

Análise do tempo de reverberação em salas de aula da UFRN

Luciana da Rocha Alves¹ⁱ
Contato: luciana_ralves@hotmail.com¹

Tecnologia e conforto no ambiente construído

INTRODUÇÃO

As pessoas, em sua vivência em sociedade, utilizam-se da fala para estabelecer a comunicação, compartilhando informações, conhecimentos e histórias. Porém o simples ato de falar e escutar não é garantia de entendimento claro do que está sendo comunicado. “Um discurso produzido no interior de um cômodo deve ser claro e compreensível em todos os lugares deste cômodo” (NABELEK; NABELEK, 1985 *apud* NELSON; SOLI; SELTZ, 2002, tradução minha). Embora os autores se refiram a um ambiente genérico, esta condição essencial, em geral, não é encontrada em salas de aulas, recinto cuja compreensão da fala é imprescindível em seu uso. Escolas são lugares de aprendizagem em que a fala e a escuta são métodos primários de comunicação. A falta de condições adequadas de acústica em ambientes escolares é considerada crônica (KOWALTOWSKI; MOREIRA; DELIBERADOR, 2012).

Quando a mensagem falada não é claramente escutada pelos alunos, a compreensão do discurso é afetada e, conseqüentemente, o processo de aprendizagem é prejudicado (JAROSZEWSKI; ZEIGELBOIM; LACERDA, 2007), resultando em um nível insatisfatório de inteligibilidade da fala, isto é, a comunicação não é estabelecida por falta de entendimento do som da fala. A má qualidade acústica é uma barreira para o aprendizado à medida que deprecia ou inibe a comunicação oral, essencial neste ambiente. Com boas condições acústicas em salas de aula, o processo de aprendizagem se torna mais fácil, mais fluido e menos estressante (LUBMAN; SUTHERLAND, 2001).

Este estudo justifica-se pela relevância da qualidade acústica no processo de ensino-aprendizado. Intenciona-se investigar a condição sonora de salas de aula de duas instituições federais, que, em teoria, deveriam proporcionar à população boas condições de escolaridade, inclusive em sua infraestrutura. No

entanto, modelos de salas de aula são reproduzidos em larga escala sem análises das condições acústicas e das consequências que podem ser causadas caso não haja qualidade sonora.

A comunicação em sala de aula é influenciada diretamente por um fator acústico chamado inteligibilidade, que indica o grau de entendimento das palavras no interior de um ambiente e é primordial para ambientes de comunicação (CARVALHO, 2010).

Este parâmetro depende dos efeitos de mascaramento de sons alheios ao discurso ouvido, principalmente aqueles derivados da reverberação excessiva e da baixa relação sinal/ruído, tornando-o uma variável mensurável de modo subjetivo ou analítico (LONG, 2006). O primeiro fator de dependência se refere ao tempo em que o som decai em uma sala após suas múltiplas reflexões. O tempo de decaimento analisado é, em geral, de 60 segundos, quando o parâmetro é chamado de TR ou T60. No entanto, também pode ser analisado com outros tempos de decaimento, como 30 e 20 segundos, sendo, respectivamente, T30 e T20. A relação sinal-ruído trata da relação entre o sinal emitido (voz do professor) e o ruído de fundo (externo, como pessoas falando nos corredores, ou interno, como o aparelho de ar condicionado) (SEEP et al., 2002). Este trabalho trata sobre uma dissertação de mestrado desenvolvida sobre o tema, restringindo-se à parte desta.

OBJETIVOS

Caracterizar as salas de aula da UFRN de acordo com os seus aspectos acústicos no que diz respeito à inteligibilidade através do tempo de reverberação.

MÉTODO

A Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) foi criada em 1958 como Universidade do Rio Grande do



Norte e federalizada em 1960. A atual estrutura foi consolidada em 1968, na qual vários departamentos foram agrupados de acordo com as suas naturezas em Centros Acadêmicos, como é o caso do Centro de Tecnologia ou o Centro de Ciências Sociais Aplicadas, por exemplo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE, 2017). O *campus* Central da UFRN (Figura 1) foi construído numa área de 123 hectares no início da década de 1970 e é composto por cinco setores de aula teóricas correspondentes aos Centros Acadêmicos.

Figura 1 - Campus Central da UFRN.



Fonte: print screen do Google Earth (2017), modificado pela autora.

