favoráveis voltarem a convergir, como no caso da Escola Municipal de Ensino Fundamental Desembargador Amorim Lima.



Foto 1: Medições de níveis de ruído em um parque e explicações aos alunos da EMEF Desembargador Amorim Lima, em São Paulo.

Classes barulhentas, por ações externas, ou por indisciplina do alunos e professores desgastados, por não saberem como lidar com a situação, somam-se ao quadro inaceitável de mazelas do sistema educacional brasileiro. Tais situações levam as crianças a acharem que deve ser assim nos demais ambientes que freqüentam e levarão esses conceitos para a fase adulta, encadeando uma série de conseqüências nefastas para a sociedade, em termos de poluição sonora.

A conscientização de crianças e jovens, nas escolas, sobre o barulho excessivo, bem como a sua educação sensorial a esse respeito, são necessidades cujo atendimento não pode mais ser postergado. Isso está previsto na Resolução nº. 2 do CONAMA – Conselho Nacional de Meio Ambiente (Ref. 2.1). Tais ações devem ser entusiasticamente formuladas e persistentemente postas em prática, primeiramente pelos professores, depois pelos alunos que, idealmente, deverão estendê-las a seus pais. Assim encontrarão terreno propício para, gradualmente, transformarem-se em bons e duradouros hábitos comportamentais.

### 3. A importância das normas

Não é um fato isolado, o que ocorreu com a Escola Municipal de Ensino Fundamental Desembargador Amorim Lima, em São Paulo, onde professores perceptivos e ativos procuraram diagnosticar, quantificar e agir contra o excesso de ruído em salas de aula. A revista Nova Escola publicou uma matéria sobre o assunto (Ref. 6) e o alentado retorno em e-mails às fontes de consulta mostrou que a preocupação é generalizada. Porém, a tônica dos relatos foi a falta de critérios para enfrentar o problema. O inédito, no caso da Amorim Lima, foi a pré-existência, na escola, do programa de conscientização ambiental, incluindo o ruído, que lhes abriu as portas para a norma NBR 10152 e lhes permitiu medir e comparar os resultados com os valores recomendados. A partir da premissa fundamentada em uma norma, as ações puderam ser formuladas, aprovadas e postas em prática.

UMA BOA NORMA SOBRE A QUALIDADE DO MEIO AMBIENTE, ABRE TODAS AS PORTAS PARA A QUESTÃO DA SUSTENTABILIDADE.

Infelizmente, esse não é o caso da NBR 10152.

Foi suficiente para a escola Amorim Lima, porque os níveis de ruído medidos eram tão elevados, que os critérios e procedimentos da norma, mesmo precários, não deram margem a dúvidas. Porém, nos dois casos que serão relatados a seguir, deixou muito a desejar.

A exemplo de outras metrópoles do primeiro mundo, São Paulo tem uma lei, a de nº 11780/95 (Ref. 4.2), limitando o agravamento permanente da poluição sonora no espaço público, causado por obras viárias e outros tipos de intervenções urbanas.

Essa lei surgiu na esteira de uma enxurrada de processos movidos contra a prefeitura, após a construção do Elevado Presidente Arthur da Costa e Silva, em 1971, popularmente conhecido como “Minhocão”. A Foto 2, feita mais de dez anos depois, mostra a acentuada degradação dos prédios, ao longo de um trecho da outrora valorizada Av. São João, da primeira metade do século passado. Ninguém suportava morar no local por muito tempo, a não ser por extrema necessidade, aproveitando-se de ofertas de locação por preços aviltantes. Conseqüentemente, a manutenção dos prédios simplesmente caiu a zero, na maioria dos casos. Outro espetáculo deprimente eram os apartamentos vazios e depredados dos andares mais baixos, que a Prefeitura foi obrigada a adquirir, em conseqüência dos processos vitoriosos, movidos contra ela.

O caso do Minhocão criou jurisprudência e foram movidas novas ações na justiça, relativas a outras obras viárias, em outros pontos da cidade. Resolveu então a Prefeitura, propor a lei, que dizia até que ponto essas obras poderiam agravar a poluição sonora, sem prejudicar seriamente o munícipe.



Foto 2. Prédios degradados, principalmente por excesso de poluição sonora, nas laterais do “Minhocão”, em meados dos anos 80, em São Paulo.

A Prefeitura de São Paulo, porém, procurou repartir a responsabilidade de proteger os munícipes, com os incorporadores de novas edificações com funções sensíveis ao ruído externo, a saber, aquelas cujo uso predominante seria para tratamento de saúde, ensino, habitação em condomínio e trabalho em prédios de escritórios. A lei passaria a exigir um laudo técnico do nível de poluição sonora própria do local da

implantação do futuro edifício, feito por instituições especializadas e de comprovada experiência técnica na área. Ao se dar entrada no projeto, para aprovação pela Prefeitura, o laudo deveria ser anexado, para permitir avaliar se as soluções construtivas adotadas permitiriam atender o disposto na norma NBR 10152, quanto aos níveis de ruído interno, oriundos do meio externo.

A lei perdura até hoje, é válida, segundo parecer do advogado Waldir de Arruda Miranda ( Ref. 7), mas não conseguiu ser regulamentada, por indefinições nos procedimentos de medição da norma. Não houve como regulamentá-la de outro modo, uma vez que a lei precisaria estar de acordo com o a Resolução nº. 1 do CONAMA (Ref. 2.1), de que consta a NBR 10152.

Ficou assim cerceada, a extraordinária importância dessa lei, em favor da sustentabilidade do meio urbano, em São Paulo, no que se refere ao controle da poluição sonora

Mas há fatos conexos, ainda mais lamentáveis.

Em 2003, a Prefeitura foi novamente acionada, devido ao caso do ruído do Minhocão, desta vez pelo Ministério Público. Resolveu procurar uma solução definitiva para o problema e instituiu um concurso de projetos com essa finalidade (Ref. 9). Como realizava estudos para estabelecer a Matriz dos Indicadores Ambientais Paulistanos, o episódio favoreceu a inclusão da Poluição Sonora entre os chamados Indicadores de Estado, com o prefixo E8. Novamente compareceram as normas da ABNT, como recursos metodológicos, desta vez incluindo a NBR 10151/00 (Ref. 1.1). Outra vez a NBR 10152/87 foi indicada, mas com a ressalva “em revisão”.

O IPT- Instituto de Pesquisas Tecnológicas, teve uma importante participação nesses estudos (Ref. 8). Para cada indicador, elaborava-se uma tabela, com todas as informações essenciais, como objetivos, metodologia, dados a coletar, etc. Numa das reuniões em que foram discutidos os meios de coletar os dados, considerou-se o grande prejuízo para a o programa, causado pela falta de regulamentação da lei 11780/95. Como essa lei exige o laudo técnico do nível de ruído em cada local onde foi erigido um edifício residencial, ou comercial em São Paulo, poderia, naquele momento, suprir com quase dez anos de resultados de medições, o banco de dados do indicador sobre poluição sonora, caso tivesse sido aplicada no período.

Assim, dentre todos os demais indicadores, o de poluição sonora saíria na frente, ensejando um bom momento para a causa dos que se preocupam com o problema. Estabeleceria uma referência. Criaria um estímulo para que iniciativas semelhantes fossem reproduzidas em outras cidades pelo país. Fomentaria estudos, convênios com universidades, formação de estudantes, aparelhamento de laboratórios, enfim, toda um revigoramento dessa área do conhecimento.

Temos aí a eloqüente evidência da importância de uma norma, infelizmente, neste caso, vista pelo lado oposto, ou seja, pelo fato de existir, mas não corresponder às exigências dos rigores de uma lei.

#### 4. Retrospecto positivo

Apontam-se fatos negativos neste artigo para que se aprenda com eles. E nessa sondagem, por vezes se descobre que têm também seus aspectos positivos.

Na Escola Amorim Lima conseguiu-se tirar proveito de uma norma, embora ruim, para um dos apoios do tripé dos 3 “Es”, mencionados no início deste artigo, o da educação. Não se conseguiu ir além dos limites da própria escola e estendê-lo a toda rede municipal de ensino, como se pretendia, por um erro estratégico na montagem do projeto, às vésperas de uma eleição municipal, como é importante recordar e frisar. Seria transformado em um programa de políticas públicas, para a educação e para a saúde auditiva das crianças. A nova administração, simplesmente removeu o pessoal da saúde.

Que esse erro não se repita novamente com nenhum projeto futuro nessa área, em que oportunidades como essa são tão escassas.

Mas ficou a semente, a ser lançada em terreno propício, em qualquer parte do país. Isso poderá ocorrer assim que a nova NBR 10152 ficar pronta e se divulgue um esclarecimento sobre o programa e sobre a norma, atendendo plenamente a demanda provocada pela matéria da revista Nova Escola. No momento, esse esclarecimento é desaconselhável, porque o enorme interesse despertado pelo assunto em diversas escolas pelo país, sempre esbarra na norma, ou seja, como acessá-la, como interpretá-la e como fazer as medições.

No caso da Lei 11780 de São Paulo, o retrospecto pode ser visto também pelo lado positivo, pelo fato da lei ter recebido, quase dez anos depois, o reforço do programa de Indicadores Ambientais Paulistanos, o que certamente facilitará sua regulamentação, assim que se dispuser da nova NBR 10152.

Ainda com respeito a essa lei, há uma circunstância recente, ainda mais benéfica, que é iminência da entrada em vigor da norma de desempenho de edifícios residenciais (Ref. 1.7), válida para quaisquer números de pavimentos, no caso da acústica. Para esse tipo de edifício, recorde-se que a lei exige a avaliação dos projetos, à vista do nível de ruído externo, apontado pelo laudo técnico obrigatório. A nova norma de desempenho poderá, então, fornecer referências úteis para o setor de aprovação de projetos da Prefeitura de São Paulo.

## UMA BOA LEI SOBRE MEIO AMBIENTE É EDUCATIVA E REFORÇA O CONHECIMENTO TÉCNICO NA ÁREA.

Exploremos melhor esse argumento, retrocedendo um pouco mais no passado.

No começo dos anos 70, São Paulo era crivado de pequenas e médias indústrias e oficinas, em meio a residências, nos bairros populares em zonas mistas de alta densidade populacional. Havia abusos por excesso de ruído interno e externo desses estabelecimentos. A Prefeitura formou, então, uma comissão com representantes do governo, da universidade e da iniciativa privada para estudar o problema. Essa comissão foi além da questão das fábricas e oficinas e elaborou e regulamentou uma lei, tida como completa para a época e, por muitos conhecedores do assunto, considerada como a melhor que São Paulo já teve, sobre controle da poluição sonora.

A Lei 8106, de 30/08/1974, regulamentada dois meses depois pelo Decreto 11467, surtiu efeitos memoráveis. Tornou-se rapidamente conhecida pela população, que a alcunhou de “Lei do Silêncio” e demandava continuamente as ações de fiscalização, a ponto de ter-se que constituir um órgão da Prefeitura, com essa finalidade, a CONSUR- Supervisão de Controle de Sons Urbanos.

Os sindicatos, céticos a princípio e receosos das dificuldades que os patrões enfrentariam para cumprir a lei, acabaram, quase todos, reconhecendo que ela ajudou, não só à melhor compreensão de como tratar o ruído, mas, em muitos casos, teve como decorrência a melhor organização dos turnos de trabalho, para evitar atividades muito ruidosas no período noturno. Houve até casos de empresas, propensas a modernizarem-se e ampliar instalações, que decidiram, a partir da lei, mudar-se para áreas predominantemente ou estritamente industriais, contribuindo para o melhor arranjo da cidade, por zonas de uso do solo.

Assim, no caso geral, as fábricas agregaram conhecimento técnico sobre controle de ruído, formando melhor seus engenheiros de segurança do trabalho. Os reflexos disso foram duradouros, uma vez que, em São Paulo, nos dias de hoje, são raríssimos os conflitos de vizinhança com indústrias, por excesso de poluição sonora.

Por outro lado, parte desse conhecimento técnico brotou de órgãos como o IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas, reforçando a perna da engenharia, do tripé dos 3 “Es”. Pesados investimentos foram feitos no laboratório de acústica, para torná-lo ágil, com o sistema de “slides de amostras” para testes de isolamento sonora. Constituiu-se um Núcleo de Estudos de Acústica, que chegou a ter 15 funcionários.

A Lei 8106 da cidade de São Paulo foi, sobretudo, educativa para a população. Nunca os jornais paulistanos publicaram tantas matérias sobre poluição sonora.

Isso é essencial. No futuro, quando se espera que o processo educativo comece na escola fundamental, é preciso que os jovens e adultos tenham o reforço do seu aprendizado, ao constatar a fiscalização do governo, coibindo os excessos com base em leis bem formuladas. Só com a parceria entre povo e governo, se conseguirá conter a avassaladora maré de abusos, que se prenuncia, num e noutro setor, como o dos estabelecimentos de diversão, por exemplo.

Especificamente para esse setor, São Paulo tem a Lei 11501/94 (Ref. 4.1). Há também o PSIU - Programa de Silêncio Urbano, bem aparelhado e atuante, mas que não consegue dar conta do número de reclamações. Para a maioria dos empresários desse ramo, falta o engajamento na causa da contenção do ruído e o interesse pelos conhecimentos técnicos, situação que um bom processo educativo, desde os bancos da escola, certamente ajudaria a melhorar.

### 5. Considerações finais

É notório que neste artigo, raciocina-se sobre acontecimentos no cenário paulistano, entre tantos outros, espalhados por todo o país, de que o autor tomou conhecimento, nos últimos 30 anos. Isso deve-se simplesmente a uma questão de delimitação de enfoque e por estar convicto de que todos os efeitos aqui analisados têm rebatimentos sobre os demais. Senão, vejamos, as normas em que se apóiam as leis paulistanas, sustentam, por exemplo, também a Resolução nº. 1 do CONAMA (Ref. 2.1), de âmbito nacional.

A megalópole paulistana, pelo insuperável potencial de problemas urbanos, certamente seria o principal desafio para o Empenho fiscalizador, perna que não pode fraquejar, do tão mencionado tripé da sustentabilidade ambiental.

E o que é, afinal, sustentabilidade ?

Há muitas definições, mas todas deixam claro que sustentabilidade não convive com indefinições quanto à ação pró-ativa das comunidades, quanto às normas que regem o processo e quanto ao equilíbrio das soluções disponíveis. Em outras palavras, requer o engajamento popular que, por sua vez não ocorre sem o esclarecimento convincente, sem a constatação de que as boas causas estão sendo defendidas pelo Poder Público e sem um repertório de medidas corretivas acessíveis e não conflitantes com outros requisitos e meio ambiente.



Nos bons tempos da “Lei do Silêncio”, em São Paulo, conhecemos um pouco dessa sustentabilidade, em termos de controle da poluição sonora. As regras do jogo estavam bem formuladas. Nunca antes, tantas tabelinhas de níveis comparativos foram publicadas nos jornais e revistas. As pessoas telefonavam, a fiscalização aparecia e os fiscalizados aprendiam soluções, muitas vezes do tipo “ovo de Colombo”, como ventilar uma oficina pelo lado certo, longe da janela do dormitório de uma residência vizinha.

É hora da nossa terceira geração de estudantes potenciais de Acústica Aplicada, ser cativada para a causa da sustentabilidade, para as suas cidades, para sua gente, para as famílias que têm agora e que virão a constituir. É hora de verem seus professores, e os professores dos seus professores, comparecerem, colocarem toda sua experiência na formulação das regras do jogo e na gestão de todo o processo de jogar. É hora de ajudarem esse esforço, pesquisando em regime de interação, tão simplificada, neste mundo globalizado.

**NENHUMA PROVIDÊNCIA ESTRATÉGICA É TÃO EMERGENCIAL, COMO REVER E COMPATIBILIZAR AS NORMAS BRASILEIRAS**

Um grupo de estudos deve ser formado para essa finalidade. Deverá reunir todos os documentos, fazer as análises, compartilhadas com a comunidade de acústicos de todo o país, elaborar recomendações e submetê-las às comissões atuantes da ABNT, solicitando retorno e reciclando o processo, até que se chegue à convergência dos esforços.

Prevê-se que alguns casos serão demorados e exigirão pesquisa. Por conseguinte, outro grupo de estudos deverá conhecer o que se ensina em Acústica, nas nossas universidades, para sugerir as oportunidades de engajamento dos estudantes.

## Referências

- [1] ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas:
- 1.1. NBR 10151-00. Avaliação do ruído em áreas habitadas, visando o conforto da comunidade.
  - 1.2. NBR 10152-87 (Em revisão). Níveis de ruído para conforto acústico.
  - 1.3. Projeto 02:135.01-005/2005 (Revisão da NBR 10152-87). Medição e avaliação de ruído em ambientes internos.
  - 1.4. NBR 6401-80. Instalações centrais de ar-condicionado para conforto. Parâmetros básicos de projeto.
  - 1.5. NBR 8572-84. Fixação de valores de redução de nível de ruído para tratamento acústico de edificações expostas ao ruído aeronáutico.
  - 1.6. NBR 12314-97. Critérios de ruído para recintos internos nas edificações submetidas ao ruído aeronáutico.
  - 1.7. Projeto 02:136.01.001/2006. Desempenho de edifícios habitacionais de até cinco pavimentos (Partes 1 a 6).
- [2] Resoluções do CONAMA - Conselho Nacional do Meio-Ambiente:
- 2.1 Resoluções no. 1 e no. 2, de 08/03/90 (assunto: poluição sonora ambiental).
  - 2.2 Resoluções no. 1 e no. 2, de 11/02/93 (assunto: poluição sonora veicular).
  - 2.3 Resolução no. 20, de 07/12/94 (assunto: “Selo Ruído”).
- [3] Portarias do Ministério do Trabalho:
- 3.1 Portaria 3214, de 08/06/78 – NR 15. Atividades e operações insalubres: proteção no ambiente de trabalho contra ruídos acima de 85 dB(A).
  - 3.2 Portaria 3751, de 23/11/90 – NR 17. Ergonomia: proteção contra ruídos excessivos no ambiente de trabalho intelectual
- [4] Legislação do Município de São Paulo:  
[http://www.prefeitura.sp.gov.br/servicos/cidadao/cidadania/leis\\_municipais/index.php](http://www.prefeitura.sp.gov.br/servicos/cidadao/cidadania/leis_municipais/index.php)
- 4.1 Lei 11501, de 11/04/94. Controla a emissão de ruídos por estabelecimentos de diversão e outros.
  - 4.2 Lei 11780, de 30/05/95. Cria responsabilidade técnica dos projetistas de edificações e obras públicas quanto à proteção dos usuários de determinados edifícios contra excessos de ruído provenientes do meio externo.
- [5] Kuniyoshi, Tereza T. Oliveira, Rosa P. da C. A experiência do “Projeto Ruído” na Escola Municipal de Ensino Fundamental Desembargador Amorim Lima. Relatório FAPESP “Conscientização para a diminuição do ruído nas escolas: uma preocupação do Poder Público com a saúde auditiva das crianças e a melhoria do rendimento escolar” Anexo 3, Documento 1. São Paulo. 2000.
- [6] Jover, Ana. Barulho demais faz mal à saúde. Revista Nova Escola nº. 179, Editora Abril, jan.-fev.2005. <http://revistaescola.abril.com.br/edicoes/0179/aberto/es-tresse.shtml>
- [7] Miranda, W. de A. M. Perturbações sonoras nas edificações urbanas. 3ª. ed. Editora Revista dos Tribunais, São Paulo, 2004.
- [8] Matriz dos Indicadores Ambientais Paulistanos. Relatório IPT nº 66910, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A. 2004.
- [9] <http://noticias.usp.br/acontece/obterNoticia?codnte=12380> (sobre o projeto vencedor do concurso para reforma do Minhocão, em São Paulo).

[http://www.cobracon.org.br/novos/Parte\\_01\\_Maio\\_2006.pdf](http://www.cobracon.org.br/novos/Parte_01_Maio_2006.pdf)

# Impacto sonoro da implantação do metrô de Salvador em edificações adjacentes, considerando os reflexos na saúde da população.

Barretto, D.M.\*; Freitas, I.M.†

\*Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana, UFBA, Salvador, BA, [deboramirandabarretto@yahoo.com.br](mailto:deboramirandabarretto@yahoo.com.br)

†Departamento de Transportes da Escola Politécnica, UFBA, Salvador, BA, [ilce@ufba.br](mailto:ilce@ufba.br)

## Resumo

Esse trabalho apresenta o relatório de andamento de dissertação que se propõe a fazer uma análise do planejamento do metrô de Salvador com relação à possibilidade do aumento do nível de ruído causado pelo percurso elevado e de superfície. Esse modo de transporte se caracteriza como uma fonte sonora móvel, que se desloca pela cidade e pode impactar a população. No Brasil raros são os trabalhos que tratam de sistemas metroviários, portanto existe a demanda de estudos capazes de desenvolver uma metodologia sistemática sobre esse tema. Ferramentas de GIS e modelos de previsão de ruído a partir da propagação sonora servirão de base para as análises. Portanto, esse estudo representa uma preocupação com a qualidade de vida daqueles que trabalham ou habitam nas zonas próximas e busca prevenir futuros problemas.

**Palavras-chave:** Poluição Sonora, Acústica ambiental, Ruído urbano, Modelos de propagação sonora.

## 1. Introdução

O conteúdo desse trabalho insere-se no contexto da acústica, enquanto ciência que estuda o som, buscando expor a influência que essa área tem no ambiente urbano e na saúde dos cidadãos. É preciso enfatizar, justificar e transmitir tanto a possibilidade quanto à necessidade de se reduzir a Poluição Sonora das cidades, pois ruído excessivo provoca efeitos negativos que podem ser observados a curto e longo prazo, com reflexos em todo o organismo e não apenas no aparelho auditivo. Existem nas cidades diversas fontes de ruído: Fontes estacionárias, Fontes que provêm do tráfego ferroviário, Fontes provenientes de aeronaves e Fontes que compõem o tráfego viário. No entanto, o progresso tecnológico não deve se apoiar em bases de degradação do homem e do seu meio.

O som é parte fundamental das atividades dos seres vivos e dos elementos da natureza, mas ruídos em excesso provocam efeitos negativos que podem ser observados a curto e longo prazo, com reflexos em todo o organismo e não apenas no aparelho auditivo.

Embora o ruído produza efeitos cumulativos no organismo, do mesmo modo que outras modalidades de poluição, diferencia-se por não deixar resíduo no ambiente tão logo seja interrompido. A capacidade do organismo para se adaptar a barulhos de variadas espécies não implica em poupança do sistema nervoso. O conhecimento acerca dos efeitos do ruído no organismo ainda não foi suficientemente divulgado e a sociedade não tem motivação para combatê-lo.

Objetiva-se justificar que o progresso tecnológico não deva se apoiar em bases de degradação do homem e do seu meio. Como o metrô de Salvador ainda está em fase de projeto e implantação e por não se configurar completamente subterrâneo, existe a possibilidade da aplicação prática dos indicadores, ou das propostas obtidas no presente trabalho, como por exemplo a instalação de barreiras acústicas em determinados trechos. O fato de o metrô ser um modo de transporte intimamente ligado aos novos paradigmas do mundo moderno requer estudos que possibilitem evitar qualquer tipo de impacto negativo.

É importante desenvolver uma metodologia de pesquisa que possa ser adotada em toda a extensão da linha e em todas as futuras etapas, visto que esse trabalho se limitará a analisar o trecho da linha referente a Avenida Mario Leal Ferreira (Figura 1), conhecida como Avenida Bonocô. O principal motivo da escolha dessa Avenida é o fato da linha do metrô nesse trecho estar totalmente ao ar-livre e por pertencer a uma região com uma grande densidade populacional, como pode ser observada na figura seguinte.

Os resultados obtidos desse trabalho de pesquisa serão especialmente úteis para a cidade de Salvador, por existirem poucos estudos sobre o impacto da Poluição Sonora no município, podendo este nortear ações efetivas para impedir o crescimento desse efeito negativo no meio, pois podem ser implementados pelos órgãos competentes e demais interessados na garantia da qualidade da vida.



Figura 1 – Foto aérea de 1998 e trecho da Av. Bonocô - CONDER

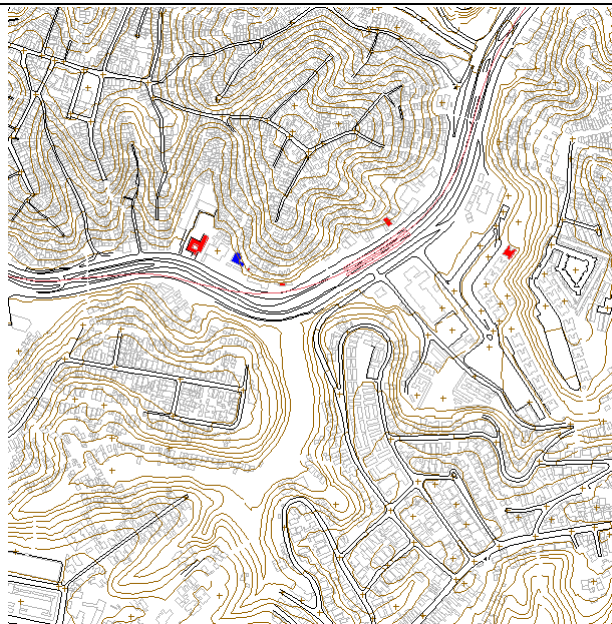


Figura 2 – Imagem obtida do Spring

## 2. Metodologia

Os mapas de ruído são ferramentas estratégicas de análise e planejamento, porque permitem visualizar condicionantes dos espaços por requisitos de qualidade do ambiente acústico e propicia o enquadramento das medidas de controle de ruído nos planos de ordenamento do território (DGA, 2001). O SIG com tecnologias de geoprocessamento permite essa modelagem, pois são capazes de relacionar o espaço físico com dados numéricos de valores de referência e/ou calculados. Pretende-se trabalhar com o Spring (Figura 2) por ser um software de domínio público e que tem funções de processamento de imagens, análise espacial, modelagem numérica de terreno e consulta a bancos de dados espaciais, o que permitirá a simulação da propagação do som observadas em faixas em torno da linha do metrô.

As propostas de ações e intervenções no Sistema de Transportes Urbanos geram modificações das condições acústicas nas vizinhanças das vias afetadas, por isso é importante dispor de instrumentos que possibilitem a previsão de tais modificações, através da previsão do ruído produzido pelo fluxo de veículos que utilizarão as vias, modificadas ou construídas.

Segundo o MHU e a EBTU (1988) tal prognóstico será utilizado para duas finalidades distintas:

- a. Indicação das providências voltadas para a atenuação de ruídos (que estiverem acima dos níveis permitidos);
- b. Avaliação dos impactos (positivos ou negativos) produzidos pela implementação das medidas propostas.

O projeto *HarmoNoise* teve início em 2001 e objetiva desenvolver um modelo Europeu de previsão de ruído ambiental de tráfego rodoviário e ferroviário, visando proporcionar um método mais preciso e de confiança, cuja base tenha aceitação internacional para todos os usuários através da Europa. A idéia é que ele se torne obrigatório para as autoridades e especialistas de todos os países membros da Comunidade Européia, pois busca harmonizar os cálculos. A característica principal desse novo método é calcular o nível de ruído em certo ponto e comparar com os limites legais sugeridos. A possibilidade de se produzir mapas de ruído e acumular o NPS proveniente de diversas fontes, permitindo que a energia acústica total seja observada, além de relacionar com o grau de incômodo, permite que o *HarmoNoise* sirva de base para decisões políticas relacionadas ao planejamento urbano (VOS, 2006).

Objetivos específicos:

1. Calcular e analisar o nível de pressão sonora resultante e a propagação do som com a implantação do metrô;
2. Relacionar o NPS resultante com a tipologia funcional das edificações lindeiras à linha do metrô de acordo com os parâmetros normatizados na NBR 10.152;
3. Analisar a relação entre os resultados de NPS obtidos nas edificações e a saúde no que diz respeito a possibilidade do surgimento de alterações tanto fisiológicas quanto psicológicas, considerando tanto o nível de ruído quanto o tempo de exposição.

Para tanto será necessário primeiramente calcular e analisar o nível de pressão sonora resultante e a propagação do som com a implantação do metrô. Para

isso serão feitos cálculos de propagação do som através do modelo de previsão de ruído ambiental de tráfego rodoviário e ferroviário *HarmoNoise*, que foi desenvolvido pela Comunidade Européia recentemente e objetiva ser um método mais preciso e de confiança, cuja base tenha aceitação internacional.

A partir de então será possível relacionar o NPS resultante com a tipologia funcional das edificações lindeiras à linha do metrô de acordo com os parâmetros normatizados. Para alcançar esse objetivo, os mapas de ruído, que são ferramentas estratégicas de análise, serão gerados em SIG, pois permite relacionar o espaço físico com dados numéricos de valores de referência e/ou calculados. Pretende-se trabalhar com o Spring por ser um software completo e de domínio público.

A pesquisa será finalizada com a análise da relação entre os resultados de NPS obtidos nas edificações e a saúde no que diz respeito a possibilidade do surgimento de alterações tanto fisiológicas quanto psicológicas, considerando tanto o nível de ruído quanto o tempo de exposição. Os parâmetros da OMS e das NBRs referentes ao tema servirão de referência. Defende-se aqui uma implantação consciente e sustentável do metrô de Salvador.

## 6. Considerações finais

O tema proposto decorre, portanto, da reflexão sobre as conseqüências do ruído produzido pelo sistema de tráfego urbano na qualidade de vida das pessoas que vivem nos grandes centros urbanos. A Poluição sonora, juntamente com a poluição do ar, das águas e a alteração das áreas verdes tem sido um dos grandes fatores da degradação da sociedade moderna, cujo controle deve ser incorporado à prática, visando a avaliação sistemática do grau de poluição existente nas cidades, sempre a procura de soluções alternativas para as situações constatadas, e ampliando o conhecimento no campo preventivo visando planos, projetos e legislações urbanísticas.

Defende-se aqui uma implantação consciente e sustentável do metrô de Salvador, de forma a evitar um aumento dos níveis de ruído e propiciar à população uma melhora na qualidade de vida no ambiente urbano com relação à questão da mobilidade urbana, sem que isso venha a gerar impactos negativos.

## Referências

- [1] ABNT 10152:2000: Níveis de ruído para conforto acústico.
- [2] Bluhm, G., Nordling, E.: *Health Effects of noise from Railway Traffic: The HEAT Study*. In: *Internoise*, 2005, Rio de Janeiro, Brasil, 2005.
- [3] CONDER: Fotos aéreas do município de Salvador: área continental, ilha de Maré e ilha dos Frades, Ago, 1988.

- [4] S. Gerges: *Ruído, Fundamentos y Control*: Florianópolis: Copyright, 1998.
- [5] A. Katagiri.: Análise do nível de ruído interno do metrô do Distrito Federal. In: XVII ANPET, Rio de Janeiro, 2003.
- [6] MHU, EBTU: *Manual Operacional de Avaliação dos Impactos Ambientais de Projetos de Transportes Urbanos*, Brasília, 1988.
- [7] DGA: *Recomendações para seleção de métodos de cálculos a utilizar na previsão de níveis sonoros*, Portugal, 2001.
- [8] U. Moehler, L. Greven: *Community Response to Railway and Road Traffic Noise: a Review on German Field Studies*. In: *Internoise*, 2005, Rio de Janeiro, Brasil, 2005.
- [9] E. Ohrstrom: Effects of simultaneous exposure to noise from road and railway traffic. In: *Internoise*, 2005, Rio de Janeiro, Brasil, 2005.
- [10] F. Souza: *A Poluição Sonora ataca traiçoeiramente o corpo*: Belo Horizonte: Meio Ambiente em Diversos Enfoques – Secretaria Municipal do Meio Ambiente, 1992.
- [11] P. Zannin: *Incômodo causado pelo ruído urbano à população de Curitiba*, PR. Curitiba: Revista Saúde Pública, 2002.
- [12] J. Lage: *Atenuação de ruídos e vibrações da Linha 5: Capão Redondo-Largo Treze*. In: XX Encontro da SOBRAC, Rio de Janeiro, Brasil, 2002.
- [13] P. Vos, M. Beuving, E. Verheijen.: *Harmonised accurate and reliable methods for the EU Directive o the assessment and management of environmental noise: Final Technical report*, 2005. Disponível em: [http://www.imagine-project.org/bestanden/D04\\_WP7\\_HAR7TR-041213-AEAT04.pdf](http://www.imagine-project.org/bestanden/D04_WP7_HAR7TR-041213-AEAT04.pdf). Acesso em: 05 mar. 2006.
- [14] WHO: *Guidelines for community noise*: Geneva, 1999.

# Implementação de Métodos para a Simulação Acústica e Auralização de Salas

Gomes, M.H.A.<sup>\*,+</sup>; Bertoli, S.R.<sup>\*</sup>; Dedecca, J.G.<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup> Departamento de Arquitetura e Construção, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da UNICAMP, mavelar@fec.unicamp.br, rolla@fec.unicamp.br, Campinas, S.P.

<sup>+</sup> Eco Acústica – Vibrações e Acústica Ltda., marcio@ecoacustica.com.br, Florianópolis, S.C.

## Resumo

O presente artigo descreve a implementação de dois métodos para a simulação acústica de salas: o Método do Traçado de Raios e o Método das Fontes Virtuais. Resultados de simulações de um auditório e de uma câmara reverberante são comparados com aqueles obtidos através de medições. Uma comparação com resultados da simulação de uma sala, feita por outros programas também é apresentada. A capacidade do primeiro método em representar o comportamento geral da Resposta Impulsiva pode ser vista, assim como a capacidade do segundo em representar em detalhes seu trecho inicial. Como se sabe, é possível escutar o resultado de uma simulação acústica, através do processo conhecido como “Auralização”. A implementação de um módulo para a auralização das salas simuladas é descrita e uma comparação entre o uso de diferentes métodos para realizar a operação de convolução, essencial neste processo, é apresentada.

**Palavras-chave:** Acústica de salas, Auralização, Simulação Numérica, Traçado de Raios, Fontes Virtuais.

## 1. Introdução

O comportamento acústico de um ambiente fechado pode ser modelado através de vários métodos, baseados na resolução da equação de onda ou na análise estatística da propagação da energia. A equação de onda pode ser resolvida analiticamente para alguns casos específicos (salas de planta e perfil retangular) ou através de métodos numéricos, tais como o Método dos Elementos Finitos ou o Método dos Elementos de Contorno. Os efeitos de interferência, difração e difusão das ondas sonoras são previstos, de forma inerente à solução. As maiores dificuldades provêm do fato de que a impedância acústica das superfícies devem ser conhecidas e o tempo de computação aumenta consideravelmente de acordo com a densidade modal da sala. Na prática, isso impossibilita o cálculo em salas grandes e em frequências altas.

