XVIII ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO
XIV ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO
AMBIENTE CONSTRUÍDO E USUÁRIO: PERSPECTIVAS LATINO-AMERICANAS

Otimização Paramétrica da geometria de Conchas Acústicas para Anfiteatros: Um Modelo *Form-Find* Baseado em Algoritmos Evolutivos

Optimización Paramétrica de la Geometría de Conchas Acústicas para Anfiteatros: Un Modelo de Form-Finding Basado en Algoritmos Evolutivos

Parametric Optimization of Acoustic Shell Geometry for Amphitheaters: A Form-Finding Model Based on Evolutionary Algorithms

Acústica arquitetônica e urbana

Queiroz, Natália
Dra., Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, Brasil,
natalia.queiroz@academico.ufpb.br

Resumo

A eficiência acústica de conchas em anfiteatros depende diretamente da geometria, que influencia a distribuição sonora no espaço. Este artigo apresenta um modelo simplificado de *form-finding* para gerar conchas acústicas otimizadas geometricamente, utilizando modelagem paramétrica no Grasshopper e a ferramenta Galápagos de otimização evolutiva. A metodologia define parâmetros geométricos e avalia um critério unicritério de fitness baseado nas primeiras reflexões sonoras. A otimização visa maximizar a distribuição homogênea da energia acústica na plateia, variando as superfícies refletoras para maior eficiência. Testaram-se duas configurações de plateia: linear e radial. Os resultados indicam o quanto a radial é acusticamente mais eficiente. O modelo permite comparar dimensões e impactos na concha acústica, evidenciando como abordagens computacionais simplificadas podem auxiliar projetos em espaços abertos nas fases iniciais.

Palavras-chave: Otimização paramétrica. Conchas acústicas. Algoritmos evolutivos. Modelagem generativa. Conforto acústico

Resumen

La eficiencia acústica de conchas en anfiteatros depende de su geometría, que influye en la distribución del sonido. Este artículo presenta un modelo simplificado de form-finding para generar conchas acústicas optimizadas, usando modelado paramétrico en Grasshopper y la herramienta evolutiva Galápagos. La metodología define parámetros geométricos y evalúa un criterio unicriterio basado en las primeras reflexiones. La optimización busca maximizar la distribución homogénea de energía acústica en la platea, variando superficies reflectoras para mayor eficiencia. Se probaron dos configuraciones: lineal y radial. Los resultados indican cuánto más eficiente acústicamente es la configuración radial. El modelo compara dimensiones e impactos, mostrando cómo enfoques computacionales simples pueden apoyar proyectos en espacios abiertos desde fases iniciales.

Palabras clave: Optimización paramétrica. Conchas acústicas. Algoritmos evolutivos. Modelado generativo. Confort acústico.

Abstract

The acoustic efficiency of shells in amphitheaters depends directly on geometry, which influences sound distribution in space. This article presents a simplified form-finding model for generating geometrically optimized acoustic shells using parametric modeling in Grasshopper and the Galapagos evolutionary optimization tool. The methodology defines geometric parameters and evaluates a single-criterion fitness based on early sound reflections. The optimization aims to maximize the homogeneous distribution of acoustic energy in the audience area by varying reflective surfaces for greater efficiency. Two audience configurations were tested: linear and radial. The results indicate how much more acoustically efficient the radial configuration is. The model enables comparison of dimensions and impacts on the acoustic shell, highlighting how simplified computational approaches can support open-air design in early project stages.

Keywords: Parametric optimization. Acoustic shells. Evolutionary algorithms. Generative modeling. Acoustic comfort.

Introdução

A eficiência acústica de conchas em anfiteatros abertos depende da sua geometria, já que a reflexão sonora impacta diretamente a experiência auditiva da plateia. Embora métodos tradicionais de projeto considerem reflexões acústicas, eles muitas vezes não exploram o potencial de otimização oferecido pelas tecnologias computacionais. A modelagem paramétrica e a otimização emergem como ferramentas para auxílio da eficiência, porém o processo analítico deve ser simples e rápido para viabilizar a integração (MARKELJ, 2014).