As salas de aula da UFRN foram analisadas a partir dos desenhos técnicos cedidos pela Superintendência de Infraestrutura (SIN) da referida universidade. Por ser um campus muito vasto, apenas o setor de aulas IV (comumente conhecido como “setor IV”) foi escolhido para o estudo, já que as salas de aula são padronizadas em todo o campus.

O setor IV abriga as aulas dos cursos do Centro de Tecnologia, dentre eles Arquitetura e Urbanismo, Engenharia Civil e Engenharia de Produção. Este setor foi construído juntamente com a construção do campus e possui estrutura modulada, replicada em todos os outros quatro setores de aula presentes no campus. Desta forma, o estudo de apenas um desses setores se faz relevante em função da replicação, tanto em forma, quanto em dimensões, materiais e mobiliários.

As salas escolhidas tiveram como critério de escolha, além da forma e proporção em planta, a sua

repetitividade no Setor IV e em todo o campus, bem como os materiais das superfícies internas. Por se tratar de edificações com estrutura modulada, as salas da UFRN possuem dimensões limitadas pela estrutura, sendo definidas por 01, 02, 03, 04 ou 06 módulos, na conformação atual. As salas de 01 módulo representam 4,56% de todas as salas dos setores de aulas teóricas da universidade, enquanto as salas de 02 módulos representam 38,36%. As salas de 03 módulos são as mais frequentes possuindo 50,23% do total de salas, enquanto que 5,94% das salas são formadas por 04 módulos e 0,91% por 06 módulos. Não existem, atualmente, salas com 05 módulos, segundo desenhos técnicos disponibilizados pela SIN da UFRN.

A Figura 2 representa o Setor IV em planta, na qual estão destacadas as salas escolhidas para o estudo (A03, B02, G03 e I02). Foram escolhidas salas A03 e I02 por estarem localizadas em construções novas, que, em teoria, deveriam ter melhor qualidade. A sala A03 apresenta-se iguais às salas antigas, havendo diferença apenas na altura do pé-direito (0,28m mais alto), enquanto a sala I02 possui forro acústico modulado. Escolheu-se, também, as salas B02 e G03 por caracterizarem salas construídas na época da construção do campus e por possuírem formatos e dimensões encontrados em abrangência em toda a universidade.

Figura 2 - Planta baixa do Setor IV da UFRN com destaque para salas de aula analisadas.



Fonte: Superintendência de Infraestrutura da UFRN (2017), modificado pela autora.



A seguir, a Tabela 1 apresenta as características arquitetônicas de cada sala de aula estudada quanto à forma em planta baixa, volume, proporção entre largura e altura e especificidade de cada sala.

Tabela 1 - Características arquitetônicas das salas de aula analisadas.

Salas	Dimensões	Volume	Proporção	Especificação
G03	8,00 x 6,05 x 3,15	152 m ³	1,5:1 (1,32:1)	Sala de aula com profundidade menor que largura
A03 e B02	8,00 x 9,15 x 3,13 (Bloco B) ou 3,43 (Bloco A)	229 m ³ (Bloco B) 251 m ³ (Bloco A)	1:1 (1:1,14)	Sala de aula de maior quantidade dentre as salas da UFRN
I02	8,00 x 9,15 x 2,86	209 m ³	1:1 (1:1,14)	Sala de aula com forro acústico instalado

A avaliação analítica da inteligibilidade é realizada através de medições de parâmetros acústicos dentro das salas de aula. O tempo de reverberação e a relação sinal-ruído são os mais comumente medidos, já que possuem grande influência na inteligibilidade, à medida que prejudicam o grau de entendimento da fala quanto maior for o tempo de reverberação e menor for a relação sinal-ruído. Este trabalho detém-se à análise de tempo de reverberação, que apresenta valores ideais para as salas analisadas de acordo com a Tabela 2.

Tabela 2 - Valores recomendados para Tempo de Reverberação nas salas estudadas.