Para a maioria dos casos, entretanto, aproximações bastante razoáveis podem ser feitas através dos métodos baseados na acústica geométrica, onde a propagação sonora é modelada de forma estatística e em termos energéticos. Os fenômenos associados à interferência de ondas são negligenciados ou incluídos através de modelos simplificados para a difração e reflexão difusa. Tais métodos são usados nos programas comerciais e não comerciais mais conhecidos e são, basicamente, combinações ou implementações puras do Método do Traçado de Raios, do Método da Transição de Energia e do Método das Fontes Virtuais.

Ao menos um grupo tem utilizado o Método do Traçado de Raios, combinado com o Método das Fontes

Virtuais, na contrapartida acústica de sistemas de Realidade Virtual [1]. Nesse caso, o primeiro é usado para: 1) pré-selecionar fontes virtuais “audíveis” e acelerar a simulação feita através do Método das Fontes Virtuais, 2) calcular o trecho final da Resposta Impulsiva e 3) calcular o trecho inicial desta, referente às reflexões que ocorrem de forma difusa. O Método das Fontes Virtuais é usado para calcular o trecho inicial da Resposta Impulsiva por ser mais preciso na determinação da distribuição das primeiras reflexões. Outras formas de implementação de métodos geométricos podem ser encontradas, por exemplo, em [2], [3] e [4], entre outros.

O presente artigo descreve a implementação dos Métodos das Fontes Virtuais e do Traçado de Raios feita na UNICAMP. Resultados da simulação acústica do auditório da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da UNICAMP e de uma câmara reverberante são comparados com aqueles obtidos através de medições. Além disso, apresenta-se uma comparação com resultados obtidos por outros programas para a sala usada como referência na primeira fase do terceiro estudo comparativo entre simulações acústicas de salas [5].

Um módulo para a “auralização” das salas simuladas também é descrito, no qual quatro formas diferentes de processar os resultados foram implementadas. O objetivo é de comparar o desempenho de cada uma e a qualidade do resultado final.

Os programas de simulação e o módulo de auralização foram desenvolvidos com o intuito de serem integrados na plataforma AcMus, resultante do projeto temático de

mesmo nome, financiado pela FAPESP, e sob a coordenação dos Professores Fernando Iazzetta (ECA-USP) e Fábio Kon (IME-USP). Tal plataforma conta atualmente com ferramentas para a medição de Respostas Impulsivas de salas e seu posterior processamento para a obtenção de parâmetros acústicos relacionados à reverberação e percepção do discurso ou da música (veja [www.gsd.ime.usp.br/acmus](http://www.gsd.ime.usp.br/acmus)). Os programas aqui descritos poderão em breve, junto com com suas instruções de uso, ser carregados da página [www.e-science.unicamp.br/ppa](http://www.e-science.unicamp.br/ppa) ou da página do projeto Acmus.

## 2. Método do Traçado de Raios

O Método do Traçado de Raios parte da idéia de que o som é irradiado pela fonte na forma de partículas, emitidas em diferentes direções e carregando uma certa quantidade de energia. Estas se propagam na velocidade do som e, quando encontram uma fronteira da sala ("parede"), são refletidas, mudam de direção e perdem energia, devido ao coeficiente de absorção da parede encontrada. Quando uma partícula encontra o receptor, definido por uma área ou volume, a quantidade de energia contida por ela e o tempo de chegada são registrados. O processo dura até que algum critério de parada seja satisfeito. Depois de seguir todas as partículas, a Resposta Impulsiva em cada receptor pode ser construída. A Figura 1 apresenta uma idéia deste processo.

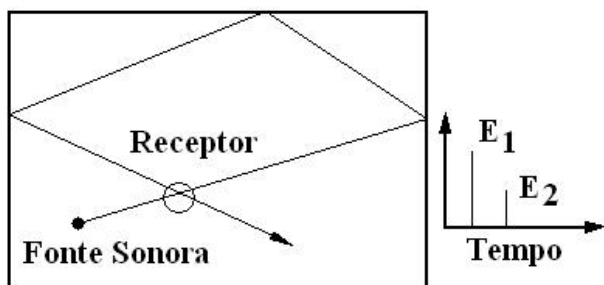


Figura 1: Idéia ilustrativa do Método do Traçado de Raios. Os índices 1 e 2 se referem ao primeiro e segundo encontro da partícula com o receptor.

O algoritmo para o método de Traçado de Raios é gerado a partir de operações com vetores. Para a rotina principal do programa devem-se conhecer:

- os vértices das paredes,
- os vetores normais aos planos que descrevem a geometria da sala,
- as coordenadas que indicam a posição da fonte sonora,
- as coordenadas que indicam a posição do receptor,
- o vetor que indica a direção inicial de propagação do raio.

Para cada plano da sala um escalar denota o coeficiente

de absorção daquela superfície ( $\alpha$ ). A atenuação do som no ar deve ser descrita através de um coeficiente ( $m$ ), que é função da temperatura e da umidade relativa do ar. A energia inicial do raio deve também ser definida e pode, por exemplo, assumir o valor unitário.

Dadas as condições iniciais, o primeiro passo deve ser a verificação de quais planos são interceptados pelo raio. Isso pode ser feito através do produto escalar:

$$\vec{N}_i \cdot \vec{v} = \|\vec{N}_i\| \|\vec{v}\| \cos \beta_i, \quad (1)$$

onde  $\vec{N}_i$  denota o vetor normal à  $i$ -ésima superfície,  $\vec{v}$  é o vetor que indica a direção de propagação do raio e  $\beta_i$  é o ângulo entre os dois vetores.

Se este resultado é maior do que zero, o ângulo  $\beta_i$  é agudo e indica que o raio não intercepta o plano definido por  $\vec{N}_i$ . Neste caso, o plano é eliminado do procedimento e deve-se então determinar qual dos planos interceptados está mais próximo da origem do raio. Isso é feito também através de operações vetoriais, semelhantes à descrita em (1). Um fluxograma e as operações detalhadas envolvidas na iteração de um raio são descritas em [6].

Em cada iteração, o programa verifica se o raio atinge o receptor. Se isso acontece, a energia do raio e o instante do encontro são registrados.

Adotou-se a energia do raio como critério de parada no programa implementado, avaliada quando este encontra um plano da sala ou o receptor. Se ela é suficientemente pequena, comparada com a energia inicial, o raio é abandonado e o algoritmo é repetido para um raio que se propaga em outro sentido.

### 2.1 Modelo de fonte sonora

Existem vários métodos para gerar as direções dos raios a serem seguidos, como proposto em [6], por exemplo. No entanto, há uma questão relativa à uniformidade na distribuição dessas direções, abordada em [2], [7], [8] e [9]. No programa implementado neste projeto, adotou-se o método determinístico descrito em [2] e [9], baseado na subdivisão geodésica do icosaedro regular, o qual resulta em uma distribuição uniforme das direções.

Para a construção de tal fonte, parte-se dos vértices do icosaedro regular, dados por:

$$\begin{aligned} &(0, \pm 1, \pm \varphi), \\ &(\pm 1, \pm \varphi, 0) \text{ e} \\ &(\pm \varphi, 0, \pm 1), \end{aligned} \quad (2)$$

onde  $\varphi = (1 + \sqrt{5})/2$ .

O processo de subdivisão do icosaedro consiste em dividir cada aresta em  $n$  partes, gerando pontos  $P_i$ , onde

$i = 1, 2, \dots, n$ .  $n$  é função do número de raios  $N_R$ , que é um dado de entrada:

$$n = \sqrt{(N_R - 2)/10} \quad (3)$$

Para cada face, deve-se selecionar duas arestas (anteriormente divididas) e dividir as linhas  $\overline{P_i P_i}$  em  $i$  partes, com o mesmo procedimento usado anteriormente. A Figura 2 ilustra o processo e o resultado.

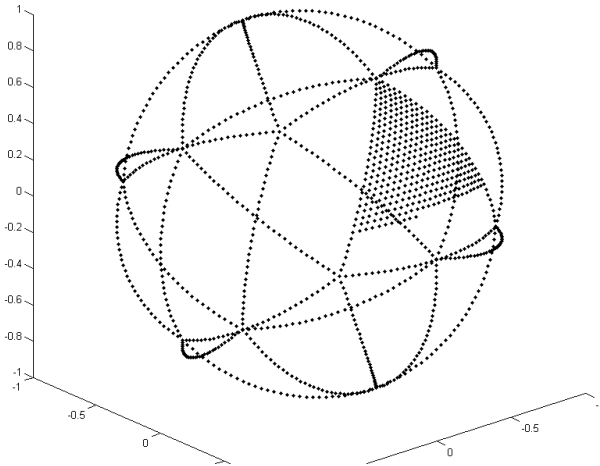


Figura 2: Processo de subdivisão geodésica do icosaedro regular.

As direções dos raios a serem seguidos são obtidas a partir dos pontos na superfície da esfera gerada e de seu centro.

### 2.2 Modelos de receptor

Dois modelos de receptor foram implementados, um descrito por uma esfera e outro descrito por uma área circular, sempre perpendicular ao raio incidente, conforme descrito em [2]. A energia do raio incidente no receptor esférico é dada por:

$$E_R = \frac{L}{2r} E, \quad (4)$$

onde  $E$  é a energia do raio na distância média entre a intersecção dele com as paredes da esfera,  $L$  é o comprimento do raio dentro da esfera e  $r$  é o raio da esfera.

Isso significa que um raio que atinge o centro da esfera, tem o fator  $L/2r$  igual a 1. Se o raio atinge a esfera, mas não o seu centro, tal fator assume valores menores. A energia de cada raio que atinge a esfera receptora é armazenada, assim como seu tempo de chegada. Isso é necessário para a construção da resposta Impulsiva. Para tanto, cada instante de tempo acumula os valores de energia dos raios que encontram o receptor naquele momento.

De acordo com [2],[10] e [11], no entanto, uma forma mais adequada de modelar o receptor seria através do uso de uma área circular e da conversão da energia sonora em “fluxo de energia“, isto é, em intensidade sonora. Considera-se que os raios atingem essa área sempre de forma perpendicular, ou seja, a área receptora “gira“ sobre o seu centro, de acordo com a direção do raio incidente. Nesse caso, a intensidade sonora no receptor, no instante  $t$  é:

$$I_R = \sum_i E_i / \pi r^2, \quad (5)$$

onde  $r$  é o raio da área receptora, e  $\sum E_i$  é a soma das energias de todos os raios que a atingem.

### 3. Método das Fontes Virtuais

O Método das Fontes Virtuais pode ser descrito através de uma analogia com um problema óptico, onde todas as paredes de uma sala são espelhos. Pode-se, nesse caso, encontrar as posições das imagens de um objeto, com relação a cada parede, através de relações geométricas. Note que um observador pode ver, não apenas as imagens “imediatas” do objeto, mas também algumas imagens das imagens. As primeiras são denominadas imagens de primeira ordem e as demais são imagens de ordens superiores (segunda ordem, terceira ordem e assim por diante).

Na acústica, os objetos são análogos às fontes sonoras e os observadores, aos ouvintes ou receptores. O método pode ser também interpretado como uma forma de reconstruir os caminhos dos raios acústicos que deixam a fonte sonora e atingem o receptor. A Figura 3 ilustra a idéia, para uma sala de planta retangular.

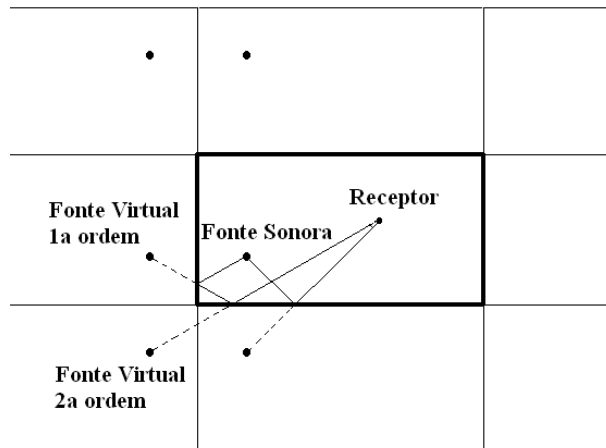


Figura 3: Ilustração do princípio do Método das Fontes Virtuais. A sala real é delimitada pelo traçado mais espesso.

A principal tarefa a ser cumprida consiste em determinar as posições das fontes virtuais. Feito isso, o problema se resume a avaliar a energia sonora no ponto receptor, devido a todas as fontes (original e imagens).

Essa avaliação pode ser feita com relação a um regime permanente, quando se quer avaliar o Nível de Pressão Sonora (ver [8,12]), ou transitório, quando se quer avaliar a Resposta Impulsiva.

Para salas retangulares, as posições das fontes virtuais podem ser determinadas explicitamente, como demonstrado em [13]. Para salas descritas por poliedros de forma arbitrária (côncavos ou convexos), pode-se usar o algoritmo descrito em [14].

O conceito básico para o algoritmo de geração das fontes virtuais é simples: toda fonte virtual deve ser refletida com relação a todas as fronteiras. Aplicando o algoritmo recursivamente para as fontes geradas, obtém-se uma malha de fontes virtuais. Nem todas as fontes geradas, no entanto, são usadas nos cálculos posteriores. Antes, cada uma deve satisfazer três critérios, que são: validade, proximidade e visibilidade.

Uma fonte virtual criada pela reflexão através da mesma superfície que a gerou é uma fonte inválida. Para evitar este problema, deve-se registrar qual foi o plano utilizado para criar a fonte virtual e excluí-lo da propagação das imagens desta fonte. Tendo passado pelo teste relacionado a este critério, deve-se verificar se a fonte virtual satisfaz a condição de proximidade. Para isso o usuário do programa deve definir uma distância. Fontes virtuais a uma distância do receptor maior do que esta são descartadas e a geração de imagens relacionadas a esta fonte é interrompida.

O teste mais dispendioso computacionalmente, no entanto, é o teste da visibilidade, pois envolve operações mais complexas. Para que uma fonte virtual de primeira ordem seja “visível” ao receptor, a linha que liga os dois deve cruzar o plano que a gerou, dentro das fronteiras da sala. Para ordens superiores, o teste deve ser feito também para “receptores virtuais” (ver [14]).

A grande desvantagem do método é relacionada ao fato de que o número de fontes virtuais  $e$ , conseqüentemente, o tempo computacional requerido, tem uma relação exponencial com a ordem máxima de reflexão  $e$ , apesar de muitas delas não serem “visíveis”, suas posições devem ser determinadas e depois testadas. Tal relação é dada por [15]:

$$N_{FV} = \frac{n_{paredes}}{n_{paredes}} - 2 \left[ (n_{paredes} - 1)^i - 1 \right], \quad (6)$$

onde  $N_{FV}$  é o número de fontes virtuais,  $n_{paredes}$  é o número de paredes e  $i$  é a ordem máxima de reflexão.

Um procedimento para acelerar o processo é descrito em [7] e [15], o qual consiste em pré-determinar as fontes virtuais visíveis a partir da aplicação do Método do Traçado de Raios. Para isso, o que se deve fazer é armazenar em uma lista os índices das superfícies refletoras na história de um raio que atinge o receptor.

O programa desenvolvido no âmbito deste trabalho ainda usa o teste de visibilidade tradicional.

## 2.1 Receptor e Resposta Impulsiva

Apesar dos Métodos das Fontes Virtuais e do Traçado de Raios se fundamentarem em princípios semelhantes, uma diferença com relação ao receptor é decisiva para a construção da Resposta Impulsiva e sua resolução temporal. No Método das Fontes Virtuais o receptor tem dimensão ínfima. Por isso, este método tem a capacidade de representar a energia da fonte sonora ou das reflexões em um instante de tempo relativo ao momento exato de chegada do som correspondente. A resolução temporal é limitada apenas pela frequência de amostragem escolhida para se construir a Resposta Impulsiva, conforme definido pelo usuário.

No Método do Traçado de Raios a resolução temporal da Resposta Impulsiva tem uma relação direta com o diâmetro do receptor. Isto é, a energia dos raios é representada a cada  $2r/c$  segundos, onde  $r$  é o raio do receptor e  $c$  é a velocidade do som no ar.

Para se construir a Resposta Impulsiva a partir das fontes virtuais “visíveis” a um receptor, deve-se, em cada instante, somar as contribuições das fontes sonoras equidistantes a ele. A energia sonora de cada fonte, que chega ao receptor, é dada por:

$$E_i = \frac{R_0^2}{R_i^2} e^{m(R_0 - R_i)} \prod_{j \in S} (1 - \alpha_j), \quad (7)$$

onde  $R_0$  é a distância do ouvinte à fonte sonora original,  $R_i$  é a distância do ouvinte à  $i$ -ésima fonte virtual,  $m$  é a constante de atenuação do som no ar,  $S$  é o conjunto de superfícies usadas na geração da fonte virtual e  $\alpha_j$  é o coeficiente de absorção da  $j$ -ésima superfície.

A amplitude descrita na Eq.(7) é relativa à energia da fonte sonora original ( $R_0$ ).

Uma vez obtida a Resposta Impulsiva através dos métodos descritos, pode-se processá-la para determinar a curva de decaimento, parâmetros acústicos (conforme descrito na norma ISO 3382 [16]) ou usá-la para a auralização da sala simulada.

## 3. Módulo para Auralização de salas simuladas

Através da auralização é possível escutar o resultado de uma simulação acústica e, dessa forma, avaliar o resultado do projeto acústico de um espaço a ser construído ou reformado. Além disso, tal ferramenta é muitas vezes utilizada na construção de amostras sonoras para estudos psicoacústicos.

O primeiro passo no processo de auralização é transformar a Resposta Impulsiva resultante de uma simulação computacional em um sinal equivalente, mas bi-aural. Isto é, com dois canais que devem reproduzir



muito bem a Resposta Impulsiva entre a fonte sonora e os ouvidos esquerdo e direito, reconstituindo as diferenças causadas pela incidência de um campo acústico sobre a cabeça do ouvinte.

Isso pode ser feito através do processamento da Resposta Impulsiva simulada com um banco de dados apropriado, resultante de medições feitas com cabeças artificiais em câmara anecóica. Tais medições são Respostas Impulsivas Relativas à Cabeça (“Head Related Impulse Responses”, HRIR), quando referidas ao domínio do tempo ou Funções de Transferência Relativas à Cabeça (“Head Related Transfer Functions”, HRTF), quando referidas ao domínio da frequência, feitas a uma determinada distância da cabeça artificial, com a fonte sonora em diferentes posições. A resolução espacial dos bancos de dados de HRIR pode variar, de acordo com a necessidade de aplicação ou do aparato experimental usado.

A contribuição da fonte sonora original e cada reflexão na Resposta Impulsiva simulada deve ser processada com o par de HRIR (canais esquerdo e direito) relativo à sua respectiva direção de incidência sobre o receptor. Por isso, a Resposta Impulsiva simulada, ao invés de ser escrita como uma sequência simples de valores, deve ser escrita como uma matriz, representada por:

$$RI = \begin{matrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{matrix}, \quad (8)$$

onde as linhas armazenam os resultados relativos ao som que incide sobre o ouvinte proveniente da  $m$ -ésima direção. Estes resultados podem ser a contribuição de uma Fonte Virtual ou de um raio, após sofrer a  $i$ -ésima reflexão.

As HRIR podem ser organizadas da seguinte forma:

$$HRIR = \begin{matrix} h_{11} & h_{12} & \cdots & h_{1n} \\ h_{21} & h_{22} & \cdots & h_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{m1} & h_{m2} & \cdots & h_{mn} \end{matrix}, \quad (9)$$

onde as linhas armazenam os valores da HRIR relativos à  $m$ -ésima direção.

Note que, para cada direção, existem duas matrizes HRIR. Uma é relativa ao sinal medido no ouvido esquerdo e a outra, ao sinal medido no ouvido direito da cabeça artificial.

A operação necessária para a criação da Resposta Impulsiva Bi-aural é a convolução entre a  $m$ -ésima linha da matriz  $RI$  com a  $m$ -ésima linha da matriz  $HRIR$ .

Como resultado, obtém-se duas matrizes com  $m$  linhas. Para chegar ao resultado final, as linhas de cada matriz devem ser somadas, gerando assim as Respostas Impulsivas referentes ao ouvido esquerdo e ao ouvido direito, ou seja, a Resposta Impulsiva Bi-aural.

Para completar o processo de auralização, cada canal da Resposta Impulsiva Bi-aural deve ser processado com um sinal de áudio gravado de forma anecóica. Novamente, o processamento consiste na operação de convolução entre os sinais.

A última etapa do processo de auralização é mais rápida do que a construção da Resposta Impulsiva Bi-aural, pois requer a realização de apenas duas operações de convolução. Para a obtenção da Resposta Impulsiva Bi-aural, pode ser necessária a realização de até o dobro do número de direções para as quais as HRIR foram medidas. Um dos bancos de dados usados neste trabalho, do “Institute of Technical Acoustics” da Universidade de Aachen, contém informações para 936 direções.

Por isso, vários esforços têm sido feitos para tornar esse processamento mais eficiente, como reportado em [2] e [17], por exemplo.

Na implementação feita na UNICAMP, quatro formas para a realização da convolução foram implementadas e comparadas. Duas delas são operações feitas no domínio do tempo e as demais são operações feitas no domínio da frequência, através de transformadas diretas e inversas de Fourier, como descrito a seguir.

### 3.1 Convolução no domínio do tempo

A operação de convolução, em um domínio discreto ( $n$ ) relativo ao tempo, entre uma linha da matriz  $RI$  e uma linha da matriz  $HRIR$  é descrita por:

$$RIB(n) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} RI(k)HRIR(n-k), \quad (10)$$

onde  $n$  e  $k$  são números inteiros.

A Eq.(10) foi implementada tal como aqui descrita. No entanto, observa-se que a Resposta Impulsiva simulada através dos métodos descritos anteriormente possui, em geral, muitos valores nulos, ou seja, é esparsa.

Pode-se então, usar uma propriedade da operação de convolução para realizá-la de forma mais rápida. Tal propriedade é, explicitamente, a seguinte:

$$\delta(t-t_0) * s(t) = s(t-t_0) \quad (11)$$

onde  $\delta(t)$  é a função Delta de Dirac e  $*$  representa a operação de convolução.

Interpretando cada componente não nulo da matriz  $RI$  como uma função Delta de Dirac, pode-se realizar a

operação de convolução simplesmente inserindo o sinal da matriz *HRIR* na posição do componente.

O método descrito pela Eq.(10) é designado daqui por diante como “Método Direto” e aquele implementado considerando a propriedade descrita na Eq.(11) é chamado de “Método Esparso”.

### 3.2 Convolução no domínio da frequência

A operação de convolução no domínio do tempo equivale à multiplicação no domínio da frequência, para Sistemas Lineares e Invariantes no Tempo. Portanto, pode-se calcular a transformada de Fourier dos sinais, multiplicá-las e retornar ao domínio do tempo, através da transformada inversa de Fourier.

Duas formas para a realização da transformada direta e inversa de Fourier foram usadas na implementação da operação de convolução no domínio da frequência. Uma delas é descrita em [18] e representa uma forma tradicional de realizar a transformada (aqui designado por FFT).

Na implementação da FFT, características que contribuíram para diminuir o tempo de processamento foram:

- a realização de transformada ‘in-place’ (como feito também para a FFTW);
- a utilização de um algoritmo de decimação no tempo, para a transformada direta e um de decimação na frequência, para a transformada indireta, permitindo que não fosse preciso reorganizar as seqüências de dados durante o processo. Isto foi necessário porque os algoritmos de decimação mais simples e rápidos têm uma das seqüências (saída ou entrada) em ordem reversa de bits (bit-reversed order, [18]);
- uso de seqüências de dados de tamanho  $N=2^v$ . Isto permitiu a utilização de algoritmos recursivos para a FFT.

Uma biblioteca para linguagem C, chamada de FFTW (ver [19]), foi utilizada, representando uma forma eficiente de implementação da transformada de Fourier (aqui designada por FFTW, como o nome criado pelos autores do algoritmo).

Alguns detalhes permitiram grande economia na memória utilizada pelo programa, tais como:

- a realização da transformada “in-place”, ou seja, utilizando-se o mesmo espaço físico de memória para os vetores no tempo e frequência,
- e a divisão do cálculo das transformadas direcionais em blocos de direções, realizando toda a convolução de algumas direções antes de calcular a convolução para o próximo bloco.

### 3.3 Bancos de HRTF

O módulo para a auralização foi implementado em duas versões. Cada versão usa um banco de dados de HRTF diferente. Um deles, como já mencionado, provém do “Institute of Technical Acoustics” (ITA) da Universidade de Aachen, na Alemanha, e o outro é um banco de dados público, desenvolvido pelo “Media Lab” do “Massachusetts Institute of Technology” (MIT) [20].

O banco de dados do ITA tem resolução espacial de  $15^\circ$ , com relação ao ângulo de elevação, que varia entre  $0^\circ$  (em baixo da cabeça) e  $180^\circ$ . A direção relativa ao ângulo de azimute tem resolução de  $5^\circ$  e tal ângulo varia entre  $0^\circ$  e  $355^\circ$ . Durante a medição das HRTF, o alto falante se encontrava a uma distância de 2 m da cabeça artificial. O valor absoluto máximo dos arquivos é 1 e todos eles têm escala relativa a este valor. Os arquivos têm resolução de amplitude de 24 bits e frequência de amostragem de 44,1 kHz. Os microfones da cabeça artificial usada são localizados na entrada do canal auditivo.

O banco de dados do MIT tem resolução de  $10^\circ$  com relação ao ângulo de elevação, que varia entre  $60^\circ$  e  $180^\circ$  ( $0^\circ$  seria a posição abaixo da cabeça artificial). O ângulo de azimute tem resolução diferente para cada elevação. Para o plano horizontal, a resolução é de  $5^\circ$  e, para a elevação de  $170^\circ$ , a resolução é de  $30^\circ$ . Pode-se selecionar dois tamanhos de orelha. Os arquivos têm resolução de amplitude de 16 bits e frequência de amostragem de 44,1 kHz. Os microfones da cabeça artificial usada são localizados na posição do tímpano e uma compensação para este fato deverá ser incluída no futuro.

## 4. Resultados dos programas de simulação acústica

Para verificar a capacidade de simular a acústica de uma sala com os programas desenvolvidos neste projeto, algumas comparações foram feitas com resultados obtidos de medições. Três salas da própria Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo foram temas de comparação (resultados de duas são apresentados aqui), assim como o estúdio do PTB (“Physikalisch-Technische Bundesanstalt”), usado no estudo comparativo descrito em [5]. As condições de simulação e medição de cada sala são descritas ao longo do texto, assim como a discussão dos resultados obtidos.

As medições foram realizadas com fonte sonora e microfones onidirecionais. A fonte sonora é especial, construída na forma de um dodecaedro. Para obter a Resposta Impulsiva, utilizou-se a técnica da deconvolução [21].

Usou-se uma frequência de amostragem de 48 kHz nas medições. Para as comparações com as simulações, a Resposta Impulsiva resultante foi filtrada na banda de frequência de 1 kHz (1/1 oitava) e convertida para um sinal amostrado com 44,1 kHz.

## 4.1 Auditório da FEC

O auditório da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da UNICAMP tem planta retangular e perfil na forma de um polígono côncavo, conforme ilustrado na Figura 4.

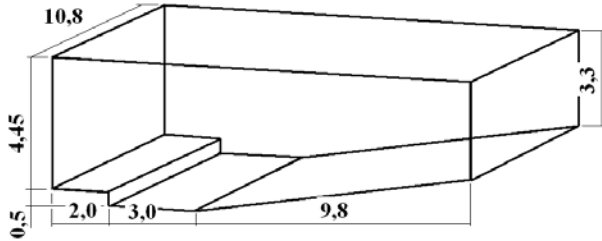


Figura 4: Ilustração do auditório da FEC-UNICAMP. Dimensões em metros.

Detalhes da construção são omitidos na figura. A área inclinada do piso é construída, na realidade, em patamares que abrigam fileiras de cadeiras levemente estofadas. Uma das paredes laterais e a parede ao fundo são construídas com blocos de concreto e são pintadas. A outra tem aproximadamente metade de sua área construída da mesma forma e outra fechada por janelas, que eventualmente são cobertas por uma cortina plástica. A parede frontal também tem os blocos de concreto pintados aparentes e possui uma lousa instalada. O piso é revestido com “paviflex” e o teto é de concreto pintado.

O volume total do auditório é de aproximadamente 690 m<sup>3</sup>. A frequência a partir da qual os modos acústicos se sobrepõem, isto é, onde a densidade modal é suficientemente alta para que métodos geométricos de simulação forneçam boas aproximações, pode ser calculada com a seguinte relação [22]:

$$f \approx 0,2 \sqrt{\frac{c^3 T}{V}}, \quad (12)$$

onde  $c$  é a velocidade do som no ar,  $T$  é o Tempo de Reverberação (estimado) e  $V$  é o volume da sala.

Estimando-se um Tempo de Reverberação de 1,5 segundos, chega-se assim a uma frequência de 60 Hz.

As superfícies utilizadas nas simulações e os coeficientes de absorção associados a elas são descritos na Tabela 1. Superfícies compostas por vários materiais foram simplificadas e descritas através de um coeficiente de absorção resultante equivalente.

A posição escolhida para a fonte sonora dista de 2,70 m da parede direita (de quem olha ao palco), 1,70 m da parede frontal e 2,50 m da parte mais baixa do piso. O ponto receptor dista de 5,30 m da parede direita, 8,40 m da parede frontal e 3,00 m da parte mais baixa do piso. Note que no caso do auditório escolhido, as superfícies que delimitam a área do palco podem obstruir alguns

caminhos da propagação sonora. Por isso, essas superfícies são denominadas “obstrutivas” e esse caso é considerado nos programas. Nas simulações, a velocidade do som considerada foi de 344 m/s.

Tabela 1: Coeficientes de absorção usados na simulação computacional. Banda de frequência de 1000 Hz (1/1 oitava).

Material	Área	Coefficiente de absorção
Bloco de concreto pintado	Parede lateral direita, Parede ao fundo	0,07
Bloco de concreto pintado + Lousa	Parede frontal	0,07
Bloco de concreto pintado + Cortina plástica	Parede lateral esquerda	0,3
“paviflex”	Lateral do palco, Área entre palco e assentos	0,05
“paviflex” + móveis	Palco	0,2
“paviflex” + assentos levemente estofados	Público	0,5
Concreto pintado	Teto	0,05

Na simulação feita através do Método das Fontes Virtuais, a ordem máxima das reflexões adotada foi 10, o que gera, para esta sala, aproximadamente  $1,4 \times 10^9$  fontes virtuais. Uma ordem maior poderia ser usada, mas o tempo de cálculo necessário seria excessivamente alto, tornando a simulação inviável. O cálculo da Resposta Impulsiva sob essas condições demorou aproximadamente 1 minuto. A lei exponencial característica, descrita pela Eq.(6), faz com que o tempo de cálculo para ordem 11 ou 12 seja da ordem de horas. A frequência de amostragem escolhida para o cálculo da Resposta Impulsiva foi de 44100 Hz, que corresponde a uma resolução temporal de  $2,27 \times 10^{-5}$  s.

Para a simulação através do Método do Traçado de Raios, foram gerados aproximadamente 100.000 (cem mil) raios e o raio adotado para o receptor foi de 0,1 metro. A Figura 5 mostra Respostas Impulsivas relativas à energia sonora, medida e simulada com Traçado de Raios.

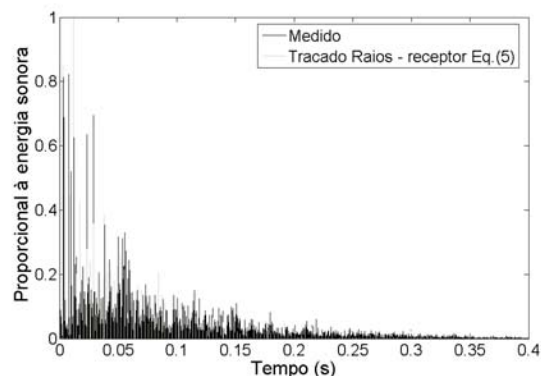


Figura 5: Respostas Impulsivas medida e simulada através do Método do Traçado de Raios.

A mesma comparação, entre a Resposta Impulsiva

medida e a simulada através do Método das Fontes Virtuais é mostrada na Figura 6.

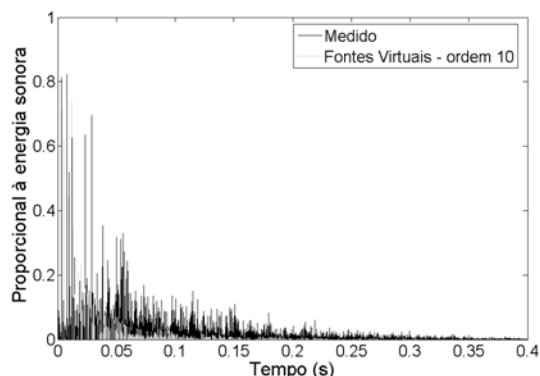


Figura 6: Respostas Impulsivas medida e simulada através do Método das Fontes Virtuais.

É possível notar que o resultado obtido através do Método do Traçado de Raios tende a representar bem o comportamento da resposta medida, enquanto uma clara diferença é percebida na resposta obtida através do Método das Fontes Virtuais. Como será mostrado, a ordem de reflexão máxima utilizada nas simulações através das Fontes Virtuais é insuficiente para representar bem o decaimento da energia sonora nessa sala. No entanto, percebe-se que a Resposta Impulsiva resultante tende a representar de forma mais precisa as primeiras reflexões, como pode ser visto na Figura 7.

Uma análise detalhada do mesmo trecho, da Resposta Impulsiva simulada através do Método do Traçado de Raios, mostraria um sinal onde os componentes estariam espaçados em intervalos constantes, relativos à dimensão do receptor.

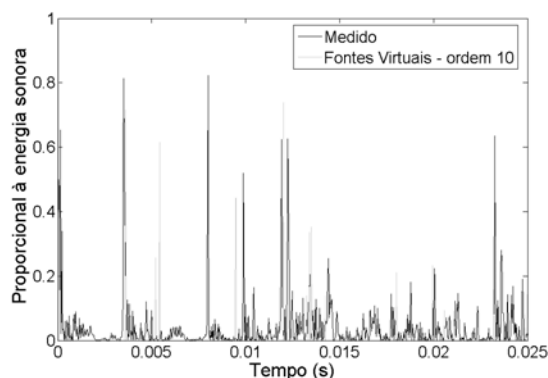


Figura 7: Detalhe do trecho inicial das Respostas Impulsivas medida e simulada através do Método das Fones Virtuais.