As conchas acústicas são fundamentais na qualidade sonora em ambientes ao ar livre. Sua geometria deve ser projetada para direcionar o som para o público para maximizar a propagação e a reflexão das ondas sonoras. Por isso, o princípio básico de sua concepção é utilizar uma forma côncava que, ao receber as ondas sonoras, as reflete e direciona para a audiência. Esse conceito é inspirado no funcionamento da orelha humana, que organiza e amplifica as ondas sonoras através de sua anatomia. O projeto de uma concha acústica deve considerar os seguintes aspectos (ERMANN, 2015; PEREIRA, 2025):

1. **Forma Geométrica**: A estrutura é projetada com um ou mais pontos focais, com uma forma clássica cônica invertida, mas variações como dobras e formas de sela também são possíveis. formas semicirculares e aberturas parabólicas são comuns.
2. **Espaço e Localização**: A posição da concha e o ambiente ao redor são relevantes. A inclinação do terreno pode ser necessária para a visibilidade do público, e o layout radial dos assentos pode ser recomendado para experiência acústica.
3. **Condições Climáticas:** O clima afeta a propagação do som, especialmente ventos fortes (acima de 15 km/h), que podem prejudicar a clareza e intensidade sonora.
4. **Materiais Ambientais**: Elementos naturais influenciam a acústica. A grama, por exemplo, absorve as ondas sonoras, enquanto a água atua prioritariamente como um refletor.

Figura 1: Exemplos de conchas acústicas



Diversos estudos têm explorado os princípios de design das conchas acústicas, utilizando diferentes métodos de simulação. Dentre essas pesquisas, destacam-se o estudo de Gu et al. (2024) que propôs uma metodologia de projeto para instalações sonoras em escala humana, utilizando materiais flexíveis. O objetivo era amplificar os sons naturais, como o canto dos pássaros, enquanto minimizava os sons humanos para preservar o ambiente natural. O método envolveu três etapas: simulação digital, experimentos físicos em modelos reduzidos e testes em escala real. O processo resultou na instalação do "*Natural Speaker*", que demonstrou a eficácia da metodologia. Apesar disso, a técnica de projeto usava *software* específico sem integração com processos de modelagem tridimensional.

Já o estudo de Bouvet et al. (2020) utilizou simulações acústicas 3D e algoritmos genéticos para otimizar a forma de uma parede acústica, com o objetivo de melhorar a acústica do teatro de Tindari, na Itália. O modelo considera a propagação do som para otimizar a parede para refletir ondas sonoras na direção do público. Utilizaram o *software Grasshopper*, conseguindo uma melhoria sonora em 96% nos lugares mais distantes da plateia. O estudo considerou como premissa os princípios da pesquisa de Canac (1967) que descreve propriedades acústicas de teatros gregos e romanos, utilizando modelos geométricos simplificados para analisar a propagação do som. Apesar da contribuição, a pesquisa não explora realmente a forma de "concha", e sim uma parede curva.

Já Shtrepi et al., 2023 avaliaram a eficácia de uma concha acústica real em um palco ao ar livre para concertos de música de câmara. Os testes realizados consideraram uma concha em forma de caixa e consideraram a variação de diferentes arranjos de refletores e difusores com melhora nos parâmetros acústicos, especialmente o suporte sonoro precoce *(ST_{early}*[1]), com variações no conteúdo espectral, particularmente em frequências acima de 1000 Hz. A pesquisa concluiu que a reflexão e difusão têm um impacto direto na experiência acústica, melhorando tanto os parâmetros objetivos quanto a percepção subjetiva dos músicos.

Dessa forma, destacam-se nas pesquisas a relevância das primeiras reflexões na experiência acústica, sendo fundamentais para projeto de uma concha acústica. Neste contexto, este artigo propõe um modelo paramétrico simplificado de otimização para a geração de conchas acústicas para apoio do processo de projeto. O estudo considera duas disposições da plateia,

[1] ST_{early}, do inglês *Early Sound Support* refere-se à quantidade de som que chega a um ouvinte em um espaço acústico nos primeiros momentos após a emissão do som. É geralmente medido durante os primeiros reflexos sonoros, que ocorrem da propagação do som principal (WENMAEKERS, 2012).

avaliando a influência da disposição do público na geração da concha de acordo com princípios geométricos levantados por Ermann (2015); Pereira (2025).