Frequência [Hz]	125	250	500	1000	2000	4000	8000
TR ideal	0,9	0,7	0,6	0,6	0,6	0,5	0,5

Foram realizadas medições da resposta impulsiva das salas escolhidas para o estudo. Todas as medições foram realizadas em finais de semana, em dias de clima típico (ensolarados com temperatura em torno de 30 a 35°C, recorrentes durante todo o ano na cidade) e sem chuva. Foram escolhidos os finais de semana para a realização das medições a fim de evitar interferências externas, como estudantes nos corredores, esportes nas proximidades e outras situações perturbadoras do silêncio que não deveriam ocorrer durante os tempos de aula. Os aparelhos de ar condicionado permaneceram desligados durante as medições. Na existência de cortinas ou persianas, estas foram fechadas, bem como portas e janelas.

Para sala de aula foi escolhida uma posição para orador (fonte sonora) e quatro posições para receptores (microfone). A posição da fonte (F) foi determinada de acordo com a posição do professor, sendo localizada a 1 m da parede do quadro branco e centralizado em relação às paredes laterais, com eixo da caixa posicionado a 1,50 m do piso, como recomendado pela ISO 3382-2 (ISO, 2008).

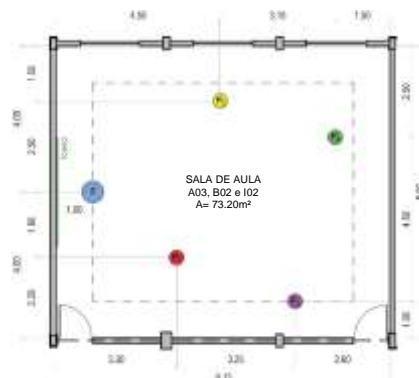
As posições dos receptores (P_n , em que “n” é a posição do microfone) foram determinadas de modo a englobar todo o campo sonoro da sala. Os microfones foram preferencialmente colocados na posição de um aluno, em que a cadeira era trocada pelo tripé com microfone, obedecendo as recomendações da ISO 3382-2 (ISO, 2008) de evitar superfícies refletoras em um raio de 1 m. O microfone foi posicionado a 1,20 m do piso, altura usual da cabeça de uma pessoa sentada. As posições de fonte e microfones são mostradas mais adiante.

Figura 3 - Pontos de medição na sala G03.



Fonte: Superintendência de Infraestrutura da UFRN (2017), modificado pela autora.

Figura 4 - Pontos de medição nas salas A03, B02 e I02.



Fonte: Superintendência de Infraestrutura da UFRN (2017), modificado pela autora.



As medições dos parâmetros acústicos foram realizadas através da técnica da resposta impulsiva da sala, geradas pelo *software* DIRAC® 6.0 e pelos equipamentos de medição, todos da fabricante Brüel & Kjær e pertencentes ao Laboratório de Conforto Ambiental da UFRN. O DIRAC® é um *software* utilizado para medições de parâmetros de acústica de salas. Este *software* permite diversas configurações para a medição (gravação e processamento) e análise da resposta impulsiva de uma sala, como, por exemplo, aquelas recomendadas pela ISO 3382. O DIRAC® é capaz de medir e analisar parâmetros de acústica de sala, inteligibilidade da fala, testar e validar sistemas de som, dentre outros usos (B&K, 2013).

O sistema de medição foi constituído, como pode ser observado na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, por um microfone omnidirecional em um tripé (01) acoplado através de um fio a um medidor de nível de pressão sonora (MNPS; 02), que por sua vez estava ligado à placa de som externa e esta ao computador (03) a fim de realizar a conversão de sinal analógico-digital, constituindo o sistema de captação sonora. A placa de som externa (desta vez convertendo sinal digital-analógico) estava, também, ligada ao amplificador (04), conectado à caixa de som omnidirecional (05), que formam o sistema de geração sonora.

Figura 5 - Sistema de medição.



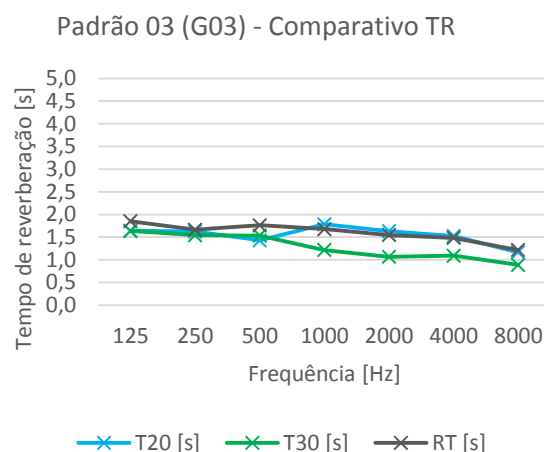
Fonte: acervo da autora (2017).

