



1º FÓRUM DE  
ACÚSTICA  
DA SOBRAC-CO  
BRASÍLIA - DF

## ARQUITETURA SONORA E MODULAÇÃO PSICONEURAL: UMA DISCUSSÃO INTERDISCIPLINAR SOBRE RESSONÂNCIAS MODAIS E NEUROPLASTICIDADE EXPERIENCIAL

Brunno Guilherme Barbosa de Sá<sup>1</sup>, Maria Luiza Ulhôa de Carvalho<sup>2</sup>

**Resumo:** Este artigo discute como a acústica de salas pode atuar na modulação de estados psiconeurais por meio da interação entre ressonâncias modais, percepção auditiva, arrastamento neural e neuroplasticidade dependente da experiência. Propõe-se compreender o som como componente ativo da experiência espacial, capaz de influenciar atenção, relaxamento, cognição e comportamento. A argumentação articula acústica arquitetônica, neurociência auditiva, neuroarquitetura e fenomenologia da percepção. Conclui-se que o ambiente acústico pode ser entendido como agente biológico ativo, com potencial para participar de processos de adaptação neural, bem-estar e regulação cognitivo-emocional.

**Palavras-chave:** Acústica Arquitetônica; Modos de Sala; Neuroarquitetura; Arrastamento Neural; Neuroplasticidade.

### 1. INTRODUÇÃO: A DIMENSÃO AUDITIVA DO ESPAÇO CONSTRUÍDO

A arquitetura organiza a experiência humana no espaço, mas durante muito tempo o projeto arquitetônico privilegiou a dimensão visual e tratou o som apenas como problema técnico. Essa postura é limitada, pois a audição opera de modo contínuo, imersivo e tridimensional, conectando o corpo ao ambiente de maneira permanente. Mudanças ambientais podem modificar o cérebro e influenciar o comportamento, argumento que reforça a necessidade de ampliar o foco projetual para a experiência acústica (GAGE, 2002).

Na mesma direção, a percepção pode ser compreendida como fenômeno corporificado e multissensorial, no qual o som contribui para definir escala, proximidade, textura e atmosfera (PALLASMAA, 2011). A arquitetura também pode ser entendida como força ativa que atua sobre os indivíduos (ROBINSON, 2021). A partir dessa base, este artigo sustenta que as frequências modais de um recinto não são apenas consequências físicas da geometria do espaço, mas condições ambientais capazes de interagir com a dinâmica neural do usuário.

Metodologicamente, trata-se de um estudo teórico-conceitual, qualitativo e interdisciplinar, fundamentado em revisão bibliográfica e articulação analítica entre acústica arquitetônica, neurociência auditiva, neuroarquitetura e fenomenologia. O objetivo é discutir um modelo de interação entre ambiente construído e modulação psiconeural, relacionando parâmetros físicos do campo acústico, especialmente modos de sala e reverberação, a processos de arrastamento neural e neuroplasticidade dependente da experiência.

### 2. O AMBIENTE COMO SISTEMA MODULADOR NEURAL

O ambiente acústico pode ser interpretado como gatilho inicial de uma cadeia de processos que envolve percepção sonora, resposta fisiológica, sincronização neural, modulação comportamental e, sob exposição repetida, consolidação sináptica. Tal leitura se aproxima da proposta de construção de pontes empíricas entre medições arquitetônicas e respostas cerebrais

<sup>1</sup> Universidade Paulista, Mestre em Arquitetura e Urbanismo pela UnB / Docente e consultor em acústica.

<sup>2</sup> Universidade Federal de Goiás, Doutora em Engenharia Acústica e de Áudio pela Universidade de Salford / Docente e consultora em acústica.

mensuráveis (EBERHARD, 2008). Sob a ótica da cognição corporificada, a mente não está isolada no cérebro, mas emerge da interação dinâmica entre cérebro, corpo e mundo.

Nesse modelo, o som do ambiente não atua somente como informação externa, mas como condição de fundo capaz de favorecer determinados estados funcionais do sistema nervoso. A repetição de estímulos acústicos com determinadas características pode reforçar padrões de ativação associados a foco, relaxamento ou vigilância. Em termos hebbianos, quando certos circuitos são recrutados de forma recorrente, sua conectividade tende a se fortalecer (HEBB, 1949). Assim, o ambiente acústico pode ser entendido como campo de treinamento sensorial e cognitivo, com efeitos graduais sobre humor, atenção e adaptação neural.