Objetivo Geral

O objetivo deste artigo é desenvolver um modelo de otimização paramétrica para o projeto geométrico de conchas acústicas em anfiteatros e comparar como diferentes configurações de plateia impactam na configuração geométrica da concha e homogeneidade acústica.

Método

Este estudo adota uma abordagem quantitativa para investigar a otimização acústica de conchas em anfiteatros sob a perspectiva geométrica, empregando modelagem paramétrica e técnicas de otimização algorítmica para identificar configurações formais mais eficientes. A pesquisa busca definir princípios de modelagem paramétrica e diretrizes geométricas para conchas acústicas, além de comparar os efeitos de diferentes configurações da plateia sobre a distribuição sonora. Para isso, utiliza ferramentas computacionais como *Rhinoceros 3D*, o *plugin Grasshopper* e o *Ladybug*, que possibilitam análises baseadas em raios traçados, usados para representar as primeiras reflexões acústicas.

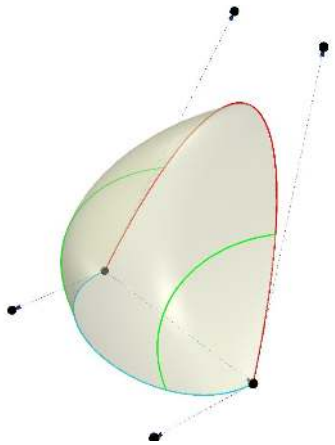
Modelagem Flexível da Concha

A modelagem da concha acústica foi realizada no *software Rhinoceros*, utilizando o *plugin Grasshopper* para criar uma geometria paramétrica flexível. Essa abordagem permite a manipulação de diferentes parâmetros geométricos da concha, como curvaturas, inclinação e dimensões, possibilitando a adaptação da forma flexível para facilitar a exploração de diversas soluções geométricas sem a necessidade de reconstruir manualmente a estrutura a cada alteração, tornando o processo ágil.

A concha paramétrica gera superfícies côncavas. O modelo é iniciado com a criação de duas curvas *NURBS* (*Non-Uniform Rational B-Splines)* e duas catenárias, permitindo ajustes variados na forma e curvatura da concha acústica. A superfície é gerada por meio da rede composta por quatro curvas distintas. A Figura 2 destaca as curvas geratrizes da superfície da concha. As curvas vermelho e ciano correspondem às *NURBS*, geradas a partir de pontos de controle representados em preto. Já as curvas verdes são catenárias, criadas com base em vetores e uma força aplicada que deforma a curva. A manipulação dos parâmetros dessas curvas geratrizes possibilita a criação de uma ampla gama de variações paramétricas na

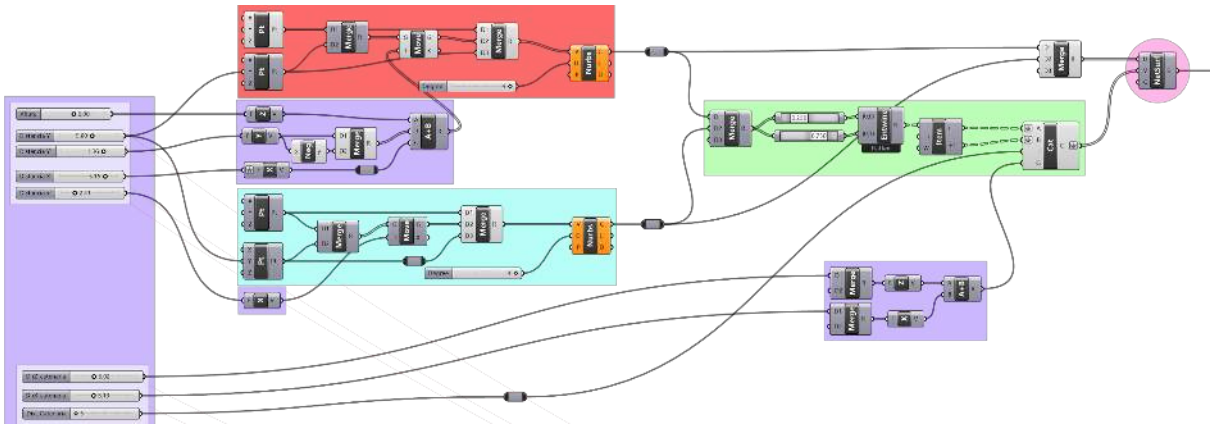
geometria da concha, entregando maior flexibilidade ao processo de modelagem. A figura 3 destaca a modelagem no *Grasshopper*.