Para uma comparação mais eficaz sobre a capacidade dos métodos de representar a realidade, as curvas de decaimento foram obtidas através da integral de Schroeder [23], que foi implementada em uma função para MATLAB. Tal integral é dada por:

$$H(t) = \int_t^{\infty} h^2(\tau) d\tau, \quad (13)$$

onde  $h(t)$  é a resposta impulsiva relativa à pressão sonora (e seu quadrado é proporcional à energia).

O limite inferior de integração se refere ao tempo em que o som direto atinge o receptor e o limite superior, na prática, é definido como um instante de tempo onde o valor médio da pressão sonora é mínimo. A função implementada afere também o tempo de reverberação da sala (EDT,  $T_{10}$ ,  $T_{20}$  e  $T_{30}$ ).

A Figura 8 apresenta o decaimento obtido da Resposta Impulsiva medida (filtrada na banda de 1/1 oitava de 1000 Hz) e das Respostas Impulsivas simuladas. Os Tempos de Reverberação obtidos são mostrados na Tabela 2.

As curvas de decaimento obtidas através do Método do Traçado de Raios são similares à medida, para as duas implementações de receptor. Observam-se algumas diferenças entre medição e simulação no trecho inicial e uma diferença maior no trecho final, que se refletem no cálculo de EDT e  $T_{30}$ .

As causas dessas diferenças podem estar relacionadas à ausência de um modelo para reflexões difusas, a ser implementado em breve, e à adoção de um valor de energia sonora ainda alto para o critério de abandono do raio. Deve-se considerar ainda a existência de alguma incerteza relativa aos coeficientes de absorção usados na simulação.

A curva de decaimento obtida a partir do Método das Fontes Virtuais parece se aproximar daquela resultante da simulação por Traçado de Raios, no trecho inicial. No entanto, sua tendência geral apresenta uma diferença significativa em relação ao resultado medido e simulado com o outro método. A origem dessa diferença está na limitação quanto à ordem das reflexões.

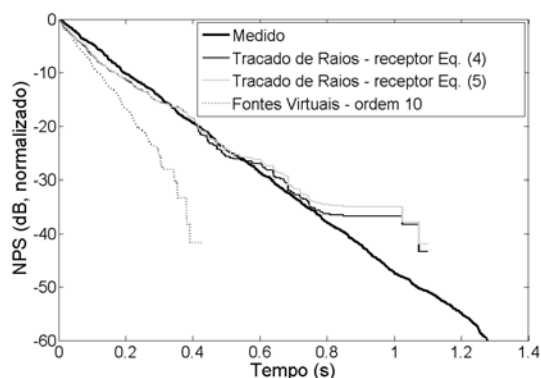


Figura 8: Curvas de decaimento obtidas no pós-processamento das Respostas Impulsivas do auditório da FEC (medida e simuladas, 1000Hz, banda de 1/1 oitava).

Tabela 2: Resultados relativos à reverberação, obtidos a partir da Resposta Impulsiva medida e simuladas para o Auditório da FEC (1000 Hz, banda de 1/1 oitava).

	Medido	Traçado de Raios Eq(4)	Traçado de Raios Eq(5)	Fontes Virtuais
EDT (s)	1,33	1,05	1,05	0,69
T <sub>10</sub> (s)	1,36	1,31	1,31	0,79
T <sub>20</sub> (s)	1,55	1,77	1,77	0,74
T <sub>30</sub> (s)	2,32	1,97	1,95	0,66

Para se chegar a essa conclusão, pode-se modelar a curva decaimento em função da ordem e do Tempo de Reverberação, conforme mostrado em [7] (pg.75). A equação que representa o decaimento é dada por:

$$L(t) = 10 \log \left| \frac{e^{-13,8t_{max}/T} - e^{-13,8t/T}}{e^{-13,8t_{max}/T} - 1} \right|, \quad (14)$$

onde  $t$  representa o tempo,  $T$  é o Tempo de Reverberação calculado pela fórmula de Eyring e

$$t_{max} = \frac{i}{\tilde{n}}, \quad (15)$$

para o Método das Fontes Virtuais, onde  $i$  é a ordem máxima das reflexões e  $\tilde{n}$  é o número médio de reflexões de um raio por segundo da sala (densidade de reflexões). Tal número é dado por

$$\tilde{n} = \frac{cS}{4V}, \quad (16)$$

onde  $c$  é a velocidade do som no ar,  $S$  é a área superficial da sala e  $V$  é o volume da mesma.

A Figura 9 mostra as curvas de decaimento previstas conforme a Eq.(14), para diferentes ordens máximas das reflexões, comparadas com aquela obtida da simulação através do método das Fontes Virtuais.

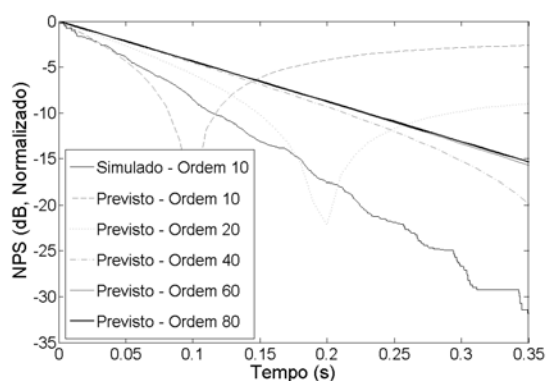


Figura 9: Curvas de decaimento esperadas para Respostas Impulsivas simuladas através do Método das Fontes Virtuais, com diferentes ordens de reflexão. Uma curva obtida após a simulação feita para ordem 10 também é mostrada.

Observando a figura, pode-se concluir que, para o auditório em questão, uma simulação correta deveria considerar fontes virtuais com ordem entre 60 e 80. Somente assim seria possível calcular parâmetros, tais como  $T_{10}$ ,  $T_{20}$ , com precisão. O fator limitante, nesse caso é o tempo de computação necessário, conforme explicado anteriormente (veja item 3). Essa questão é tema a ser resolvido futuramente, através da implementação do algoritmo híbrido.

#### 4.2 Câmara reverberante da FEC

A câmara reverberante do Laboratório de Conforto Ambiental e Física Aplicada (LACAF), da FEC/UNICAMP foi usada também para comparações entre medições e simulações. Suas paredes são construídas com blocos de concreto pintado, o piso é cerâmico e o teto é concreto pintado. Duas portas de madeira pintada com tinta acrílica dão acesso à câmara em uma das paredes. Apesar de sua geometria se assemelhar a uma sala “retangular”, não há superfícies paralelas. Uma área de 7,8 m<sup>2</sup> do piso foi coberta por material absorvente. Os coeficientes de absorção usados nas simulações foram de 0,07, para blocos de concreto, 0,5 para o piso e 0,02 para o concreto pintado, referentes às propriedades dos materiais em 1000 Hz.

Para a câmara reverberante, a frequência calculada através da Eq.(12) é de aproximadamente 200 Hz, sem a presença de material acústico absorvente e 130 Hz, com a presença do material utilizado nas medições. A condição de superposição dos modos acústicos para que os modelos baseados em acústica geométrica sejam confiáveis é mais desfavorável do que no caso anterior. Mesmo assim, considera-se que o problema pode ser tratado através da acústica geométrica na banda de frequência de 1000 Hz. As condições de simulação são as mesmas usadas para o Auditório descrito em 4.1.

As curvas de decaimento resultantes, para a frequência de 1000 Hz, são mostradas na Figura 10 e os parâmetros relativos ao Tempo de Reverberação, na Tabela 3.

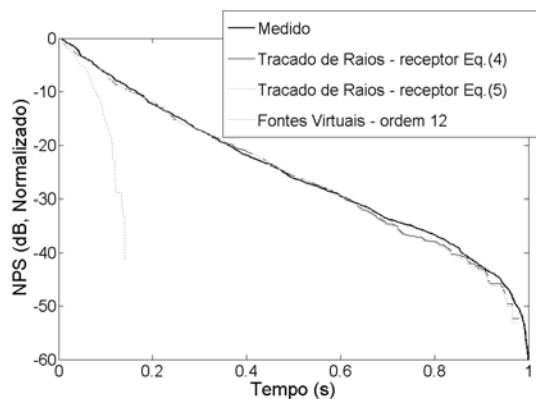


Figura 10: Curvas de decaimento obtidas das Resposta Impulsivas simuladas e medida, para a câmara reverberante do LACAF (1000 Hz, banda de 1/1 oitava).

Tabela 3: Resultados relativos à reverberação, obtidos a partir da Resposta Impulsiva medida e simuladas para a câmara reverberante do LACAF (1000 Hz, banda de 1/1 oitava).

	Medido	Traçado de Raios Eq(4)	Traçado de Raios Eq(5)	Fontes Virtuais
EDT (s)	0,99	0,92	0,94	0,47
T <sub>10</sub> (s)	1,10	1,03	1,05	0,30
T <sub>20</sub> (s)	1,21	1,23	1,23	0,21
T <sub>30</sub> (s)	1,35	1,29	1,27	0,18

As curvas de decaimento obtidas a partir da simulação por Traçado de Raios são muito próximas da medida, o que se reflete em diferenças muito pequenas nos parâmetros relativos à reverberação. Lembra-se que os efeitos de reflexões difusas são menores nesta sala do que no auditório da FEC, onde há fileiras de poltronas na área destinada ao público.

Já o resultado obtido através da simulação feita através do Método das Fontes Virtuais, também nesse caso, é insuficiente para o cálculo correto dos parâmetros relacionados à Reverberação. Prevê-se que uma simulação de ordem 20 já seja suficiente para estimar bem o EDT.

### 4.3 Estúdio do PTB

Para verificar a precisão dos resultados obtidos de uma outra forma, fez-se a simulação de uma "sala-padrão" usada no terceiro estudo comparativo entre simulações computacionais da acústica de salas. Em tal estudo, a primeira fase (de três) teve o objetivo de comparar os resultados obtidos por diversos programas para uma geometria simplificada da sala e com coeficientes de absorção iguais a 0,1 para todas as superfícies. Vários parâmetros foram comparados, entre eles EDT e T<sub>30</sub>.

A sala simulada é um estúdio de aproximadamente 360 m<sup>3</sup>. Na primeira fase do estudo mencionado e para a comparação feita aqui, os detalhes referentes à porta, janelas e difusores foram omitidos. Bork [5] apresenta uma descrição completa do estudo.

Os parâmetros EDT e T<sub>30</sub>, na frequência de 1000 Hz, obtidos a partir das Respostas Impulsivas simuladas com o Método do Traçado de Raios e os resultados médios, resultantes das simulações feitas pelos participantes do estudo, são mostrados na Tabela 4. O desvio padrão calculado para os resultados dos participantes também é mostrado.

Tabela 4: Resultados relativos à reverberação, obtidos de simulações feitas com os programas descritos neste projeto e médios para 21 participantes do estudo descrito em [5] (1000 Hz, banda de 1/1 oitava).

	Média	Desvio Padrão	Traçado de Raios Eq.(4)	Traçado de Raios Eq.(5)
EDT (s)	1,82	0,14	1,78	1,78
T <sub>10</sub> (s)	1,81	0,16	1,72	1,72

Os resultados obtidos através da simulação feita com o

Método do Traçado de Raios descrito neste trabalho são muito próximos dos valores médios obtidos por outros programas. As diferenças são menores do que o desvio padrão.

Os resultados obtidos através do Método das Fontes Virtuais não são mostrados, pois, também neste caso, não são satisfatórios, devido à limitação imposta pelo tempo computacional necessário para se levar em conta ordens de reflexão mais elevadas. O uso de tal método, sem a pré-seleção das fontes virtuais "visíveis", restringe-se à salas pequenas e com Tempo de Reverberação baixo [15].

### 5. Investigação da eficiência de métodos para a obtenção de Respostas Impulsivas Bi-aurais

Alguns testes foram feitos para verificar o tempo necessário para gerar uma Resposta Impulsiva Binaural, usando os métodos descritos em 3.1 e 3.2 para a realização da operação de convolução. Além disso, procurou-se comparar também o grau de similaridade dos resultados gerados. Apenas o banco de HRTF do ITA foi usado para esse fim.

Uma Resposta Impulsiva Binaural obtida a partir da uma simulação do Auditório da FEC, feita com o Método das Fontes Virtuais, é mostrada na Figura 11. A simulação foi feita com as mesmas condições descritas anteriormente, distinguindo-se apenas com relação à ordem de reflexão usada, que nesse caso foi de 12. O ouvinte foi orientado de forma que a fonte sonora estivesse no hemisfério frontal. A resposta foi gerada através do uso da FFTW.

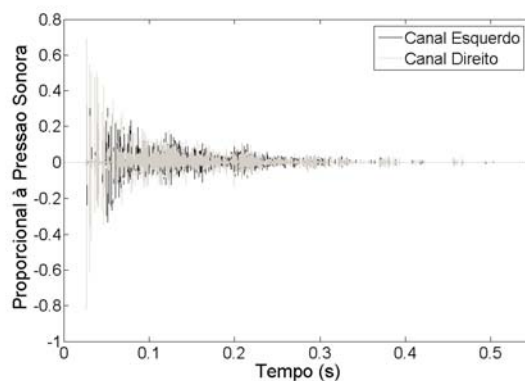


Figura 11: Exemplo de Resposta Impulsiva Bi-aural, obtida pelo programa de auralização.

A Figura 12 mostra um detalhe da Resposta Impulsiva Bi-aural, com o som direto e a primeira reflexão. Pode-se perceber que o som chega primeiro ao canal relativo ao ouvido direito, significando que a fonte está posicionada no hemisfério direito do ouvinte.

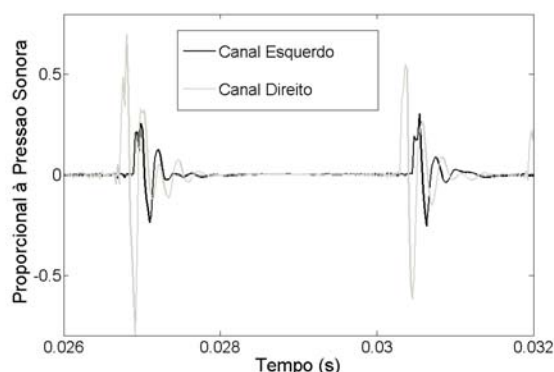


Figura 12: Detalhe da Resposta Impulsiva Bi-aural mostrada na Figura 11. Som direto e 1ª reflexão.

### 5.1 Verificação do tempo de processamento

Um teste preliminar relativo ao tempo para a obtenção da Resposta Impulsiva Binaural, através de diferentes métodos, foi feito para uma sala retangular, isto é, com 6 paredes. Para isso, respostas obtidas com o Método das Fontes Virtuais, aplicado para diferentes ordens de reflexão, foram processadas. Simulações que consideram ordens maiores de reflexão produzem Respostas Impulsivas com maiores números de componentes, isto é, menos esparsas. Todo o processamento foi feito em um computador com processador de 1,6 Ghz e 512 Mb de memória RAM. Os resultados são mostrados na Figura 13. A Resposta Impulsiva Binaural não foi obtida através do método direto para simulações com ordem de reflexão maior que 12.

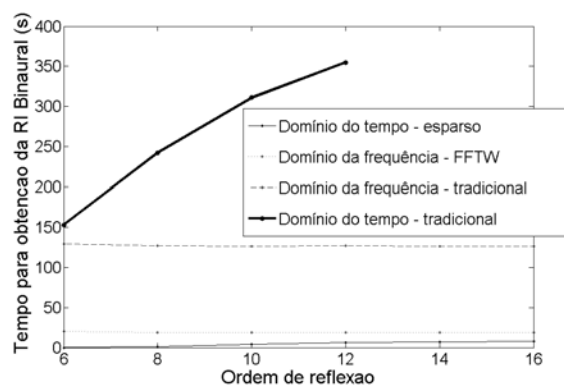


Figura 13: Tempo para a obtenção da Resposta Impulsiva Bi-aural, em função da ordem de reflexão usada na simulação de uma sala retangular.

Como pode ser visto, o uso dos métodos tradicionais para a operação de convolução, no domínio do tempo e da frequência, requer um tempo de processamento da ordem de minutos. O uso da biblioteca com o método FFTW é bem mais eficiente e requer um tempo de processamento de aproximadamente 19 segundos. O método “esparso”, nesse caso, mostrou-se mais eficiente

ainda e, para a Resposta Impulsiva menos esparsa investigada, resultante de uma simulação de ordem 16, o tempo de processamento foi de 8 segundos, como pode ser melhor observado na Figura 14.

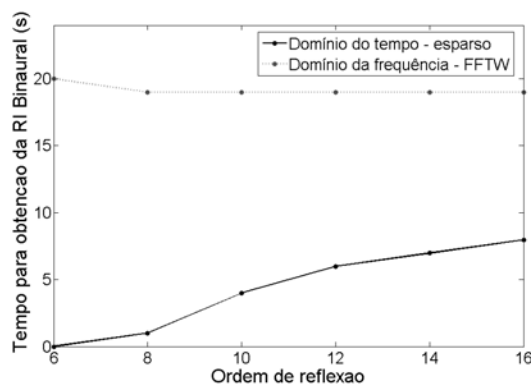


Figura 14: Tempo de processamento da resposta simulada, necessário para a obtenção da Resposta Impulsiva Bi-aural.

É importante notar que o tempo de processamento se mantém constante quando os métodos no domínio da frequência são usados, com relação ao número de componentes não nulos da Resposta Impulsiva simulada. O método esparso, apesar de ter se mostrado o mais eficiente no caso específico estudado, apresenta um tempo de processamento que depende do número de componentes não nulos da resposta impulsiva. É importante então, estabelecer uma relação entre o número de componentes não nulos da Resposta Impulsiva simulada e o tempo de processamento através do método esparso, para que se possa criar um algoritmo que se adapte e use o método mais eficiente para cada situação.

Se o tempo de processamento através do método esparso for uma função linear da ordem de reflexão, como sugerido pela Figura 14 (a partir da ordem 12 e para salas retangulares), sua aplicação será mais eficiente do que o método FFTW para simulações com ordem de reflexão até 38. Isso para simulações feitas com o Método das Fontes Virtuais.

Para respostas obtidas através do Método da Traçado de Raios, o raio do receptor é determinante para o número de valores não nulos. Se considerarmos um receptor de 0,05 m e a velocidade do som de 344 m/s, chegamos à conclusão de que há valores não nulos a cada  $1,45 \times 10^{-4}$  segundos. Em 1 segundo de resposta, teremos então aproximadamente 6880 valores não nulos. Este valor é da mesma ordem daquele obtido em uma simulação de sala retangular com ordem de reflexão 16, feita com o Método das Fontes Virtuais. Isso significa que, para Respostas Impulsivas que durem até aproximadamente 2 segundos, o método esparso ainda pode ser vantajoso com relação ao método que usa a FFTW. Essa vantagem pode ainda ser maior, pois o tempo de processamento através do método esparso não depende do

comprimento da resposta, mas apenas do número de componentes não nulos. Através dos métodos que usam FFT, há uma dependência do tempo de processamento com essa variável.

Essa análise, no entanto, deve ser aprofundada para que conclusões mais precisas possam ser encontradas e outros métodos devem ser incluídos na comparação. É importante ressaltar que o método esparso só tem chances de ser mais eficiente se aplicado diretamente sobre resultados simulados, antes de qualquer outro tipo de processamento. Quando se pretende, por exemplo, gerar uma Resposta Impulsiva de banda larga, simulações devem ser feitas por bandas de frequência, relativas àquelas para as quais se conhecem os coeficientes de absorção das superfícies, e cada resposta deve ser convoluída com um filtro correspondente. Os resultados devem, então, ser somados para a obtenção da resposta final. Uma resposta que já passou por um processo de convolução com a Resposta Impulsiva de um filtro não possui componentes nulos, ou estes são muito raros.

## 5.2 Verificação da similaridade das respostas

Para verificar a similaridade entre as Respostas Impulsivas Bi-aurais obtidas através de diferentes métodos de realização da convolução, os resultados foram divididos uns pelos outros. A divisão de duas respostas idênticas resulta em uma função do tempo de amplitude unitária.

A Figura 15 mostra o resultado da divisão do sinal obtido através do método esparso por aquele obtido através da FFTW, para o canal esquerdo.

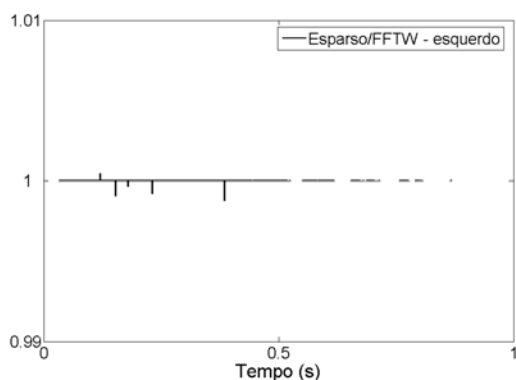


Figura 15: Resultado da divisão de Respostas Impulsivas pós-processadas através do método Esparso e da FFTW (canal esquerdo).

A função resultante não é contínua por causa dos valores nulos das Respostas Impulsivas. Há algumas diferenças nos resultados obtidos, mas bem menores do que 1%. Tal diferença será, muito provavelmente, imperceptível a um ouvinte. Resultados similares foram obtidos da comparação com os outros métodos.

Pode-se concluir assim, que os métodos Esparso e da FFTW usados para a construção da Resposta Impulsiva Bi-aural, produzem resultados semelhantes. O tempo de processamento requerido por estes métodos é significativamente menor do que os métodos “tradicionais”. O método esparso será mais eficiente dependendo das condições de simulação e antes do processamento através de qualquer tipo de filtro digital.

## Conclusões, comentários e trabalhos futuros

O programa de simulação acústica baseado no Método do Traçado de Raios apresentou resultados muito semelhantes às medições realizadas, tanto com relação à curva de decaimento, quanto com relação aos parâmetros relacionados à reverberação, especialmente para a câmara reverberante. Um modelo para reflexões difusas será implementado e espera-se que isso contribua para melhorar os resultados relativos ao Auditório da FEC. A comparação com resultados obtidos por outros programas na primeira fase do estudo descrito em [5] reforça a conclusão de que a implementação foi bem-sucedida. O desenvolvimento deste programa prevê a implementação de funções que calculem outros parâmetros acústicos.

Para o cálculo de parâmetros acústicos, o Método do Traçado de Raios é suficiente, desde que as hipóteses assumidas na acústica geométrica sejam plausíveis face ao problema físico. Quando se deseja, além disso, auralizar a sala simulada, o trecho inicial da Resposta Impulsiva deve ser representado com maior precisão, como obtido através do Método das Fontes Virtuais.

A implementação de tal método foi feita também com sucesso, como sugere a comparação entre curvas de decaimento teóricas e aquela obtida para simulação com ordem de reflexão igual a 10, mostrada na Figura 9. Um método híbrido deverá ser implementado em breve, para que o tempo de computação não seja um fator limitante e o uso deste programa seja viável em um universo maior de problemas.

O módulo de auralização também foi implementado com sucesso e as comparações feitas entre diferentes métodos para a realização da convolução mostram que os resultados são semelhantes. Além disso, foi verificado que o Método Esparso e o FFTW realizam o processamento em tempo significativamente menor do que os métodos “tradicionais”.

Ambos os programas e o módulo de auralização já podem ser usados para gerar amostras a serem usadas em estudos psicoacústicos. Um estudo sobre a capacidade de indivíduos em localizar fontes sonoras já se encontra em andamento.

Os programas serão úteis em estudos sobre os efeitos de reflexões difusas em parâmetros acústicos e na percepção auditiva.



## Agradecimentos

Os autores agradecem ao apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), aos coordenadores e colegas do projeto AcMus, à Fundação de Amparo ao Ensino, Pesquisa e Extensão da UNICAMP (FAEPEX), ao aluno de Iniciação Científica Rhenan Giorgiani do Nascimento (Programação do Método do Traçado de Raios) e ao Prof.Dr.Rer.Nat. Michael Vorlaender e Dipl. Ing. Tobias Lentz, do Institut für Technische Akustik do RWTH-Aachen pelo fornecimento do banco de HRTF para este trabalho.

## Referências

- [1] Lentz, T., Schroeder, D., Vorlaender, M., Assenmacher, I., Virtual Reality System with Integrated Sound Field Simulation and Reproduction. *Journal on Applied Signal Processing*.
- [2] Tenenbaum, R. A., Camilo, T.S., Torres, J.C.B., Gerges, S.N.Y.: Hybrid method for numerical simulation of room acoustics with auralization: Part 1 - Theoretical and numerical aspects. *Journal Of The Brazilian Society Of Mechanical Sciences And Engineering*, Rio de Janeiro, 2006.
- [3] Medrado, L.O., Tenenbaum, R.A.: Simulação numérica de acústica de salas: implementação do código computacional RAIOS e sua validação por comparação. *In: Encontro da Sociedade Brasileira de Acústica*, Rio de Janeiro, Brasil, 2002.
- [4] Alarcão, D.: *Acoustic Modelling for virtual spaces*. Dissertação para a obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Electrotécnica e de Computadores apresentada no Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa, 2005.
- [5] Bork, I.: Report on the 3<sup>rd</sup> Round Robin on Room Acoustical Computer Simulation – Part I: Measurements, *Acta Acustica united with Acustica*, 91, p. 740-752, 2005.
- [6] Kulowski, A.: Algorithmic Representation of the Ray Tracing Technique. *Applied Acoustics*, v.18, p.449-469, 1985.
- [7] Vorlaender, M., *Untersuchungen zur Leistungsfähigkeit des raumakustischen Schallteichenmodells*. Dissertação para a obtenção do Grau de Doutor em Ciências Naturais apresentada na Faculdade de Eletrotécnica da “Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen”, 1989 (disponível em [www.akustik.rwth-aachen.de](http://www.akustik.rwth-aachen.de)).
- [8] Ballesteros, M.L., *Simulação numérica de acústica de salas*. Tese de mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 1991.
- [9] Lewers, T. A combined beam tracing and radiant exchange computer model of room acoustics. *Applied Acoustics*, v.38, p.161-173, 1993.
- [10] Camilo, T.S.: *Método Híbrido para Simulação Numérica de Acústica de Salas: Combinação dos Métodos de Traçado de Raios e Transição de Energia*. Tese COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2003.
- [11] Tenenbaum, R.A., Camilo, S.: Método Híbrido para a Simulação Numérica da Acústica de Salas: Teoria, Implantação Experimental e Validação. *in: I Seminário de Música, Ciência e Tecnologia*, Instituto de Matemática e Estatística da USP, 2004 (disponível em [www.gds.usp.br/Acmus](http://www.gds.usp.br/Acmus)).
- [12] Gibbs, B.M., Jones, D.K. A simple image method for calculating the distribution of sound pressure levels within an enclosure. *ACUSTICA*, v.26, p.24-32, 1972.
- [13] Allen, J. B.; Berkley, D. A., Image method for efficiently simulating small-room acoustics. *Journal of the Acoustical Society of America*, No.65(4), p.943-950, April 1979.
- [14] Borish, J. Extension of the image model to arbitrary polyhedra. *Journal of the Acoustical Society of America*, No.75(6), p.1827-1836, June 1984.
- [15] Vorlaender, M., Simulation of the Transient and Steady-state Sound Propagation in Rooms Using a New Combined Ray-tracing/Image-source Algorithm. *Journal of the Acoustical Society of America*, No.86(1), p.172-178, July 1989.
- [16] ISO 3382: Acoustics – Measurement of reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameters.
- [17] Schroeder, D., Lentz, T., Real-Time Processing of Image Sources Using Binary Space Partitioning. *Journal of the Audio Engineering Society*, 54, Nr(7/8), 2006.
- [18] Oppenheim, A.V., Schafer, R.W. *Discrete-Time Signal Processing*, Prentice-Hall, 1999.
- [19] Frigo, M., Johnson, S.G., The Design and Implementation of FFTW3. *In Proceedings of IEEE*, vol.93, no.2, 2005, p.216-231.
- [20] Gardner, W., Martin, K., página eletrônica <http://sound.media.mit.edu/KEMAR.html>, acessada em janeiro de 2007.
- [21] Mueller, S., Massarani, P., Transfer Function Measurements with Sweeps. *Journal of the Audio Engineering Society*, Vol. 49, 2001.
- [22] Kuttruff, H. *Room Acoustics*. Elsevier Applied Science, 3rd edition 1991.
- [23] Schroeder, M., New Method of Measuring Reverberation Time. *Journal of the Acoustical Society of America*, v37, p.409, 1965.

# Avaliação da inteligibilidade com o STI

Swen Müller

Laboratório de Acústica e Vibrações, INMETRO, Xerém, Duque de Caxias, RJ, smuller@inmetro.gov.br

## Resumo

Problemas com a inteligibilidade de fala em edificações públicas são muito comuns. Na maioria das vezes, os dois vilões que dificultam o entendimento são uma acústica de sala inadequada e um elevado ruído de fundo. O *Speech Transmission Index* (STI) é uma medida objetiva que leva em consideração esses dois fatores e fornece um simples valor que pode variar entre 0 (nenhuma inteligibilidade) e 1 (inteligibilidade perfeita). Na maioria das vezes, ele tem boa correlação com a inteligibilidade de fato percebida no lugar avaliado. Por isso, ele está se tornando cada vez mais popular e não raramente já faz parte dos requerimentos do cliente à construtora de uma nova edificação. Se o STI não cumprir um valor mínimo no prédio concluído, a construtora terá que adotar medidas para melhorá-lo, senão estará sujeita a pena contratual. Em obras grandes, o STI já é estimado na fase de planejamento por softwares de simulação para conferir a viabilidade dos requerimentos. Após o término da construção, os resultados são obrigatoriamente verificados mediante medições reais, o que pode desempatar questões litigiosas. O STI também já é referência em outras normas nacionais e internacionais na área de sistemas de alarme sonorizado, tais como a DIN 0833-4 e a BS 5839-8. Este artigo pretende descrever os conceitos fundamentais do STI, as aplicações típicas e alguns cuidados que têm que ser tomados para não deturpar os resultados. Alguns exemplos teóricos e um prático são apresentados e alguns pontos fracos do STI revelados.

**Palavras-chave:** STI, inteligibilidade, ruído, reverberação, resposta impulsiva.

## 1 Introdução

Obter uma qualidade acústica satisfatória e uma boa inteligibilidade da voz humana em lugares onde é primordial que um locutor seja ouvido e entendido por todas as pessoas presentes (por exemplo auditórios, salas de aulas, estádios, igrejas, aeroportos, estações de metrô, ferroviárias, rodoviárias, etc.) sempre foi um assunto delicado. A situação se complica no Brasil, devido à sua condição de país tropical, que reflete na maneira de construir. Para garantir uma boa ventilação nos dias quentes de verão, é comum deixar amplos vãos na alvenaria, pelos quais o ar, mas infelizmente também o ruído, circula entre o exterior e o interior do prédio. Adicionalmente, os onipresentes aparelhos de ar condicionado causam um nível constante de ruído de fundo que atrapalha bastante o entendimento.

Como as janelas brasileiras geralmente não têm projeto de vedação contra o frio, elas possuem um único vidro e molduras simples de alumínio que não vedam efetivamente o barulho oriundo das ruas.

Para agravar a situação, os níveis de ruído nas cidades brasileiras são notavelmente acima dos encontrados nos países mais ricos, pela falta de controle e pela má conservação de veículos e vias de circulação. Recentemente, os ônibus municipais começaram a ser equipados com ar condicionado, cujo compressor no teto é uma indesejável fonte adicional de ruído.

Finalmente, também existe um fator cultural: Shows ao vivo, comícios, cultos evangélicos, anúncios por carros com caixas de som enormes no teto e até conversa comum entre as pessoas, tudo parecendo precisar de um

nível de som exageradamente alto.

Enfrentamos então dois agravantes no Brasil: de um lado, ruído de fundo gerado com nível elevado, e do outro, edificações com pouco isolamento que possa diminuir o ruído. Como terceiro agravante, tratamento acústico com absorvedores dentro dos prédios é desconcomunal, devido aos custos, mas também como medida de proteção à higiene e à saúde pela facilidade que os materiais absorventes têm em acumular sujeira e mofo devido às altas temperaturas e taxas de umidade do ar.

Em lugares cuja função principal é de passar informações de forma oral de uma pessoa para um grupo de outras (escolas, universidades, auditórios), ou onde existe uma grande concentração de pessoas que, num caso de emergência, precisam receber avisos inteligíveis mesmo se houver pânico e gritaria (estádios, aeroportos, salas de show), faz sentido de prescrever uma inteligibilidade mínima em todos os pontos do público.

A maneira mais segura para avaliar a qualidade da transmissão de fala humana é de conduzir extensos testes de inteligibilidade com listas de palavras ou sílabas, envolvendo muitas pessoas espalhadas na área útil do lugar, e aplicar métodos de avaliação estatística. No entanto, esse procedimento é muito moroso e não permite a previsão da inteligibilidade ainda na fase de planejamento de uma edificação.

Dos múltiplos parâmetros acústicos objetivos que podem ser obtidos mediante simulação e medição da conjuntura acústica, o que mais se popularizou nas últimas três décadas e finalmente foi introduzido em

normas e regulamentos de vários países, é o STI (Speech Transmission Index). A razão disso é que ele leva em consideração tanto a reverberação e os ecos das salas quanto o ruído de fundo, sendo portanto sensível aos dois maiores inimigos da inteligibilidade. Além disso, ao contrário de outros parâmetros acústicos conhecidos, o resultado é um simples índice, de fácil interpretação, que ocupa valores entre 0 (fala completamente ininteligível) e 1 (inteligibilidade perfeita).

## 2 História

Os dois idealizadores do STI, os holandeses Tammo Houtgast e Herman J.M. Steeneken, já se envolviam em testes de inteligibilidade no final dos anos 60. Na época, eles foram solicitados para pesquisar o alcance da transmissão de rádios VHF. Os testes, inicialmente conduzidos pelo método tradicional de avaliação subjetiva, consumiram tempo considerável, o que incentivou os dois pesquisadores a desenvolver um método objetivo e automatizado com base em sinais artificiais.