Do ponto de vista operacional, esse modelo de modulação não pretende reduzir a experiência humana a um mecanismo linear, mas explicitar uma sequência recorrente: campo acústico, captação sensorial, interpretação perceptiva, resposta autonômica, sincronização neural e aprendizagem por repetição. A relevância do esquema está em mostrar que o ambiente não atua apenas no instante da escuta, mas pode participar da formação de hábitos atencionais e afetivos quando certas qualidades acústicas se estabilizam na rotina de uso. Biomarcadores como Resposta de Seguimento de Frequência (Frequency Following Response - FFR), Resposta Auditiva de Estado Estacionário (ASSR), coerência de fase e medidas comportamentais de atenção tornam-se, nesse contexto, instrumentos estratégicos para aproximar arquitetura e neurociência em bases empiricamente observáveis.

## **2.1 Conceitos para a análise do FFR**

A FFR é um potencial evocado auditivo que expressa a capacidade do sistema nervoso de acompanhar com precisão as características temporais e espectrais de um estímulo periódico. Tradicionalmente associada ao tronco encefálico, essa resposta também apresenta contribuições corticais relevantes, ampliando seu valor para o estudo da cognição auditiva e da plasticidade cerebral (BIDELMAN, 2018; COFFEY et al., 2019a; COFFEY et al., 2019b). Quando o cérebro acompanha a frequência fundamental e os harmônicos de um som, torna-se possível avaliar a fidelidade da codificação neural.

Sua análise costuma considerar amplitude, latência, espectro de frequência, relação sinal-ruído e consistência de fase. A amplitude informa a robustez da resposta neural; a latência, a velocidade do processamento auditivo; o espectro, a presença da frequência fundamental e de seus harmônicos; a relação sinal-ruído, a clareza da resposta; e a consistência de fase, a estabilidade temporal do acoplamento entre estímulo e atividade neural (PICTON et al., 2003; SKOE; KRAUS, 2010). Esses parâmetros tornam a FFR um indicador importante para investigar como diferentes condições acústicas podem favorecer ou dificultar a precisão do processamento auditivo.

## **2.2 Conceitos para a análise do Arrastamento Neural**

O arrastamento neural é o processo pelo qual oscilações endógenas do cérebro se sincronizam com a periodicidade de um estímulo externo. No campo acústico, esse fenômeno é relevante para a escuta da fala, da música e dos ritmos ambientais, pois permite que o sistema nervoso alinhe suas janelas de excitabilidade às estruturas temporais do som (LAKATOS; GROSS; THUT, 2019). Essa sincronização pode ser observada por medições da atividade cerebral por meio de Eletroencefalografia (EEG) e Magnetoencefalografia (MEG), sobretudo com métricas de coerência de fase e travamento de fase entre múltiplas apresentações de um estímulo.

Entre os indicadores mais utilizados estão a coerência de fase, o Phase Locking Value, o Inter-Trial Coherence e a resposta auditiva de estado estacionário. Em conjunto, essas medidas permitem verificar se a atividade cerebral acompanha a frequência do estímulo e com que estabilidade esse acoplamento ocorre (COHEN, 2014; HERRMANN et al., 2016; LACHAUX et al., 1999). No contexto arquitetônico, a relevância do arrastamento neural reside na hipótese de que ambientes acústicos distintos podem favorecer padrões diferentes de sincronização, influenciando estados de alerta, relaxamento, criatividade ou fadiga mental.

### **3. FUNDAMENTAÇÃO ACÚSTICA: A FÍSICA DAS RESSONÂNCIAS E SEU IMPACTO NEURAL**

A base física dessa discussão está na maneira como o som interage com a geometria, os materiais e o volume do recinto. Em espaços fechados, a absorção e a reverberação são parâmetros centrais. O coeficiente de absorção indica quanto da energia sonora é dissipada por uma superfície, enquanto o tempo de reverberação expressa o tempo necessário para o decaimento de 60 dB após a interrupção da fonte (ABNT, 1992; KUTTRUFF, 2009). Quando excessivamente baixo, o ambiente tende a soar seco; quando excessivamente alto, compromete inteligibilidade, conforto e clareza perceptiva.