Figura 2: Parâmetros variáveis do modelo.



Fonte: Autor.

Figura 3: Modelagem paramétrica da concha acústica no Grasshopper.

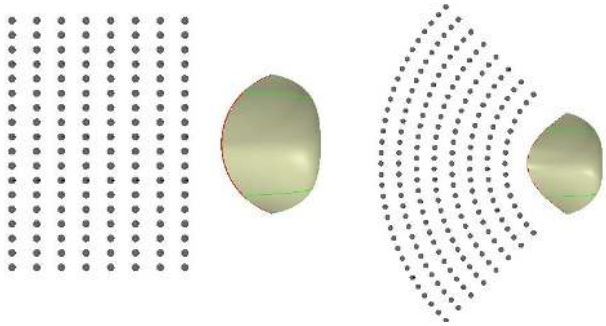


Fonte: Autor.

Definição do Processo analítico

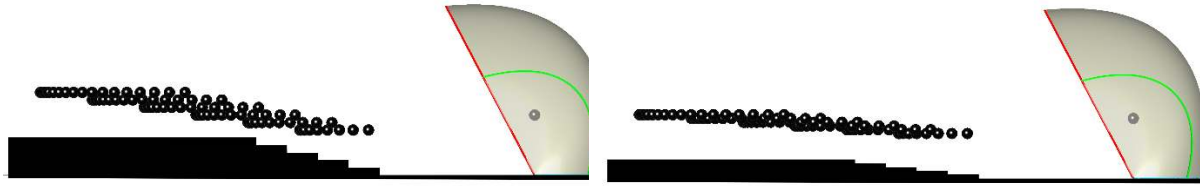
Para o processo analítico, foi inicialmente modelada a posição da cabeça das pessoas em duas configurações distintas de plateia: disposição linear, disposição semicircular. Nos dois primeiros casos, a plateia foi disposta sobre uma arquibancada com inclinação variável que também será considerada na otimização. A organização dos indivíduos na plateia seguiu um espaçamento de 0,6 m lateralmente e 1 m na direção frente/costas, enquanto a posição das cabeças foi padronizada a 1,2 m do solo, para representar pessoas sentadas (Figura 4 e 5).

Figura 4: Disposição das pessoas



Fonte: Autor.

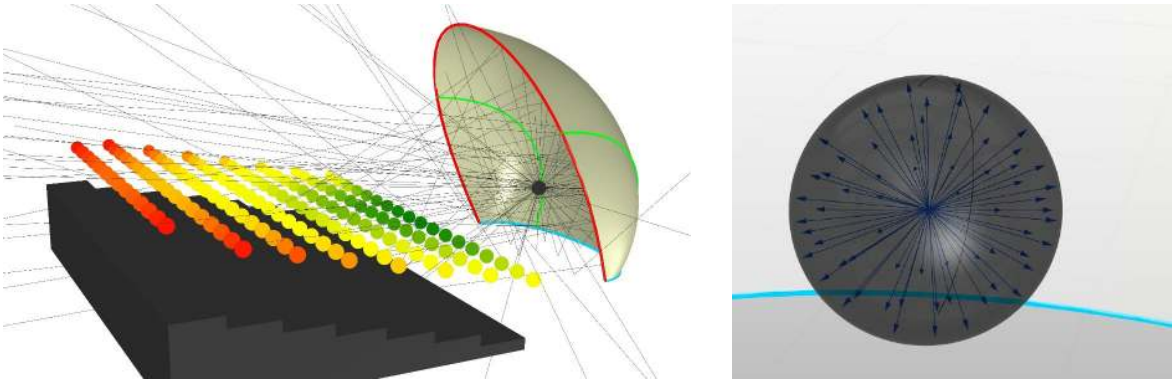
Figura 5: variação da inclinação da arquibancada



Fonte: Autor.