O resultado foi apresentado num artigo importante na revista *Acustica*, em 1971 (antes disso, o manuscrito foi refutado pela JASA), seguido por inúmeras outras publicações da dupla, nas quais eles apresentam aperfeiçoamentos e verificações do método.

O STI, junto com o RASTI (Rapid STI), que é uma simplificação para cálculo mais rápido que hoje está caindo em desuso, culminou na norma IEC 268-16 em 1988. A segunda edição dessa norma entrou em vigor em 1998 e foi substituída em 2003 pela atual versão, a IEC 60268-16. Essa terceira edição introduziu duas versões do STI, uma direcionada para fala feminina e a outra para fala masculina, e leva em conta a redundância de resultados parciais em bandas de oitava adjacentes.

Uma quarta edição está em fase de preparação e é programada para ser concluída no ano 2010. No final deste artigo, algumas das novidades que provavelmente venham a entrar nessa nova versão serão apresentadas.

A descrição da obtenção do STI neste artigo se baseia na versão vigente, ou seja, na terceira edição de 2003 [1].

## 3 Como funciona o STI?

No início dos trabalhos, Steeneken e Houtgast [2-5] encetaram uma série de ensaios para avaliar propriedades estatísticas da fala humana e para descobrir quais dessas propriedades são sensíveis a mudanças em termos de inteligibilidade. Eles descobriram que a *intensidade*, ou seja, o quadrado do sinal temporal da voz, exibe componentes espectrais significativos na faixa de 0.5 a 25 Hz, com um valor máximo localizado na região entre 3 e 4 Hz.

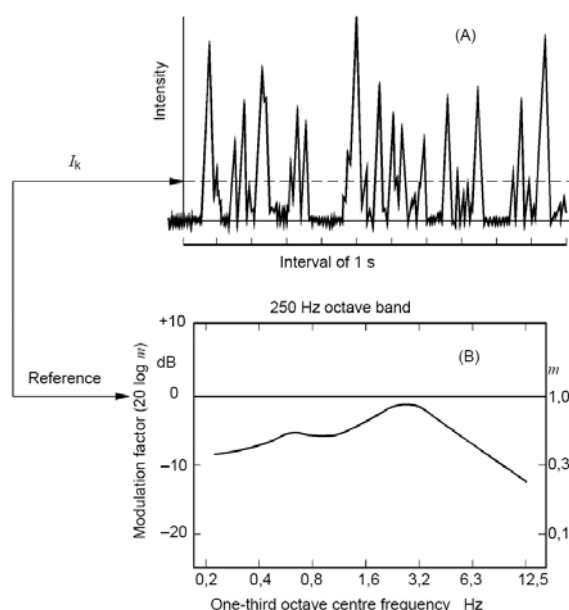


Figura 1: Envelope típico da intensidade de fala e sua transformada de Fourier. De [1]

Num ambiente com ruído de fundo ou reverberação notável, é claro que os mínimos da intensidade (as lacunas entre palavras e sílabas) são preenchidos, o que leva a uma aparente redução da profundidade da *modulação* da intensidade. No caso de ruído de fundo estacionário, esse preenchimento independe da frequência de modulação. Já no caso de reverberação, flutuações rápidas da intensidade sofrem mais nivelamento do que trechos com frequência de modulação lenta, onde a reverberação já decai bastante dentro do intervalo entre dois máximos da modulação.

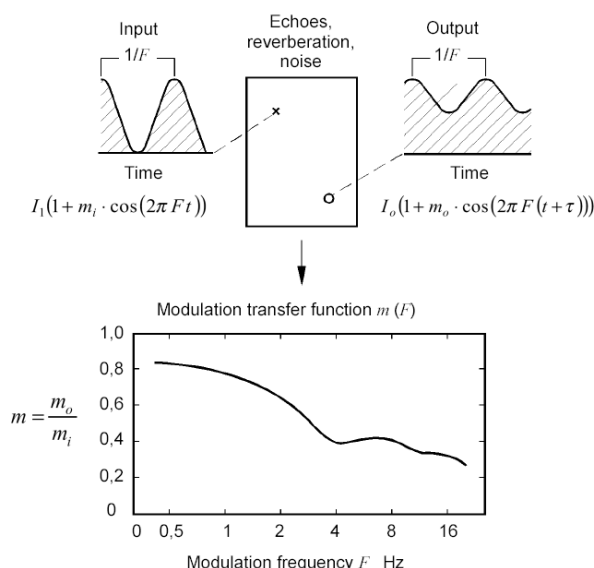


Figura 2: Função da Transferência de Modulação, indicando influência de ruído, reverberação e ecos. De [1]

Esses fatos levaram à concepção da *função de transferência de modulação*, ou *modulation transfer function (MTF)* em inglês. A MTF representa a transferência  $m(f)$  do envelope da intensidade da entrada à saída, dependendo da frequência  $f$  de modulação. O ruído age como um atenuador na MTF, enquanto que a reverberação exibe o efeito de um filtro passa-baixa.

Como as frequências que compõem a fala humana têm importância variada para o reconhecimento das palavras, o STI examina a perda da profundidade de modulação separadamente em 7 bandas de oitava entre 125 Hz e 8 kHz, dando ponderação individual para cada banda. A própria perda de modulação é avaliada em 14 frequências de modulação, subindo de 0.63 a 12.5 Hz em passos de terços de oitava. Essas 14 frequências têm ponderação igual no cálculo do STI. Ao todo, o STI levanta uma matriz de 98 valores  $m_{k,f}$ , onde  $k$  é a frequência central da banda de oitava do sinal carregador, e  $f$  é a frequência de modulação.

Vamos agora conhecer os dois métodos fundamentais para chegar aos tais valores  $m_{k,f}$ . Depois, o cálculo para computar o STI a partir da matriz desses 98 valores será apresentado.

#### 4 Método direto

A forma original do STI estipula a modulação senoidal da intensidade (ou seja, do quadrado) de um sinal de ruído. Isso corresponde à multiplicação do ruído com o termo  $\sqrt{\{1 + \cos(2\pi f_m t)\}}$ , sendo  $f_m$  a frequência de modulação.

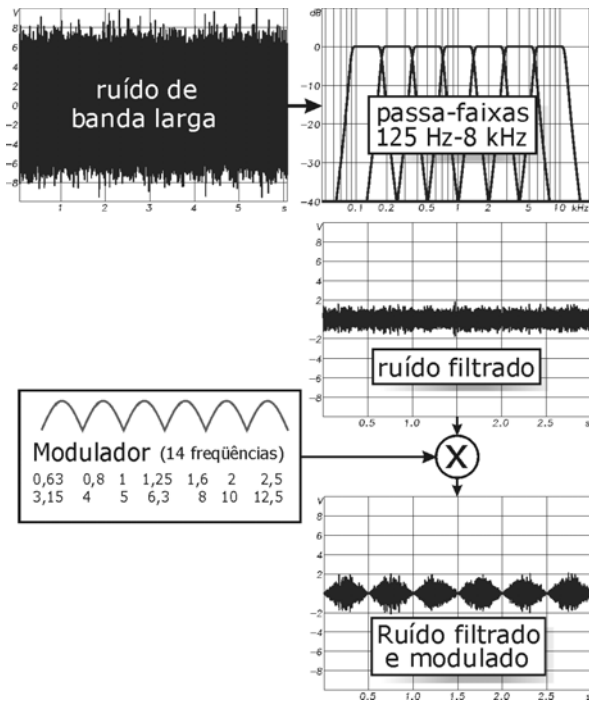


Figura 3: Criação dos 98 sinais para o STI. Exemplo: banda de oitava  $k = 1$  kHz, modulação  $f = 2$  Hz.

Para poder ponderar várias faixas com importância variada para a transmissão da voz humana, o ruído de banda larga é antes dissecado nas 7 oitavas entre 125 Hz e 8 kHz mediante passa-faixas. Cada um desses 7 ruídos filtrados, por sua vez, é modulado pelas 14 frequências de modulação, subindo em passos de terços de oitavas de 0.63 Hz até 12.5 Hz. Ao todo, são então 98 sinais diferentes, e cada um deles é reproduzido e capturado separadamente no ambiente sob investigação.

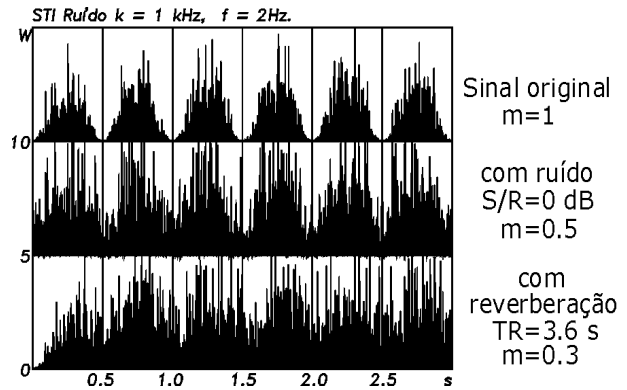


Figura 4: Influência de ruído e da reverberação na transferência de modulação. Exemplo na banda de 1 kHz com frequência de modulação de 2 Hz.

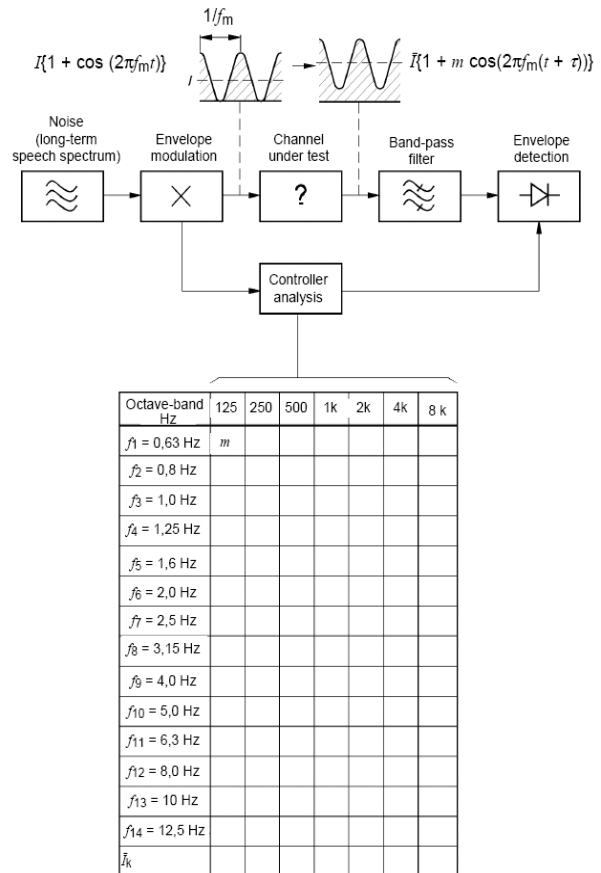


Figura 5: Organização dos resultados na matriz de MTFs [1]

No ponto de recepção, a redução da modulação  $m_{k,f}$  para cada um desses 98 sinais é avaliado da seguinte maneira:

- 1) Aplicar um filtro de oitava (que corresponde àquele utilizado na síntese do ruído).
- 2) Elevar o sinal filtrado ao quadrado.
- 3) Aplicar ao sinal filtrado e elevado ao quadrado uma transformada discreta de Fourier de uma frequência só, isto é, a da modulação. Em outras palavras, multiplicar o intervalo analisado com o seno e o cosseno da frequência de modulação.
- 4) Dividir o módulo do resultado da análise de Fourier, ou seja  $\sqrt{\{Re^2 + Im^2\}}$ , pela energia total, quer dizer, a soma da intensidade no intervalo analisado
- 5) Finalmente multiplicar esse resultado com 2.

## 5 STIPA

O método tradicional, que consiste em tocar e analisar cada uma das 98 combinações de ruído modulado, é muito moroso, consumindo no mínimo 15 minutos. Isso o restringe aos casos nos quais meramente uma comunicação ponto a ponto esta sendo investigada (por exemplo, sistemas de comunicação com *headset*, como os utilizados por pilotos de aviões ou atendentes em *call-centers*). Para a avaliação do STI em áreas com cobertura para muitas pessoas, é imprescindível medir o STI em vários pontos a fim de poder executar médias espaciais. Nesse caso, a duração de cada avaliação do STI completo é proibitiva.

Uma derivada do STI concebida especialmente para a avaliação da inteligibilidade de sistemas de sonorização, o **STIPA** (STI para PAs, PA = Public Address) só utiliza seis bandas de ruído, das quais cada uma é modulada concomitantemente com *duas* frequências (relação 1:5). Cada uma das duas só chega a uma profundidade de modulação de  $m = 0.55$ , ao contrário do  $m = 1$  no método tradicional. Todas as bandas são tocadas *simultaneamente*, o que reduz o tempo de medição e avaliação a algo em torno de tipicamente 12 segundos.

A grande vantagem do STIPA é que a avaliação pode ser feita com aparelhos portáteis (semelhantes a medidores do NPS), com o sinal de excitação sendo tocado de um CD e injetado no sistema de som.

Porém, como o método só explora duas frequências de modulação em cada banda, ele é menos preciso do que o método tradicional e em alguns casos específicos pode errar bastante na predição da inteligibilidade. Por isso, é sempre recomendável medir o STI completo.

Ambos os métodos, STI tradicional completo e STIPA, não podem ser aplicados em ambientes onde o ruído de

fundo é flutuante, porque isso pode levar a um aparente aumento da modulação. Em outras palavras, o ruído flutuante pode não diminuir, mas aumentar os valores  $m_{k,f}$ . O exemplo mais típico disso é um ambiente com pessoas conversando (*speech babble*). Nesses casos, só o método indireto apresentado em seguida ajuda.

		Carrier frequency [Hz]						
		125	250	500	1k	2k	4k	8k
Modulation frequency [Hz]	0,63			■				
	0,8						■	
	1	■	■					
	1,25					■		
	1,6							
	2				■			
	2,5							■
	3,15			■				
	4						■	
	5	■	■					
	6,3					■		
	8							
	10				■			
12,5							■	

Figura 6: Bandas de oitava e frequências de modulação utilizadas no sinal de excitação do método STIPA

## 6 Método indireto

Em vez do ruído modulado reproduzido sequencialmente, existe um método bem mais rápido para chegar a todos os valores  $m_{k,f}$  da matriz. Ele explora as *respostas impulsivas* (RIs) do ambiente pesquisado. Segundo a teoria, a RI entre dois pontos descreve *todas* as características lineares do caminho de transmissão. Por isso, todas as informações sobre reflexões e reverberação devem ser embutidas nela. O venerado Manfred Schroeder descobriu que a função de modulação  $m(f)$  pode ser calculada através da equação:

$$m(f) = \frac{\int_0^{\infty} h^2(t) e^{-j2\pi f t} dt}{\int_0^{\infty} h^2(t) dt} \quad (1)$$

Nessa equação, o numerador representa uma análise de Fourier da resposta impulsiva  $h(t)$  levado ao quadrado, e o denominador representa a energia total da resposta impulsiva.

Utilizando essa equação, a avaliação dos valores de transferência  $m_{k,f}$  a partir de RIs funciona de forma muito parecida à dos ruídos modulados:

- 1) Medir a RI de banda larga com um dos métodos

conhecidos (MLS, analisador FFT de dois canais, varredura de seno...).

- 2) Aplicar um banco de 7 filtros de oitava, de 125 Hz até 8 kHz, à RI obtida. Os filtros devem cumprir a norma IEC 1260.
- 3) Elevar os sete sinais resultantes ao quadrado.
- 4) Aplicar a cada um dos 7 sinais filtrados e elevados ao quadrado uma *transformada discreta de Fourier* com as 14 frequências exatas (entre 0.63 Hz e 12.5 Hz) de modulação estipuladas pela norma do STI.
- 5) Finalmente, é necessário dividir o módulo dos 14 resultados da análise de Fourier em cada banda, ou seja  $\sqrt{\{Re^2 + Im^2\}}$ , pela energia total dessa banda (a parte DC), o que resulta diretamente nos 14 valores  $m(f)$  dessa banda.

Mais uma vez, a *transformada discreta de Fourier* significa multiplicar o intervalo analisado com o seno e o cosseno de cada frequência exata de modulação, o que resulta em 14 partes reais e imaginárias para cada banda de oitava. Para evitar erros de vazamento, só um número íntegro de períodos deverá ser analisado para cada frequência de modulação. Como a frequência mais baixa de modulação é de 0.63 Hz, as RIs medidas devem acolher no mínimo um período inteiro dessa frequência, ou seja, o comprimento da RI nunca deve ser inferior a 1.6 segundos. Caso contrário, erros no cálculo dos valores  $m_{k,f}$  para as frequências baixas de modulação são inevitáveis. Em ambientes com muita reverberação, é claro, o comprimento da RI deve ser maior ainda para não cortar partes significantes da cauda reverberante, o que levaria a uma superestimação do STI.

Tudo isso significa que uma RI só, que na maioria das vezes é levantada de qualquer maneira para avaliar outros parâmetros acústicos (sobretudo os tempos de reverberação), é suficiente para chegar imediatamente aos 98 valores  $m_{k,f}$  que compõem a matriz das MTF.

Porém, existe uma grande diferença em relação ao método tradicional. O intuito na captação de RIs normalmente é de diminuir ao máximo a influência do ruído de fundo, para não atrapalhar o cálculo dos tempos de reverberação e dos demais parâmetros acústicos. Para chegar a essa meta, o sinal de excitação escolhido deveria possuir uma coloração semelhante à distribuição espectral do ruído de fundo (para tornar a relação sinal/ruído independente da frequência), e ser reproduzido com volume alto. Médias síncronas podem ser efetuadas para melhorar ainda mais a relação **S/R**. Isso significa que a matriz dos valores  $m_{k,f}$  e o próprio STI obtidos a partir da RI são praticamente isentos da influência do ruído de fundo. Para incluir ele devidamente nesse *noiseless STI*, existem dois métodos.

O primeiro consiste em utilizar como sinal de excitação um ruído pseudo-aleatório (por exemplo, MLS) e pré-filtrar ele com um filtro de fala (*speech filter*) a fim de obter uma distribuição espectral que corresponde à da fala humana. Esse sinal deve ser tocado com o mesmo valor RMS que seria emitido por um locutor numa situação típica de anúncio no ambiente pesquisado. Médias não devem ser feitas. O resultado será que o ruído de fundo se espalhará com a proporção certa na RI e conseqüentemente terá reflexo correto na diminuição do STI.

Ainda assim, esse método é pouco prático e pouco recomendável. As RIs captadas dessa maneira normalmente não poderão mais ser utilizadas para a avaliação dos outros parâmetros acústicos (a não ser que o ruído de fundo seja muito baixo, mas neste caso, o procedimento descrito seria desnecessário de qualquer maneira porque a influência do ruído seria desprezível). Também barra o uso de outros sinais de excitação, particularmente as varreduras de seno, que estão gradualmente substituindo medições com MLS por terem muitas propriedades superiores. Para contornar essas desvantagens, o melhor procedimento, bastante utilizado na praxe, é cortar a medição do STI em três etapas (a ordem não importa):

- 1) A RI é levantada com a melhor faixa dinâmica possível.
- 2) O nível **R** do ruído de fundo prevalente é medido.
- 3) O nível **S+R** de uma pessoa falando com volume típico no ambiente é examinado.

Ambos os níveis **R** e **S+R** são levantados nas sete bandas de oitavas entre 125 Hz e 8 kHz contempladas pelo STI. É claro que a estimação do nível **S+R** introduz um certo grau de incerteza, devido ao caráter flutuante e errático do nível de fala humana. Ele é comumente calculado através do **L10** ou **L12** (nível de pressão sonora que está sendo ultrapassado em 10% ou 12% do tempo, respectivamente), ou através do valor RMS da fala, desconsiderando as folgas entre as sílabas. Para calcular a relação **S/R**, o ruído **R** tem que ser excluído para chegar ao valor real do nível **S** do orador:

$$S = 10 \cdot \log(10^{S+R/10} - 10^{R/10}) \quad (2)$$

A relação **S/R** servirá para manipular todos os 14 valores  $m_{k,f}$  de uma banda de oitava  $k$  por um termo de correção que será apresentado em seguida.

O procedimento descrito, além de ser mais prático e de execução mais fácil, traz uma grande vantagem: A possibilidade de observar separadamente o efeito do ruído de fundo e o da acústica da sala, o que possibilita identificar quem dos dois atrapalha mais, e ainda prever como seria a influência no STI quando só um dos dois é

variado.

## 7 Redução adicional da modulação

Uma vez obtidos os valores  $m_{k,f}$  da matriz das MTF, o software de avaliação do STI pode chegar rapidamente ao valor final através de umas equações simples que iremos conhecer no capítulo seguinte.

Porém, antes de fazer o cálculo principal, os valores  $m_{k,f}$  ainda têm que passar por algumas correções.

### 8.1 Consideração da relação S/R

A primeira e mais importante correção, obrigatória para o método indireto, é a que introduz a relação S/R, medida separadamente como descrito anteriormente:

$$m_{COR\_SNR} = m \cdot \frac{1}{1 + 10^{\frac{-S/R}{10}}} \quad (3)$$

A aplicação dessa correção assume que a própria resposta impulsiva seja suficientemente livre de ruído. Na praxe, uma relação S/R acima de 25 dB em todas as bandas de oitava já satisfaz esse pré-requisito, tornando o erro desprezível.

Desde a terceira edição da norma IEC 60268-16, existem mais duas correções em bandas de oitavas que dizem respeito ao *maskamento* em bandas adjacentes, e ao *nível absoluto* da fala do locutor, respectivamente. Ambas as correções são modeladas como um ruído adicional que piora a transferência de modulação, ou seja, baixa os valores  $m_{k,f}$ .

### 8.2 Consideração do mascaramento

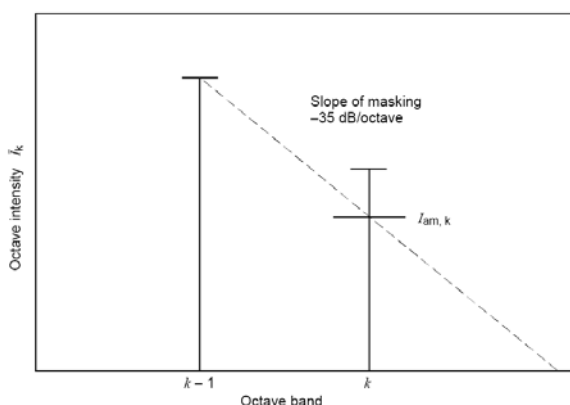


Figura 7: Efeito de mascaramento da banda  $k-1$  sobre a banda superior  $k$  para um nível entre 55 e 65 dB do sinal do locutor na banda  $k-1$ . De [1].

O mascaramento diz respeito ao efeito psicoacústico de sobreposição de um som forte sobre um som fraco numa frequência vizinha. No caso do cálculo do STI, que trabalha com bandas de oitava, o mascaramento terá efeito notável se uma banda possuir um nível S da fala

bem mais baixo do que nas bandas adjacentes (o que pode acontecer em sistemas eletro-acústicos mal equalizados, por exemplo). Para simplificar o cálculo, só a banda inferior é considerada. O mascaramento dessa banda  $k-1$  sobre a banda  $k$  é modelada como uma linha que decai com uma declinação fixa em dB/octava:

Porém, a inclinação dessa reta depende do nível  $S_{k-1}$  na banda  $k-1$ . Na norma, essa dependência é tabelada em passos discretos de 10 dB:

Tabela 1: Inclinação do mascaramento e fator de mascaramento auditivo (amf) dependendo do nível.

Nível [dB]	46-55	56-65	66-75	76-85	86-95	>95
Inclinação dB/octava	-40	-35	-25	-20	-15	-10
amf	0.0001	0.000316	0.00316	0.01	0.0316	0.1

Como se vê, o efeito nocivo de mascaramento aumenta com o nível do sinal.

Pelo menos, a inclinação não depende da frequência. Ela é modelada como uma *intensidade I* de som que interfere na banda  $k$  e entra no termo de correção dos valores  $m_{k,f}$ .

$$I_{am,k} = 10^{\frac{S_{k-1}}{10}} \cdot amf \quad (4)$$

$I_{am,k}$  é o “mascaramento auditivo” exercido na banda  $k$ ,  $S_{k-1}$  é o nível do mascarador na banda inferior  $k-1$ , e *amf* (*auditory masking factor*) é o fator de mascaramento dependendo desse nível  $S_{k-1}$ , depreendido da Tabela 1.

### 8.3 Consideração do limiar absoluto de audição

Quanto mais o nível de fala cair e se aproximar do limiar de audição, maior terá que ser a relação S/R para manter a mesma inteligibilidade. Para dar conta desse efeito, um terceiro componente, o *limiar absoluto de recepção* (absolute reception threshold) entra no termo de correção dos valores  $m_{k,f}$ . Esse limiar, que depende da frequência, é modulado como um ruído constante de baixo nível sobreposto ao sinal do locutor:

Tabela 2: Limiar absoluto de recepção em bandas de oitava.

Banda	125	250	500	1k	2k	4k	8k
$L_{rs,k}$ [dB]	46	27	12	6.5	7.5	8	12

Para o cálculo, os valores em dB da Tabela 2 são transformados para intensidades:

$$I_{rs,k} = 10^{\frac{L_{rs,k}}{10}} \quad (5)$$

### 8.4 Termo completo de correção

Com a ajuda da intensidade  $I_k$  da fala na banda  $k$ ,

$$I_k = 10^{\frac{S_k}{10}} \quad (6)$$

o termo completo de todos as correções para a banda  $k$ , incluindo também a influência da relação **S/R** nessa banda, se torna:

$$m_{COR k} = \frac{1}{1 + 10^{\frac{-S/R}{10}}} \cdot \frac{I_k}{I_k + I_{am,k} + I_{rs,k}} \quad (7)$$

Todos os 14 valores  $m_{k,f}$  de determinada banda  $k$  agora podem ser multiplicados com esse termo de correção:

$$m'_{k,f} = m_{k,f} \cdot m_{COR k} \quad (8)$$

É interessante anotar que as duas correções relativas ao limiar absoluto de audição e ao mascaramento fazem com que o STI caia não somente se o nível de fala se aproximar do limiar absoluto de audição. Devido ao fato que o mascaramento mútuo entre as bandas aumenta com o nível, o STI também cai se o nível da fala for muito acima daquele de conversa comum entre pessoas (ver Figura 8). Um exemplo dessa situação é um estádio de futebol, onde os anúncios precisam de um volume elevado para superar o barulho dos torcedores. Como a relação **S/R** já costuma ser fraca nessa condição adversa, é praticamente impossível atingir um STI classificado “bom” ou “excelente”.

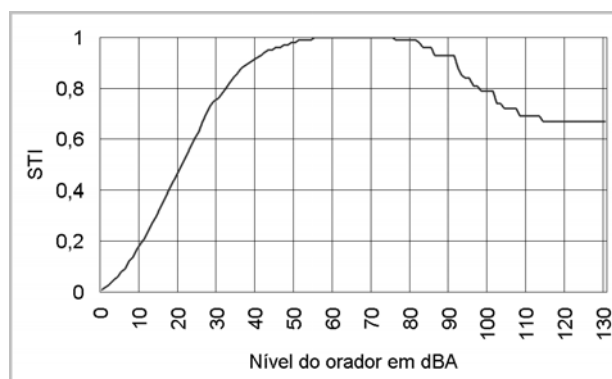


Figura 8: Dependência do STI exclusivamente do nível do orador

## 8 Cálculo do STI

Após o ajuste dos valores  $m_{k,f}$  pelas três correções descritas, o STI pode ser calculado. Como primeiro passo, cada valor é transformado em uma relação **S/R** (*signal to noise ratio, SNR*) aparente:

$$SNR_{k,f} = 10 \cdot \log \frac{m'_{k,f}}{1 - m'_{k,f}} \text{ dB} \quad (9)$$

Se a redução da transferência de modulação fosse exclusivamente ocasionada pelo ruído de fundo, esse valor SNR de fato apresentaria a relação sinal/ruído real.

Todos os 98 valores SNR agora são ceifados a uma faixa de  $\pm 15$  dB. Quer dizer, um valor muito bom que ultrapassa 15 dB é fixado em 15 dB, e um valor péssimo que cai abaixo de -15 dB é içado a -15 dB.

Em seguida, cada um dos valores  $SNR_{k,f}$  limitados à faixa de  $\pm 15$  dB é transformado para o chamado *índice de transmissão* (transmission index,  $TI$ ):

$$TI_{k,f} = \frac{SNR_{k,f} + 15 \text{ dB}}{30 \text{ dB}} \quad (10)$$

Devido à ceifa anterior dos valores  $SNR_{k,f}$ , os  $TI_{k,f}$  só podem tomar valores entre 0 e 1. Portanto, eles já se assemelham com o STI final, e de fato este é calculado em duas etapas como média sobre todos os 98 índices de transmissão. A primeira etapa é uma simples média aritmética dos 14 índices dentro de cada banda de oitava:

$$MTI_k = \frac{1}{14} \sum_{f=1}^{14} TI_{k,f} \quad (11)$$

Este *índice de transmissão de modulação* (Modulation transfer index,  $MTI_k$ ) por oitava dá então igual peso a todas as 14 frequências de modulação na faixa de 0.63 Hz a 12.5 Hz considerada pelo STI. Existem propostas para ponderar mais a faixa entre 2 e 6.3 Hz, que tem maior importância para a inteligibilidade [9].

Finalmente, os 7 valores  $MTI_k$  formam o STI através da seguinte soma ponderada:

$$STI_r = \sum_{n=1}^7 \alpha_n \cdot MTI_n - \sum_{n=1}^6 \beta_n \cdot \sqrt{MTI_n \cdot MTI_{n+1}} \quad (12)$$

A parte essencial é a primeira soma, que calcula a média dos  $MTI_k$ , mas nesta etapa não dando igual importância a todos os componentes do somatório. A segunda soma é um termo de redundância só introduzido a partir da terceira versão da norma IEC 60268-16. Ela considera que um resultado bom em uma banda pode parcialmente compensar um resultado pior numa banda adjacente. Os fatores de ponderação  $\alpha$  e  $\beta$ , específicos para cada banda de oitava, dependem do sexo do locutor, o que é outra novidade da terceira edição da norma:

Tabela 3: Fatores de ponderação específicos para oradores masculinos e femininos.

Banda	125	250	500	1k	2k	4k	8k
$\alpha$ mas.	0.085	0.127	0.230	0.233	0.309	0.224	0.173
$\beta$ mas.	0.085	0.078	0.065	0.011	0.047	0.095	-
$\alpha$ fem.	-	0.117	0.223	0.216	0.328	0.250	0.194
$\beta$ fem.	-	0.099	0.066	0.062	0.025	0.076	-



### 9 Classificação do valor do STI

O valor final do STI é avaliado da seguinte maneira:

Tabela 4: Relacionamento do valor STI com a inteligibilidade predita.

Valor do STI	Avaliação segundo a IEC 60268-16
0.75 - 1	Excelente
0.6 - 0.75	Bom
0.45 - 0.6	Adequado
0.3 - 0.45	Fraco
0 - 0.3	péssimo

### 10 Mecanismos básicos que influenciam no STI

Neste capítulo, iremos conhecer alguns casos teóricos e os efeitos que eles exercem sobre o STI. Para simplificar a contemplação, as duas correções que dizem respeito ao mascaramento e ao limiar absoluto, introduzidos na terceira versão da norma IEC 60268-16, foram deixados fora do cálculo.

#### 10.1 Influência de ruído

Ruído estacionário exerce uma influência na MTF que independe da frequência de modulação. A influência pode ser diretamente calculada através da equação já conhecida:

$$m_{SNR} = \frac{1}{1 + 10^{\frac{-S/R}{10}}} \quad (13)$$

Uma relação S/R de -15 dB ou pior em todas as bandas significa que o STI fica no patamar do “pior possível”, ou seja, 0. A partir desse limiar, cada aumento de 3 dB na relação S/R faz com que o STI aumente em 0.1, até finalmente chegar ao valor 1 (indicando inteligibilidade perfeita) quando a relação S/R atinge e ultrapassa 15 dB.

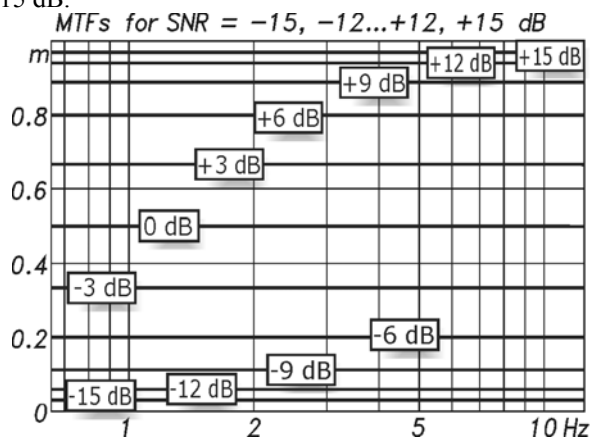


Fig. 1: Influência da relação S/R de banda larga na MTF

Tabela 5: Relação entre SNR de banda larga e o STI.

SNR [dB]	-15	-12	-9	-6	-3	0
STI	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5

SNR [dB]	0	+3	+6	+9	+12	+15
STI	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1

Esse relacionamento se deve à projeção linear da relação S/R à faixa dos índices de transmissão entre 0 e 1:  $TI = (S/R + 30 \text{ dB}) / 15 \text{ dB}$ .

Outro fato interessante é que uma relação S/R de 0 dB em todas as bandas de oitava resulta num STI de exatamente 0.5, perto da divisa entre “adequado” e “fraco”.

#### 10.2 Influência de reverberação

Como já mencionado, reverberação surte um efeito passa-baixa na MTF. Quer dizer, afeta bastante as altas frequências de modulação, enquanto tem efeito menos dramático nas baixas. Contanto que o decaimento seja estritamente exponencial, indicando condições perfeitas de campo difuso, a influência de reverberação na MTF pode ser expressa pela seguinte equação:

$$m_{TR}(f) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{2\pi \cdot f \cdot TR}{13.8}\right)^2}} \quad (14)$$

Com um tempo de reverberação TR de 1 segundo em todas as bandas, o STI atingiria meramente um valor de 0.59, o que significa que ele já sairia da categoria “boa” para a “adequada”. Com 2 segundos de TR, o STI cairia para 0.44, o que já corresponde à categoria “fraco”. Na praxe, os tempos de reverberação raramente são iguais em todas as bandas de oitava. Tendem aumentar nas bandas baixas e são mais bem comportados nas médias e nas altas. As bandas com maior ponderação no cálculo do STI são as de 500 Hz até 4 kHz.

