

APLICAÇÃO DO DESIGN GENERATIVO NO DIMENSIONAMENTO DE BARREIRAS ACÚSTICAS

Generative Design Applied to the Dimensioning of Noise Barriers

Lucas Martins Cardoso ¹, Dariane Gomes Rocha ², Ricardo Prado Abreu Reis ³



PALAVRAS-CHAVE:

Barreiras acústicas;
Ruído de tráfego;
Design generativo;
Programação visual;
Algoritmos evolutivos;

KEYWORDS:

Noise barriers;
Traffic noise;
Generative design;
Visual programming;
Evolutionary algorithms.

RESUMO: O controle do ruído de tráfego rodoviário próximo a zonas habitadas pode ser alcançado com a instalação de barreiras acústicas. Entretanto, o processo de projeto desses elementos demanda muito tempo e energia do projetista em um ciclo de tentativa e erro. Visando automatizar parte dessa dinâmica, especialmente em sua fase inicial, este trabalho propõe um modelo de dimensionamento e avaliação de desempenho para barreiras acústicas, criado por meio de programação visual e do design generativo. Assim, a partir de um cenário hipotético – um terreno lindeiro à uma rodovia – buscou-se encontrar os pontos com a maior atenuação sonora possível após a inserção de uma barreira fina, semi-infinita e em condições de campo livre. As análises, realizadas com um *evolutionary solver*, foram divididas por altura da barreira e tipo de fonte sonora (puntiforme e linear). Os valores da atenuação foram calculados separadamente para cada altura do receptor e banda de frequência da onda sonora (de 63 Hz a 8 kHz). Para efeito de simplificação, as características materiais e variáveis climáticas não foram consideradas. Os resultados demonstrados nos gráficos correspondem às expectativas anteriores às simulações – quanto mais elevado o receptor em relação à barreira, menor a atenuação sonora – comprovando a eficiência do método utilizado, e os melhores valores puderam ser selecionados facilmente, com a visualização das soluções feita em tempo real.

ABSTRACT: Controlling road traffic noise close to inhabited areas can be achieved by installing sound barriers. Nonetheless, the design process of such elements requires large amount of time and energy from the designer on a trial and error cycle. Aiming to automate part of this dynamic, especially in its early stages, this paper proposes a sizing and performance evaluation model for noise barriers, created through visual programming and generative design. Thus, from a hypothetical scenario – a terrain adjacent to a highway – it was sought to find the points with the greatest possible attenuation after the insertion of a thin and semi-infinite barrier in free field conditions. Performed with an *evolutionary solver*, the analyses were organized by the barrier height and type of sound source (point or line sources). Attenuation values were calculated separately for each receiver height and frequency octave band (from 63 Hz to 8 kHz). For simplification purposes, material characteristics and weather effects were not considered. The results shown in the graphs correspond to expectations prior to the simulations – the higher the receiver in relation to the barrier, the lower the sound reduction – proving the efficiency of the method used. The best values could be easily selected and the visualization of the solutions made in real time.

* Contato com os autores:

Publicado em 12 de maio de 2023

¹ e-mail: lucasmartins.arq@gmail.com (L. M. Cardoso)

Arquiteto e Urbanista, Especialista em Construção Civil pela Universidade Federal de Goiás (UFG)

² e-mail: darianegomes@outlook.com (D. G. Rocha)

Engenheira Civil, Mestranda do Curso de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal de Goiás (PPG-GECON/UFG)

³ e-mail: ricardo_reis@ufg.br (R. P. A. Reis)

Eng. Civil, Doutor, Prof. do Curso de Engenharia Civil e Ambiental (EECA) e do curso de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil da Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás (PPG-GECON/UFG)

1. INTRODUÇÃO

Com a expansão desordenada dos centros urbanos é comum a ocupação por zonas habitacionais próximo a áreas geradoras de intenso ruído aéreo, como indústrias e vias de tráfego rodoviário. Uma das soluções mais empregadas para atenuar a energia sonora incidente nas regiões habitadas é a instalação de barreiras físicas entre o receptor e a fonte da onda sonora em questão.

Para o projeto de barreiras acústicas, é de interesse realizar estudo do ambiente acústico ao longo da via, incluindo a caracterização de fontes de ruído e da distribuição populacional próxima (HUANG et al., 2020). Ainda, para a otimização do projeto, devem ser levantadas informações sobre fatores intervenientes, tais como: local de instalação, materiais construtivos, custos, (HUANG et al., 2020), distância da barreira ao tráfego, tipo de pavimento, condições do tráfego e velocidade do vento (GIRALDO-CLAVIJO e YANG, 2020).

No campo da acústica em construção civil há métodos de cálculo e projeto já consolidados para a implementação de tais elementos construtivos. No entanto, esse processo pode demandar muito trabalho manual e repetitivo por parte do projetista de modo a alcançar os objetivos necessários.

Uma vez que as barreiras acústicas têm como princípio de funcionamento a difração sonora, o projeto deve partir da identificação e caracterização da fonte de ruído. Em seguida, definem-se a área a ser protegida e os critérios de desempenho desejados para a barreira. Tendo sido estabelecidos esses parâmetros, prossegue-se à predição da solução inicial por meio do cálculo da atenuação sonora e, não sendo satisfatório o resultado, outras simulações devem ser realizadas. Esse método exaustivo pode ser parcialmente automatizado com o uso de planilhas ou softwares específicos para projetos de acústica, mas como afirmam Monks, Oh e Dorsey (2000), ainda é um processo oneroso de tentativa e erro, fazendo-se necessário o constante ajuste dos dados de entrada (variáveis). Além disso, há apenas um pequeno número de hipóteses e iterações disponíveis ao trabalho do projetista (CRUZ et al., 2021).

Considerando as diversas tentativas de inovação tecnológica no setor da construção civil, em especial as que abordam as fases de desenvolvimento de projeto, a adoção do design (ou projeto) generativo tem o potencial de reduzir o volume de tarefas manuais do projetista, automatizando partes do processo de projeto (ZHANG, LIU e WANG, 2021).

Um sistema generativo busca, a partir de instruções e critérios bem definidos, a geração de múltiplas soluções para o mesmo problema, podendo estas resultarem na otimização de determinado aspecto ou na produção de alternativas distintas entre si (CELANI, 2011). Logo, são três as etapas principais do design generativo: gerar diferentes soluções, avaliá-las considerando as restrições impostas e, por fim, unir os parâmetros das melhores soluções geradas para gerar novas opções mais otimizadas (VELOSO et al., 2020).

As ferramentas disponíveis para essa abordagem fornecem ao usuário maior controle sobre o processo projetual, de modo que a inserção e ajustes necessários nos parâmetros estabelecidos são realizados com mais facilidade e rapidez. Além disso, é possível pré-visualizar a solução gerada em tempo real e, somada ao emprego de algoritmos evolutivos, a geração e seleção dos resultados que melhor atendem aos requisitos definidos anteriormente é feita de modo automatizado.

As vantagens do emprego do design generativo representam um ganho de produtividade e eficiência quando aplicadas ao projeto de barreiras acústicas, especialmente nas fases iniciais do processo. No entanto, para que tal uso seja, de fato, proveitoso e seus resultados confiáveis, é imprescindível uma compreensão mais ampla dos fundamentos que coordenam os sistemas paramétricos e generativos. Semelhantemente, os princípios físicos e métodos matemáticos norteadores no dimensionamento das barreiras fornecem elementos suficientes para construir regras e critérios que alimentam a geração de sua geometria básica através da programação visual e de algoritmos evolutivos. Logo, o estudo desses dois

assuntos – ainda pouco explorados simultaneamente – além de traçar um caminho metodológico para esse tipo de abordagem, cria uma base para aplicações futuras em outros campos da acústica.

2. OBJETIVO

Este trabalho tem por objetivo propor um modelo de dimensionamento e avaliação de desempenho de barreiras acústicas, criado por meio de uma linguagem visual de programação e do design generativo, considerando a avaliação a partir de um cenário hipotético – um terreno lindeiro à uma rodovia – no qual busca-se encontrar os pontos com a maior atenuação sonora possível após a inserção da barreira.

3. CONTEXTUALIZAÇÃO

O setor da construção civil, em toda sua cadeia produtiva, tem vislumbrado incessantes tentativas de inovação tecnológica. Talvez a mais discutida delas seja o BIM (*Building Information Modeling*). E nesse contexto, onde boa parte dos profissionais ainda o desconhece – ou conhece rasamente – é até compreensível o fato de que haja muitos conceitos envolvendo o design generativo sendo mal interpretados e mal utilizados. Assim, algumas definições se fazem necessárias para tornar menos turvo o ambiente dessa discussão.

O primeiro e mais simples conceito é o de Projeto Paramétrico que, de cujo nome se pode deduzir, requer um parâmetro. Segundo o dicionário Lexico.com, parâmetro é “um fator numérico ou outro fator mensurável que compõe um conjunto que define um sistema ou define as condições de sua operação” (OXFORD UNIVERSITY PRESS, 2020). Sendo assim, trata-se de algo pontual ou, ainda, de um valor numérico do qual o projeto passa a ser dependente, podendo então ser chamado de paramétrico. De forma geral, a operabilidade dos softwares BIM se baseia nesses valores e em restrições para grupos de parâmetros, que são a informação inerente ao processo.

A segunda ideia envolve os sistemas generativos, que podem ser usados a fim de se obter para um problema múltiplas soluções em potencial, como descreveu Mitchell (1975). Ainda, se algo é “capaz de produzir ou criar” outra coisa (CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS, 2020), ou seja, gerar, então pode ser chamado de generativo. Uma definição plausível para Design Generativo é a de que se trata de “um paradigma de design que emprega descrições algorítmicas que são mais autônomas que o Projeto Paramétrico” (CAETANO; SANTOS e LEITÃO, 2020). Tais descrições são as regras, instruções e fórmulas que comandam as relações entre os parâmetros, oferecendo um vasto espectro de possibilidades como, por exemplo, o uso de algoritmos genéticos.