Outro conceito fundamental é o dos modos de sala, ou ondas estacionárias, produzidos pela reflexão repetida do som entre superfícies do ambiente. Em determinadas frequências, as ondas se reforçam e criam distribuições espaciais estáveis de picos e vales de pressão sonora. Isso significa que a própria forma do recinto organiza seletivamente a energia acústica em certas faixas de frequência (EVEREST; POHLMANN, 2015). Em baixas frequências, onde a densidade modal é reduzida, esses efeitos são mais perceptíveis e podem alterar de maneira importante a experiência do usuário.

À medida que o volume da sala cresce, a distribuição modal muda e a frequência de Schroeder delimita a transição entre a região de modos discretos e a região em que o campo sonoro passa a se comportar de maneira mais difusa. Do ponto de vista neuroarquitetônico, esse conjunto de parâmetros interessa porque define o espectro vibratório com o qual o corpo convive. Em outras palavras, as dimensões físicas do espaço não apenas moldam o som que se ouve, mas estruturam as condições materiais que podem favorecer certos tipos de estimulação auditiva e, em tese, diferentes formas de sincronização neural (EVEREST; POHLMANN, 2015; KUTTRUFF, 2009).

Esse raciocínio torna especialmente importante a noção de densidade modal e a frequência de Schroeder, porque ambas ajudam a diferenciar salas em que os modos discretos dominam daquelas em que o campo tende à difusão estatística. Em ambientes pequenos, a escuta é mais sensível a reforços localizados e a irregularidades espectrais; em ambientes maiores, a sobreposição modal tende a suavizar a resposta global. Para o projeto, isso significa que decisões sobre proporção geométrica, revestimentos e posicionamento de fontes ou ouvintes podem alterar não só a inteligibilidade e o conforto, mas também o tipo de estimulação sonora que se torna mais recorrente no cotidiano.

### **4. ANÁLISE COMPARATIVA: ARRASTAMENTO NEURAL, DIMENSÕES E ESTADOS DE CONSCIÊNCIA**

Investiga-se, nesta seção, a hipótese de que diferentes tipologias arquitetônicas tendem a concentrar frequências modais que podem conceitualmente se aproximar de bandas de oscilação cerebral registradas por EEG. A Tabela 1 ilustra alguns casos. Por exemplo, em ambientes muito pequenos, como gabinetes de foco, os primeiros modos tendem a ocorrer em

faixas mais altas, próximas do domínio gamma, associado a processamento intenso e alta demanda cognitiva. Em salas de estar, os modos iniciais costumam se situar em regiões beta e gamma, compatíveis com estados de atenção externa e vigilância moderada.

Já em recintos maiores, como pequenos auditórios e galerias, os modos iniciais descem para faixas compatíveis com ritmos alpha e theta, frequentemente relacionados a relaxamento alerta, introspecção e estados meditativos. Essa aproximação não implica causalidade simples nem permite concluir que a sala determina automaticamente um estado mental. Contudo, esta narrativa oferece um modelo interpretativo promissor para investigar como características acústicas recorrentes podem predispor o organismo a determinados regimes de sincronização. A relevância do argumento está menos em um determinismo espacial e mais na possibilidade de projetar ambientes que ampliem condições favoráveis ao bem-estar cognitivo, emocional e comportamental.

Tabela 1 - Síntese comparativa entre tipologias espaciais, faixas modais predominantes e efeitos psiconeurais esperados.

Fonte: elaboração própria (2026).

| Ambiente          | Faixa modal predominante | Correspondência EEG aproximada | Efeito psiconeural provável                           |
|-------------------|--------------------------|--------------------------------|-------------------------------------------------------|
| Gabinete de foco  | Mais altas               | Gamma                          | Processamento intenso e atenção concentrada           |
| Sala de estar     | Médias-altas             | Beta e Gamma                   | Alerta, atenção externa e vigilância moderada         |
| Pequeno auditório | Médias                   | Alpha e Beta                   | Relaxamento alerta, escuta ampla e criatividade       |
| Galeria de arte   | Mais baixas              | Theta e Alpha                  | Introspecção, contemplação e desaceleração perceptiva |

## 5. CONCLUSÃO E PERSPECTIVAS FUTURAS

A discussão desenvolvida sugere que a acústica arquitetônica deve ser entendida como dimensão ativa da experiência humana e não apenas como recurso corretivo. Modos de sala, reverberação, absorção e distribuição modal compõem um campo vibratório que pode interferir na qualidade da percepção, na inteligibilidade, na carga cognitiva e, potencialmente, em processos de sincronização neural e adaptação dependente da experiência. Nessa chave, o projeto acústico deixa de ser mero ajuste técnico e passa a integrar uma agenda ampliada de saúde, conforto e cognição no ambiente construído.