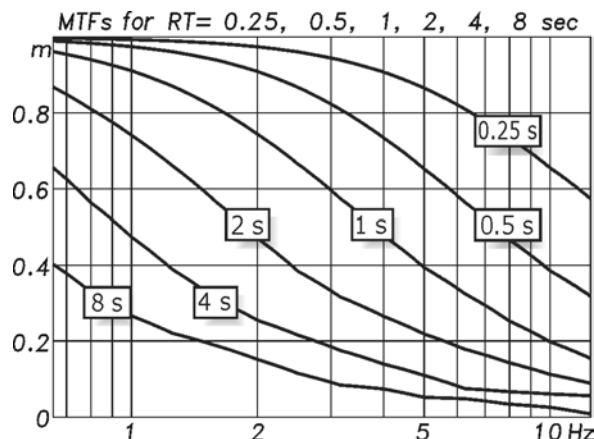


Fig. 2: Influência de reverberação de banda larga na MTF

Tabela 6: Relação entre reverberação de banda larga e o STI

TR [s]	8	4	2	1	0.5	0.25
STI	0.19	0.31	0.44	0.59	0.74	0.85

A Figura 9 mostra como a combinação entre tempo de reverberação e relação S/R limita o STI alcançável.

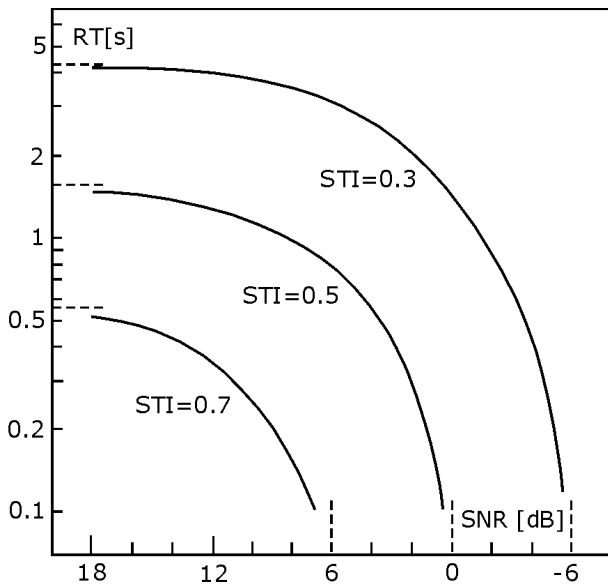


Figura 9: STI vs. tempo de reverberação e relação sinal/ruído de banda larga

### 11.3 Influência de um eco

Ecos causam um efeito “filtro de pente” na MTF. Isso se deve à interferência construtiva e destrutiva da adição com o som direto causando “batimento”.

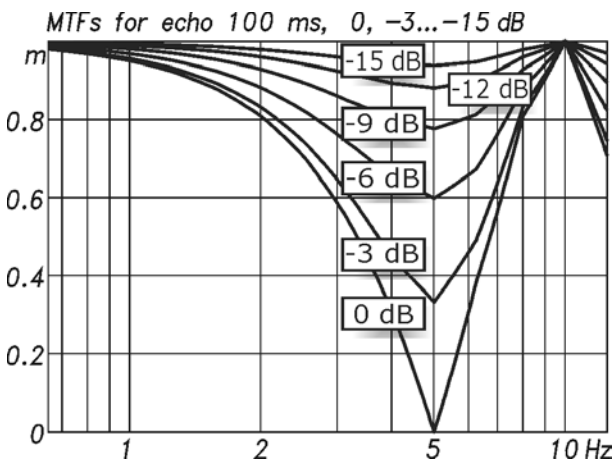


Fig. 3: Influência do nível de um eco de banda larga de 100 ms de atraso na MTF

A influência de um eco de banda larga com nível variável pode ser calculada pela seguinte equação:

$$m_{ECO}(f) = \frac{\sqrt{1 + 2 \cdot I_E \cdot \cos(2\pi \cdot f \cdot T_E) + I_E^2}}{1 + I_E} \quad (15)$$

com  $I_E = 10^{\frac{L_E}{10}}$

Tabela 7: Relação entre nível de um eco de 100 ms e o STI

L <sub>E</sub> [dB]	0	-3	-6	-9	-12	-15
STI	0.68	0.74	0.80	0.87	0.93	0.97

O exemplo escolhido aqui é um eco de banda larga que chega 100 ms após o som direto. A Tabela 7 indica que mesmo chegando com nível igual ao do som direto, o STI sofrerá queda para apenas 0.68, no meio da faixa de avaliação “bom”. No entanto, esse tipo de eco prejudica bastante o entendimento, enquanto o STI não acusa suficientemente a perda de inteligibilidade. Essa insensibilidade a ecos tardios e nocivos à inteligibilidade é um dos pontos fracos do STI.

### 11 Medições práticas

Existem dois cenários básicos para a avaliação da inteligibilidade mediante o STI: A transmissão da fala com e sem amplificação eletro-acústica. Enquanto a amplificação é indispensável a partir de um certo tamanho da área a ser sonorizada, a transmissão direta do orador aos ouvintes é a situação típica em pequenas salas de reuniões, auditórios e salas de aula.

Tecnicamente, a avaliação do STI é mais fácil no primeiro caso, quando a divulgação da fala depende de um sistema de sonorização. Nesse caso, o sinal de excitação para medir o STI é simplesmente fornecido ao sistema de som instalado e se espalha da mesma maneira como o sinal do locutor faria, retratando de forma fiel a influência da acústica de sala.

Já o caso de transmissão direta sem apóio técnico impõe algumas dificuldades na avaliação do STI. Para obter um resultado que condiz com a realidade, o alto-falante usado para injetar o sinal de excitação na sala deve possuir uma direcionalidade muito parecida à de uma pessoa. Caso contrário, os níveis das reflexões chegando ao receptor serão diferentes do caso natural. Para evitar essa deturpação dos resultados, existem os chamados *oradores artificiais*. Se trata de uma caixa acústica que possui a forma de um torso humano. O alto-falante embutido emite o som através de um tubo que desemboca no lugar da boca. O som é então sujeito da mesma forma à refração em redor da cabeça e às reflexões causadas pelo ombro como acontece em uma pessoa natural. Para reforçar os graves, uma segunda via, composta por um ou dois alto-falantes maiores embutidos no tórax do torso, emite o som por um orifício na altura do pescoço. Devido às reflexões nos tubos utilizados para dirigir o som aos orifícios, o sistema precisa de uma pré-equalização para alcançar

uma resposta plana em frequência.



Figura 10: Vista do interior de um orador artificial

Poucos pesquisadores, consultores e engenheiros de som empenhados em medir o STI dispõem de um orador artificial (cujo uso de fato é prescrito pela norma IEC 60268-16). Nesse caso, substitutos viáveis são pequenas caixas de som com um só alto-falante de banda larga, com diâmetro igual ou menor a 4 polegadas. Esse tipo de caixa possui uma direcionalidade que exibe uma certa semelhança à de pessoas naturais. Fontes onidirecionais, tais como os populares *dodecaedros* (comumente usados para medir os demais parâmetros acústicos) não devem ser utilizadas. Aliás, para fazer sentido, os parâmetros que dizem respeito à qualidade de fala, por exemplo a *definição* ou *Deutlichkeit*, também não deveriam ser medidos com uma fonte onidirecional. De maneira geral, os experimentadores em ensaios acústicos pouco se importam com a direcionalidade do alto-falante utilizado para injetar o sinal de excitação. Uma despreocupação errada, pois ela exerce um efeito considerável nos resultados.

A Figura 11 mostra um arranjo típico para medir a inteligibilidade em uma sala de aula. O sinal de excitação gerado pelo programa de medição rodando num PC é convertido para o analógico e amplificado, fornecendo potência aos alto-falantes do orador artificial. O sinal acústico captado pelo(s) microfone(s) é pré-amplificado, digitalizado e transmitido ao computador, que analisa o sinal e depreende dele o STI.

O orador é posto no mesmo lugar e na mesma altura onde a professora normalmente ministra as aulas (quer dizer, em frente do quadro negro). Embora a norma não explicita a direcionalidade do microfone de captação, normalmente é o tipo onidirecional que está sendo utilizado para medir o STI. Além do microfone,

comumente instalado na altura das orelhas dos ouvintes, a Figura 10 também mostra um *ouvidor artificial* que pode auxiliar na caracterização do ambiente acústico (IACC etc). A quarta versão da norma 60268-16 em andamento provavelmente venha a trazer uma versão binaural do STI, o que tornaria o uso de uma cabeça artificial mais interessante ainda.

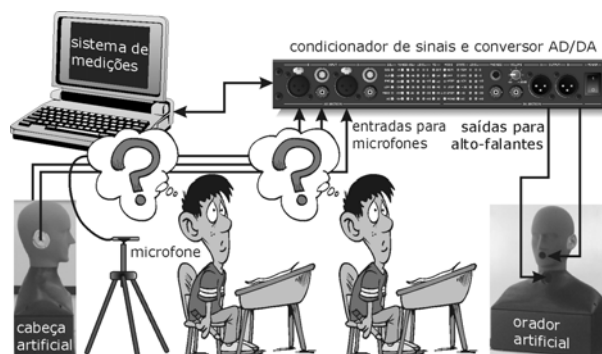


Figura 11: Arranjo para medir a inteligibilidade em uma sala de aula

Existem também casos híbridos de sonorização: A fala é amplificada e reproduzida por um sistema de som, mas o orador se encontra no mesmo ambiente. Isso significa que as primeiras fileiras vão ouvir o orador tanto pela via direta quanto pelos alto-falantes. Ademais, significa que o microfone capta ruído e reverberação, o que piora a inteligibilidade em comparação à fala seca livre de ruído reproduzida pelo sistema de som.

Esse caso igualmente torna obrigatório o uso do orador artificial. Colocado devidamente na mesma altura e na mesma distância de microfone, ele substitui o orador natural nos ensaios.

### 12.1 Estádio Olímpico em Berlim

Vamos conhecer um exemplo prático para a aplicação do STI. Trata-se do estádio olímpico em Berlim, um dos utilizados na copa do mundo de 2006, inclusive na final tediosa entre a França e a Itália. No ano anterior da copa, foi realizada uma reforma abrangente, incluindo a instalação de um novo sistema de sonorização, composto por *line-arrays*, como de praxe atualmente.

O primeiro passo em projetos desse tamanho normalmente é utilizar um software de predição da distribuição do som. Com os dados da direcionalidade e da potência máxima dos alto-falantes e do modelo do recinto a ser sonorizado, esses softwares são capazes de calcular mapas do NPS na área de cobertura e até prever o STI (com base na RI calculada a partir do som direto, um número reduzido de primeiras reflexões e da reverberação estimada com meios estatísticos). Executar essa simulação é um passo indispensável para verificar a adequação dos alto-falantes escolhidos. Nesse caso específico, a análise já foi exigida na licitação.

Após a instalação do sistema de sonorização, coube verificar se os valores de STI e o nível máximo preditos foram cumpridos. Como o locutor de um estádio comumente se encontra numa cabine acusticamente isolada, não é necessário trabalhar com orador artificial para incluir o caminho orador-microfone neste caso.

A uniformidade da resposta em frequência (pré-requisito: só  $\pm 3$  dB na faixa 70 Hz – 15 kHz) também foi investigada. Para verificar essas metas de forma representativa, nada menos que 200 medições de RIs foram executadas em pontos espalhados sobre toda a área do público no estádio vazio. Em termos de acústica de sala, o estádio vazio apresenta o pior caso, com a maior reverberação possível. Para levar o efeito absorvedor do público em consideração, um “bônus” conservador de 0.05 foi concedido ao valor final do STI, medido sem público.



Fig. 4: Estádio Olímpico em Berlin. De [8].

Antes disso, a relação  $S/R$  foi modelada com base no nível  $S$  máximo alcançado pelo sistema de sonorização, predito pela simulação e verificado posteriormente com ruído rosa. Junto com um ruído  $R$  médio de 92 dB(A) estipulado para o público - em situações extremas, como o tripúdio seguindo um gol, ele pode chegar até 110 dB(A) -, chegou-se a um valor de 13 dB para a relação  $S/R$ , correspondendo a um fator de redução de 0.95 para todos os valores  $m_{k,f}$  da matriz das MTFs.

Para a amostra de RI apresentada na Fig. 6, essa correção pela relação  $S/R$  diminuiu o STI de 0.58 para 0.55. O bônus concedido elevou o valor a 0.6, na fronteira entre as categorias “adequado” e “bom”. O pré-requisito estipulado pelo mandante da obra, a cidade de Berlin, era um STI mínimo de 0.5 a ser cumprido em no mínimo 90% dos assentos no estádio lotado.

A reverberação no estádio vazio é impressionante: 5 segundos na faixa entre 500 Hz e 2 kHz. Mesmo assim, com as devidas correções, o STI dá “luz verde” neste exemplo prático. Mais importante: Uma auralização feita mediante a convolução da RI com fala seca revela que tudo pode ser entendido sem maiores

problemas, não obstante a cauda reverberante maciça que acompanha cada sílaba. A razão disso é a boa relação do som direto sobre a reverberação difusa. Como pode ser visto na Fig. 5, o som direto chega aos ouvintes do público com nível quase 20 dB acima da cauda reverberante. Isso é essencialmente fruto do uso de *line-arrays*, que agem parcialmente como fonte de linha, emitindo ondas quase cilíndricas. Ao contrário de fontes pontuais, fontes de linha têm perda de somente 3 dB com cada dobro da distância, reforçando o som direto particularmente nas áreas mais afastadas dos alto-falantes.

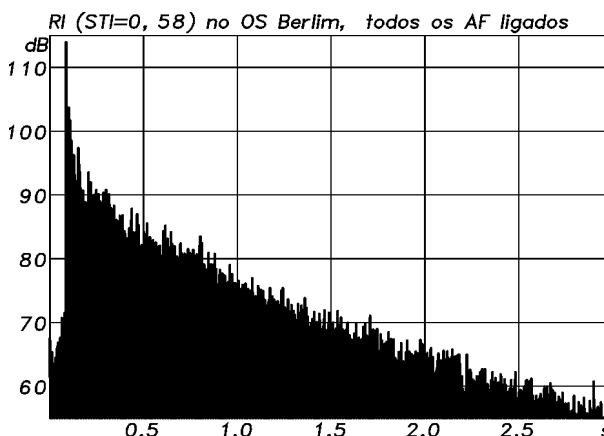


Fig. 5: Resposta impulsiva no estádio Olímpico, Berlin.

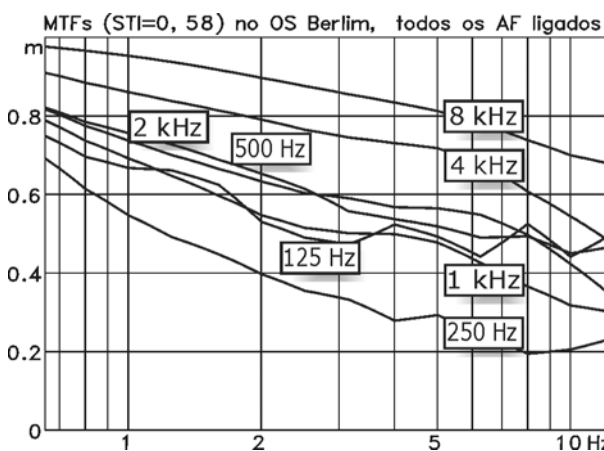


Fig. 6: MTFs no estádio Olímpico, Berlin.

Muitas tarefas de sonorização contam com esse problema: Nada ou pouca coisa pode ser feita para mudar uma acústica difícil que um recinto possa ter. A solução é otimizar a radiação dos alto-falantes, buscando cobertura homogênea na área do público com emissão de ondas coerentes e ao mesmo tempo evitando o vazamento de som para áreas fora do público.

## 12 Fraquezas do STI

Embora normalmente exiba uma correlação boa com a inteligibilidade percebida, o STI pode errar bastante em casos extremos. De forma geral, o STI não se importa

de forma adequada com a estrutura temporal das respostas impulsivas. Por exemplo, um resultado idêntico para o valor de STI é obtido entre uma RI e a sua versão simplesmente invertida no eixo temporal, ação que produz uma inteligibilidade desastrosa! Aparentemente, algumas propriedades do nosso senso auditivo, que aproveita componentes chegando no máximo 50 ms após o som direto, mas é despistado bastante por componentes chegando mais tarde, não são modeladas de forma psicoacusticamente correta no cálculo do STI.

Relacionado a esse aspecto é a percepção tridimensional do nosso ouvido, que ajuda bastante para discernir uma voz numa barafunda de outras vozes ou ruído em geral. Porém, o STI normalmente é levantado com a ajuda de um microfone onidirecional, desconsiderando as direções das quais os componentes da RI chegam às orelhas do ouvinte e as diferenças interaurais. Por isso, seria mais adequado adquirir RIs binaurais com uma cabeça artificial [6]. Mas esse é um problema que também vale para a avaliação dos demais parâmetros acústicos.

Outro ponto fraco do STI diz respeito ao equilíbrio tonal da transmissão. Em ambientes onde a relação  $S/R$  não é problema, o STI pouco se importa como a resposta em frequência de um sistema de sonorização. Um exemplo típico e com bastante relevância prática é a falta de agudos. No exemplo da Fig. 7, a função de transferência medida no estádio em Berlim foi deliberadamente reduzida em até 25 dB a partir de 1 kHz.

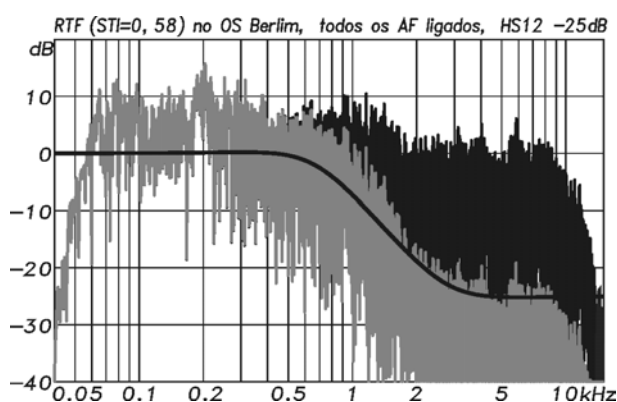


Fig. 7: Função de transferência no estádio Olympia em Berlim e simulação de uma perda acentuada de agudos (curva sólida: resposta do filtro empregado).

Como o nível não tem influência nos componentes do STI que dizem respeito à acústica de sala (reflexões e reverberação), os fatores  $m_{k,f}$  da matriz praticamente não mudaram. Portanto, o valor final do STI (segundo a definição original) também não sofre alterações. A correção do mascaramento introduzida na terceira edição da norma só traz uma pequena queda do STI de 0.58 para 0.55. De maneira alguma acusa de forma adequada a perda quase total de inteligibilidade neste

exemplo. E não se trata de um caso puramente teórico. Ele pode facilmente acontecer quando os *tweeters* do sistema de sonorização forem queimados. Como se vê neste exemplo, essa ocorrência praticamente não poderia ser detectada por uma medição do STI.

O STI não é somente destinado aos efeitos naturais de acústica de sala e ruído de fundo. Já pelas origens, quando os idealizadores visaram quantificar com meios objetivos a qualidade de transmissão de rádios de comunicação, ele sempre teve a pretensão de também considerar corretamente qualquer influência técnica na transmissão de som, seja ela deliberada ou não. Porém, nem todos os efeitos de processamento e sonorização de fala têm reflexo correto sobre o STI. Alguns até mudam o STI na direção errada.

O exemplo mais notável disso é o uso de compressores. Um compressor aumenta o nível nos trechos baixos de fala e diminui os picos. Isso tem duas consequências para o cálculo do STI. A primeira é que o método indireto, chegando ao STI através da RI, não pode ser aplicado. As envoltórias dos sinais de excitação têm uma característica completamente diferente em comparação à fala, surtindo reações do compressor igualmente diferentes. No caso de varreduras de seno, o compressor não mudaria o ganho, pois o nível já se encontra em patamar constante (o negócio é diferente para compressores de multi-banda, é claro). Portanto, a inclusão do compressor não surtiria efeito nenhum. No caso de ruído pseudo-aleatório (como MLS), muito sensível a quaisquer mudanças não-lineares e/ou variáveis no tempo, o uso do compressor iria destruir a RI, aumentando dramaticamente o ruído de fundo aparente.

Então, transmissões de fala que passam por um compressor só podem ser investigadas com o método direto, quer dizer tocando seqüencialmente os 98 ruídos filtrados e modulados. Porém, como o compressor diminui os picos e levanta os vales, o que corresponde a uma diminuição da profundidade de modulação, o STI sofrerá uma queda notável, acusando uma perda de inteligibilidade. No entanto, o contrário é verdade: o compressor (empregado na medida certa) melhora a inteligibilidade e em casos críticos com muito ruído de fundo, pode elevar uma transmissão do ininteligível até o razoável.

Uma coisa parecida acontece se *frequency-shifters* são aplicados para suprimir realimentações. O deslocamento linear de frequência em torno de 5 ou 10 Hz não prejudica a inteligibilidade, mas tem efeito bastante negativo no STI, pois as frequências centrais de modulação não são mais acertadas.

Existe uma série de diversos erros que podem acontecer em equipamentos eletro-acústicos que não exercem um reflexo adequado no STI.

Um exemplo bem conhecido é o chamado *center-clipping* (ceifa central). Ele faz com que o sinal, ao mudar a polaridade, desapareça completamente abaixo de um certo limite. Antigamente, esse efeito era comum em microfones de carbono, empregado em telefones, mas hoje substituído pelos microfones de eletreto. Ainda pode ser ocasionado nos estágios complementares de amplificadores de potência se a *corrente de repouso* nos transistores de potência for baixa. Também pode se manifestar em conectores com mau contato e circuitos eletrônicos com defeito em geral. Infelizmente, esse fenômeno muito desagradável tem pouquíssima influência no cálculo do STI. Como a intensidade do sinal já é baixa nos trechos que desaparecem, a contribuição energética no cálculo é baixíssima. Todavia, o *center-clipping* prejudica bastante a inteligibilidade.

Outro fenômeno similar é transmissão intermitente, que pode acontecer em sistemas sem fio quando o sinal RF cair abaixo do limiar do *sqlch* (supressor de ruído quando o canal está vazio), ou em sistemas digitais quando houver qualquer erro de transmissão. *Drop-outs* na reprodução de fitas velhas, arquivos danificados, ou de *streams* de áudio através de uma conexão digital compartilhada e temporariamente sobrecarregada são outros exemplos corriqueiros dessa condição desagradável. No entanto, esse tipo de estorvo também não incomoda muito o STI. Uma simulação reveladora é de periodicamente ligar e desligar o som, com silêncio de 100 ms em cada período. Esse estropício de fala a deixa quase completamente ininteligível. Por incrível que pareça, o STI aumenta ligeiramente nessa situação!

Como se viu nos capítulos 4 a 6, o cálculo do STI é bastante complexo. Tendo em vista todas essas situações nas quais o STI pode falhar, é justificável a dúvida se todo o esforço realmente valha a pena. Bradley [7] até mostrou que uma medida bem mais simples, o  $U_{50}$  (que é o *useful-to-detrimental ratio*, ou seja, a *claridade*  $C_{50}$  com influência do ruído de fundo), tem uma correlação tão boa com a inteligibilidade quanto o STI.

### 13 O futuro do STI

Embora a versão 3 da norma IEC 60268-16 do STI tenha aperfeiçoado o cálculo e tirado algumas ambigüidades, ela ainda contém alguns pontos mal-esclarecidos e sobretudo carece avisos práticos e preceitos tanto para a geração dos sinais de excitação quanto para a análise dos sinais capturados. A futura versão 4, planejada para ser lançada somente no ano 2010, irá complementar essas informações e vai enfatizar dicas práticas para o dia-a-dia das medições do STI.

Ela provavelmente também venha a introduzir o STI binaural, medido com a ajuda de uma cabeça artificial,

que vai levar melhor em consideração a capacidade do nosso sentido de audição de discernir sons oriundos de várias direções através de um processo que pode ser considerado sendo uma “correlação cruzada neural”. Essa capacidade maravilhosa do nosso cérebro faz com que ainda conseguimos entender um locutor num ambiente taxado péssimo pelo STI por ser fortemente reverberante ou ruidoso, contanto que o som do locutor chegue de uma única direção bem definida. Para contemplar esse efeito no STI binaural, duas medidas serão aplicadas: Primeiro, para cada uma das sete bandas de oitava, a “orelha” com o melhor STI será escolhida, e segundo, para as bandas de 500 Hz, 1 kHz e 2 kHz, um algoritmo de correlação cruzada (semelhante ao que fornece o IACC) será utilizado.

Outra novidade vai ser uma correção do STI para ouvintes que não são nativos da fala empregada (importante para a sonorização em congressos internacionais ou em lugares com frequência elevada de estrangeiros, tais como aeroportos), ou para pessoas que sofrem algum tipo de perda auditiva.

### 14 Conclusões

O STI certamente não é uma panacéia na predição e avaliação da inteligibilidade em lugares padecendo ruído de fundo e acústica de sala carente, mas ele é bem prático e um bom primeiro indicador de problemas que comprometem o entendimento. Embora possa falhar fatalmente em situações extremas (e atípicas), ele geralmente exibe uma correlação satisfatória com a inteligibilidade de fato experimentada no lugar pesquisado.

Uma pré-condição para lugares que dependem da amplificação da voz é que o sistema de sonorização funcione sem erros técnicos, sendo bem equalizado e livre de certos tipos de processamento (notavelmente dispositivos que mudam a dinâmica do sinal, tais como limitadores, compressores e *gates*). A resposta em frequência sempre tem que ser avaliada separadamente (mas podendo utilizar convenientemente as RIs já medidas para avaliar STI), porque o STI é insensível a desequilíbrio tonal.

O lado positivo do STI é que ele é uma ferramenta padronizada e amplamente utilizada mundialmente. Em casos litigiosos, ele pode desempatar um laudo técnico. Ao mesmo tempo, isso significa que ele tem que ser levantado cautelosamente, sempre visando excluir possíveis fontes de erros. A maior delas sem dúvida é a estipulação da relação *S/R*. O ruído depende muito da situação e o nível do sinal também pode variar bastante entre locutores diferentes. Em contrapartida, o componente da acústica de sala pode ser traçado com boa precisão, sobretudo se o sistema de sonorização a ser utilizado na reprodução da voz do locutor também for utilizado para medir as respostas impulsivas.

A avaliação automatizada do STI por um equipamento não substitui um especialista em acústica, muito pelo contrário. Com um pouco de experiência, os valores  $m_{k,f}$  (ou melhor, as MTFs) informam qual é a fonte predominante que compromete a inteligibilidade. Cabe então a engenheiro tarimbado identificar a origem do problema e tentar tirar ele pela raiz.

## 15 Referências

- [1] IEC 60268-16:2003, “Objective rating of speech intelligibility by speech transmission index”.
- [2] Past, present and future of the Speech Transmission Index, TNO Human Factors, Soesterberg, Netherlands (ISBN 90-76702-02-0).
- [3] TAMMO HOUTGAST, HERMAN J.M. STEENEKEN (1971), “Evaluation of Speech Transmission Channels by Using Artificial Signals”, *Acustica* vol. 25, 355-367.
- [4] HERMAN J.M. STEENEKEN, TAMMO HOUTGAST, “Basics of the STI measuring method”, disponível em [www.steeneken.nl/sti.html](http://www.steeneken.nl/sti.html)
- [5] HERMAN J.M. STEENEKEN, TAMMO HOUTGAST, “Improvements of STI: frequency weighing, gender, level dependent masking, and phoneme specific prediction” disponível em [www.steeneken.nl/sti.html](http://www.steeneken.nl/sti.html)
- [6] PETER MAPP, “Systematic & Common Errors in Sound System STI and Intelligibility Measurements”, 117. convenção da AES, São Francisco 2004, Preprint 6271.
- [7] JOHN S. BRADLEY, “Optimising Sound Quality for Classrooms”, XX Encontro da SOBRAC, Rio de Janeiro, Outubro de 2002
- [8] ANSELM GOERTZ, CHRISTIANE BANGERT, WOLFGANG AHNERT, STEFAN FEISTEL, “Setup and final measurements for a PA-System at the example of a large sports stadium in Berlin”, Tonmeistertagung Leipzig, Novembro de 2004, (infelizmente, só em alemão)
- [9] G. LEMBRUGGEN, A. STACEY, “Should the Matrix be reloaded?” *Proceedings of the Institute of Acoustics*, Vol. 25. Pt.8, 2003
- [10] SWEN MÜLLER, “Medir o STI“, II Seminário de Música, Ciência e Tecnologia, Campinas, 2005. Disponível em [www.proceedings.scielo.br](http://www.proceedings.scielo.br)
- [11] S.J.VAN WIJNGAARDEN, JAN VERHAVE, “Recent Advances in STI Measuring Techniques”, *Proceedings of the Institute of Acoustics*, Vol. 28, Pt.6. 2006
- [12] TAMMO HOUTGAST, HERMAN J.M. STEENEKEN, “The Modulation Transfer Function in Room Acoustics as a Predictor of Speech Intelligibility”, *Acustica* vol. 28, 1973
- [13] TAMMO HOUTGAST, HERMAN J.M. STEENEKEN, R. PLOMP, “Predicting Speech Intelligibility in Rooms from the Modulation Transfer Function”, *Acustica* vol. 46, 1980
- [14] PETER MAPP, “Relationships between Speech Intelligibility Measures for Sound Systems”, 112. convenção da AES, Munique 2002, Preprint 5604.
- [15] PETER MAPP, “Limitations of Current Sound System Intelligibility Verification Techniques”, 113. convenção da AES, Los Angeles 2002, Preprint 5668.

# Avaliação do desempenho acústico de cabinas audiométricas *in situ*

Souza, K.; Massarani, P.M.; Nabuco, M.  
Laboratório de Ensaio Acústicos, INMETRO, Rio de Janeiro, RJ.

## Resumo

Os ambientes utilizados para a realização de exames audiométricos, devem, segundo a Norma Regulamentadora NR 7 do Ministério do Trabalho, atender as especificações da norma ISO 8253-1 no que diz respeito, dentre outros, aos níveis máximos de ruído ambiente. Na maioria dos casos são utilizadas cabinas audiométricas para que os limites dos níveis de ruído sejam atendidos. A ABNT, através da Comissão de Estudo de Equipamentos Eletroacústicos (CE-03:029.01), vem trabalhando na elaboração de duas normas para atender essa demanda. Uma trata do método direto, quando o nível de ruído ambiente a cabina é medido diretamente, e outra, a parte 2, do método indireto, quando o isolamento acústico da cabina é medido e utilizado para se estimar o provável nível de ruído no interior da cabina a partir de valores medidos do nível de ruído no ambiente em que a referida cabina está instalada. O método direto requer a utilização de microfones especiais de baixo nível de ruído próprio para a obtenção de resultados confiáveis. Com o método indireto, além da menor exigência aos equipamentos de medição, é possível obter um parâmetro fixo para monitoração contínua dos níveis nas cabinas. Esse trabalho apresenta resultados obtidos para o isolamento sonoro de um protótipo de cabina audiométrica medido em câmara reverberante em duas posições distintas e em uma sala de uso normal. São comparados os níveis no interior da cabina obtidos direta e indiretamente. São também apresentados resultados práticos da utilização dos resultados na instalação da cabina para uso regular em audiometria.

**Palavras-chave:** audiometria, cabinas audiométricas, isolamento sonoro de cabinas.

## 1. Introdução

A norma regulamentadora NR 7 do Ministério do Trabalho e Emprego exige que as cabinas audiométricas atendam as especificações da norma ISO 8253-1. Em função disso e ainda com o aumento do número de empresas sofrendo auditorias para a ISO 9000 e outras, a demanda por verificação do desempenho acústico de cabinas audiométricas é cada vez maior.

No entanto, os profissionais que atuam na área de audiometria aparentemente não tem usado adequadamente os laudos de ensaios produzidos para as cabinas audiométricas. O uso do laudo de forma adequada significa monitorar o nível de ruído dentro do ambiente audiométrico de forma a que os valores exigidos pela ISO 8253-1 não sejam ultrapassados durante os exames audiométricos. Dois métodos estão em fase final de normalização no âmbito da ABNT. O método apresentado no projeto de norma 03-029.01-027/1, chamado de *Medição Direta*, e o método apresentado no projeto de norma 03:029.01-027/2, chamado de *Medição indireta através da determinação do isolamento*.

O primeiro método especifica as condições para medição do nível de ruído no ambiente de teste audiométrico. De posse desses resultados e ainda de valores medidos em uma posição de controle na sala

onde está o especialista em audiometria, o nível de ruído no ambiente de teste pode ser monitorado e dessa forma uma ou outra frequência de teste durante a qual esses níveis foram ultrapassados podem ser repetidas de modo a assegurar confiabilidade metrológica para o ensaio realizado.

O segundo método, sem dúvida muito mais fácil de ser realizado, especifica as condições para a medição do isolamento sonoro da cabina. De posse desses valores e conhecendo os níveis de ruído existentes no ambiente em que a cabina está instalada, é possível se estimar o nível de ruído no ambiente de teste audiométrico e dessa forma validar os resultados de uma audiometria.

Como o projeto de norma não especifica claramente que a avaliação da cabina deva se realizada *in situ*, por facilidade e redução de custos do ensaio, o Inmetro tem realizado as medições de cabinas tanto em ambientes reverberantes encontrados em laboratório, como *in situ*, caso as cabinas estejam já instaladas para uso.

Nesse trabalho foram realizados testes com cabinas em câmara reverberante, instaladas no meio do ambiente e encostada em uma das paredes. Também foram realizados testes em uma sala normal, mobiliada, com a presença de operadores dos equipamentos de medição.

Os resultados encontrados para o isolamento sonoro foram utilizados para se estimar o nível de ruído no



ambiente de teste audiométrico, para dois tipos diferentes de ruído: ruído rosa e o som de uma conversação.

Embora apresentem diferenças as mesmas estão abaixo dos valores estimados para a incerteza de medição sugeridos nos projetos de norma em questão. Também são apresentados resultados obtidos para o nível de ruído no interior da cabina medido com instrumentação especial (microfone de 1" de alta sensibilidade) e instrumentação usual com microfones de 1/2", cujo ruído elétrico é sensivelmente mais alto.