Segundo Nagy (2017), o algoritmo genético tem origem no trabalho de Alan Turin intitulado *Computing Machinery and Intelligence*, de 1950, no qual ele resgata os princípios da evolução natural sugerindo uma contribuição deste no desenvolvimento de máquinas artificialmente inteligentes. Nagy (2017) afirma que o funcionamento desse algoritmo se baseia em quatro operadores básicos: geração, seleção, cruzamento e mutação. A partir desses, surgem então os softwares conhecidos como *evolutionary solvers*, muito utilizados atualmente em processos de otimização de um projeto. Essas ferramentas geram inúmeras alternativas fundamentadas em critérios predefinidos, de modo exaustivo, entregando ao projetista os melhores resultados – ou seja, que atendem às regras estabelecidas.

Sob essa perspectiva de geração de múltiplas respostas, pode-se criar a falsa impressão de que seja algo inerente ao desenvolvimento tecnológico. No entanto, não se trata de um conceito novo (MELLO, 2017a, 2017b). Para Mitchell (1975), até mesmo Aristóteles já trazia à luz essa ideia em sua obra *Política*, na qual ele faz uma analogia entre a constituição de uma cidade e a formação de várias espécies de animais, resultado das combinações dos distintos órgãos que os compõem. Ainda assim, pode-se associar

ao sistema generativo a grande capacidade de processar informações dos computadores atuais, de modo a tornar a exploração das alternativas potenciais a mais exaustiva e automatizada possíveis.

Nesse contexto, deve-se distinguir o último conceito aqui abordado: o Projeto Algorítmico. De acordo com Caetano, Santos e Leitão (2020), este pode ser considerado um subconjunto do design generativo, uma vez que ambos operam através do uso de algoritmos. No entanto, a principal diferença seria a habilidade (ou falta dela) de rastrear a correlação entre determinado resultado e seu algoritmo originário. No primeiro caso, esse rastreamento é mais simples de ser executado, enquanto o segundo é mais bem caracterizado pela “não rastreabilidade do script gerador” (CAETANO, SANTOS e LEITÃO, 2020). Desse modo, por facilitar a identificação de partes do código gerador original, o Projeto Algorítmico permite maior grau de controle e manipulação dele.

3.2 BARREIRAS ACÚSTICAS: PARÂMETROS DE PROJETO

Segundo Bistafa (2018, p. 212) “barreira acústica é qualquer estrutura ou obstáculo que impede a visão da fonte pelo receptor”, ou seja, um elemento físico que interrompe o caminho direto percorrido pelo som desde o ponto onde foi gerado até atingir o observador. O fenômeno da difração da onda sonora é o princípio inerente à eficácia de uma barreira e, de modo simplificado, traduz a capacidade de tal onda de contornar objetos. Esse efeito está diretamente relacionado ao comprimento de onda – e inversamente proporcional à frequência – do som incidente e é mais evidente nas baixas frequências. Assim, quanto maiores as dimensões do obstáculo mais vasto será o espectro de frequências dentro da zona de sombra acústica (área protegida do ruído atrás da barreira).

Além das propriedades da onda sonora e geometria da barreira, fatores relacionados à localização da fonte e do receptor, materiais constituintes, bem como variáveis do entorno também contribuem no cálculo da atenuação do ruído. No momento em que o som alcança o obstáculo, parte da energia incidente é refletida, enquanto outra parcela continua sendo propagada diretamente sobre o objeto (sofrendo ou não difração na borda) e, ainda, uma fração é transmitida através do mesmo. De acordo com Kurze e Anderson (1971), essa transmissão pode ser desconsiderada no cálculo, sem que o desempenho seja prejudicado, se a barreira tiver uma densidade superficial de pelo menos 4 lb/ft^2 – ou 20 kg/m^2 .

No que diz respeito ao local de implantação, as características materiais do solo e de outras construções nas proximidades podem influenciar na reflexão e absorção da onda sonora em suas superfícies. Assim como ocorre com a própria barreira, a geometria desses elementos interfere para uma maior ou menor atenuação, a depender de como ocorrem as reflexões. Uma situação que pode ocasionar a perda da eficiência é quando são instaladas duas barreiras paralelas e opostas em relação à fonte sonora, gerando múltiplas reflexões entre elas, como destaca Xiao et al. (2020).

A presença de vegetação densa no entorno é outro fator que pode resultar em uma pressão sonora menor no receptor, uma vez que a folhagem e troncos podem atuar na absorção e dispersão do som. Além disso, as condições da atmosfera no local também colaboram, positivo ou negativamente, com a eficácia da barreira. Esses aspectos ambientais são a temperatura do ar e a velocidade do vento. A variação em um destes provoca a alteração na velocidade do som, bem como na sua direção de propagação, resultado da refração na onda. Logo, a inclusão simultânea de todos esses fatores no cálculo significa um grande incremento em sua complexidade.

3.3 ABORDAGENS SIMILARES

A metodologia de projeto com o uso de um sistema generativo aliado à programação visual abre caminhos para uma vasta gama de possíveis aplicações. A lógica do processo, buscando eliminar as etapas de tentativa e erro, se mantém a mesma independente do objeto a ser estudado. Assim, não só a acústica

arquitetônica, mas também o conforto térmico em edificações, estruturas (em diversas escalas) ou qualquer outro campo no qual se proponha uma análise sistemática de soluções baseadas em critérios objetivos – parâmetros. Norton (2013) realizou um estudo de otimização geométrica para um auditório na Universidade do Sul da Califórnia (USC), onde os critérios norteadores foram os valores do tempo de reverberação, razão de baixos (do inglês, *bass ratio*) e clareza sonora. As ferramentas para modelagem e geração das soluções foram as mesmas utilizadas no presente trabalho, como mostra a Figura 1. Já Spaeth e Menges (2011) desenvolveram um algoritmo evolutivo genético que foca na síntese da geometria, na atribuição de propriedades materiais e na avaliação da performance acústica de salas – como estudo de caso, foram utilizadas a Filarmônica de Berlim e a Ópera Semper, na cidade de Dresden, Alemanha. A Figura 2 ilustra esse último caso.

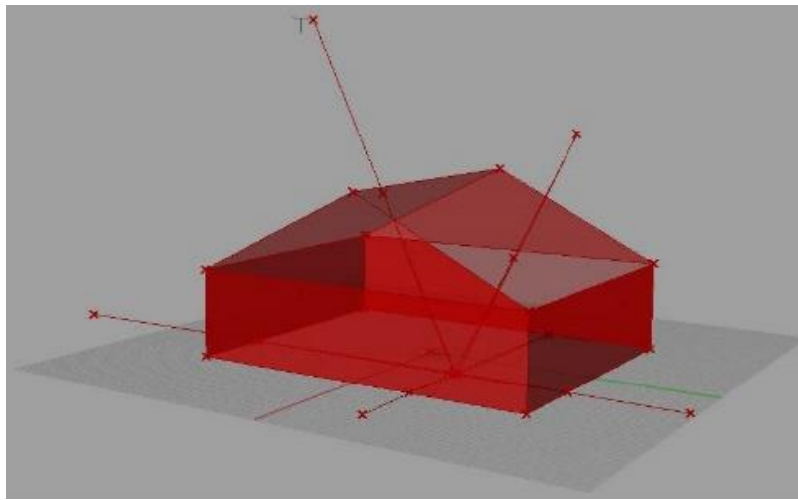


FIGURA 1: Pontos de reflexão na parte interna da cobertura do auditório.
FONTE: Norton (2013).

Semper Opera, Dresden

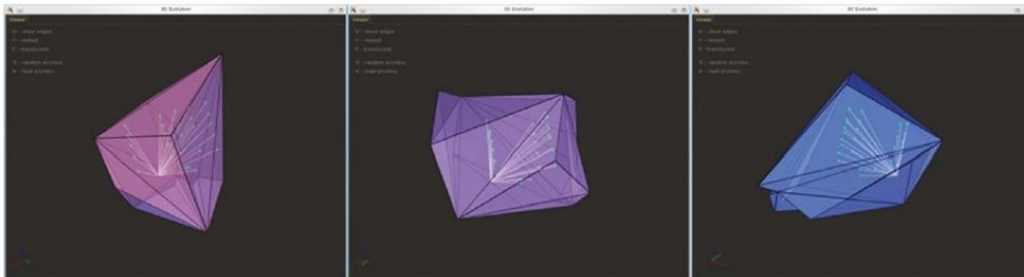


Figure 4
Left: frame 200, $q=0.70$.
Middle: frame 2500, $q=0.73$.
Right: frame 7300, $q=1.0$

FIGURA 2: Otimização do tempo de reverberação da sala em função do coeficiente de absorção das superfícies, com pouca alteração na geometria.
FONTE: Spaeth e Menges (2011).

Fora da acústica, o projeto de proteções solares para fachadas também representa um bom exemplo de aplicação, uma vez que toma como dados de partida as várias posições relativas do sol na abóbada celeste. Assim, o trabalho apresentado por Venâncio (2020) buscou elaborar um modelo para elementos de sombreamento que, ao mesmo tempo em que diminuíssem a incidência da radiação solar direta através da janela, maximizavam a iluminância do ambiente interno, conforme mostra a Figura 3. Para tanto, por tratar-se de um sistema com mais de uma variável a ser otimizada, foi adotado o plugin *Octopus*, um *evolutionary solver* para o *Grasshopper* que é capaz de lidar com diversas variáveis simultaneamente. Desse modo, percebe-se o potencial aumento de performance que esse tipo de abordagem pode agregar ao processo projetual, em especial se empregado em suas fases mais iniciais de desenvolvimento.