Em termos aplicados, a hipótese discutida neste artigo sugere implicações relevantes para escolas, hospitais, escritórios, salas de espera, espaços expositivos e ambientes residenciais. Em todos esses casos, a acústica pode contribuir para reduzir sobrecarga perceptiva, melhorar a inteligibilidade da comunicação, apoiar estados de concentração ou desaceleração e qualificar a sensação de bem-estar. Ainda que a validação experimental siga em aberto, a incorporação dessa agenda ao projeto amplia o campo da arquitetura para além do desempenho técnico e aproxima o desenho espacial de uma prática de cuidado mais sensível às respostas do corpo e do cérebro.



Como perspectiva de pesquisa, o avanço dessa hipótese exige protocolos experimentais controlados que relacionem medições acústicas de recintos a biomarcadores eletrofisiológicos, comportamentais e, idealmente, moleculares. Investigações com EEG, MEG, sistemas multicanais de emulação modal e estudos longitudinais podem testar se diferentes configurações espaciais produzem efeitos consistentes sobre atenção, relaxamento, memória auditiva e estresse. A convergência entre acústica arquitetônica e neurociência, portanto, abre um campo promissor para um design mais responsivo, capaz de conceber espaços que não apenas abriguem atividades humanas, mas contribuam ativamente para sua regulação e desenvolvimento.

## REFERÊNCIAS

- ABNT. NBR 12179: tratamento acústico em recintos fechados. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1992.
- BIDELMAN, G. J. Subcortical-cortical interplay in the generation of the auditory frequency-following response. *Journal of Neurophysiology*, v. 119, n. 6, p. 2182-2196, 2018.
- COFFEY, E. B. J. et al. Analyzing the FFR: a tutorial for decoding the richness of auditory brainstem responses. *Hearing Research*, v. 382, p. 107796, 2019a.
- COFFEY, E. B. J. et al. Evolving perspectives on the sources of the frequency following response. *Nature Communications*, v. 10, n. 1, p. 5036, 2019b.
- COHEN, M. X. *Analyzing neural time series data: theory and practice*. Cambridge: MIT Press, 2014.
- EBERHARD, J. P. *Brain landscape: the coexistence of neuroscience and architecture*. Oxford: Oxford University Press, 2008.
- EVEREST, F. A.; POHLMANN, K. C. *Master handbook of acoustics*. 6. ed. New York: McGraw-Hill, 2015.
- GAGE, F. H. Neurogenesis in the adult brain. *Journal of Neuroscience*, v. 22, n. 3, p. 612-613, 2002.
- HEBB, D. O. *The organization of behavior: a neuropsychological theory*. New York: Wiley, 1949.
- HERRMANN, B. et al. Neural entrainment to complex auditory signals. *Frontiers in Neuroscience*, v. 10, p. 197, 2016.
- KUTTRUFF, H. *Room acoustics*. 5. ed. London: CRC Press, 2009.
- LACHAUX, J. P. et al. Measuring phase synchrony in brain signals. *Human Brain Mapping*, v. 8, n. 4, p. 194-208, 1999.
- LAKATOS, P.; GROSS, J.; THUT, G. A new unifying account of the roles of neuronal entrainment. *Current Biology*, v. 29, n. 18, p. R890-R905, 2019.
- PALLASMAA, J. *Os olhos da pele: a arquitetura e os sentidos*. Porto Alegre: Bookman, 2011.
- PICTON, T. W. et al. Human auditory steady-state responses. *International Journal of Audiology*, v. 42, n. 4, p. 177-219, 2003.
- ROBINSON, S. *Architecture is a verb*. London: Routledge, 2021.
- SKOE, E.; KRAUS, N. Auditory brainstem response to complex sounds: a tutorial. *Ear and Hearing*, v. 31, n. 3, p. 302-324, 2010.