## 2. Instrumentação e esquema de medição utilizados nos ensaios

### 2.1. Medição do isolamento em câmara reverberante

Esses ensaios foram realizados em uma câmara reverberante com volume de 226 m<sup>3</sup>, área total de 236 m<sup>2</sup>, com paredes de concreto pintadas e não paralelas entre si. O protótipo de cabina foi instalado no meio do piso da câmara e encostada a uma das paredes verticais.

O nível de pressão sonora foi medido em cinco posições no interior da câmara e em duas no interior da cabina. Foram utilizados microfones para campo difuso Larson Davis tipo 2559 conectados a um multiplexador Bruel&Kjaer modelo 2811. O sinal captado pelos microfones foi processado em um analisador de frequências Norsonic RTA 840, onde foi calculada a média temporal durante 1 minuto para cada microfone.

O sinal de excitação para o campo sonoro na câmara reverberante foi um ruído rosa gerado por uma fonte sonora de referência da marca Bruel&Kjaer modelo 4204. A fonte foi instalada em três posições no piso da câmara distantes 1,7 m uma da outra.

A figura a seguir apresenta de forma esquemática o layout da montagem dos equipamentos.

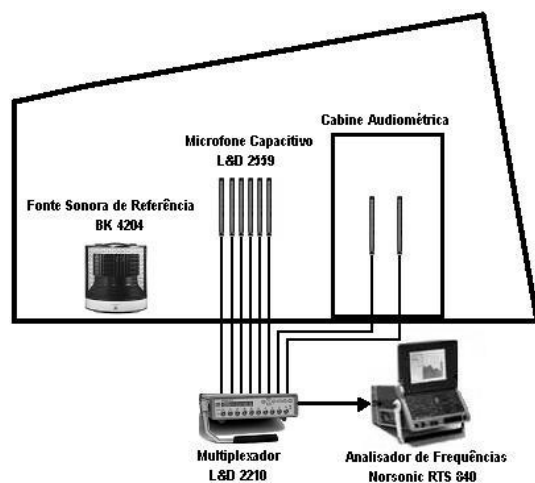


Figura 1: Esquema de montagem dos equipamentos.

### 2.2. Medição do isolamento *in situ*

A medição do isolamento da cabina *in situ* foi realizada utilizando o medidor de nível de pressão sonora Larson Davis 824 em bandas de 1/3 de oitava de 100 Hz à 10.000 Hz. Uma fonte sonora de referência Bruel&Kjaer modelo 4204 foi instalada em três posições na sala distantes de 1 m uma da outra. O nível de pressão sonora médio ( $L_{eq}$ ) foi medido/calculado durante 15 seg. para cada combinação de posição de fonte-microfone.

O nível de pressão sonora no interior da cabina foi medido em duas posições atendendo as especificações do Projeto de Norma ABNT 03-029.01-027/2.

### 2.3. Medição do nível de ruído ambiente no interior da cabina *in situ*

O nível de ruído ambiente no interior da cabina foi medido com um microfone de 1" de alta sensibilidade GRAS modelo 40EH acoplado a um Condicionador de sinais GRAS modelo 12HF por um pré-amplificador GRAS 26HF. Simultaneamente o nível de ruído no interior da sala onde se encontrava a cabina foi medido com um microfone 1/2" Larson Davis modelo 2559 para campo difuso. Os sinais de ambos os microfones foram analisados em bandas de 1/3 de oitava de 31,5 Hz à 12.500 Hz, por um analisador Norsonic RTA 840.

## 3. Resultados obtidos

### 3.1. Comparação dos resultados para o nível de ruído ambiente com instrumentação regular (mic 1/2") e especial (mic 1")

A figura 2 a seguir apresenta as curvas para o nível de pressão sonora no interior da cabina instalada para testes audiométricos medidos com um microfone de 1/2" e 1" respectivamente.

As curvas demonstram claramente que a utilização de microfones de 1/2" de baixa sensibilidade podem impedir que sejam registrados níveis de ruído muito baixos (menores que 20 dB), embora possam ainda assim estar abaixo dos valores limites estabelecidos pela norma ISO 8253-1 (ver figura 5).

Já os microfones de 1", e em especial os que apresentam alta sensibilidade (da ordem de 1 mV/Pa) permitem a medição de níveis muito baixos, inclusive permitindo que sejam verificadas as condições para testes audiométricos por condução óssea, quando o nível de ruído permitido é muito baixo (ver figura 5).

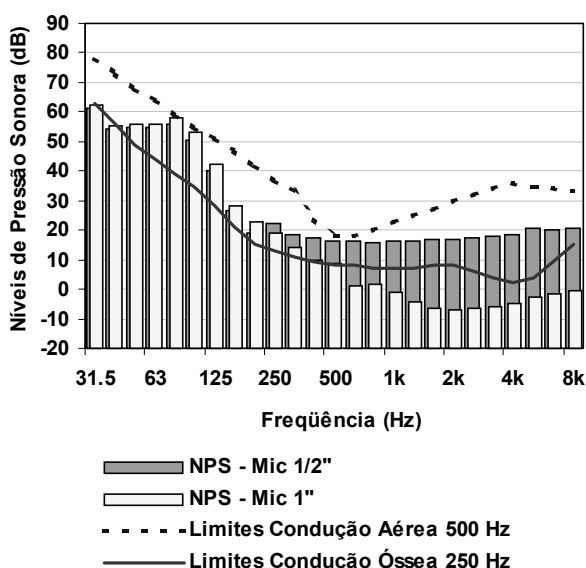


Figura 2: Nível de Pressão Sonora no interior da Cabina medido com Mic de 1/2" e 1"

A figura 3, a seguir, mostra as curvas correspondentes aos níveis de pressão sonora medidos com ambos microfones (1/2" e 1") instalados em um ambiente ruidoso. Ao contrário do verificado no ambiente silencioso do interior da cabina as curvas são bastante parecidas, as pequenas diferenças verificadas podem ser atribuídas ao fato dos microfones não estarem exatamente na mesma posição.

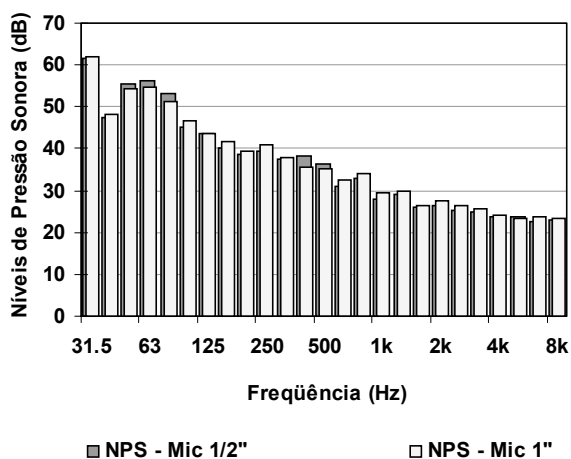


Figura 3: Nível de Pressão Sonora em ambiente ruidoso medido com Mic de 1/2" e 1"

### 3.2. Comparação entre resultados obtidos para o isolamento de uma cabina em câmara reverberante e *in situ*

O Laboratório de Ensaios Acústicos do Inmetro realiza a medição do isolamento sonoro de cabinas tanto em laboratório (câmaras reverberantes) como *in situ*, no local onde a cabina está instalada. Esse último pode implicar em custos adicionais devido ao deslocamento dos especialistas e equipamentos para o local onde está a cabina. Ao mesmo tempo, alguns fabricantes de cabinas tem solicitado ensaios para cabinas a serem comercializadas, ou seja ainda não teriam local definido para instalação.

É importante observar que os resultados obtidos são associados à amostra (cabina) ensaiada, caracterizada por um número de série, não podendo ser estendidos a qualquer outro produto mesmo que tenha saído da mesma linha de produção e seja do mesmo modelo.

A seguir (figura 4) são apresentados os resultados obtidos para um determinado modelo de cabina comercial cujo isolamento foi medido em câmara reverberante (VENEGAS *et al*, 2003) e *in situ*, instalada contra uma das paredes e com todos os móveis (escrivaninhas, armários, e outros posicionados como de costume).

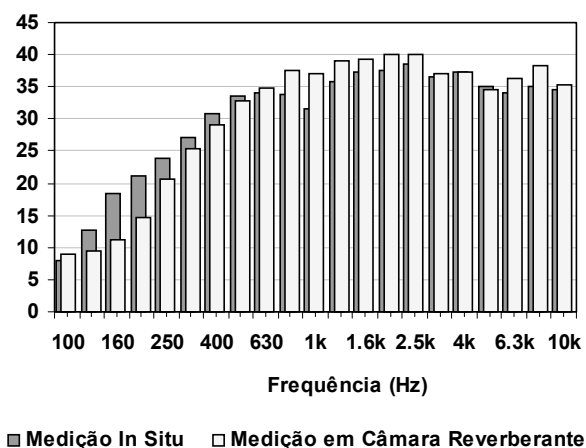


Figura 4: Isolamento sonoro de uma cabina medido em câmara reverberante e *in situ*

De posse dos valores do isolamento sonoro de uma cabina, sejam eles obtidos em câmara reverberante ou *in situ*, o especialista que realiza o exame audiométrico pode monitorar o nível de ruído no interior da cabina e validar ou não um ensaio se os limites estabelecidos pela norma ISO 8253-1 não forem ou forem ultrapassadas durante os testes.

Nas figuras 5 e 6 estão apresentados os resultados obtidos para a previsão do nível de ruído interno em uma cabina instalada em uma sala normal, usando os dados do isolamento sonoro obtidos em câmara reverberante e na própria sala. Dois tipos de ruído diferentes foram utilizados para "ruído ambiente" na

sala de controle: o ruído de vozes e um ruído rosa.

O nível de pressão sonora na sala de controle foi medido numa posição próxima ao especialista que teoricamente conduziria o exame audiométrico. Simultaneamente, foi medido o nível de ruído no interior da cabina.

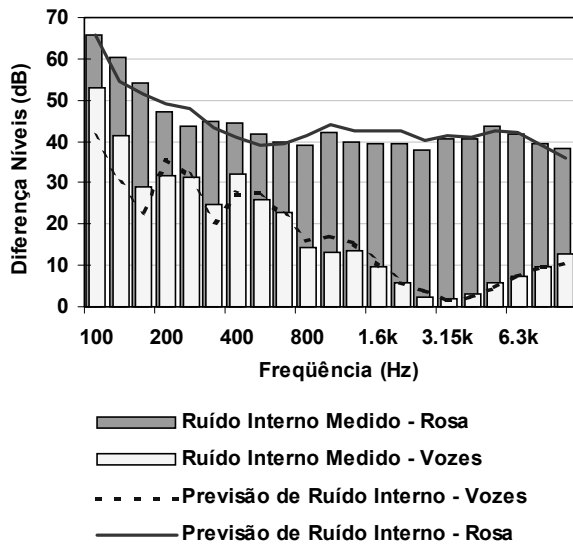


Figura 5: Previsão do nível de pressão sonora no interior de uma cabina audiométrica a partir de resultados do isolamento obtidos em medições *in situ*

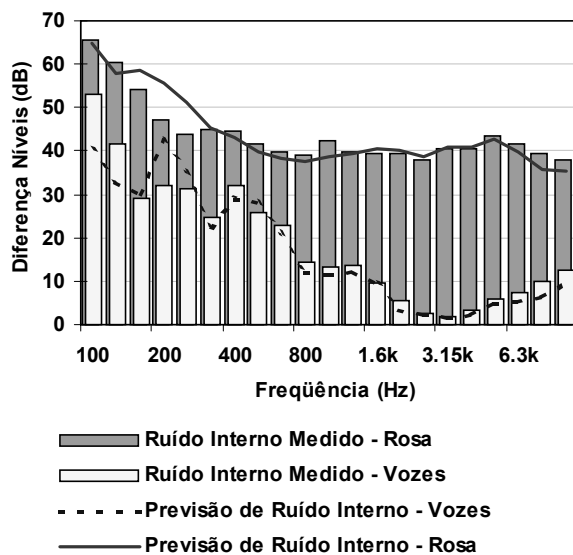


Figura 6: Previsão do nível de pressão sonora no interior de uma cabina audiométrica a partir de resultados do isolamento obtidos em medições em câmara reverberante

Quando se deseja instalar uma cabina, a primeira providência é a medição do nível de ruído ambiente onde será instalada a cabina em questão. De posse desses valores, seleciona-se uma cabina cujo isolamento

sonoro em bandas de 1/3 de oitava possa proporcionar uma redução no ruído de modo a que os valores máximos de norma sejam atendidos.

A figura 8 apresenta os resultados da simulação dos cálculos a serem realizados para a instalação de uma cabina em uma sala com nível de ruído conhecido. As curvas vermelhas e azul correspondem, respectivamente, aos valores máximos permitidos para o nível de ruído dentro da cabina para a realização de testes audiométricos de condução aérea e óssea.

As barras azuis são os valores calculados do ruído no interior de uma cabina ensaiada em uma câmara reverberante, e instalada contra uma das paredes. Segundo os cálculos, com esse tipo de instalação (contra parede) os níveis de ruído dentro da cabina deverão atender aos limites para testes audiométricos de condução aérea.

Os valores para condução óssea também são atendidos nas frequências mais altas. Se a cabina for instalada no meio da sala, uma Segunda condição ensaiada na câmara, o critério para condução óssea também será atendido, coimo pode ser visto nas barras rosas.

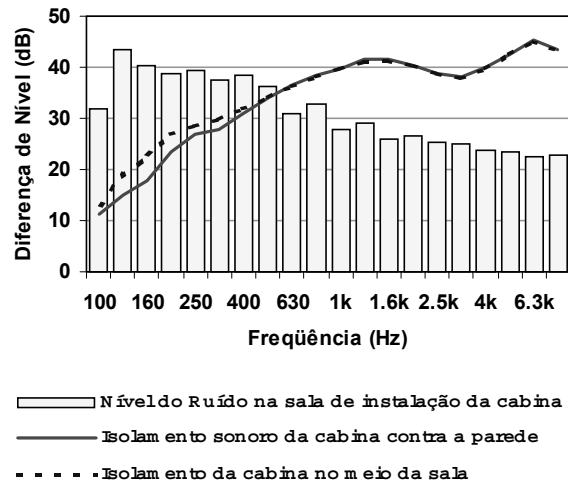


Figura 7: Valores do isolamento sonoro medido em câmara reverberante e dos níveis de ruído na sala onde será instalada uma cabina

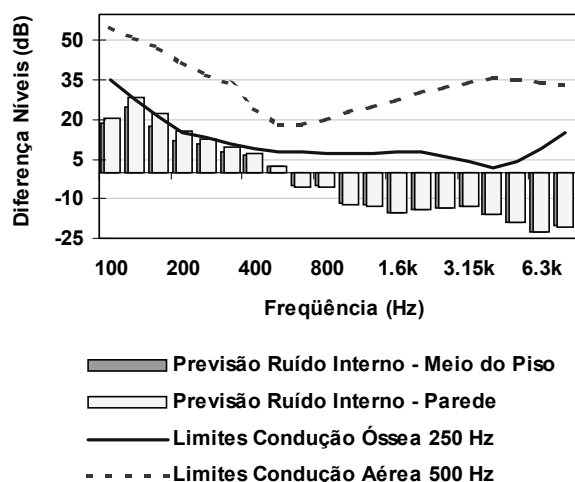


Figura 8: Exemplo de instalação de uma cabina em uma sala com nível de ruído conhecido

#### 4. Comentários e conclusões

A medição direta dos níveis de ruído internos em cabinas devem se feitas sempre associadas à medição de níveis de controle em algum ponto da sala onde está instalada a cabina audiométrica. Isso porque não se pode assegurar que os valores obtidos numa medição realizada em um determinado dia da semana, em um determinado horário irá se repetir em momentos distintos.

A medição direta exige ainda a utilização de um microfone de 1", uma vez que os microfones de 1/2" com sensibilidade da ordem de 40 mV/Pa não permite medições de níveis mais baixos que 15 a 20 dB. Sistemas de medição para níveis baixos de ruído (Microfones de 1" com alta sensibilidade mais pré-amplificadores) custam na faixa de US\$ 3.000,00 (sem taxas). Uma alternativa para a avaliação do desempenho acústico de cabinas audiométricas é a medição do isolamento sonoro das mesmas.

Essa medição pode ser realizada em câmaras reverberantes e *in situ*. Esse último apresenta a vantagem de se avaliar a cabina numa condição de instalação real, com um campo sonoro mais próximo daquele que estará submetida no dia a dia. No entanto, para o desenvolvimento de cabinas, quando empresas fabricantes não dispõem de recursos laboratoriais para realizar os testes, são necessários ensaios em laboratório. Como foi visto nesse trabalho, os resultados obtidos em ambas as condições se aproximam claramente.

A previsão do ruído no interior de cabinas a partir do conhecimento dos valores de isolamento sonoro medidos em qualquer das duas situações e ainda dos valores medidos do nível de ruído presente na sala de

controle permitem que se estime com um grau aceitável de confiança os níveis de ruído no interior das cabinas, se considerados as incertezas sugeridas no projeto de norma 03-029.01-027/2.

Finalmente, seria interessante que fossem realizadas investigações sobre a validação de exames audiométricos em ambientes com níveis de ruído maiores que aqueles estabelecidos na norma ISO 8253-1. A partir desses estudos poderia ser realizada uma revisão do referido documento, inclusive no que diz respeito à faixa de frequência do ruído máximo permitido, pois enquanto o projeto de norma recomenda a faixa de 100 Hz à 10.000 Hz, a ISO 8253-1 recomenda medições de ruído de 31,5 Hz à 12.500 Hz.

#### Agradecimentos

A Vibranihil por ter cedido os protótipos de cabina para as medições e ao Walter Hoffmann pelas sugestões de ensaio.

#### Referências

- [1] ABNT, Projeto de Norma 03-029.01-027/1- Eletroacústica - Métodos para avaliação de ambientes para ensaios audiométricos - Parte 1: Medição direta, São Paulo, 2005
- [2] ABNT, Projeto de Norma 03-029.01-027/2- Eletroacústica - Métodos para avaliação de ambientes para ensaios audiométricos - Parte 2: Medição indireta através da determinação do isolamento, São Paulo, 2005
- [3] ISO 8253-1 *Acoustics - Audiometric test methods - Part 1: Basic pure tone air and bone conduction threshold audiometry*, 1989
- [4] VENEGAS, R., NABUCO, M. e MASSARANI, P., *Sound Insulation Evaluation Using Transfer Function Measurements, Building Acoustics* 13(1), p. 59-67, 2006

# Avaliação Acústica de Teatros

Massarani, P.M.

Laboratório de Ensaios Acústicos, Inmetro, Duque de Caxias, RJ, pmassarani@inmetro.gov.br

## Resumo

São revistos aspectos da medição de parâmetros acústicos utilizados para avaliar objetivamente a qualidade de teatros. Os resultados dos parâmetros analisados podem variar conforme a metodologia aplicada na medição. Essa variação é comparada ao que pode ser percebido pela sensibilidade dos ouvintes. As variações de resultados ocorrem por causa dos seguintes fatores: método de medição, variação espacial dentro dos teatros, algoritmo de cálculo dos parâmetros e instrumentação utilizada. São apresentados dados de comparações retirados da literatura, análises dos algoritmos de cálculos de alguns parâmetros e são avaliados os resultados experimentais obtidos em uma sala de concerto.

**Palavras-chave:** ISO 3382, medição de parâmetros acústicos, teatros, qualidade sonora.

## 1. Introdução

Os teatros são espaços especialmente projetados para exibição de espetáculos desempenhados por artistas diretamente para uma platéia. A qualidade acústica dos teatros é uma das suas características mais importantes, principalmente quando da apresentação de espetáculos musicais. Desde os teatros de existência mais antiga, os arquitetos têm encontrado uma enorme quantidade de soluções para que a platéia possa assistir e ouvir com satisfação as peças apresentadas. Os conceitos de projeto aplicados variam com a época, com o tipo de apresentação e com o estilo musical. Em muitos casos os projetos são direcionados primordialmente para impressionar visualmente os usuários dos teatros, apresentando geometrias marcantes na conformação dos volumes internos de ocupação. Os especialistas em acústica têm acompanhado o processo de mudança de conceitos dos projetos, adicionando elementos acústicos tais como, difusores, refletores e absorvedores acústicos, sem contudo alterar a harmonia visual criada pelo arquiteto. Naturalmente que o reconhecimento da qualidade sonora de um teatro é atestada pelo público e pelos músicos que executam as peças.

Apesar da possível diversidade nas suas formas, acusticamente os teatros apresentam uma quase inevitável característica. Os músicos e seus instrumentos, ou sejam as fontes sonoras, ocupam um lugar bem determinado no qual as pessoas do público possam ter contato visual. O público, ou seja os receptores, se espalha em áreas distribuídas no piso e em balcões elevados buscando a máxima ocupação dentro da sala. Os assentos do público e as pessoas formam áreas bem definidas de maior absorção sonora dentro do volume interno das salas. Essa característica acústica típica é responsável pela ocorrência de variações do nível de pressão sonora propagado nos teatros. Acredita-se que em um teatro de projeto bem

sucedido, não ocorrerá diferenciação significativa da qualidade sonora em regiões distintas de ocupação do teatro.

O alvo desse trabalho é a medição objetiva das características acústicas dos teatros. Os procedimentos e os parâmetros acústicos são descritos na norma internacional ISO 3382 [1]. Nas medições inevitavelmente é necessário fazer aproximações. Os instrumentos musicais, ou cantores, distribuídos no palco são substituídos por fontes sonoras omnidirecionais posicionadas em pontos discretos. No lugar do público tem-se transdutores padronizados, que podem microfones de medição também omnidirecionais ou dispositivos com direcionalidade especiais (torsos artificiais por exemplo), da mesma forma discretamente posicionados nas áreas da platéia, balcões ou outras regiões ocupadas pelos ouvintes. A seleção de posições da fonte e dos microfones procura amostrar suficientemente um teatro em sua variação espacial. No estado da arte atual das medições procura-se obter, na melhor forma possível, as respostas impulsivas entre cada combinação de posições de fonte e de microfone. O teatro pode ser avaliado em diferentes estados de ocupação, mas normalmente a condição mais conveniente é sem a presença de público e de músicos.

A norma ISO 3382 apresenta em seu apêndice, em uma proposta informativa, uma lista de definições de parâmetros bem aceitos pela comunidade para avaliação de qualidade dos teatros ou de outras salas. Até hoje, mesmo estando em desenvolvimento uma nova versão da ISO 3382, mantém-se ainda em nível normativo somente o tradicional tempo de reverberação. É reconhecida, entretanto, a necessidade de caracterizar acusticamente as salas por outros tipos de medição evidenciando a distribuição de níveis relativos de pressão sonora, as relações entre energias sonoras precoces e posteriores que alcançam os ouvintes e a

distinção espacial do campo sonoro. A existência ainda de lacunas nas definições é mais um agente motivador da análise apresentada nesse trabalho.

Uma identificação confiável da qualidade de teatros através de parâmetros calculados após as medições pode ser útil para diferentes propósitos. A boa qualidade de um teatro, reconhecida por usuários, pode ser relacionada aos valores dos parâmetros medidos, auxiliando o projeto de novas salas ou a reforma de salas existentes porém menos apreciadas. Os valores medidos podem também ser relacionados à elementos construtivos que afetam a qualidade, como forma de palco, superfícies refletoras e difusoras e propriedades de absorção sonora das cadeiras e outras superfícies. No caso de teatros antigos e de importância histórica, as medições podem ser utilizadas para caracterizar o seu estado de conservação e balizar tecnicamente critérios de preservação de patrimônio.

O objetivo desse trabalho é de apresentar as variações possíveis que ocorrem nas medições e cálculos dos parâmetros. Espera-se que as informações apresentadas auxiliem aos especialistas que realizam as medições de acústica em teatros na garantia da qualidade dos seus resultados de medição. As medições são inevitavelmente amostrais, dependendo de aproximações estatísticas de um sistema acústico tão complexo como é o campo sonoro em uma sala. Por essa razão, não é possível atribuir valores verdadeiros aos parâmetros medidos e sim médias representativas. A ferramenta indicada para avaliar se os procedimentos de medição adotados por alguém que se propõem caracterizar as salas são corretos é a comparação de resultados sobre objetos fixos de medição. Além disso é conveniente analisar os processos de cálculo dos parâmetros e relacioná-los com características das respostas impulsivas medidas. Na realização de medições em um teatro é conveniente analisar as variações espaciais dos resultados encontrados, garantindo a coerência e a reprodução de valores únicos atribuídos às salas.

## 2. Respostas Impulsivas e parâmetros de salas

A matéria prima para a obtenção dos parâmetros acústicos é a resposta impulsiva das salas. Um som impulsivo, com energia concentrada em um período muito curto de tempo, tem a propriedade de excitar o sistema acústico em uma ampla faixa de frequência. A resposta impulsiva, RI, entre uma fonte e um receptor na sala contém a função de transferência da sala, para a combinação em particular de posições da fonte e de recepção. A anatomia característica de uma RI de sala é composta das seguintes regiões. Inicialmente há um curto período de tempo necessário para o impulso percorrer a distância da fonte ao microfone, onde predomina o ruído de fundo. Após isso, a RI registra um

pico de pressão sonora que corresponde ao caminho direto da fonte ao microfone. Seguindo o componente direto, ocorrem as primeiras reflexões provenientes de superfícies mais próximas tanto da fonte quanto do microfone. Passando mais adiante no registro temporal, as reflexões passam a não ser bem distinguidas, ocorrendo uma mistura de alta densidade de reflexões oriundas de todas as superfícies refletoras da sala. Essa última região é a cauda reverberante que apresenta um decaimento exponencial com o tempo. Na Figura 1 é apresentada duas representações de uma mesma RI. No gráfico em cima tem-se uma escala linear no eixo das ordenadas enquanto que no gráfico em baixo tem-se uma escala em níveis logarítmicos. A cauda reverberante termina mergulhando no ruído de fundo constante da sala, ou no caso da figura no tempo próximo a 2 s.

Os parâmetros de qualidade das salas apresentados na ISO 3382 representam características das RI. Em todos os casos é necessário distinguir a porção da RI relativa à sala daquelas onde predominam o ruído, ou sejam os intervalos de tempo antes do componente direto e depois do mergulho da cauda reverberante. O tempo zero de análise de uma RI é determinado um pouco antes do tempo de chegada da frente de onda direta, onde a energia é pelo menos 20 dB abaixo da energia do pico direto. É conveniente também estabelecer o final da RI no tempo em que o decaimento linear do seus níveis intercepta o nível constante de ruído de fundo. A qualidade de uma RI para o cálculo dos parâmetros depende da relação entre a energia da porção de interesse e o nível de energia do ruído de fundo. Na atualidade os sistemas de medição são capazes de obter RI com relações entre o sinal e o ruído, S/N, suficientemente altos (no caso da figura 1 cerca de 60 dB), com a utilização de fontes eletroacústicas omnidirecionais e métodos de identificação como MLS e principalmente com a utilização de varreduras de senos. Deve considerar também a análise dos parâmetros em bandas de frequência, pela qual um RI em banda larga é filtrada resultando em várias outras. As RI filtradas por bandas de baixas frequências de centro tem uma S/N geralmente mais baixa tanto por deficiência das fontes eletroacústicas quanto pelos níveis de ruído de fundo normalmente mais intensos. Outra característica crítica das baixas frequências é a ocorrência de batimentos e curvaturas no decaimento da cauda reverberante causados por baixas densidades modais das salas e distribuição não uniforme de áreas de absorção sonora.

As definições dos parâmetros acústicos estão detalhadamente apresentadas na norma ISO 3382. Convém, entretanto, para o propósito desse trabalho fazer uma distinção dos parâmetros conforme o processamento das RI. A Tabela 1 apresenta alguns dos parâmetros organizados conforme o processo sobre a

RI. O cálculo de nível é obtido calculando a energia total da RI, no caso do “Source Strength”  $G$  é calculado o nível de energia relativa ao nível de potência sonora da fonte utilizada. Para a determinação dos tempos de reverberação, RT, e do “Early Decay Time”, EDT, a resposta impulsiva é integrada na ordem reversa suavizando o decaimento. Os parâmetros  $C_{80}$  e  $D_{50}$  são obtidos relacionando-se porções selecionadas das RI, uma porção correspondente a energia precoce e outra a energia posterior. O parâmetro “Centre Time”,  $T_s$ , calcula também uma relação entre as energias precoce e posterior, porém através do centro de gravidade da distribuição de energia instantânea. Os parâmetros relacionados ao espaço, como o “Lateral Fraction” LF e o “InterAural CrossCorrelation” IACC, requerem transdutores de recepção com direcionalidades especiais.

Tabela 1: Parâmetros acústicos

Nível	Integração	Seleção	Espaço
G	RT e EDT	$C_{50}$ , $C_{80}$ , $D_{50}$ e $T_s$	LF e IACC

### 2.1 Limite de percepção subjetiva

Uma questão essencial a ser tratada antes de se estudar o grau de exatidão na medição dos parâmetros está em conhecer os limites de percepção a serem distinguidos pelos ouvintes. O limite de percepção é a sensibilidade que temos em diferenciar uma música, ou um som, executado em uma sala com um dos parâmetros acústico alterado. É conveniente, portanto, que sejamos capazes de medir os parâmetros com uma exatidão menor que os limites subjetivos. Quando analisam-se as variações de resultados de um parâmetro, seja por conta de comparações ou pela diferenciação de áreas de um teatro, pode-se verificá-las relativas aos limites subjetivos.

Considera-se também que somos capazes de perceber a qualidade acústica das salas em função da frequência. Os parâmetros acústicos são representados em bandas de oitava, com frequências de centro entre 125 e 4000 Hz. Análises mais finas de frequência, utilizando-se bandas de 1/3 de oitava por exemplo, não são necessárias por não acrescentar mudança subjetiva de julgamento.

### 2.2 Valores únicos para teatros

Na literatura é muito comum encontrar descrições de salas onde são atribuídos valores dos parâmetros medidos. Alguns autores fazem comparações entre as salas buscando identificar valores desejáveis dos parâmetros baseados na opinião dos usuários. Muitas das salas mais famosas são medidas várias vezes, por diferentes equipes e em épocas diferentes. Questões sobre a representatividade e a reprodução dos resultados de medição dos muito parâmetros em uma sala são

frequentemente levantadas. No famoso livro de Beranek [2] sobre salas de concerto e ópera são apresentadas descrições de 76 teatros em todo o mundo. Os valores dos resultados de medições objetivas, declarados no livro, para as salas são médias de resultados obtidos por vários outros autores. Beranek, naturalmente citou trabalhos realizados por equipes consideradas eficientes, e apresenta os resultados com detalhes nos Apêndices. Alguns dos parâmetros, em certas salas, demonstram boa reprodução mesmo com medições realizadas com décadas de diferença. A figura 2, por exemplo, apresenta uma comparação de resultados obtidos por 4 equipes para tempo de reverberação da sala Grosser Musikvereinsaal de Viena para a sala vazia e com público. O valor médio declarado no livro também é apresentado, acrescido com barras de erros representando os limites de percepção apresentados na Tabela 2. Apesar de algumas diferenças entre os resultados, as variações estão essencialmente dentro do limite de percepção.

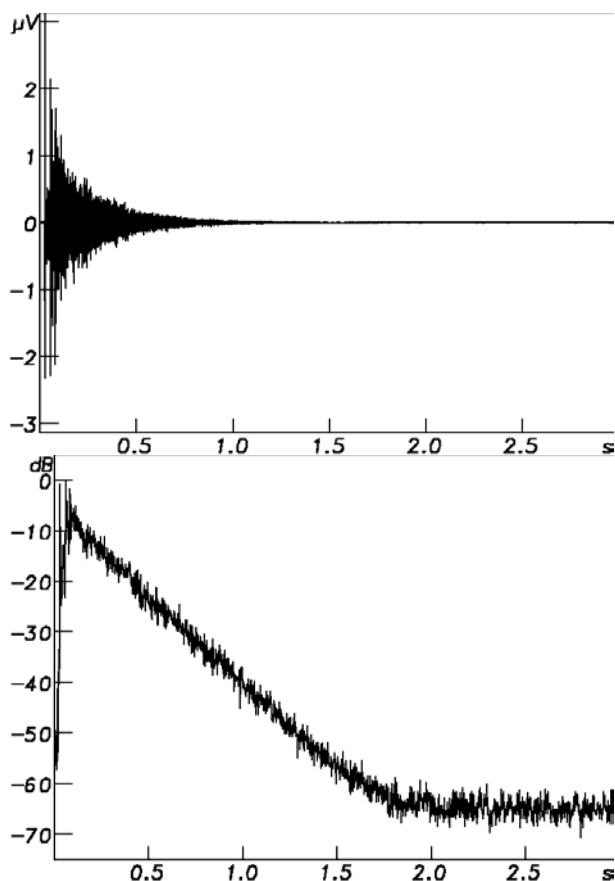


Figura 1: Representações de resposta impulsiva

Tabela 2: Limites subjetivos de percepção.

Parâmetro	Limite subjetivo
RT e EDT	5 %
C80 e G	0,5 dB
TS	10 ms
IACC	0,08

apresentados devido a grande variação dos resultados, conforme ilustrado na Figura 4, para a sala Concertgebouw de Amsterdam medidos por 3 equipes diferentes. A razão da variação é a existência de mais de um método de medir os níveis de pressão sonora e o nível de referência.

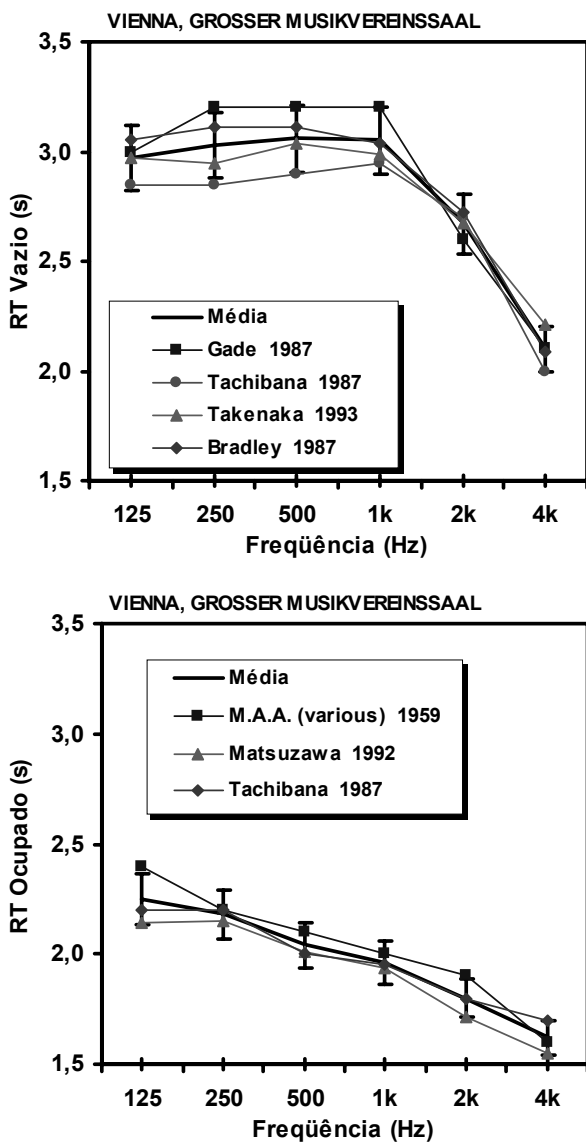


Figura 2: Resultados de tempo de reverberação apresentados em [1].