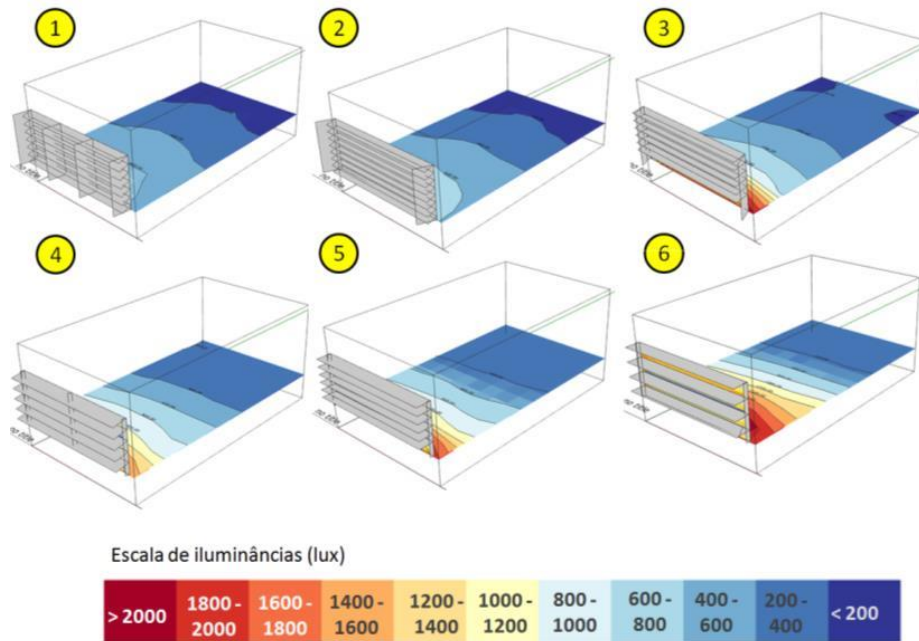


FIGURA 3: Casos selecionados para simulações anuais.
 FONTE: Venâncio (2020).

4. METODOLOGIA

As etapas de desenvolvimento deste estudo foram estruturadas em quatro partes principais, como ilustra o fluxograma da Figura 4. A separação apresentada é apenas didática e não limitou o fluxo de atividades a uma forma estritamente linear e sequencial, havendo entre essas uma sobreposição em alguns momentos.

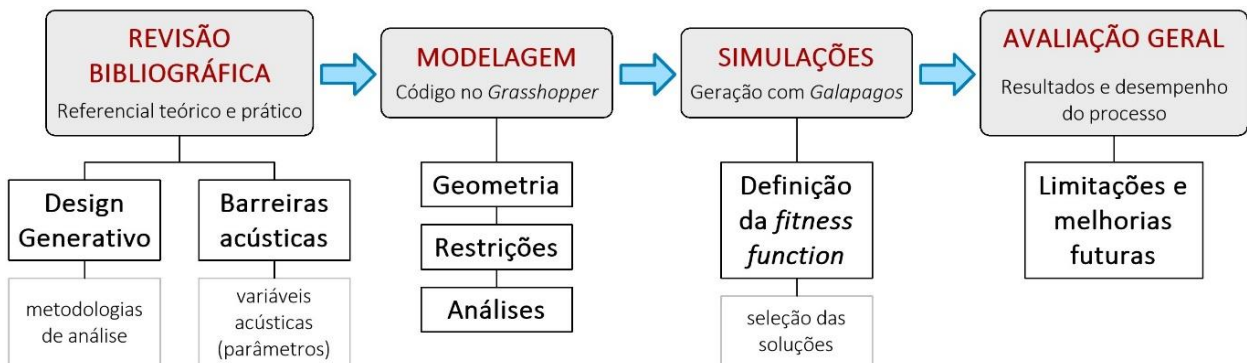


FIGURA 4: Fluxograma com as etapas principais do trabalho.
 FONTE: Autoria própria.

Com a finalidade de se alcançar os objetivos apresentados nesse trabalho, foi considerada no estudo uma barreira fina, semi-infinita e em condições de campo livre. Isso quer dizer que a estrutura pode ser tratada como um único plano, sem espessura, na qual a difração e transmissão do som só podem ocorrer a partir de sua borda superior e não lida com as reflexões da onda no solo. Assim, de modo a simplificar a análise e modelagem da barreira, assumiu-se apenas a influência dos parâmetros diretamente relacionados à geometria da mesma, não contemplando as características de materiais e os possíveis efeitos do ambiente externo – como mencionado no item 3.2. Tal simplificação é satisfatória para essas condições, conforme apresentou Maekawa (1968) no seu estudo sobre a difração em barreiras acústicas, baseado em dados experimentais.

Isto posto, para delimitar as análises desenvolvidas no modelo computacional, definiu-se um cenário hipotético: em um dado terreno, lindeiro à uma rodovia, deseja-se criar uma barreira acústica a fim de reduzir o ruído oriundo do tráfego automotivo. Assim, a partir dos pontos com a maior atenuação seria possível identificar os melhores locais para uma futura edificação habitacional. A fonte sonora foi então situada no eixo longitudinal da rodovia, não tendo sua posição alterada nas simulações, tanto no caso de ser considerada puntiforme quanto linear. Já o ponto que representa o receptor foi restringido aos limites do terreno, podendo variar suas coordenadas ao longo dos eixos vertical e horizontais, respeitando o recuo mínimo frontal de 15 m, definido pela Lei nº 13.913, de 25 de novembro de 2019, como faixa não edificável (BRASIL, 2019). A Figura 5 ilustra esse cenário no ambiente tridimensional do modelo.

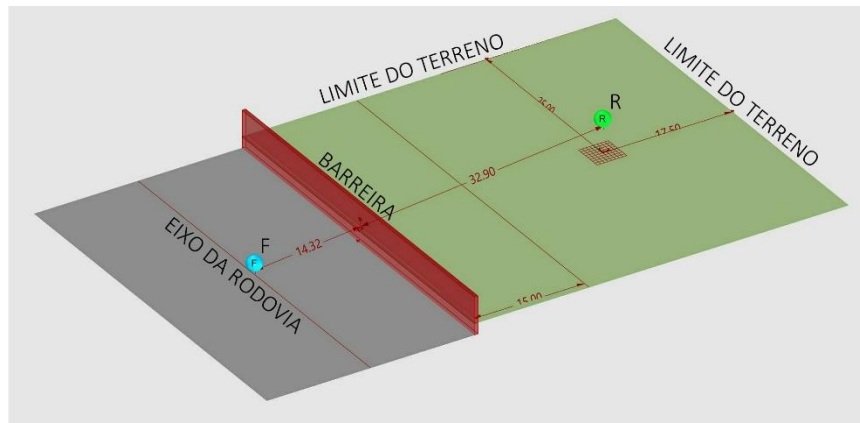


FIGURA 5: Perspectiva do cenário hipotético modelado, mostrando o trecho da rodovia, a barreira, o terreno, a fonte sonora (F) e o receptor (R).

FONTE: Autoria própria.

Com o cenário criado, foi analisada a atenuação sonora em duas situações para efeito de comparação: 1) considerando a fonte como puntiforme e 2) fonte linear. É sabido, como afirma Silva (2009), que a propagação do som em ambos os casos se dá de modos distintos, sendo o primeiro por meio de frentes de ondas esféricas – que poderia representar um veículo isolado na pista – e o segundo por frentes cilíndricas – caso mais adequado ao tráfego não homogêneo na rodovia. Isso implica diferentes níveis de pressão sonora no receptor em relação a cada tipo de fonte. Enquanto, para a fonte pontual, esse nível é reduzido em 6 dB à medida em que a distância até a fonte é duplicada, na linear esse valor é de 3 dB. Assim, no cálculo da atenuação da barreira foram adotadas duas equações, sendo que para o primeiro caso foi utilizada a fórmula apresentada por Hannah (2007a, 2007b), descrita como o Método de Maekawa (1968), dada pela Equação 1:

$$A_{\text{barreira}} = 10 \log (3 + 40 \delta / \lambda) \quad \text{Eq. [1]}$$

Em que:

A_{barreira} = atenuação da barreira (dB);

δ = (a+b-c), sendo a diferença entre as distâncias do caminho percorrido pela onda difratada e o caminho direto entre a fonte e o receptor (m);

λ = comprimento da onda sonora (m).

Para a segunda situação, com fonte linear e conforme demonstrado por Kawakita (2008), a atenuação é dada pela Equação 2:

$$A_{\text{barreira}} = 10 \log (20N + 3) - (20N)^{0.3} \quad \text{Eq. [2]}$$

Em que:

N = número de Fresnel.

O número de Fresnel N é uma variável adimensional que estabelece uma relação entre o caminho percorrido pela onda difratada, até atingir o receptor, e o caminho direto entre este e a fonte sonora, sendo dado por meio da Equação 3:

$$N = \frac{2}{\lambda}(a + b - c) \quad \text{Eq. [3]}$$

Em que:

- a** = distância entre a fonte e o topo da barreira (m);
- b** = distância entre o topo da barreira e o receptor (m);
- c** = distância entre a fonte e o receptor (m).

A Figura 6 ilustra essa situação.

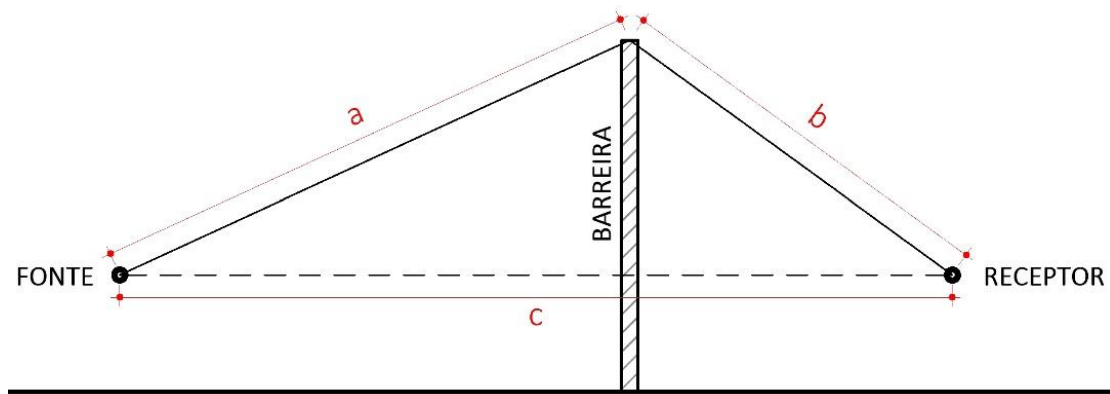


FIGURA 6: Esquema da barreira com as distâncias a , b e c .
FONTE: Autoria própria.