O traçado das reflexões usou o *plugin Ladybug* através do componente *Forward Raytracing,* considerando um máximo de três reflexões para evitar o impacto de reflexões tardias excessivas e manter a qualidade acústica. Para a simulação, um ponto emissor foi posicionado no palco, próximo à concha acústica, representando a fonte sonora. Esse ponto foi colocado a 1,7 m do chão, representando a altura de um orador ou músico em pé. A partir dessa fonte sonora, 65 vetores omnidirecionais foram emitidos, refletindo nas superfícies modeladas. Os vetores representam a propagação inicial do som e permitem a análise do comportamento acústico geométrico da concha em relação às diferentes configurações de plateia (Figura 6).

Figura 6: Posicionamento da fonte sonora e direções dos raios lançados



Fonte: Autor.

Definição do Processo de Otimização

Para o processo de otimização, foi utilizado o algoritmo evolutivo unicritério Galápagos, integrado ao *Grasshopper* que permite a busca de soluções ótimas por meio de mecanismos de seleção natural, como cruzamento e mutação, em um processo iterativo de geração de soluções. Este método é adequado para problemas de otimização nos quais não há conflitos significativos entre diferentes objetivos, o que justifica a escolha de um critério único em vez da abordagem multicritério.

No caso da otimização da concha acústica, o Galápagos manipula parâmetros de curvaturas, alturas e posicionamento da rede de curvas de controle que geram a forma da superfície da concha. Esses parâmetros são ajustados segundo a eficiência da reflexão acústica, conforme medido pela função de fitness. O processo de otimização envolve a manipulação de oito "genes", que são as variáveis independentes do modelo de otimização. A Tabela 01 apresenta a relação desses parâmetros. Já a Tabela 2 apresenta os critérios de otimização utilizados.

Tabela 1: Varáveis paramétricas otimizadas.

Elemento geométrico	Parâmetros	Domínio (m) Min-Max
Curva NURBS 1	Altura dos pontos de controle	3,00-10,00
	Desvio em x	0 – 5,00
Curva NURBS 2	Largura dos pontos de controle	0 - 10,00
	Desvio em Y	-3,00 – 3,00
Catenárias	Vetor força em x	0 -10,00
	Vetor força em z	0 -10,00
	Distância	3,00 – 10,00
Inclinação da plateia	Distância em altura	0,13 – 0,40

Fonte: Autor.

Tabela 2: Configuração da otimização.

Parâmetro	Valor
Função	Minimizar
População	50
População inicial	100

Fonte: Autor.

Escolha do Critério de Fitness

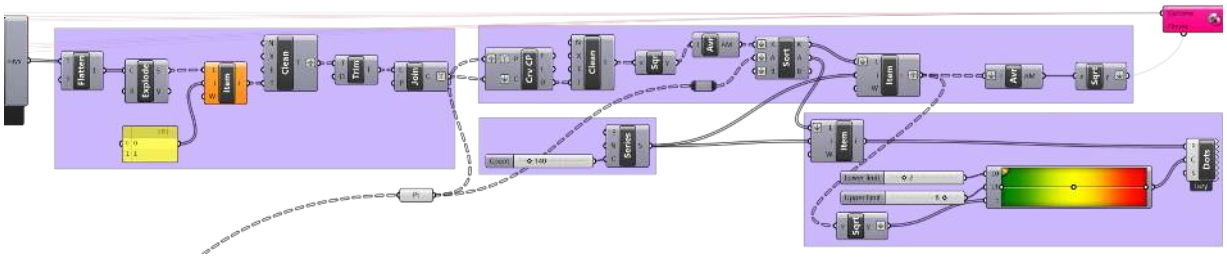
O critério de fitness adotado leva em conta duas das três primeiras reflexões sonoras, para evitar o impacto de reverberação excessiva e considerar a clareza do som. As reflexões foram avaliadas a partir da altura dos ouvidos da plateia. O fitness computa a menor distância entre cada reflexão e cada usuário da plateia. Após este processo computa a média quadrática,