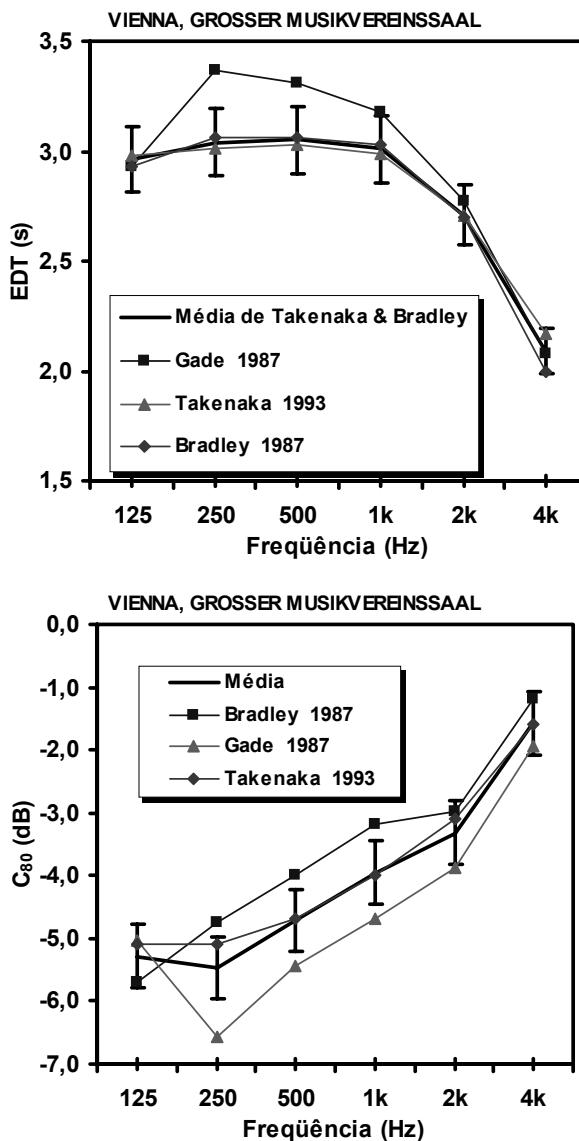


Figura 3: Resultados de C<sub>80</sub> e EDT apresentados por em [1].

Comparações semelhantes na mesma Grosser Musikvereinssaal de Viena para os parâmetros EDT e C<sub>80</sub> não apresentam reproduções tão boas, como ilustra a Figura 3. No caso do parâmetro G nem Beranek ousou expressar valor médio para nenhum dos teatros

### 3.2 Comparação de estimativas de RI

Bradley [5] organizou uma comparação com o propósito de verificar variações nos parâmetros após identificação de RI por técnicas diferentes. Foi utilizado um equipamento elétrico que realizava convoluções em tempo real a partir da programação de respostas impulsivas artificiais (“Reverberator”). Com o tal sistema foi desenvolvido um protocolo em que os 23



participantes deviam configurar e medir três RI diferentes pré-programadas no dispositivo. O sistema retornou algumas vezes ao organizador da comparação possibilitando uma verificação da sua estabilidade após algumas operações de transporte entre os participantes. Os resultados em [5] apresentam variações pequenas, porém o autor discriminou da média e do desvio padrão os piores resultados sem, contudo especificar qual foi o critério adotado para a seleção. Os métodos testados de identificação de RI não foram postos à prova totalmente por que o dispositivo com as respostas artificiais não considerou a adição de ruído, nem eventuais variações ambientais que ocorrem em uma sala real. Dois problemas de definição de cálculo de parâmetros foram identificados como responsáveis por variações maiores que o esperado. Um dos problemas ocorreu em uma das RI artificiais que apresentava componente direto de muito intensidade, fornecendo nesse caso diferenças na estimativa do EDT. O outro problema foi no cálculo de  $C_{50}$  em baixa frequência para uma outra RI artificial que continha uma reflexão forte próxima do limite de seleção.

Seguindo a proposta de Bradley, Katz [4] disponibilizou uma resposta impulsiva real obtida em uma sala de aula com estouro de balão para participantes de uma outra comparação. Os participantes utilizaram a resposta gravada para calcular os parâmetros de qualidade da sala.

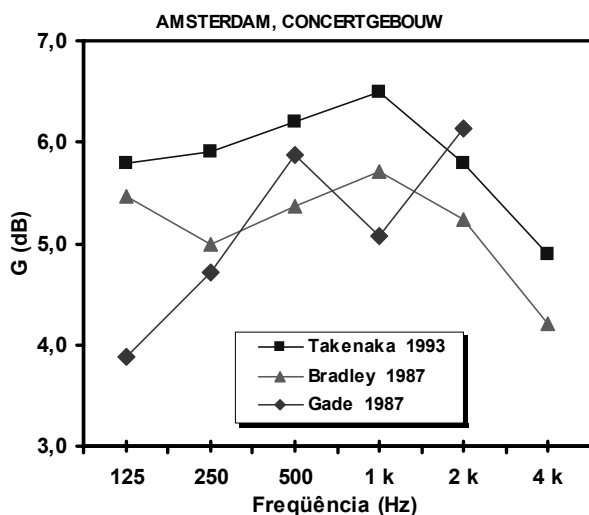


Figura 4: Resultados de G apresentados em [1].

### 3.3 Comparação de fontes sonoras

Witew [7] realizou medições em um auditório de 5500 m<sup>3</sup> de volume com cinco fontes omnidirecionais eletroacústicas diferentes, todos dodecaedros, utilizando seis posições fixas de microfones. As fontes foram colocadas em cima de uma mesa giratória e as RI para

cada microfone foram medidas em passos de 10° de giro. As variações de resultados mais pronunciadas encontradas foram no EDT e no  $C_{80}$  para frequências acima de 1 kHz. A norma ISO 3382 especifica critérios de direcionalidade para as fontes, tolerando desvios no nível de pressão sonora em campo livre, em ângulos de 30°, de 1 dB para as bandas de oitava de 125 a 500 Hz, de 3 dB para 1 kHz, de 5 dB para 2 kHz e de 6 dB para 4 kHz. Esses limites da norma podem ser respeitados por fontes de concepção muito diferente, conforme demonstrou Leishman [6] ao construir fontes em forma de tetraedro, hexaedro, octaedro, dodecaedros e icosaedro.

### 3.4 Comparação em um estúdio

Com o propósito de gerar resultados de referência para avaliação de desempenho na modelagem numérica de salas, quatro equipes de competência comprovada realizaram medições em um estúdio de 400 m<sup>3</sup> de volume [3]. O estúdio tinha uma parede lateral lisa e inclinada, duas paredes com cortinas e uma com difusores de madeira. No total os parâmetros acústicos foram medidos por três programas de computador e três fontes sonoras das quatro equipes, porém utilizando mesmas três posições para a fonte e 2 posições para o microfone. Apesar de não ser uma comparação em um teatro e o número de participantes ser reduzido e selecionado, os resultados de [3] produzem uma interessante base de dados para o propósito desse trabalho.

### 3.5 Resultados das comparações

Avaliar as dispersões dos resultados encontradas pelos participantes das comparações é mais importante, para o objetivo desse trabalho, do que confrontar os valores obtidos dos parâmetros. As variações são aqui expressas pelos desvios padrão dos resultados e são diretamente comparadas com os limites de percepção apresentados na Tabela 2. Como exemplo a Figura 5 apresenta os resultados para o parâmetro EDT da comparação de [3]. No gráfico em cima são apresentados os valores de cada participante, as médias de cada banda de oitava e os desvios padrão somados e subtraídos das médias. Para os parâmetros EDT e TR foram calculadas as variações percentuais relativas às médias, equação (1), utilizando os resultados do desvio padrão, equação (2):

$$EDT[\%] = 100 \times \frac{s(EDT)}{EDT} \quad (1)$$

$$s(EDT) = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (EDT_k - \overline{EDT})^2}{n-1}} \quad (2)$$

onde  $\overline{EDT}$  é o tempo de reverberação médio da comparação e  $s(EDT)$  é o desvio padrão da amostra  $k$  diante das  $n$  outras que compõem a média. No gráfico em baixo da Figura 5 são apresentados os desvios padrão calculados pelas equações (1) e (2). O desvio padrão percentual da Figura pode ser comparado com o limiar subjetivo de 5 %. Na banda de 125 Hz o desvio atinge 7,5 %, significando que participantes obtiveram resultados acima ou abaixo da média por esse percentual. Dois participantes com resultados próximos aos limites opostos do desvio em relação à média distam 15% entre eles.

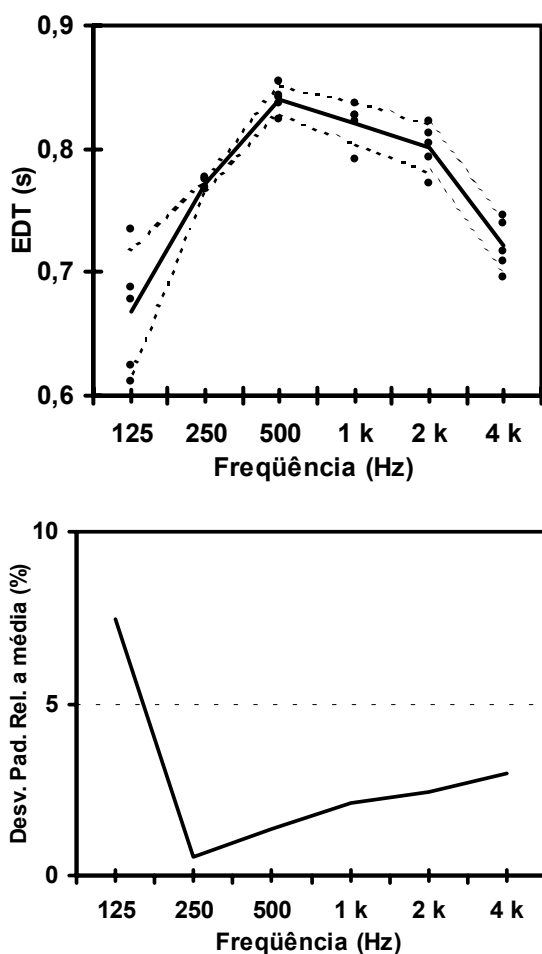


Figura 5: Resultados de Bork [3] para EDT, à esquerda: valores de cada participante (círculos pretos), a média (linha cheia) e o limites de desvio padrão (linha pontilhada).

Os resultados das comparações são mostrados juntos na Figura 6. A expectativa natural para as variações de parâmetros de cada comparação poderia ser de encontrar variações crescentes, sendo as menores para as entradas de Katz [4], depois as de Bradley [5] e finalmente as de Bork [3]. O número de fontes de variações aumenta nas comparações dos três autores,

entretanto o número de participantes obedeceu a uma ordem inversa. No caso das variações de RT tanto para Bork quanto para Bradley os valores encontrados foram menores que o limiar subjetivo. Porém as variações encontradas por Katz para a banda de 125 Hz são alarmantes, atingindo variações de 17,2% ou seja, mais que 3 vezes o limite subjetivo. Isso equivale a dizer que a mesma RI pode ser considerada por um sistema de análise três vezes mais reverberante do que por outro. Para EDT a variação encontrada por Katz foi maior que o limite subjetivo, 24,3% comparado aos 5 %, em quase todas as bandas de oitava, com discrepância ainda maior que o RT. Para agravar a situação, o EDT é considerado o parâmetro melhor relacionado à percepção humana de reverberação. A comparação no estúdio apresentou variância maior que o limite na banda de 125 Hz, provavelmente por causa dos altos desvios espaciais encontrados pelos participantes, em torno de 20%, nas posições de fonte e microfones utilizadas.

Nos parâmetros determinados por seleção das RI,  $C_{80}$  e  $T_S$  na Figura 6, a tendência dos resultados de Bradley e Bork é de diminuição do desvio conforme a frequência das bandas. No caso de Bork ocorreu um aumento das variações nas frequências mais altas, que pode ser relacionada pela utilização de fontes sonoras diferentes conforme as conclusões encontradas em [7]. Variações maiores que os limites subjetivos foram mais uma vez apresentadas pela comparação de [4], para  $C_{80}$  em todas as bandas de frequência e para  $T_S$  nas bandas de 125 e 250 Hz. Finalmente, as variações apresentadas para o parâmetro espacial IACC da Figura 6 também permaneceram abaixo do limite subjetivo, porém com comportamentos diferentes nas comparações de Bradley e Bork. No último caso 4 dos participantes utilizou o mesmo torso artificial e o restante um de outro fabricante, portanto o provável responsável pelas variações mais intensas tenha sido a direcionalidade da fonte e a distribuição desigual de absorção sonora das superfícies do estúdio.

#### 4. Análises de algoritmos

Para ilustrar algumas fontes de variações dos resultados causadas pelos algoritmos de cálculo serão feitas algumas comparações utilizando-se o programa de medição e análise "Monkey Forest", utilizado no laboratório de ensaios acústicos do Inmetro, LAENA. A RI disponibilizada por Katz [4] foi primeiramente utilizada para um teste do desempenho do programa. Na Tabela 3 estão apresentados, por bandas de oitava, as relações S/N e os desvios entre os valores calculados pelo LAENA e as médias dos resultados da comparação. Os desvios apresentados na Tabela em itálico são aqueles que ultrapassaram o limite subjetivo. No caso do  $C_{80}$  nas bandas de 125 e 250 Hz são apresentados desvios adotando-se duas metodologias diferentes de seleção e filtragem.

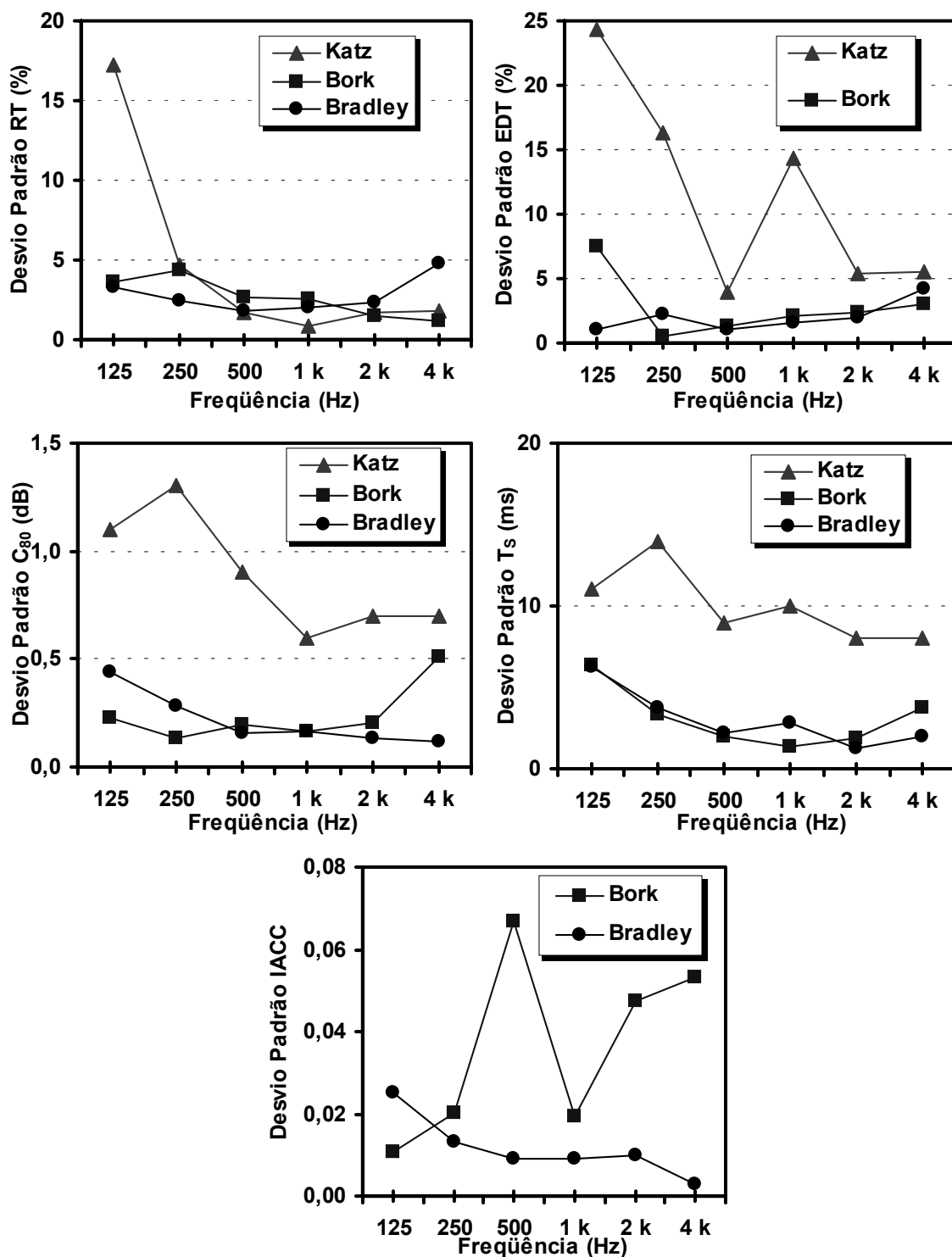


Figura 6: Desvios padrão dos resultados das comparações.

Tabela 3: Resultados da análise da RI de referência [4].

Frequência	125	250	500	1 k	2 k	4 k
S/N (dB)	44	49	63	63	66	56
EDT (%)	0,95	0,42	0,84	0,52	0,57	0,46
T <sub>20</sub> (%)	11,10	2,00	0,69	2,24	1,61	1,96
T <sub>30</sub> (%)	3,21	5,08	2,00	0,04	0,86	3,51
C <sub>50</sub> (dB)	0,51	0,07	0,12	0,23	0,17	0,11
C <sub>80</sub> (dB)	0,49 1,69*	0,24 1,26*	0,01	0,24	0,08	0,03
T <sub>s</sub> (ms)	2,20	0,80	1,00	2,60	1,20	1,40

\* Cálculo com filtragem antes da seleção

Em seguida são feitas análises dos algoritmos divididas em duas categorias de cálculo. A primeira categoria inclui a integração reversa de RI para os cálculos de RT e EDT. Na outra categoria são consideradas formas de distinção dos componentes precoces e posteriores e filtragem.

#### 4.1. Integração de RI

As enormes variações de RT e EDT encontradas na comparação [4], principalmente na banda de 125 Hz, são explicadas em parte pela baixa relação S/N (ver Tabela 3). Com o objetivo de verificar o grau de influência da integração reversa da RI foi selecionado uma resposta de um teatro medida pelo LAENA. O programa de análise “Monkey Forest” foi utilizado para calcular os parâmetros T<sub>20</sub>, T<sub>30</sub> e EDT da RI, operando em 4 diferentes configurações, descritas na Tabela 4. O limiar de detecção do início da RI determina o tempo zero da integração. A norma ISO 3382 determina que o início seja estabelecido em um tempo anterior ao correspondente ao pico, componente direto, no qual o nível seja pelo menos 20 dB menor. Com a escolha de um limiar menor, -30 dB, por exemplo, o período da RI será maior. Os sistemas de análise podem ter métodos para a detecção de fim da RI, automaticamente determinando o ponto de encontro da cauda reverberante com o ruído de fundo. Nos casos onde a relação S/N é pobre, é possível estender a faixa de decaimento subtraindo-se da RI uma estimativa do nível de ruído de fundo. No caso específico o ruído de fundo foi estimado de uma porção do fim da resposta impulsiva completa.

Tabela 4: Configurações selecionadas no “Monkey Forest”.

Configuração	Limiar de detecção do início da RI	Detecção de fim da RI	Subtração do ruído de fundo
1	-20 dB	Sim	Sim
2	-30 dB	Sim	Sim
3	-20 dB	Não	Não
4	-20 dB	Sim	Sim

A Figura 7 apresenta o desvio padrão percentual de T<sub>20</sub> dos resultados obtidos com cada uma das 4 configurações. Na banda de 125 Hz o desvio foi o mais

alto e mais próximo do limite subjetivo. Os desvios de EDT e T<sub>30</sub> tiveram comportamento semelhante com a frequência, entretanto no caso do EDT foram menores, 0,2 % no máximo, e para T<sub>30</sub> foram muito mais altos, 89% no máximo. As diferenças são explicadas pelas faixas de decaimento utilizadas para cada o cálculo de cada parâmetro: 10 dB para o EDT, 25 dB para o T<sub>20</sub> e 35 dB para o T<sub>30</sub>. As diferenças entre bandas de frequência são mais provavelmente causadas pela relação S/N das RI após as filtragens. Ao se analisar os desvios padrão percentuais em função da relação S/N, como na Figura 8, é possível estabelecer uma tendência de variação dos parâmetros com o ruído e a faixa de decaimento. Com essa análise pode-se sugerir relações S/N mínimas para garantir desvios menores que o limite subjetivo para diferentes formas de processamento da RI. Desvios menores que o 5% de limite ocorrem, portanto para relações S/N maiores que 45 dB para o T<sub>20</sub> e 55 dB para o T<sub>30</sub>. Os valores de RT relativos à comparação de Katz [4] apresentados no item 3.5 foram de T<sub>20</sub> cuja RI filtrada apresentou uma relação S/N de 45 dB (Tabela 3).

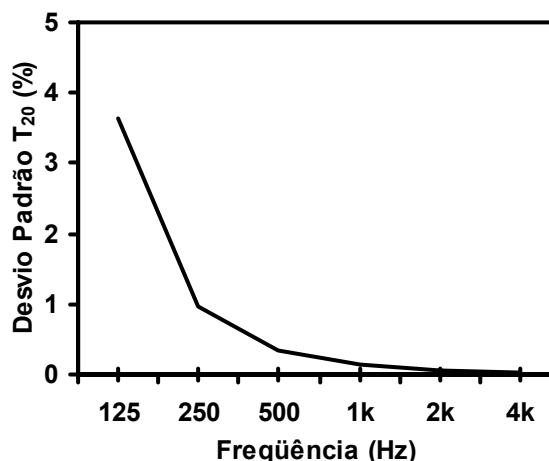


Figura 7: Desvio padrão de RT dos resultados obtidos com 4 configurações da Tabela 4.

#### 4.2 Seleção de componentes de RI

Para análise dos procedimentos de seleção de componentes precoce e posterior da RI foram considerados dois parâmetros o C<sub>80</sub> e o T<sub>s</sub>. O parâmetro C<sub>80</sub> requer uma seleção de dois trechos da RI, um entre o zero da resposta até 80 ms depois e o outro de 80 ms até o final da resposta. Os desvios no seu cálculo ocorrem quando existem reflexões fortes na vizinhança dos 80 ms que limita os dois trechos. A diferenciação dos trechos se torna mais difícil quando a RI é filtrada, principalmente pelos filtros de frequências menores 125 e 250 Hz. Isso por que os filtros modificam os impulsos, atrasando-os e alargando-os. A norma ISO 3382 apresenta dois métodos de seleção dos trechos nesses

casos. No método preferido, a RI é primeiro cortada em duas, uma para cada trecho, e depois filtrada. Alternativamente, a RI pode ser filtrada antes e depois feita a seleção dos trechos compensando os atrasos inerentes dos filtros. O parâmetro  $T_S$  não é sujeito a erros na seleção de trechos, porém é necessário estabelecer o início e o fim da RI.

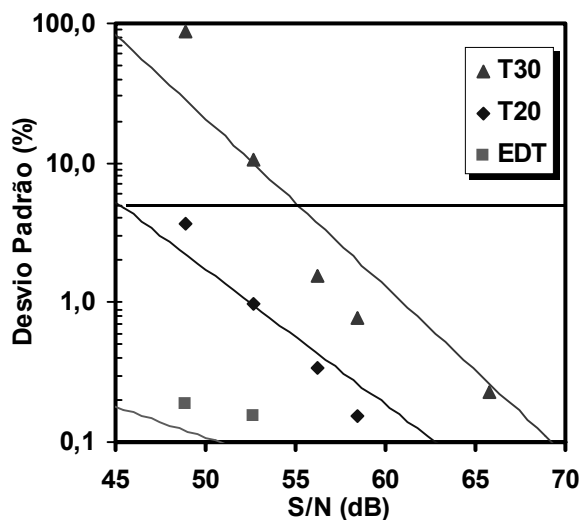


Figura 8: Desvio padrão de RT dos resultados obtidos com 4 configurações da Tabela 4 em função de S/N com as curvas de ajuste exponenciais.

A Figura 9 apresenta os valores calculados no LAENA em comparação aos resultados apresentados por Katz. Os círculos são referentes ao cálculo na seqüência seleção e depois filtragem e as cruzes são referentes ao cálculo na seqüência filtragem da RI e seleção. Os valores no segundo caso são sistematicamente mais baixos que a média, com diferenças maiores que o limite subjetivo (ver também a Tabela 3). Para verificar a diferença dos dois procedimentos foi criado um sinal simulando uma RI contendo três pulsos idênticos, porém defasados: o primeiro com pico em 30 ms, o segundo em 100 ms e o terceiro em 120 ms. Dessa forma, considerando o pulso de 30 ms como o componente direto, têm-se 2 pulsos dentro dos 80 ms e 1 pulso após. O segundo e o terceiro pulsos estão 10 ms distantes do limite de 80 ms. O valor teórico para  $C_{80}$  do sinal simulado é de 3 dB para todas as bandas de frequência, ou seja 10 vezes o logaritmo na base 10 de 2 (aplicando a definição do parâmetro da ISO 3382). A Figura 10 ilustra o sinal antes e depois da filtragem na banda de 125 Hz. Os pulsos são alargados e defasados pela filtragem, sendo que o segundo e terceiro pulsos tendem a se misturar na região próxima de 80 ms. Utilizando-se o primeiro procedimento de cálculo, seleção e filtragem, foram obtidos para todas as bandas o valor esperado de 3 dB. Com o segundo procedimento, filtragem e seleção (sem compensação de

atraso), foram obtidos valores mais baixos somente para as bandas de 125 e 250 Hz:  $C_{80}(125 \text{ Hz}) = -1,0 \text{ dB}$  e  $C_{80}(250 \text{ Hz}) = 2,3 \text{ dB}$ . A compensação do atraso do filtro nesse caso não se mostrou suficiente para se obter o valor teórico do parâmetro por causa da fusão entre os pulsos próximos do limite, resultando em:  $C_{80}(125 \text{ Hz}) = 2,0 \text{ dB}$  e  $C_{80}(250 \text{ Hz}) = 2,8 \text{ dB}$ .

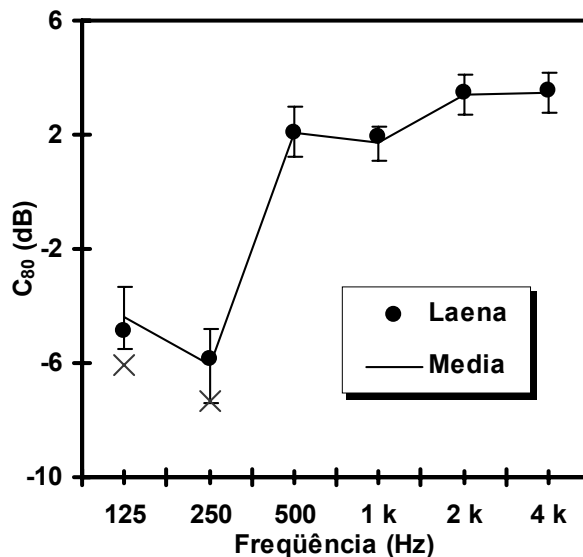


Figura 9: Valores médios de  $C_{80}$  e os desvios padrão (barras de erros) da comparação de KATZ juntos dos valores calculados no LAENA.

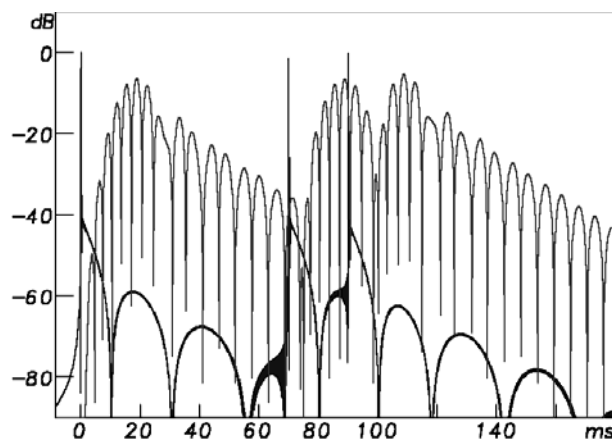


Figura 10: RI simulada com 3 pulsos: o sinal sem filtro tem picos marcantes e após filtro de 125 Hz é suavizado e deslocado no tempo. O eixo do tempo foi alterado para o tempo zero da RI.

O limiar de detecção do início da RI também é um fator causador de variações nos resultados de cálculo dos parâmetros. Outra vez utilizando-se uma RI de um teatro medido pelo LAENA, foram realizados os cálculos para dois limiares de detecção, um considerando o início da RI em um nível 30 dB abaixo do pico e o outro com 20 dB. A Figura 11 apresenta,

para os parâmetros  $T_S$  e  $C_{80}$ , as diferenças de resultados por banda de oitava. Naturalmente o valor de  $T_S$  aumenta para o limiar  $-30$  dB, que considera um início antecipado da RI, sendo esse aumento mais acentuado nas bandas de menor frequência. Entretanto, no caso analisado, a diferença foi menor que o limite subjetivo de 10 ms. Os valores de  $C_{80}$  também foram mais discrepantes nas bandas de baixa frequência e as diferenças foram menores que o limite subjetivo de 1 dB.

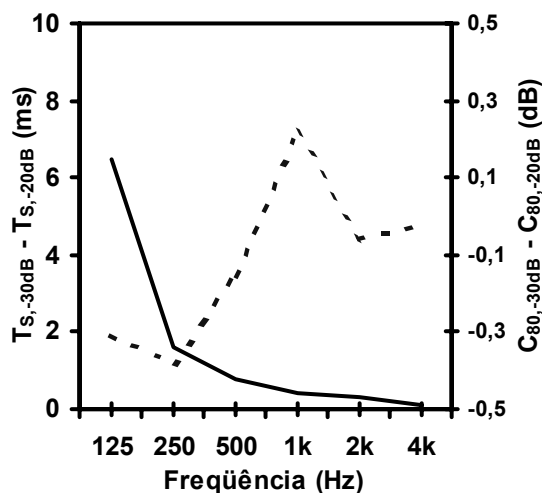


Figura 11: Diferenças entre os resultados dos parâmetros de seleção ( $T_S$  linha contínua e  $C_{80}$  linha tracejada) com limiares de detecção do início da RI de  $-30$  e  $-20$  dB.

### 5. Variação dentro de um teatro

Os exemplos apresentados no item 2.2 e outros contidos no livro de Beranek [2] acenam para a possibilidade de apresentar valores únicos dos parâmetros objetivos de um teatro. Contudo, para realizar as medições é preciso amostrar espacialmente o teatro, conforme o número de assentos. Cada parâmetro é o resultado de uma média espacial do teatro para minimizar efeitos locais do campo sonoro. A norma ISO 3382 recomenda números mínimos de posição de microfone nos teatros conforme as suas capacidades de público: 6 posições para 500 assentos, 8 posições para 1000 assentos e 10 posições para 2000 assentos. Uma análise prévia da planta do teatro indica a existência de áreas distintas onde supostamente pode haver variações sonoras. É, portanto conveniente ter um número significativo de posições de medição distribuídos nessas áreas e verificar se ocorrem variações dos parâmetros que possam ser percebidas. Alguns parâmetros, como o G e o EDT, apresentam variações em função das distâncias entre a fonte e o microfone.

Nesse item serão apresentados alguns resultados medidos na Sala Cecília Meireles no Rio de Janeiro,

uma sala de concerto de  $5.750 \text{ m}^3$  de volume e capacidade para até 832 espectadores. Trata-se de uma sala essencialmente retangular com 16,5 m de largura, 32,6 m de comprimento e 11 m de altura. Maiores detalhes sobre a sala são apresentados em [8]. São notáveis duas áreas de ocupação do público, uma platéia e um balcão elevado. Foram utilizadas três posições para a fonte (conjunto dodecaedro e “subwoofer”) e 11 posições de microfones, sendo seis na platéia e 5 no balcão. Para cada parâmetro foram calculados valores médios do teatro em bandas de oitava. Os desvios padrão espaciais dos parâmetros EDT, RT e  $C_{80}$  estão apresentados na Figura 12. Exceto para o RT nas bandas acima de 500 Hz, todos os valores são comparáveis ou superiores aos limites subjetivos, podendo sugerir que talvez ocorra uma distribuição heterogênea do campo sonoro no teatro. Os valores médios dos desvios padrão espaciais de todos os participantes da comparação de Bork [3] foram adicionados nas curvas da Figura 12, em linhas pontilhadas. Apesar das diferenças entre os volumes do estúdio e do teatro e do número de combinações de posições de fonte e de microfone os desvios são comparáveis em ordem de grandeza e na dependência com a frequência.

Comparando-se as médias dos parâmetros entre as duas áreas de público diferenciadas, ou seja, a platéia e o balcão, não se percebem diferenças notáveis do comportamento sonoro. Os desvios padrão espaciais das duas áreas demonstraram comportamentos muito semelhantes aos apresentados na Figura 12. Na Figura 13 são apresentadas as diferenças entre as médias dos parâmetros na platéia e no balcão. Tanto para o EDT quanto para o RT os valores médios na banda de 125 Hz correspondentes ao balcão são inferiores aos da platéia mais de duas vezes o limite subjetivo. O TR do balcão tende a ser inferior ao da platéia em toda a faixa de frequência, porém em uma diferença menor que os 5 % que são considerados perceptíveis (excluindo o valor de 125 Hz). Para os parâmetros EDT e  $C_{80}$  não foram distinguidas diferenças sistemáticas entre as áreas. O comportamento dos parâmetros em função das distâncias entre a fonte e o microfone também não indicou qualquer tendência de distinção de áreas. A Figura 14 apresenta os comportamentos dos valores de EDT e de TR na platéia. Ajustando-se melhores retas aos valores verificou-se a homogeneidade dos valores com a distância, apesar da dispersão ao redor da média, uma tendência esperada para salas retangulares.