4.1 DEFINIÇÃO DO MODELO COMPUTACIONAL

A construção do modelo foi realizada por programação visual, utilizando-se a plataforma do software *Grasshopper*. Esse tipo de abordagem requer um processo mais detalhado de cada etapa e elemento a ser modelado – se comparado às formas mais usuais de modelagem tridimensional – o que resulta em um maior controle sobre a definição. No entanto, não é necessário que o usuário escreva linhas de código, uma vez que o *script* é elaborado a partir de parâmetros e componentes predefinidos. Tais componentes executam determinada tarefa a partir dos dados de entrada – os *inputs* – e retornam outras informações como dados de saída – os *outputs* – que podem ser usados para novas funções. O esquema na Figura 7 demonstra a forma de operação básica desse método.

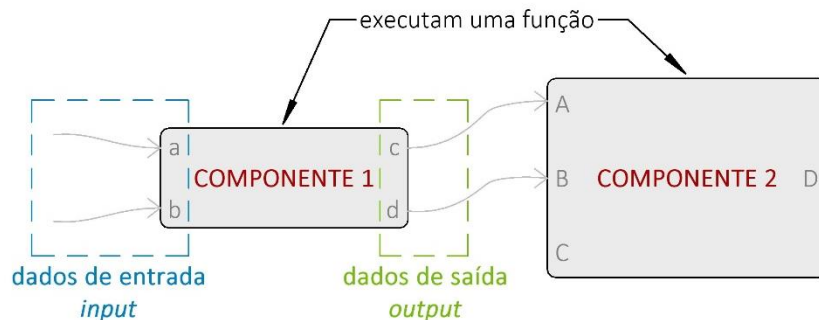


FIGURA 7: Esquema de funcionamento dos componentes por meio de programação visual.
FONTE: Autoria própria.

Assim, a definição do modelo da barreira foi organizada em grupos de componentes, a fim de facilitar a identificação de cada elemento e sua função bem como os ajustes necessários às posteriores análises. Vale ressaltar que todos esses elementos estão interconectados, de modo que a alteração ou remoção de um afeta todo o conjunto, com exceção dos componentes cujo papel seja apenas o de visualizar algum dado. A Figura 8 mostra a configuração final do *script* do modelo, com sua estruturação em grupos dispostos conforme o esquema na Figura 9, onde foram enumerados segundo suas tarefas principais.

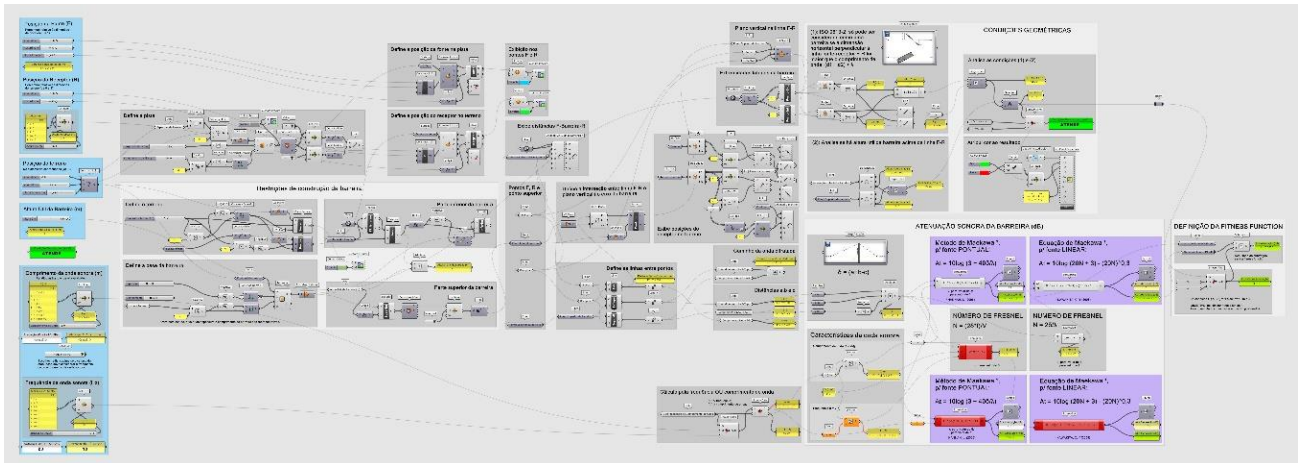


FIGURA 8: Visão geral do script (código) gerador do modelo, no ambiente de trabalho do Grasshopper.

FONTE: Autoria própria.

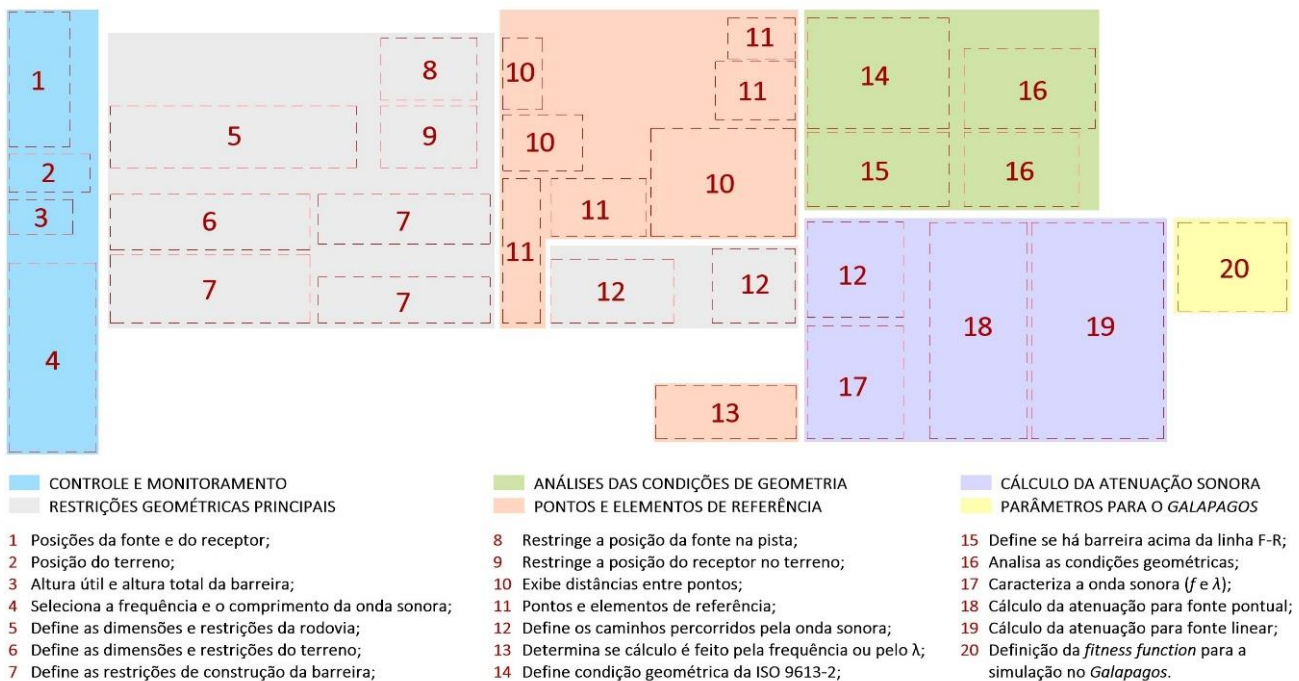


FIGURA 9: Esquema da definição organizada em grupos de componentes.

FONTE: Autoria própria.

No grupo de controle e monitoramento estão os principais parâmetros que alimentam o modelo, desde as posições da fonte e receptor, altura da barreira e as características da onda sonora. Tais dados influenciam diretamente na geometria da barreira e na sua atenuação. Nesse mesmo conjunto de componentes também se encontram painéis que retornam as distâncias entre os elementos e os valores obtidos a partir da configuração definida para esses dados de entrada. Os resultados neles exibidos se

referem a cada ajuste manual feito nesses *inputs*, não se tratando ainda do produto final das simulações realizadas com um *evolutionary solver*. A Figura 10 mostra o arranjo dos parâmetros e os tipos de componentes utilizados para controlá-los.

Assim, os elementos identificados como um *number slider* nada mais são do que um modo de selecionar um valor específico em um conjunto de números. Tomando a posição da fonte sonora (F) como exemplo, cada *number slider* define uma coordenada no espaço do modelo, podendo ser modificada a qualquer momento. Esse componente pode ser configurado conforme a necessidade e adotado para distintas finalidades. Como mencionado, é possível selecionar o valor para uma coordenada bem como indicar qual item do painel fonte de dados deverá ser utilizado. O painel tem o papel de exibir as informações de determinado elemento, mas também serve como origem de valores predefinidos, como foi o caso da altura do receptor e da frequência da onda sonora.