DESENVOLVIMENTO

A sala G03, da UFRN, representa aquelas que são compostas por dois módulos de profundidade em planta baixa. É a sala de menor profundidade entre todas as analisadas. Quanto ao tempo de reverberação, a sala G03 exibe valores próximos entre TR, T_{20} e T_{30} nas frequências até 500 Hz, havendo uma ligeira variação do T_{30} a partir de 1 kHz, apresentando valores mais baixos

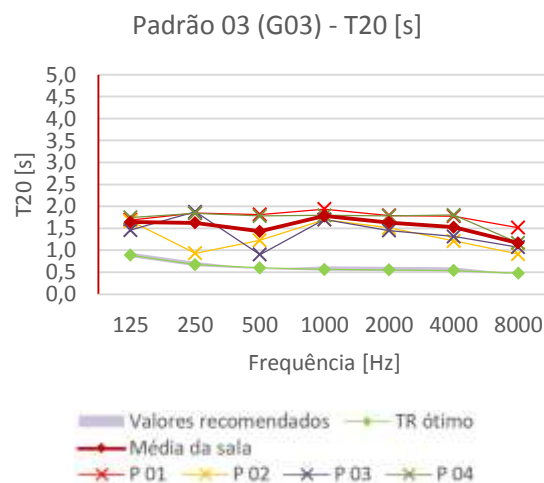
em comparação com o TR e o T_{20} . A Figura 6 demonstra que o tempo de reverberação nesta sala é praticamente linear, apresentando valores semelhantes em todas as frequências, com uma pequena variação para baixo em 500 Hz e para cima em 1 kHz. O tempo de reverberação encontrado nesta sala pode ser considerado alto, já que está acima de 1,0 segundo para todas as frequências.

Figura 6 – Gráfico de Tempo de Reverberação na sala G03.



Neste padrão é o Ponto 02, em amarelo na Figura 7, que apresenta valores mais baixos em todas as frequências, porém com variações muito pequenas. Este ponto apresenta uma depressão em 250 Hz, aproximando-se do valor recomendado para salas de aula. O mesmo ocorre com o Ponto 03, porém na frequência de 500 Hz. Excetuando-se estes casos, pode-se perceber na Figura 7 que não existem grandes variações nos valores por frequência entre os pontos.

Figura 7 - Gráfico de T_{20} por ponto de medição na sala G03.



As salas A03 e B02 são semelhantes em planta, havendo apenas uma diferença entre elas: a altura do pé-direito. A sala A03 apresenta 0,28 m de altura a mais que a sala B02, o que implica num aumento de 35 m³.

A Figura 8 e a Figura 10 apresentam a comparação entre valores de TR, T_{20} e T_{30} nas frequências mais relevantes do espectro da fala para cada uma das salas. A sala A03 apresenta valores quase iguais em todas as frequências com uma divergência insignificante na frequência de 8 kHz. Já a sala B02 exibe maiores discrepâncias, porém ainda irrelevantes quantitativamente. Nesta sala, é possível perceber que o T_{20} do Ponto 01 (Figura 11) é significativamente mais baixo em relação aos outros pontos medidos, enquanto na sala A03 todos os pontos possuem valores bastante próximos (Figura 9).

Figura 8 - Gráfico de Tempo de Reverberação na sala A03.

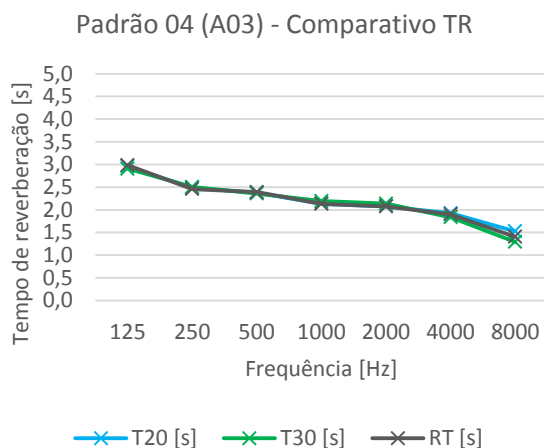


Figura 9 - Gráfico de T_{20} por ponto de medição na sala A03.