### 6. considerações finais

É muito usual encontrar na literatura descrições de teatros através de parâmetros acústicos subjetivos medidos por métodos baseados na norma ISO 3382. Em algumas das referências parece ter sido dada muita importância aos resultados medidos, fazendo considerações à qualidade sonora dos teatros avaliados,

sem avaliar a possível variabilidade do método. Comparações entre as salas avaliadas com teatros de maior fama, porém avaliados por outros autores, também são comuns. Um especialista que conhece o método descrito na norma e adquire um sistema comercial de medição, de boa indicação e alto preço, pode se sentir tentado a utilizar resultados medidos em teatros sem questionar ou ao menos tentar considerar as incertezas de medição. Mesmo a norma ISO 3382 tendo uma existência de quase dez anos, da primeira edição que inclui os parâmetros subjetivos diferentes do tempo de reverberação, não houve uma indicação da incerteza do método nem de quais valores dos parâmetros podem ser recomendados.

As comparações são ferramentas que podem ser utilizadas para determinar as variações de resultados. Também podem ser oferecidas aos especialistas que têm a intenção de avaliar a proficiência do seu sistema de medição. Alguns dos resultados das comparações apresentadas nesse trabalho apresentaram dispersões alarmantemente altas. Os resultados de menor dispersão das comparações descritas foram obtidos com alguma forma de seleção das entradas mais favoráveis, ou de participantes de melhor reputação.

Convém aos especialistas que realizam medições em teatros manter registrados as características de uma medição com detalhes suficientes para que ela possa ser repetida pelo mesmo especialista em outra ocasião, ou por outra equipe. O espalhamento dos resultados conforme a distribuição espacial indica de alguma forma a incerteza do resultado final, ou seja, a média do teatro. Outras fontes de variações podem ser relacionadas às relações sinal / ruído das respostas impulsivas obtidas no ensaio, incluindo todas as bandas de frequência.

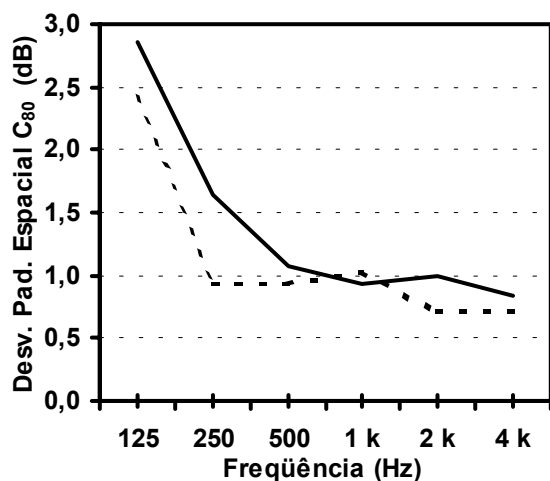
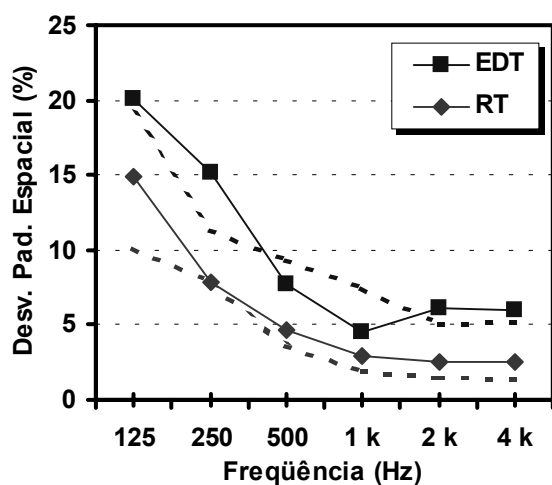


Figura 12: Desvios padrão espaciais dos parâmetros no teatro, linhas cheias, e do estúdio em BORK, linhas pontilhadas.

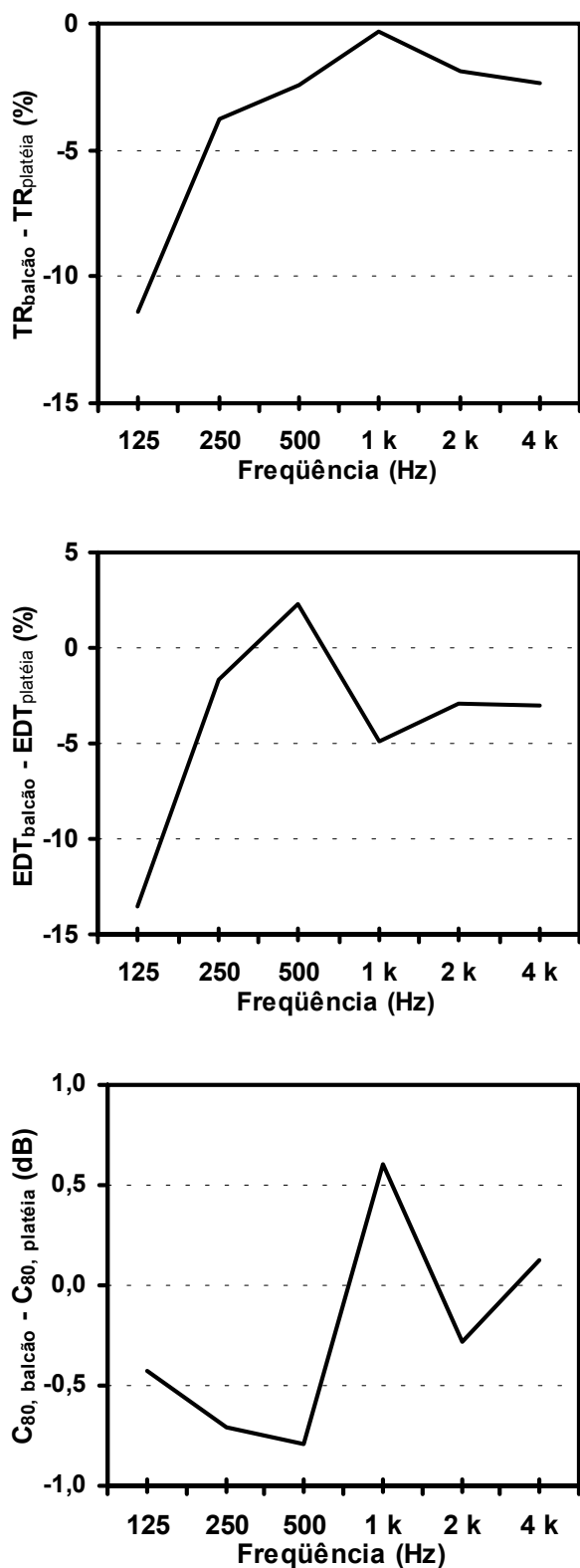


Figura 13: Diferenças entre as médias obtidas no balcão e na platéia.

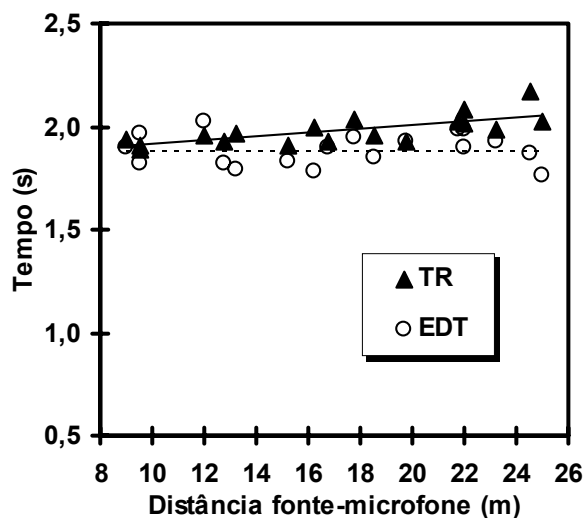


Figura 14: Variação dos parâmetros em função da distância entre fonte e microfone na platéia.

#### Referências

- [1] ISO 3382:1997: *Acoustics – Measurement of the reverberation time of room with reference to other acoustical parameters.*
- [2] L. Beranek: *Concert and Opera Halls How they Sound.* Woodbury: ASA, 1996.
- [3] Bork, I.: Report on the 3<sup>rd</sup> Round Robin on Room Acoustical Computer Simulation – Part I: Measurements, *Acta Acustica united with Acustica.*, **91**, p. 740-752, 2005.
- [4] Katz, B.: International Round Robin on Room Acoustical Impulse Response Analysis Software 2004, *Acoustics Research Letters Online* **5**(4), p. 158-164, 2004.
- [5] Bradley, J.S.: *An International Comparison of Room Acoustic Measurement Systems*, Institute for Research in Construction Internal Report **714**, 1996
- [6] Leishman, T.W., Rollins, S., Smith, M.: An Experimental Evaluation of Regular Polyhedron Loudspeakers an Omnidirectional Sources of Sound, *J. Acoust. Soc. Am.*, **120**(3), p. 1411-1422, 2006.
- [7] Witew, I. B., Behler, G. K.: Low-Mid Frequency Measurement of Single Number Parameters in Room Acoustics with Multi-Way Dodecahedron Speakers. *In Internoise 2005*, Rio de Janeiro, Brasil, 2005.
- [8] Marques, C.: *40 Anos de Música: Sala Cecília Meireles*, Rio de Janeiro, Associação dos Amigos da Sala Cecília Meireles, 2006.



## Entrevista

A revista Acústica & Vibrações, editada pela SOBRAC vem sendo publicada regularmente duas vezes por ano. Durante a assembléia geral da posse da atual diretoria pelo menos um associado apresentou proposta para o estilo que a revista deveria possuir. A revista da SOBRAC deve ser um periódico exclusivamente técnico/científico? É importante que essa revista seja indexada junto aos organismos pertinentes? Os artigos a serem publicados devem ser avaliados por um conselho editorial? Na última assembléia geral, realizada no Teatro Tucarena em novembro de 2006, novamente esse assunto foi ligeiramente discutido. Mas pelo menos uma decisão foi tomada: o assunto seria discutido de forma ampliada no Fórum de debates do novo site da SOBRAC. O Site já está no ar e, para iniciar esse veículo de discussão pela internet de assuntos do interesse de associados, estamos abrindo as discussões com duas entrevistas de associados ilustres que representam a área acadêmica e o setor de consultores e empresas privadas.

Foram cinco perguntas apresentadas ao Professor Moyses Zindeluk e ao Engenheiro Fernando Aidar, dois associados de primeira hora bastante conhecidos dos associados da SOBRAC. O próximo passo é iniciar o Fórum no Site e isso estará em funcionamento ainda no mês de abril.

### **REVISTA A&V - Você acha importante a SOBRAC ter revista impressa?**

#### **MOYSÉS**

Muito importante, especialmente porque não há outro veículo similar para esta especialidade no País e a SOBRAC é "A" SOBRAC.

#### **AIDAR**

Sim. Na minha opinião o ideal será o de possuir 2 Revistas, com diferentes periodicidades em função dos conteúdos. Duas REVISTAS com sobre nomes: *SOBRAC – Ciências* e *SOBRAC – Profissional*.

### **REVISTA A&V - Caso afirmativo, e considerando a realidade da Sociedade Brasileira de Acústica, com qual a regularidade você acha que a revista da SOBRAC deveria ser editada e distribuída? Semestral, anual ou outra?**

#### **MOYSÉS**

O problema é essa tal "realidade". Na verdade, a realidade pode mudar e a revista pode ser um dos ovos (que certamente vêm antes das novas galinhas, as mutantes). A revista poderia ser semestral ou quadrimestral ou até trimestral, mas esses espaçamentos menores só seriam viáveis quando fosse disponível o material para desafogar em mais edições. Ou seja, se o Volume é identificado pelo ano, e o Número pela edição dentro do ano, você pode ter de 2 a 4 números em um dado ano, sem necessidade de cumprir a mesma frequência todos os anos.

#### **AIDAR**

*SOBRAC - Ciências*: Cada 18 ou 24 meses, indexada.  
*SOBRAC - Profissional*: Cada 6 ou 12 meses.

### **REVISTA A&V - Qual o conteúdo esperado para a publicação da SOBRAC? Artigos técnico-científicos, aplicações práticas, divulgação de equipamentos comerciais, resumos de teses acadêmicas, outros.**

#### **MOYSÉS**

Uma diferença entre a SOBRAC e a ABCM (por exemplo) está marcada desde o início. A SOBRAC pretendia ser uma associação integradora entre os diversos agentes envolvidos com a Acústica no País e também a interlocutora com outras sociedades no exterior. Para essa integração, necessariamente ela tem que valorizar as produções não acadêmicas. O interesse prático das aplicações da Acústica é crescente e uma boa parte dos associados (mesmo que inadimplentes!) não é docente nem pesquisador. Se deixar os fabricantes de materiais e os consultores de fora da publicação, ela pode ficar mais acadêmica, mas é menos representativa "daquela" SOBRAC.

#### **AIDAR**

*SOBRAC - Ciências*: resumos de teses, papers de Congressos, técnicas de medições laboratoriais ou de campo, novas propostas de normalizações e os porquês, informações sobre pesquisas nacionais e internacionais.

*SOBRAC - Profissional*:

Tecnologia dos materiais: Novos materiais industrializados e respectivos desempenhos. Divulgação

de desempenho de materiais convencionais da construção e respectivos sistemas construtivos;  
**Tecnologia dos Projetos:** Resumos de estudos e resultados de Projetos Convencionais de controle do ruído e de vibrações que mereçam o reconhecimento da Revista. (Residencial, Comercial, Industrial, Institucional, Rodoviários, Ferroviários, Metroviários, Navais, Aeroviários, Fluviais e Portuários).  
**Tecnologia das aplicações:** Novas abordagens de utilizações de materiais e de sistemas construtivos nas soluções de problemas para o controle do ruído e das vibrações.

**Artigos Técnicos:** Artigos tutoriais, história de casos especiais, utilização de software vantagens e limitações, entrevistas.

**Matéria Paga:** novos produtos (lançamentos), aparelhos de medições, produtos ou sistemas construtivos industrializados para o controle do ruído e de vibrações. anúncios publicitários;

**Divulgação:** Pós graduações, seminários, feiras e livros.

**REVISTA A&V - Acha importante que os artigos a serem publicados sejam avaliados e aprovados por um conselho editorial?**

**MOYSÉS**

Sim, mesmo trabalhos de caráter "prático" deveriam ser avaliados, corrigidos, etc. A "humildade" do autor é fundamental para que ele possa se orgulhar de seu trabalho e do veículo que o publicou.

**AIDAR**

Sim. Além disso as Revistas SOBRAC só deverão aceitar divulgação publicitária de desempenho de produtos ou sistemas com a apresentação de Laudos emitidos por Laboratórios credenciados pelo INMETRO

**REVISTA A&V - Você considera que a indexação da Revista da SOBRAC nos bancos de dados regulares é importante para o sucesso da revista?**

**MOYSÉS**

Para a indexação, acho que o pedaço comercial e grande parte do "prático" deveriam estar em brochura separada, e seria necessário assegurar um fluxo mínimo de papers de bom nível para alimentar a revista. O sucesso desse formato também dependeria do tamanho da comunidade "acadêmica" de Acústica.

Dentre as várias batalhas que o pequeno conjunto de profissionais que carrega a SOBRAC pode querer enfrentar para levar a sociedade para cima, levar a revista a esse status pode não ser a batalha mais relevante. Fazê-la ficar muito melhor, com ciência e técnica, é mais fundamental do que indexá-la.

Porém, neste caso, eu posso estar sofrendo de um "bias", porque estou me aposentando da Universidade e, pela primeira vez em 36 anos, estou aliviado da pressão do "publish or perish". Para os jovens, pode ser muito importante ter veículos não tão exigentes quanto JASA, JSV, etc, para escoar sua produção e fazer currículo. A revista da ABCM tem cumprido esse papel, para os mais "mecânicos", sem desmerecer da sua qualidade, mas a comunidade da ABCM é bem maior, com dezenas de candidatos às tarefas e à liderança, e uma produção anual de centenas de papers.

**AIDAR**

Pelo o que tenho experiência uma tese, ou algo inédito a ser divulgado, que mereça a atenção internacional, o autor prefere editar em primeira mão, se o aceitarem, na mídia de maior penetração nos meios científicos, e ou profissionais. Essa prerrogativa do autor ninguém poderá contestar.

De qualquer modo um começo é sempre um começo. A indexação, ainda que modesta, é um fato relevante para o sucesso da Revista e do prestígio do Brasil na área da Ciência Acústica.

**Moysés Zindeluk**

Possui graduação em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal do Paraná, mestrado em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro e doutorado em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro. PROFESSOR TITULAR da Universidade Federal do Rio de Janeiro, em vias de se aposentar, atua também como consultor. Tem experiência na área de Engenharia Mecânica, com ênfase em Acústica e Vibrações, atuando principalmente nos seguintes temas: Propagação de Ondas, Controle de Ruído e Vibração, Monitoração e Diagnóstico de Máquinas.



**Fernando Henrique Aidar**

Possui graduação em Engenharia Civil, pela Universidade de São Paulo (Escola Politécnica, 1953). Por 41 anos (56/97) prestou serviços de Desenvolvimento de Produtos e de Pesquisa para indústria de materiais acústicos e isolantes térmicos (Eucatex SA). Atualmente, através da F. H. Aidar Engenharia Ltda., presta assessoria, consultoria, desenvolve projetos e executa medições acústicas de campo na área da Engenharia de Controle do Ruído e Vibrações.



*Ilustrações feitas por Rui Miranda para o II SIBRAMA 2002*

## Congressos

### **Emerging Technologies in Non-Destructive Testing & Technology**

2-4 de abril, Stuttgart, Alemanha

[www.sfa.asso.fr/secretariat/etech-flyerStuttgart.pdf](http://www.sfa.asso.fr/secretariat/etech-flyerStuttgart.pdf)

### **Fourth International Conference on Bio-Acoustics**

10-12 de abril, Loughborough, Inglaterra

[linda.canty@ioa.org.uk](mailto:linda.canty@ioa.org.uk)

[www.ioa.org.uk](http://www.ioa.org.uk)

### **32nd International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing - ICASSP**

15-20 de abril, Hawaii - EUA

[icassp2007.org/CallForPapers.asp](http://icassp2007.org/CallForPapers.asp)

### **II Congresso Brasileiro de Comunicação Alternativa**

15-19 de maio, Campinas, Brasil

[isaacbrasil2007@gmail.com](mailto:isaacbrasil2007@gmail.com)

[www.fee.unicamp.br/isaacBrasil2007](http://www.fee.unicamp.br/isaacBrasil2007)

### **11th International Conference on Hand-Arm Vibration**

3-7 de junho, Bologna, Itália

[segreteria.aia@imamoter.cnr.it](mailto:segreteria.aia@imamoter.cnr.it)

[www.associazioneitalianadiacustica.it](http://www.associazioneitalianadiacustica.it)

### **European Forum on Effective Solutions for Managing Occupational Noise**

3-5 de julho, Lille, França

[www.noiseatwork.eu](http://www.noiseatwork.eu)

### **8th International Conference on Theoretical and Computational Acoustics**

2-6 de julho, Heraklion, Grécia

[taroud@iacm.forth.gr](mailto:taroud@iacm.forth.gr)

[www.iacm.forth.gr/~ictca07](http://www.iacm.forth.gr/~ictca07)

### **Fourteenth International Congress on Sound and Vibration - ICSV14**

9-12 de julho, Cairns, Australia

[www.icsv14.com](http://www.icsv14.com)

### **IX Simpósio Brasileiro de Acústica Veicular - SIBRAV 2007**

16 e 17 de agosto, São Paulo, Brasil

[www.pontocomm.com.br/cea/cea/cont/sibrav/emktsibrav2009.htm](http://www.pontocomm.com.br/cea/cea/cont/sibrav/emktsibrav2009.htm)

### **V Congresso Brasileiro de Fonoaudiologia Neonatal**

24-25 de agosto, Porto Alegre, Brasil

[cepef@cepef.com.br](mailto:cepef@cepef.com.br)

[www.cepef.com.br](http://www.cepef.com.br)

### **Congrès Français de Mécanique**

27 - 31 de agosto, Grenoble, França

[christophe.bailly@ec-lyon.fr](mailto:christophe.bailly@ec-lyon.fr)

[www.sfa.asso.fr/secretariat/SFA\\_CFM-1.htm](http://www.sfa.asso.fr/secretariat/SFA_CFM-1.htm)

### **INTER-NOISE 2007**

28-31 de agosto, Istanbul, Turquia

[contact@internoise2007.org.tr](mailto:contact@internoise2007.org.tr)

[www.internoise2007.org](http://www.internoise2007.org)

### **ICA - 19th International Congress on Acoustics**

2-7 de setembro, Madrid, Espanha

[www.ica2007madrid.org](http://www.ica2007madrid.org)

### **ISMA2007 - International Symposium on Musical Acoustics**

9-12 de setembro, Barcelona, Espanha

[www.ica2007madrid.org](http://www.ica2007madrid.org)

**ISRA 2007 - International Symposium on Room Acoustics**

9-12 de setembro, Sevilla, Espanha

isra2007sevilla@viajeseci.es

www.isra2007.org

**FAN NOISE 2007 - bruit des ventilateurs**

17-19 de setembro, Lyon, França

info@fannoise2007.org

www.fannoise2007.org

**International Conference on Detection and Classification of Underwater Targets**

18-19 de setembro, Edinburgh, Inglaterra

linda.canty@ioa.org.uk

www.ioa.org.uk

**3rd Southern Europe Workshop on Environmental Acoustics "Application of the Environmental Noise Directive and Noise mapping"**

9-10 de outubro, Marseille, França

pierre-etienne.gautier@sncf.fr

www.sfa.asso.fr/workshop\_Europe/accueil.htm

**Noise-Con 2007**

22-24 de outubro, Nevada, EUA

www.inceusa.org/nc07/index.asp

**IEEE International Ultrasonics Symposium**

28-31 de outubro, New York, EUA

www.ieee-ultrasonics2007.org

**19º Congresso de Engenharia Mecânica - COBEM COBEM**

5-11 de novembro, Brasília - Brasil

www.cobem2007.com.br

**154th Meeting of the Acoustical Society of America**

27 de novembro - 1 de dezembro, New Orleans, EUA

asa.aip.org

## PROPOSTA DE ATA DA ASSEMBLÉIA GERAL ORDINÁRIA DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ACÚSTICA A SER SUBMETIDA À APROVAÇÃO

Em assembléia realizada no Teatro TUCARENA, na Rua Monte Alegre, 1024 na Cidade de São Paulo, durante o I SIBRASE e XXI encontro da Sociedade Brasileira de Acústica, reuniu-se, conforme lista de presença aposta neste livro de atas, a Assembléia Geral da Sociedade Brasileira de Acústica – SOBRAC. A assembléia teve início às 15:30h do dia 22 de novembro de 2006 com a leitura da ata da última assembléia, realizada na cerimônia de posse da atual Diretoria em São Paulo, em fevereiro do mesmo ano. Após a leitura a referida ata foi aprovada por unanimidade. Em seguida Marco Nabuco apresentou o relatório financeiro e o relatório de atividades realizadas pela atual Diretoria no ano de 2006, bem como as propostas de trabalho para o atual mandato. A palavra foi então passada ao Prof. Samir Gerges que reapresentou seu relatório sobre o INTENOISE2005, expôs as atividades realizadas durante sua gestão, informou que as anuidades do I-INCE, ICA e IIAV foram pagas até 2006 e que o Prof. Samir faz parte do Congress Selection Committee - CSC do I-INCE. Ainda na Assenbléia, Prof Samir encaminhou à atual diretoria cópia impressa dos emails enviados pelos conselheiros de sua gestão referentes as contas do ano de 2005. Marco Nabuco comentou sobre a necessidade de se modificar o atual estatuto da SOBRAC, visto que dentro das propostas da nova diretoria está o programa de certificação de pessoas. O Prof. Jorge (Mato Grosso) comentou que a SOBRAC deveria credenciar profissionais da área. A Prof. Dinara comentou que é preciso criar também um regimento interno para contemplar as questões operacionais que fogem ao estatuto e que o estatuto da SOBRAC tem que ser modificado de qualquer forma, pois precisa se adequar ao novo código civil. A Prof. Elvira sugeriu que essas mudanças sejam discutidas com os associados. O Prof. Samir questionou o posicionamento da revista: seria uma revista acadêmica ou prática? A Prof. Stelamaris solicitou que fosse revisada a mala direta digital da SOBRAC e que a discussão sobre a reformulação da revista fosse feita através do novo sítio da sociedade na internet. O Dr. Paulo Massarani propôs a criação de um fórum na internet. A proposta de se discutir a reformulação da revista em fórum a ser hospedado no novo sítio da SOBRAC na internet foi aprovada pela Assembléia. O Eng. Honório Lucatto anunciou a organização do SIBRAV 2007 a ser realizado em parceria com a Escola Politécnica da USP na Cidade de São Paulo. A agenda com os novos congressos também será levada á discussão em fórum específico na internet. A Prof. Maria Lúcia Oiticica propôs que se fizesse contato com universidades do Norte e Nordeste do País para que se angariasse mais associados dessas regiões. Foi comentado sobre a realização do ENCAC em 2007 (Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído) a ser realizado em Agosto na cidade de Ouro Preto. Foi comentada a intenção de tirar os congressos do eixo Rio-São Paulo. Prof. Samir comentou sobre a possibilidade da SOBRAC fazer organização de congressos a partir de sua secretaria em Florianópolis. Lembrou ainda que o Brasil é candidato para o congresso do ICSV 2010 e que se faz necessário que alguém da SOBRAC vá à Austrália defender nossa candidatura em Julho de 2007. Quanto ao ICA de 2013 a FIA irá apresentar proposta que deve ser aprovada também em 2007, na cidade de Madri no mês de Setembro. Foi feita a leitura do email com sugestões, enviado pelo Sr. João Baring para a atual diretoria, no qual se destacou a necessidade da definição de temas prioritários de gestão do desenvolvimento da acústica no Brasil e na América Latina. Entre eles o Sr. Baring sugere a questão das normas e legislações e a do ensino e literatura Brasileiros em acústica. A Prof. Maria Lúcia Oiticica citou o estatuto das cidades e a importância dos planos diretores sugerindo que a SOBRAC conclamasse seus associados para divulgar a intenção da Sociedade de interagir com as comissões que elaboram esses planos em âmbito nacional. Sem mais assuntos a tratar foi dada por encerrada a Assembléia Geral da Sociedade Brasileira de Acústica – SOBRAC.

## Concurso de Logo da Sobrac

Durante os últimos encontros da Sobrac vários sócios têm apontado a necessidade de se atualizar o Logo da sociedade. Por enquanto o novo site da Sobrac está com um logo provisório, e diante da oportunidade de realizarmos consultas pela internet a diretoria decidiu realizar um concurso para a escolha do novo logo da sociedade. Abaixo estão as regras do concurso que deverá ser inteiramente realizado pela internet.

### 1. DOS PARTICIPANTES E DA APRESENTAÇÃO

1.1 O concurso é dirigido aos associados das categorias efetivos e estudantes da Sobrac.

1.2 As propostas deverão ser apresentadas individualmente, e cada pessoa poderá concorrer com até 3 (três) trabalhos.

1.3 Os membros da comissão julgadora estão impedidos de participar do concurso

1.4 A logomarca deve ser original, legível, ter clareza e contemporaneidade, ser rapidamente reconhecida e facilmente lembrada;

1.5 Deve ficar clara a identificação da Sociedade Brasileira de Acústica-Sobrac

1.6 Devem ser apresentadas 3 (três) cópias das seguintes versões Tamanho A4 colorido, Tamanho A4 com redução de logo em 1,5 cm x 1,5 com em preto e branco, Tamanho A4 com redução do logo em 1,5 x 1,5 em colorido também deve ser entregue uma cópia digital do trabalho, em disquete, zipdrive ou CD, utilizando as seguintes extensões: GIF, JPEG ou BMP.

1.7 Deve ser entregue também um painel do trabalho no formato 80X60 cm contendo: a logomarca em tamanho livre nas versões preto e branco e colorido, a logomarca em tamanho 1,5 x 1,5 cm nas versões preto e branco e colorido, e a justificativa de cada criação, salientando que a identificação de autoria do projeto deve ser feita apenas por meio de um pseudônimo.

1.8 O trabalho deve ser apresentado com suas especificações técnicas (explicitar fonte, escala de cores e programa utilizado) e justificativa de sua criação (no máximo 20 linhas).

1.9 O trabalho deve levar em conta sua utilização nas mídias impressa e eletrônica, além do uso em papel carta, envelopes, folders, etc.

1.10 A inscrição e entrega do projeto deverão ser feitos por e-mail enviado à Secretaria da Sobrac, no endereço sobrac@acustica.org.br (Tel: 48 326909882), no período de 2 a 10 de junho de 2007. O julgamento das logomarcas candidatas terá início no dia 12 de junho de 2007. A votação em primeiro turno acontecerá no período de 18 a 24 de junho de 2007, enquanto que a votação em segundo turno do dia 02 a 08 de julho de 2007.

1.11 O resultado será anunciado no dia 13 de julho de 2007 no site da Sobrac.

### 2. JULGAMENTO

A comissão julgadora, composta pela atual Diretoria da Sobrac, será coordenada pela Profa. Elvira Viveiros, a qual exercerá ainda o Voto Minerva em caso de empate. As logomarcas concorrentes serão avaliadas inicialmente pela comissão julgadora quanto ao atendimento às condições do edital. Em seguida, as aprovadas nesse quesito serão divulgadas no site da Sobrac onde serão votadas em sufrágio universal pela internet por todos os sócios efetivos. Os três logomarcas vencedoras dessa etapa serão novamente submetidas à votação em segundo turno pelos associados efetivos. A logomarca que receber a maior quantidade de votos nesse segundo turno será escolhida como vencedora.

### 3. CONSIDERAÇÕES GERAIS

3.1 No ato de inscrição os participantes estão concordando em ceder à Sobrac a propriedade e o direito de uso exclusivo da logomarca vencedora;

3.2 A utilização da logomarca será responsabilidade da Direção da Sobrac;;

3.3 Os trabalhos inscritos poderão ser retirados na Secretaria da Sobrac após 6 (seis) meses a contar da data de publicação do resultado final;

3.4 O proponente da logomarca vencedora fará jus ao prêmio de R\$ 500,00 (quinhentos reais) e a isenção das anuidades referentes a 2008 e 2009.

# Dia Internacional da consciência sobre o ruído



## **O controle do ruído está nas suas mãos**

O impacto do ruído na audição, saúde e qualidade de vida não mais pode ser questionado. Inúmeros volumes na literatura mostram os perigos para a audição devido à exposição repetida ao ruído. Numerosos estudos podem ser encontrados, nos quais o ruído, junto com outros agentes causadores de stress está relacionado com mudanças físicas e psicológicas negativas nos humanos. Os indivíduos e as comunidades não mais aceitam o ruído como um efeito colateral da sociedade industrializada.

Neste ano, será celebrado o 12º Dia Internacional da consciência sobre o ruído. Procure no site da sobrac ([www.acustica.org.br](http://www.acustica.org.br)) maiores informações sobre o dia e horário em que o planeta celebrará um minuto de silêncio. Serão 60 segundos para destacar o impacto do ruído nas nossas vidas cotidianas, proporcionando aos participantes uma pausa e uma oportunidade de conscientização sobre esse problema que atinge todos nós.

Junte-se à essa iniciativa e divulgue o International Noise Awareness Day em sua comunidade: promova eventos na sua empresa, bairro ou escola. Entre em contato com a Sobrac e saiba como essa data é celebrada em outros países e ajude-nos a fazer dele, um grande evento também aqui no Brasil.

***Pare com esse barulho!***





## SOBRAC – Sociedade Brasileira de Acústica

Depto. Engenharia Mecânica - Caixa Postal 476 – Campus Universitário

CEP 88.040-900 – Trindade – Florianópolis – SC

Te: 48 3269 9882 Skype I.D.: sobrac\_acustica

E-mail: secretaria@acustica.org.br

Home Page: www.acustica.org.br

### Ficha de Inscrição

Categoria: Efetivo ( ) Estudante ( ) Institucional ( )

Anuidade: R\$ 80,00      R\$ 30,00      R\$ 250,00

### Dados Pessoais

Nome: \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

Endereço: \_\_\_\_\_  
(Rua, No., Compl.) \_\_\_\_\_

Bairro: \_\_\_\_\_ CEP: \_\_\_\_\_ Cidade: \_\_\_\_\_ UF: \_\_\_\_\_

Fone Res.: \_\_\_\_\_ Fone Com.: \_\_\_\_\_

E-mail: \_\_\_\_\_ FAX: \_\_\_\_\_

Escolaridade: 2º Grau regular ( ) 2º Grau técnico) ( ) Graduação ( )

Pós-graduação ( ) Mestrado ( ) Doutorado ( )

### Dados Comerciais

Nome da  
Empresa: \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

Setor: \_\_\_\_\_

Endereço: \_\_\_\_\_  
(Rua, No., Compl.) \_\_\_\_\_

Bairro: \_\_\_\_\_ CEP: \_\_\_\_\_ Cidade: \_\_\_\_\_ UF: \_\_\_\_\_

Fone Res.: \_\_\_\_\_ Fone Com.: \_\_\_\_\_

E-mail: \_\_\_\_\_ FAX: \_\_\_\_\_

*Obs: Se Sócio Institucional, após preencher os dados da empresa preencher outras fichas com os dados pessoais dos dois representantes*



# Coloque seu anúncio na revista Acústica & Vibrações

A partir da próxima edição, além das 3 contra-capas da revista você terá outros 3 espaços para divulgar sua marca.

Nosso Guia Amarelo, que agora é um encarte separado da revista, poderá também receber o anúncio de seus produtos e serviços.

Consulte nossa secretaria, sobre pacotes de anúncios na revista e na nossa página na Internet.

[sobrac@acustica.org.br](mailto:sobrac@acustica.org.br)