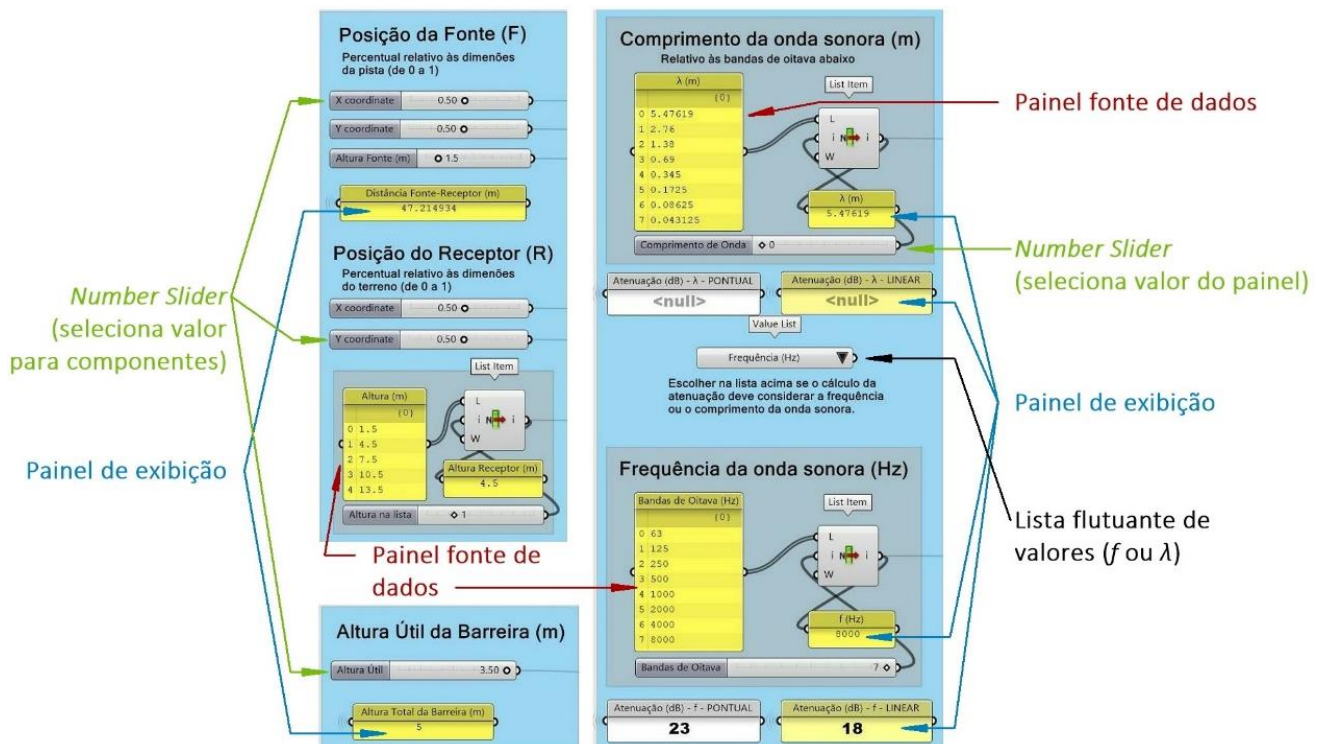


FIGURA 10: Principais elementos do grupo de controle e monitoramento.

FONTE: Autoria própria.

Desse modo, em vez de o cálculo ser realizado para muitos valores próximos entre si, os resultados ficam delimitados a números mais efetivos. No caso da altura do receptor, os itens do painel indicam sua posição – 1,50 m em relação ao piso, conforme preconiza a norma NBR 10.151 (ABNT, 2019) – adotando-se um pé-direito teórico de 3 m e sendo considerados o térreo mais quatro pavimentos. Similarmente, a onda sonora foi classificada em faixas de frequência, conhecidas como bandas de oitava, cujos valores centrais variam entre 63 Hz e 8 kHz. Para conferir mais flexibilidade ao código do modelo, este foi construído de modo a permitir a seleção, por meio de uma lista flutuante, de qual grandeza o usuário deseja utilizar – comprimento de onda ou frequência. A lista com os comprimentos de onda apresenta valores correspondentes aos das bandas de oitava utilizadas.

No que se refere à altura da barreira, limitou-se um conjunto de números reais entre 0,0 m e 3,5 m, uma vez que em casos reais seria difícil adotar alturas maiores que esta, mesmo que isso resulte em maior atenuação. Isso foi definido para a altura útil da barreira, que representa a porção desse elemento acima do nível do terreno onde foi localizado o receptor. Para as simulações neste trabalho, o desnível do lote acima da pista foi estabelecido em 1,5 m, podendo ser ajustado livremente à medida em que isso se faça necessário. Somando, então, esses dois valores, obtém-se a altura total da barreira.

Outro grupo importante no código do modelo é o que analisa o atendimento às suas condições de geometria. Segundo a norma ISO 9613-2 (1996), “um objeto só é considerado como obstáculo quando sua dimensão horizontal perpendicular à linha FR for maior que o comprimento de onda: $(d_1 + d_2) > \lambda$.” Essa restrição foi adicionada ao modelo criado e foi chamada de Condição 1. A Figura 11 compara a representação das distâncias d_1 e d_2 , como apresentadas na norma, e a maneira como foram traduzidas no modelo. Como esse trabalho pressupõe uma barreira semi-infinita e, dentre os comprimentos de onda analisados, o maior deles é de 5,47 m, a Condição 1 será sempre atendida, a partir das configurações atuais.

A segunda restrição de caráter geométrico, a Condição 2, garante que haja a interrupção da linha FR pela barreira, uma vez que a mesma só é eficaz nessa situação. O modo como foi construído o modelo não impede que sejam gerados resultados numéricos satisfatórios para a atenuação, mas que, ao mesmo tempo, criem cenários ineficazes no mundo real, que não atendem tal condição. Por isso, como mostra a Figura 12, foi criado um painel que exhibe o atendimento (ou não) às condições 1 e 2, simultaneamente. Desse modo, quando uma delas não é satisfeita, é retornado um aviso com o texto “não atende”, na cor vermelha. Na Figura 13 pode ser observado como tais restrições e condições foram relacionadas entre si na construção do código gerador do modelo.

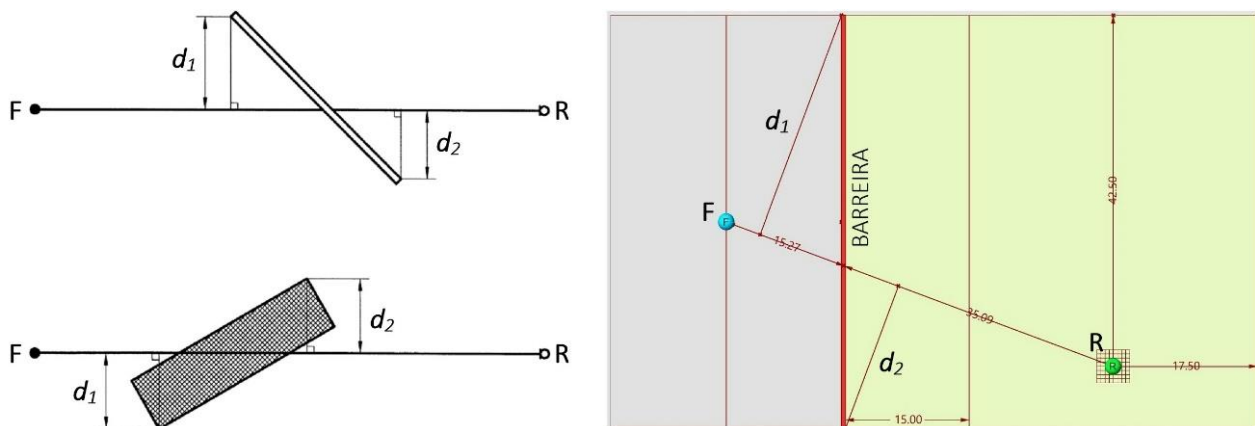


FIGURA 11: À esquerda, vista em planta de dois obstáculos entre a fonte (F) e o receptor (R). À direita, a barreira modelada e suas projeções sobre a linha FR, conforme a Condição 1.

FONTE: Adaptado da ISO 9613-2 (1996).

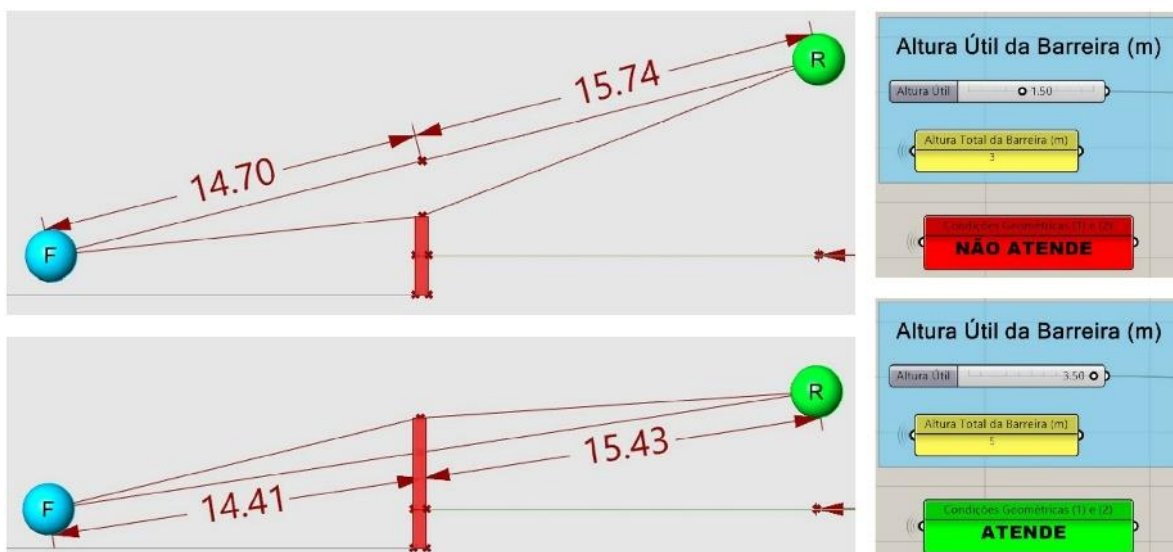


FIGURA 12: Vista lateral com as situações que atendem ou não à Condição 2.

FONTE: Autoria própria.