estabelecendo o resultado para cada usuário e para cada solução. Dessa forma, a função leva em consideração as primeiras 140 pessoas presentes na plateia, com o objetivo de maximizar a distribuição homogênea da energia acústica no espaço ocupado pelos ouvintes. A média quadrática também penaliza soluções com assimetrias dos resultados incentivando resultados mais uniformes. O fitness é estabelecido conforme equação 1. A figura 7 mostra como se dá a função fitness no *Grasshopper.*

$$MQ = \sqrt[2]{\frac{\mu(d_1{}^2)+\mu(d_2{}^2)+\cdots\mu(d_{140}{}^2)}{140}} \qquad \text{Equação 1}$$

Aonde, MQ é média quadrática final; μ é média aritmética e d_x é a menor distância entre o usuário e as primeiras e segundas reflexões entre todas lançadas.

Figura 7: Modelagem da função fitness



Fonte: Autor.

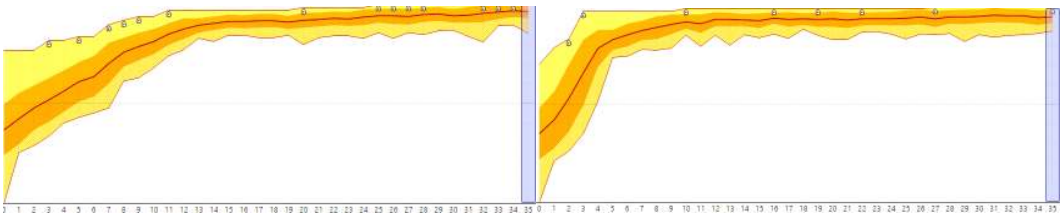
Avaliação e Comparação de Soluções

A avaliação das soluções geradas pelo algoritmo evolutivo foi realizada por meio da análise das distâncias das reflexões em relação aos ouvidos. As soluções que apresentaram menor distância quadrática média entre as reflexões e os usuários foram selecionadas como as mais eficientes em termos acústicos. Além disso também foi computado a variância das distâncias considerando cada usuário, como indicador de uniformidade.

Resultados

A otimização da concha acústica, conduzida através do algoritmo evolutivo unicritério Galápagos, gerou diversas soluções geométricas. O processo de otimização foi realizado ao longo de 30 gerações. O tempo total de execução do processo foi de aproximadamente 2 horas e 30 minutos para cada otimização. Ao final do processo, o algoritmo convergiu conforme mostrado na figura 8 para a configuração linear e configuração radial.

Figura 8: Convergência para a configuração linear (esquerda) e radial (direita).



Fonte: Autor.

As soluções obtidas foram avaliadas com base no critério de fitness, que levou em consideração a média quadrática da distância entre as reflexões e os ouvidos da plateia. Sendo os valores obtidos para cada usuário e para solução no geral. Posteriormente foi calcula a variância da população para analisar a uniformidade final das soluções.

A análise comparativa entre diferentes disposições da plateia revelou naturalmente resultados mais favoráveis na disposição radial, apesar da linear ocupar menos área. Quando a plateia foi posicionada em uma configuração mais radial, a concha acústica mostrou-se mais eficiente na distribuição das reflexões. A Tabela 3 resume as soluções otimizadas para diferentes disposições da plateia, destacando a uniformidade acústica medida pela variância. A configuração radial apresentou uma menor variação nas distâncias de reflexão de 8% em relação a linear e uma maior uniformidade na distribuição do som ao longo da plateia 23% maior em relação a linear. A altura dos degraus da arquibancada foi de 0,25m para configuração linear e 0,23m para a radial.