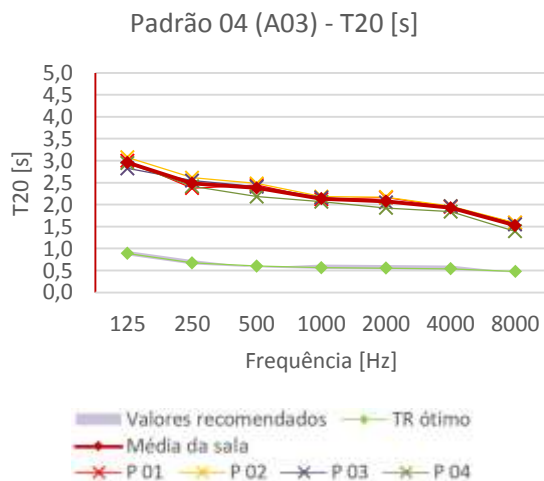


Figura 10 - Gráfico de Tempo de Reverberação na sala B02.

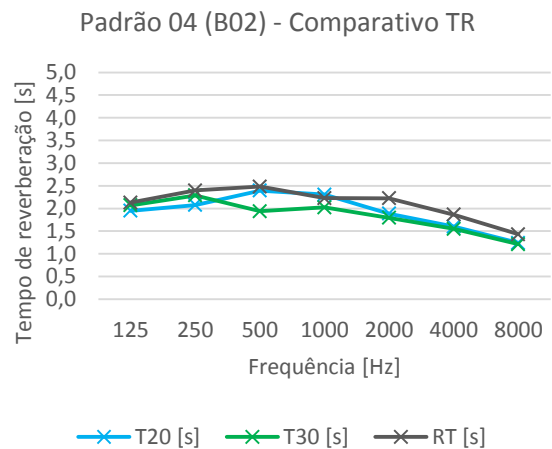
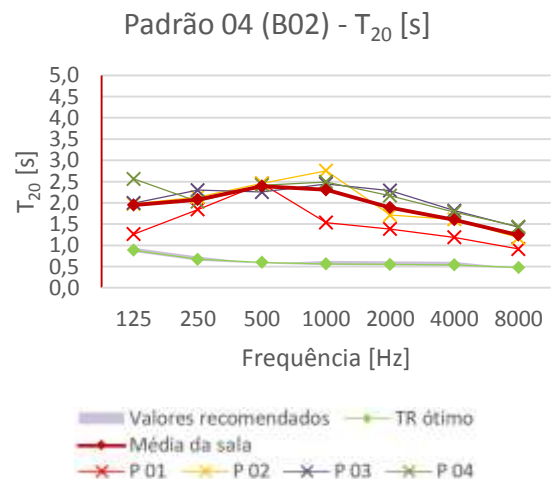


Figura 11 - Gráfico de T_{20} por ponto de medição na sala B02.



Por fim, tem-se a sala I02, única que possui forro acústico. Tendo em vista a maior área de absorção e o menor volume, esta sala exibe menores valores de tempo de reverberação, que indica uma melhor inteligibilidade em comparação com as outras salas. Porém, ainda assim, os valores estão fora do intervalo considerado ótimo.

A Figura 12 apresenta o comparativo entre o tempo de reverberação obtido com diferentes decaimentos, que resultaram em valores muito próximos e com a mesma tendência de comportamento no gráfico. Todos os pontos medidos na sala exibiram valores semelhantes, como se pode observar na Figura 13. O T_{20} encontrado é basicamente linear com valores próximos entre as frequências e comportamento semelhante aos valores ótimos (maior nas baixas frequências em relação às



altas). Porém os valores estão cerca de 1,0 segundo acima do ideal.

próximos às conversas ou aparelhos de climatização, situações estas em que há maior ruído de fundo.

Figura 12 - Gráfico de Tempo de Reverberação na sala I02.