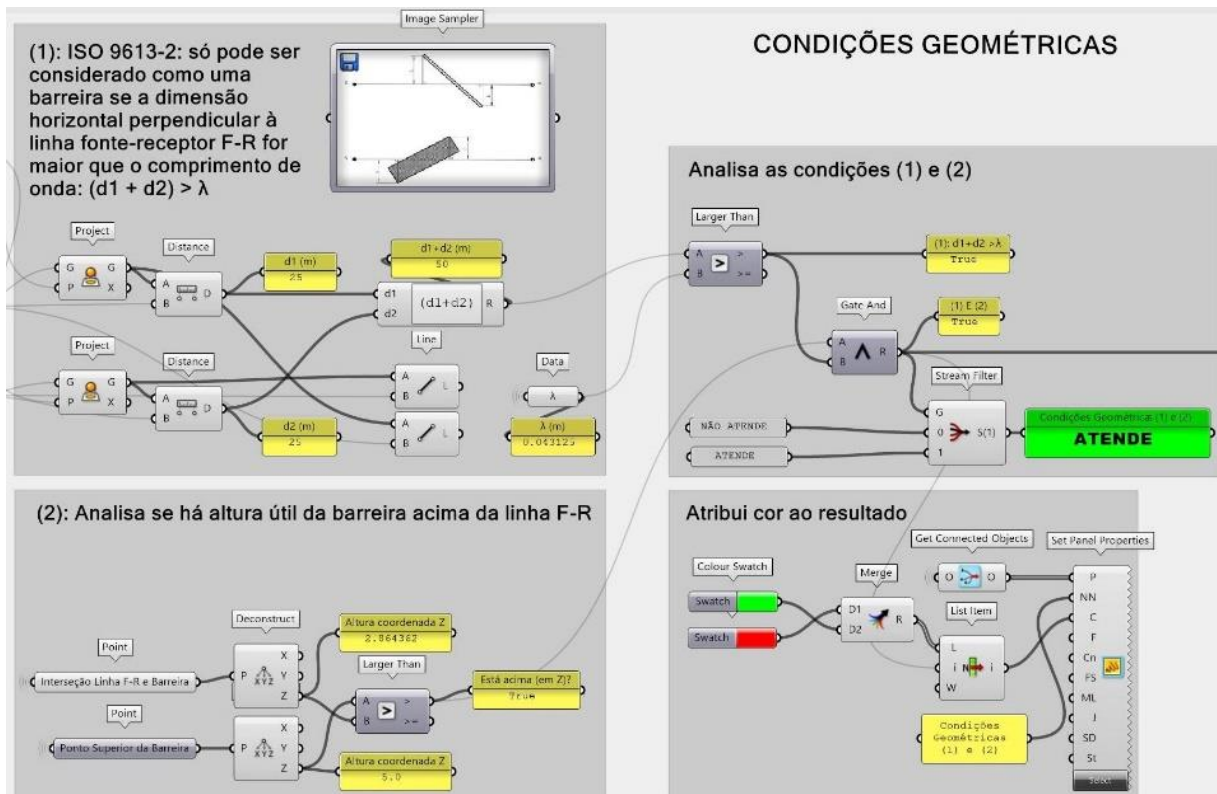


FIGURA 13: Trecho do código que avalia as condições geométricas e retorna aviso conforme a análise.

FONTE: Autoria própria.

Dos grupos apresentados anteriormente na Figura 9, o de maior relevância é o que reúne os componentes para o cálculo da atenuação sonora. Como foram comparadas duas situações distintas, sendo uma para fonte puntiforme e outra para fonte linear, a Equação 1 foi aplicada na parte mais à esquerda do grupo e a Equação 2 na porção mais à direita, conforme exibido na Figura 14. Em ambos os casos, o resultado numérico é dado de forma simultânea, a partir dos parâmetros do grupo de controle e monitoramento. O componente que manipula expressões matemáticas, onde foram inseridas essas equações, foi duplicado para permitir a escolha (ver Figura 10) de qual grandeza da onda sonora deve ser considerada, o seu comprimento ou sua frequência. O valor final mantém-se o mesmo, apenas o caminho percorrido pelos dados é diferente.

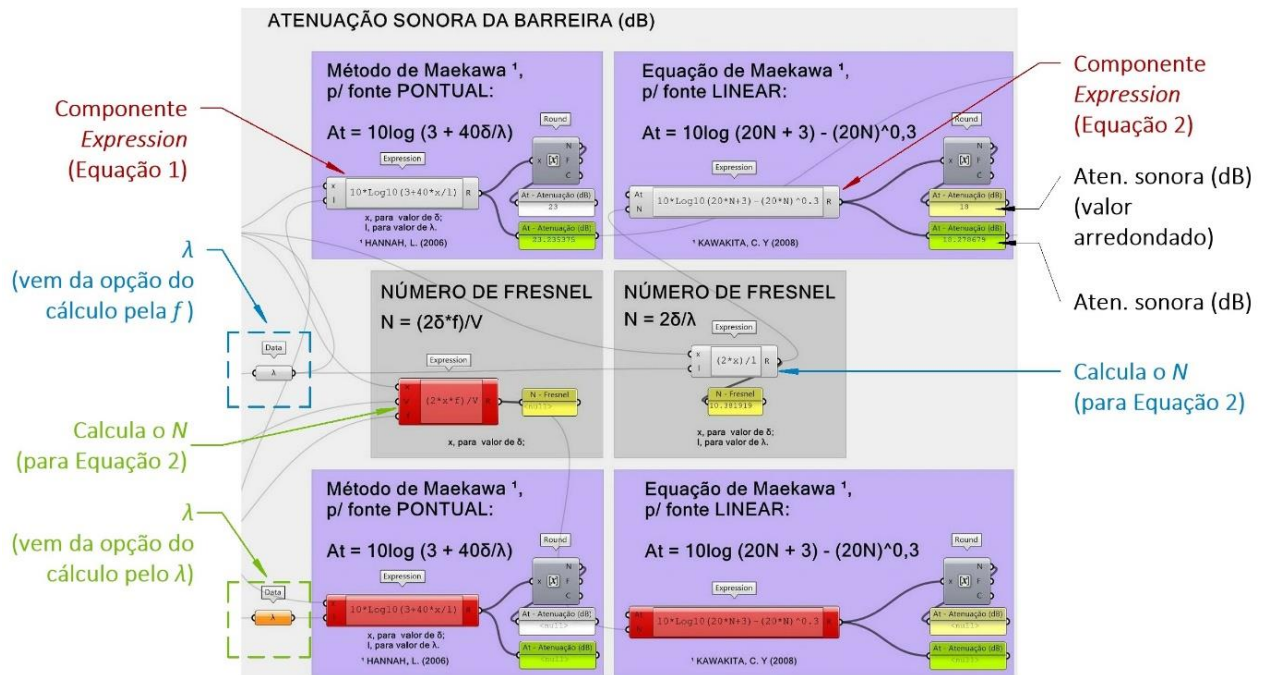


FIGURA 14: Cálculo da atenuação sonora para fonte puntiforme, à esquerda e, à direita, para fonte linear.
FONTE: Autoria própria.

4.2 SIMULAÇÕES COM UM *EVOLUTIONARY SOLVER*

Um *evolutionary solver* é um programa cujo funcionamento básico se dá a partir de algoritmos genéticos, os quais operam à semelhança do processo evolutivo natural. Dito isso, o que se busca é a formação de uma população de indivíduos, através de cruzamentos e mutações, que representam os melhores adaptados ao meio a cada nova geração. Essa adaptabilidade pode ser representada por um valor numérico, cujo incremento ou diminuição significa um elemento mais ou menos evoluído, a depender dos objetivos iniciais. Tal número, minimizado ou maximizado, é identificado pelo termo *fitness function*.

Assim, cada genoma – ou indivíduo – é o resultado da combinação de vários genes que, no caso do design computacional, são os parâmetros variáveis definidos no modelo. Para gerar novos genomas que melhor atendam à *fitness function*, o *solver* parte de uma população inicial aleatória, cujos membros são combinados e novos descendentes são formados. Esse processo segue ocorrendo indefinidamente e, a cada nova geração, os valores menos satisfatórios são descartados e os mais promissores recombinados. Para o modelo desenvolvido da barreira acústica, definem-se como objetivos – leia-se *fitness functions* – os dois resultados de atenuação obtidos: para fontes pontual e linear. Em ambos os casos, o que se deseja é o maior valor possível para cada posição do receptor e faixa de frequência da onda sonora.

Isto posto, a definição desses dois valores, de modo a serem otimizados pelo *solver*, foi estabelecida conforme demonstrado na Figura 15. Percebe-se, na imagem, que um segundo valor (intitulado “A perder na Atenuação”) foi criado como uma estratégia para que o *Galapagos* evite soluções em que uma das condições de geometria (1 ou 2) for igual a "False", já que tal resultado implica uma perda proposital de 20 dB na atenuação da barreira. O objetivo é a maximização da atenuação, por isso as simulações conseguem aumentar o seu valor ao mesmo tempo em que se desviam de soluções sem a interrupção, pela barreira, da linha de visão direta entre a fonte e o receptor – como mostrado anteriormente na Figura 12.

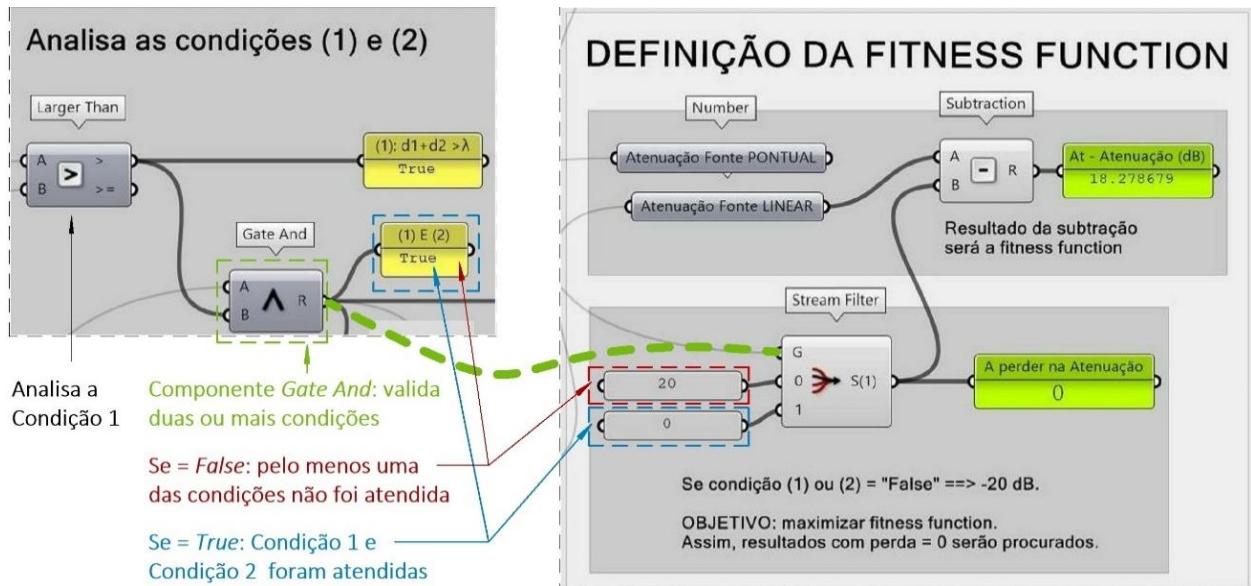


FIGURA 15: Trecho do código que define a fitness function.