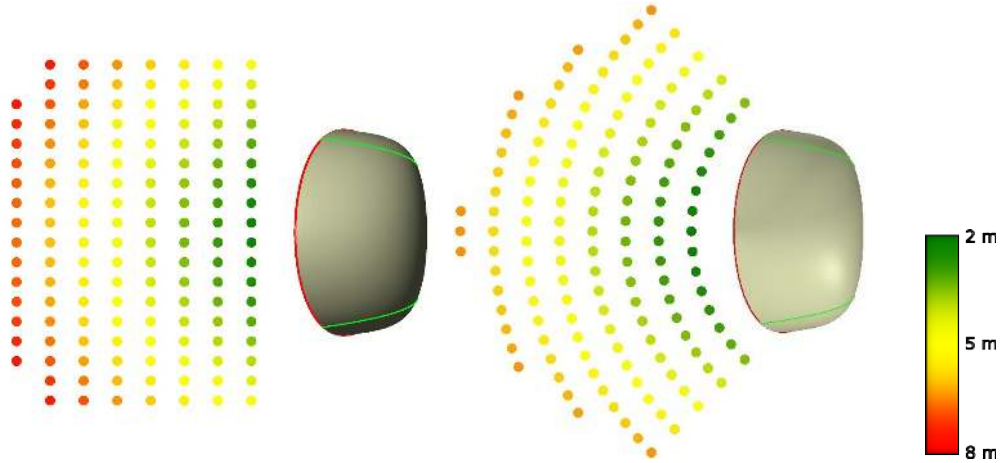
Tabela 3: Resumo das soluções otimizadas para diferentes disposições da plateia

Disposição da Plateia	Distância quadrática Média (m)	Distância Min-Max (m)	Uniformidade Acústica (variância) (m)	Área da concha final (m^2)	Altura de Inclinação da plateia (m)	Geração da solução ótima
linear	5,20	2,46 – 7,33	1,66	52,43	0,25	34
radial	4,76	2,35 – 6,37	1,27	51,59	0,23	35

A comparação entre as duas soluções ótimas revela que a solução com a plateia em configuração radial obteve a melhor eficiência acústica, com a menor distância quadrática média das reflexões e maior homogeneidade na distribuição do som. Ou seja, esta configuração gerou uma concha acústica cujas reflexões foram distribuídas de maneira mais uniforme. No entanto, a configuração linear, apesar de uma eficiência inferior, possui menor largura em relação a configuração radial, o que pode ter influenciado no resultado. A figura 9

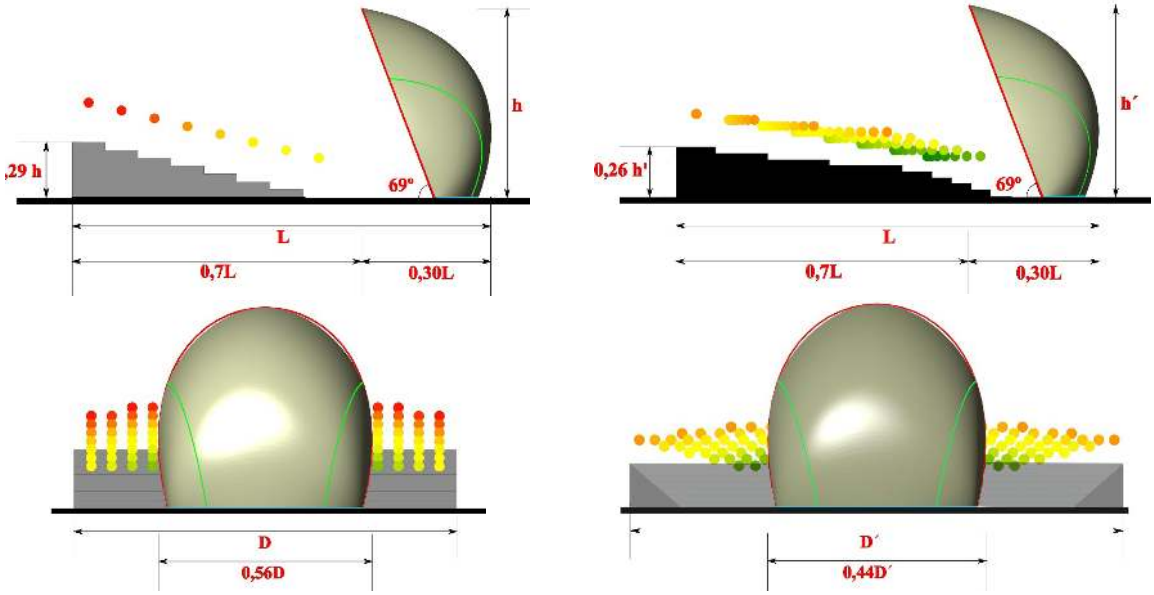
mostra a seleção dos 140 usuários para cada disposição e o resultado médio quadrático da distância por usuário. A posição linear possui os usuários mais mal posicionados. A figura 10 apresenta as relações geométricas encontradas nas conchas otimizadas. Embora a configuração resultante seja semelhante em ambas as otimizações, a relação dimensional da concha com a plateia difere em largura. Parâmetros fixos, como a distância entre fileiras e a largura da base da concha, provavelmente foram determinantes para a forma final.