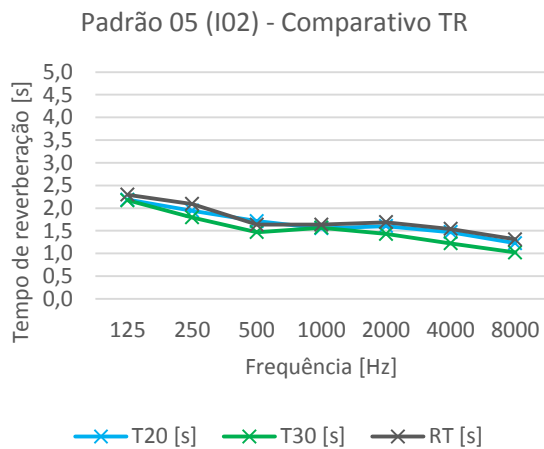
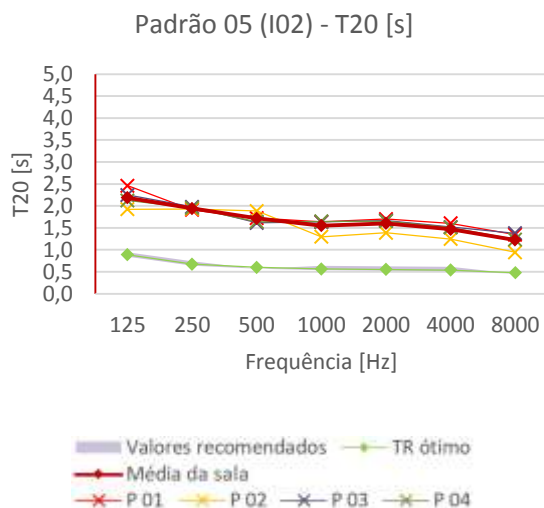


Figura 13 - Gráfico de T20 por ponto de medição na sala I02.



CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir do exposto no que se refere à situação atual das salas de aula estudadas, pode-se dizer, de modo geral, que todas as salas apresentam baixa qualidade acústica para fala e, conseqüentemente, inteligibilidade ruim. Todas as salas apresentam T_{20} maior que 1,0 segundo em todas as frequências, indicando que estes ambientes são excessivamente reverberantes para salas de aula. Considerando que é comum casos em que alunos conversam paralelamente à explicação do professor, torna-se ainda mais difícil entender a mensagem emitida pelo professor, principalmente para aqueles alunos

Na maior parte das salas o tempo de reverberação decai à medida que a frequência aumenta. Apenas as salas G03 e B02 apresentam T_{20} com mais linearidade. Na maioria dos casos o ponto de medição que apresenta menor valor no tempo de reverberação em relação à média é o Ponto 01, localizado mais próximo à fonte sonora e mais distante do campo reverberante do fundo da sala. Apenas na sala G03 esse ponto possui índices maiores que a média da sala, sendo os Pontos 02 e 03 aqueles que apresentam menores valores que a média, principalmente em 250 e 500 Hz, em que, cada um, respectivamente, apresentam depressões no gráfico. De modo geral, o tempo de reverberação encontrado demonstra que todas as salas possuem má qualidade acústica, com baixa inteligibilidade, mesmo quando é utilizado um forro acústico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

B&K, B. & K. S. AND V. M. **Technical documentation: DIRAC Room Acoustics Software Type 7841**. Naerum, 2013.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, (ISO). **ISO 3382-2: Acoustics - Measurement of room acoustic parameters - Part 2: Reverberation time in ordinary rooms**. Suíça, 2008.

JAROSZEWSKI, G. C.; ZEIGELBOIM, B. S.; LACERDA, A. Ruído escolar e sua implicação na atividade de ditado. **Revista CEFAC**, v. 9, n. 1, p. 122–132, 2007.

KOWALTOWSKI, D. C. C. K.; MOREIRA, D. C.; DELIBERADOR, M. S. **O Programa Arquitetônico No Processo De Projeto: Discutindo a Arquitetura Escolar, Respeitando O Olhar Do Usuário**. Simpósio Brasileiro de Qualidade do Projeto no Ambiente Construído. **Anais...**2012

LUBMAN, D.; SUTHERLAND, L. C. **Good Classroom Acoustics is a Good Investment**. 17th International Congress on Acoustics. **Anais...**Roma: ICA, 2001

NELSON, P. B.; SOLI, S. D.; SELTZ, A. **Classroom acoustics II: Acoustical barriers to learning**. 1. ed. Melville: Acoustical Society of America, 2002.

NORTE, U. F. DO R. G. DO. **Portal da UFRN**. Disponível em: <<http://www.ufrn.br/institucional/sobre-a-ufrn>>. Acesso em: 14 jul. 2017.