FONTE: Autoria própria.

As simulações para os valores da atenuação foram realizadas em uma interface própria do Galapagos. A Figura 16 ilustra como são exibidos os dados na janela do solver.

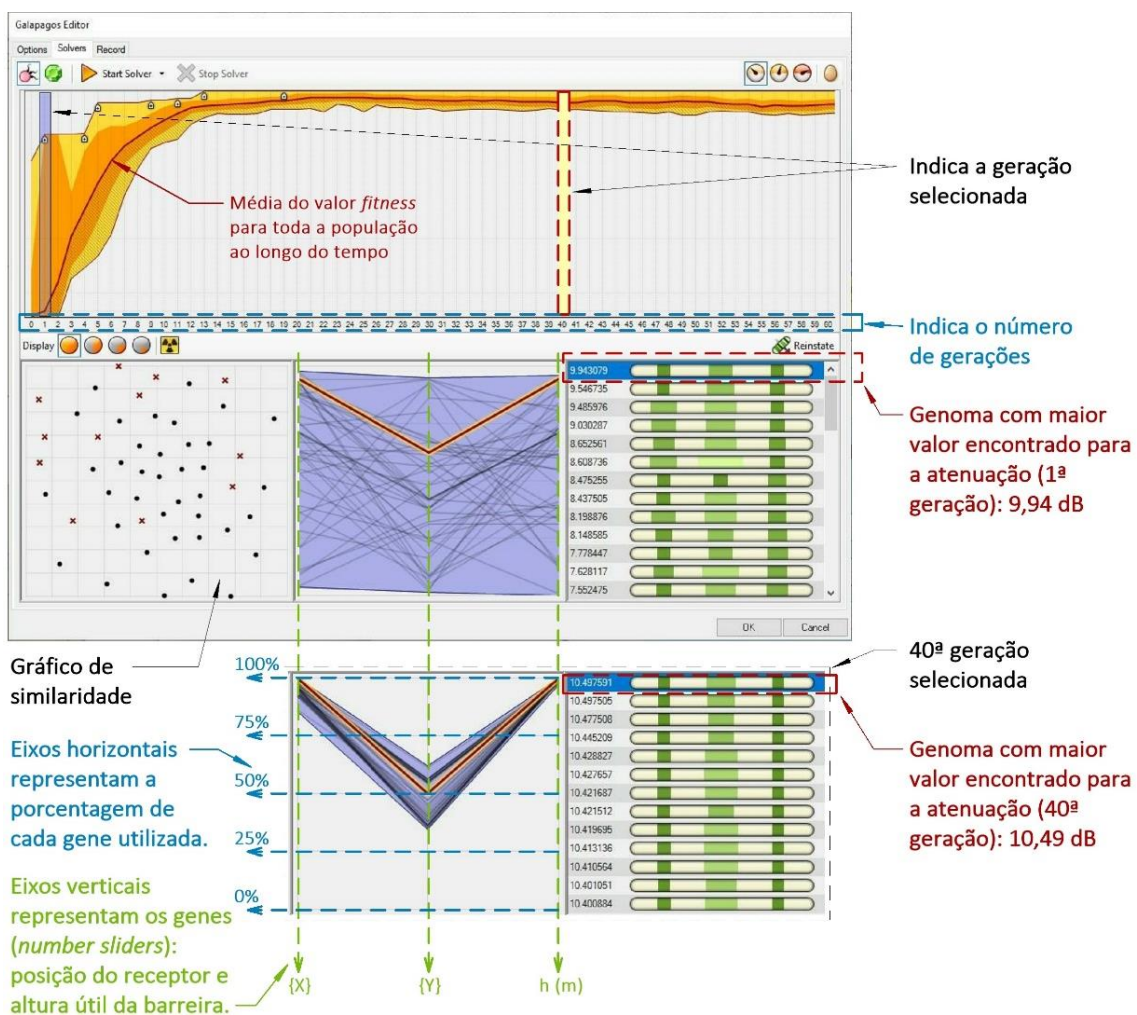


FIGURA 16: Análises gráficas no Galapagos e comparação entre a 1ª e a 40ª gerações.

FONTE: Autoria própria.

Os gráficos de maior relevância para o estudo são os dois na parte inferior da janela, onde o que está ao centro é chamado de gráfico de coordenadas paralelas e, o mais à direita, mostra os genomas e seus valores de atenuação, em ordem decrescente. Quanto ao primeiro, seus eixos verticais representam os parâmetros variáveis (genes) selecionados para a análise, ou seja, os *number sliders* referentes às posições do receptor e à altura útil da barreira. Já os eixos horizontais exibem o quanto de cada gene, em porcentagem, foi utilizado no indivíduo. Sendo assim, ele define a combinação final de cada genoma. A linha vermelha nele destacada é o genoma selecionado no gráfico da direita. Como a 1ª geração é formada aleatoriamente, percebe-se na imagem que as combinações abrangem várias porcentagens dispersas. No entanto, na 40ª geração, essas configurações tendem a ficar mais próximas umas das outras, à medida em que já conseguiram alcançar os melhores valores da *fitness function*.

Para efeito de comparação e, visando a obtenção de maior quantidade de dados, as análises foram divididas por altura da barreira e tipo de fonte sonora. Da mesma forma, tendo em vista a limitação do *solver* de otimizar apenas um objetivo por vez, os valores da atenuação foram calculados separadamente para cada altura do receptor e banda de frequência da onda sonora. Então, definiram-se três medidas de altura útil para a barreira: 3,5 m, 2,5 m e 1,5 m, as quais se referem à distância entre o nível do terreno e o topo da estrutura. Como foi adotado um desnível hipotético de 1,5 m entre a pista da rodovia e a superfície do lote, a altura total da barreira é dada pela soma dessas duas dimensões.

Tais simulações foram executadas com um limite de tempo de 60 segundos para cada situação predefinida, porquanto observou-se que não ocorriam alterações significativas no valor da atenuação sonora após esse período.

5. RESULTADOS

Os resultados das simulações realizadas no *Galapagos* são mostrados nesta seção do trabalho. O cálculo da atenuação pela Equação 1 e Equação 2 considera, intrinsecamente, grandezas de natureza geométrica, como o comprimento da onda e a diferença entre os caminhos por ela percorridos. Em consequência disso, já era esperado que as maiores atenuações fossem encontradas para posições do receptor quando este localiza-se mais próximo da barreira e do solo. Desse modo, como mostra o gráfico da Figura 17, o valor da atenuação sonora eleva-se à medida em que a altura do receptor diminui e a frequência da onda aumenta, já que nessas condições o som apresenta maior dificuldade de contornar obstáculos.

Confirma-se, também, uma maior eficiência da barreira para a fonte puntiforme – dada a diferença no modo de propagação em cada caso. No entanto, conforme indicado pela norma ISO 9613 (1996a), nenhum resultado para a atenuação superior a 20 dB – no caso de difração simples, como é neste estudo – deve ser considerado válido. Isso faz com que os cálculos para fonte linear estejam mais próximos de uma realidade prática, já que a única faixa de frequência que apresenta uma atenuação acima desse valor é a de 8000 Hz. O comportamento das curvas se mantém similar quando a altura útil da barreira é reduzida para 2,5 m, como demonstrado na Figura 18, sendo a principal diferença a posição vertical do receptor que, agora, só pode ser considerado protegido – com atenuação efetiva – do ruído quando estiver, no máximo, a 10,5 m de altura em relação ao terreno. Isso se deve ao fato da linha FR ficar acima da borda superior da barreira nessas condições, semelhante ao que foi exemplificado na Figura 12, quando a Condição 2 não é atendida. Além disso, nota-se que quanto maior a altura do receptor, os resultados da atenuação tendem a ficar mais próximos entre si, uma vez que a diferença δ entre os percursos da onda difratada e direta também diminui.

Já nos gráficos da Figura 19, onde a altura útil da barreira foi definida em 1,5 m, o receptor só pode ser considerado protegido em alturas inferiores a 4,5 m, o que equivale estar posicionado a 1,5 m em

relação ao nível de piso do primeiro pavimento de uma edificação típica. O fato desses gráficos desconsiderarem os valores da atenuação para algumas alturas do receptor não implica total ineficácia da barreira nessas posições em um caso real. Na prática, como a onda sonora se propaga em todas as direções, parte dela será difratada, mesmo que a linha FR não seja interrompida. Sendo assim, essas simulações consideram apenas os melhores resultados em cada situação.