Figura 9: Resultados da média quadrática para os melhores 140 assentos para configuração linear e radial.



Fonte: Autor.

Figura 10: Relações geométricas das conchas otimizadas e plateias para configuração linear (esquerda) e radial (direita).



Fonte: Autor.

Conclusões

Esta pesquisa propôs um método simplificado compatível com as primeiras fases de projeto, baseado em modelagem e otimização algorítmica, para buscar soluções geométricas para conchas acústicas em anfiteatros. A abordagem adotada permite gerar e analisar diferentes geometrias, considerando a interação entre superfícies refletoras e plateia, avaliando a distribuição do som com base nas duas primeiras reflexões sonoras.

O método simplificado consegue estabelecer com base em princípios elementares estimativas quantificáveis associadas ao desempenho. Os resultados indicaram que a configuração radial proporciona naturalmente uma distribuição mais uniforme das reflexões em comparação à linear, que, embora tenha apresentado redução na eficiência acústica, ocupa menos área.

A aplicação do Galápagos permitiu refinamento ágil e progressivo das soluções. Apesar disso, a abordagem unicritério é um limitador. Estudos futuros podem ampliar as variações paramétricas da concha e plateia, integrar otimização multicritério, incluindo métricas estruturais e visuais, além da análise subsequente de superfícies difusoras e absorventes para aprimoramento da qualidade sonora.

Referências

BOUVET, Giovanni Augusto et al. Computational design: Acoustic shells for ancient theatres. In: **Forum Acusticum**. 2020. p. 1581-1585.

CANAC, François. **L'Acoustique des théâtres antiques, ses enseignements**. 1967.

GU, SIJIA et al. **A phygital form-finding method for body-scale soundscape installation with flexible materials**. CAADRIA, 2024.

MARKELJ, Jernej et al. A simplified method for evaluating building sustainability in the early design phase for architects. **Sustainability**, v. 6, n. 12, p. 8775-8795, 2014.

ERMANN, Michael. **Architectural acoustics illustrated**. John Wiley & Sons, 2015.

PEREIRA, Matheus. *How Acoustic Shells Work and How to Design Them Effectively*. Disponível em: https://www.archdaily.com/889713/how-acoustic-shells-work-and-how-to-design-them-effectively. Acesso em: 21 fev. 2025.

SHTREPI, Louena et al. **Stage acoustics in an open-air performance acoustic shell**. 2023.

WENMAEKERS, R. H. C.; HAK, C. C. J. M.; VAN LUXEMBURG, L. C. J. On measurements of stage acoustic parameters: time interval limits and various source–receiver distances. **Acta Acustica united with Acustica**, v. 98, n. 5, p. 776-789, 2012.