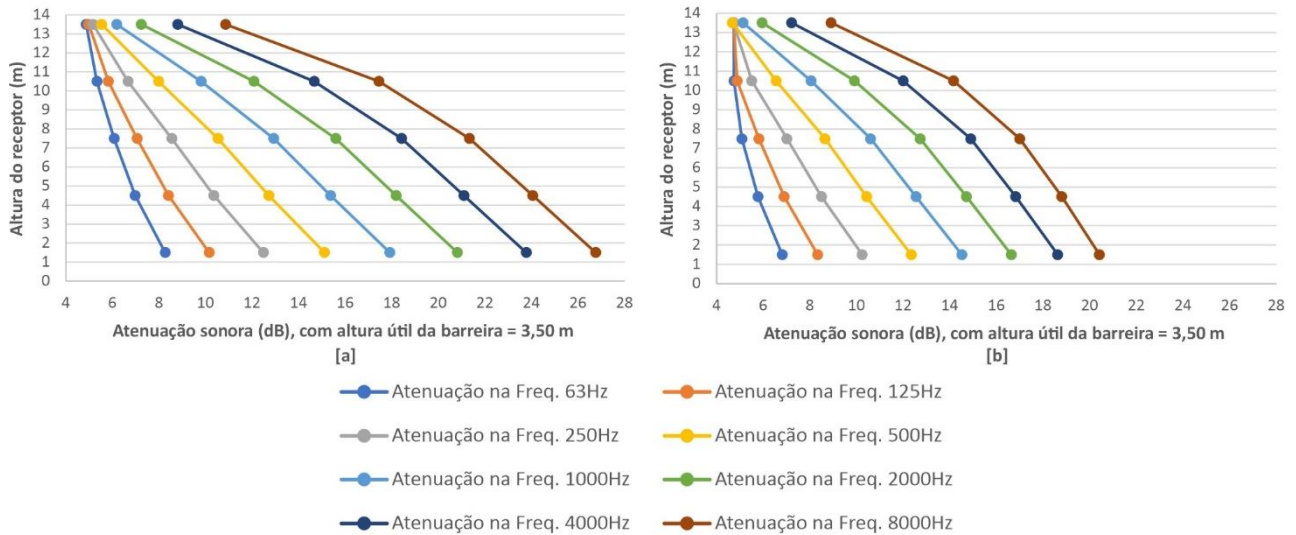


FIGURA 17: Gráfico da atenuação sonora com 3,5 m de altura útil da barreira: [a] fonte pontual; e [b] fonte linear.

FONTE: Autoria própria.

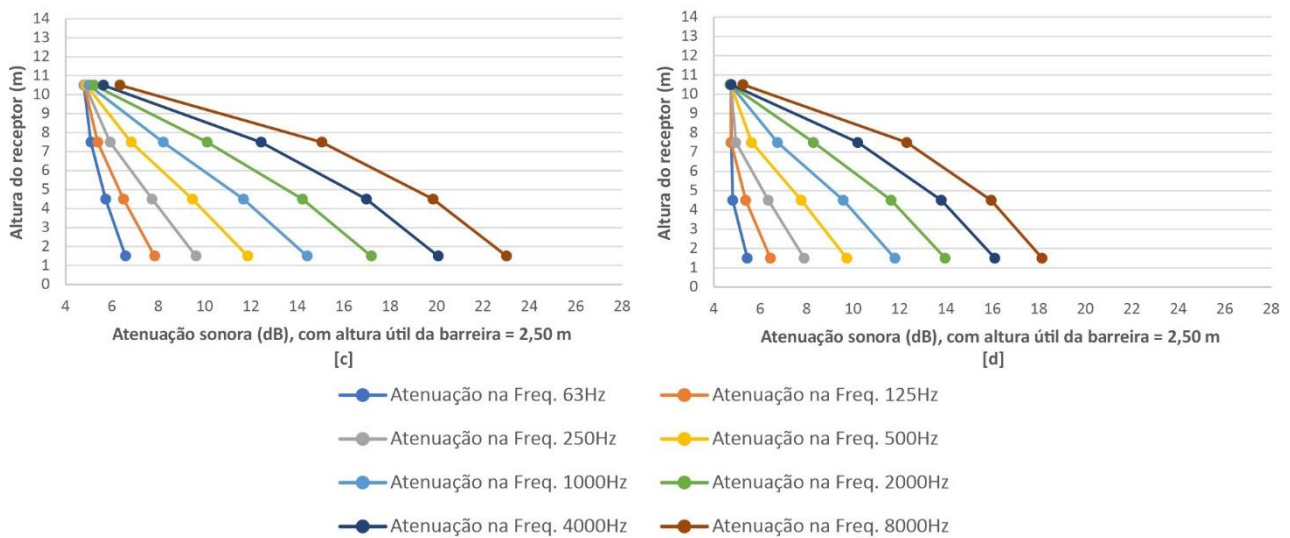


FIGURA 18: Gráfico da atenuação sonora com 2,5 m de altura útil da barreira: [c] fonte pontual; e [d] fonte linear.

FONTE: Autoria própria.

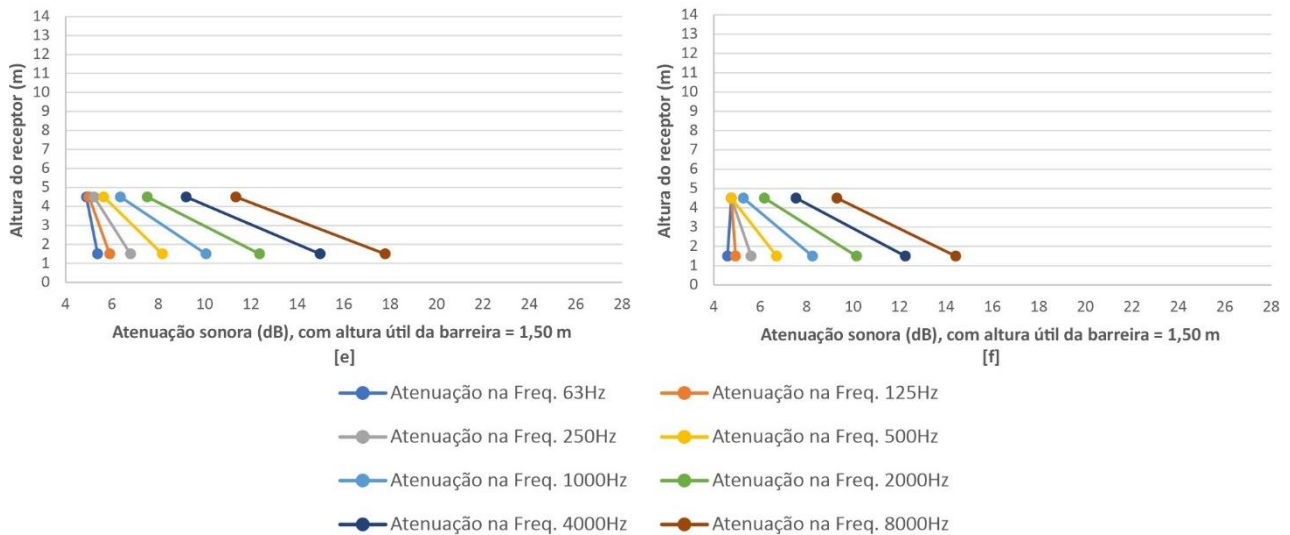
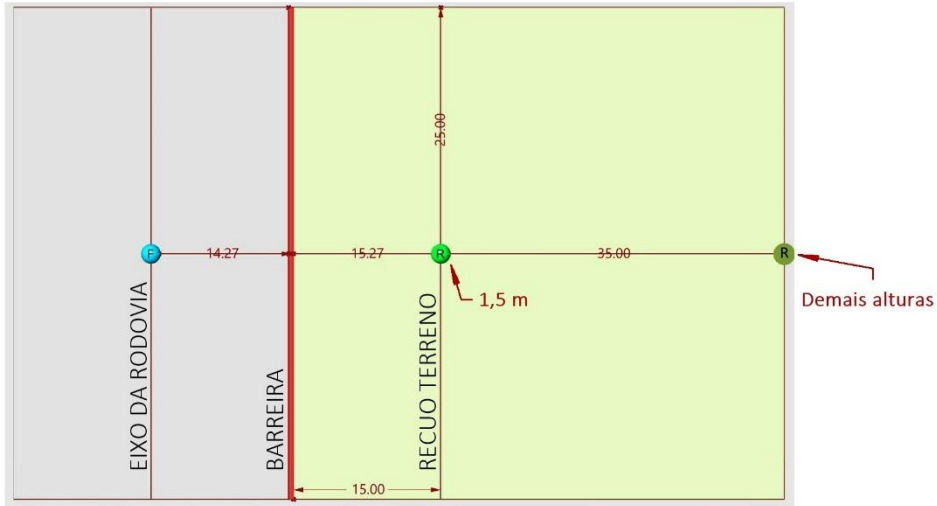


FIGURA 19: Gráfico da atenuação sonora com 1,5 m de altura útil da barreira: [e] fonte pontual; e [f] fonte linear.
FONTE: Autoria própria.

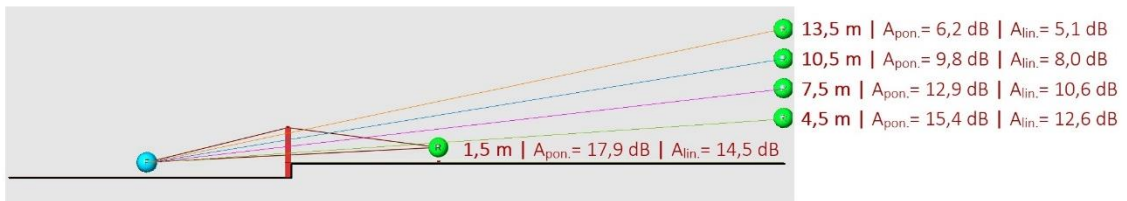
Para complementar o entendimento dos gráficos, as diferentes posições do receptor e seus correspondentes maiores valores de atenuação podem ser visualizados na Figura 20, Figura 21 e Figura 22. Nessa mesma ordem estão dispostas as três alturas úteis testadas para a barreira: 3,5 m, 2,5 m e 1,5 m. Em cada caso, são exibidas as alturas do receptor nas quais o caminho direto (linha FR) da onda sonora é representado pelas linhas coloridas e somente aparecem aquelas interceptadas pela estrutura da barreira. Assim, ao lado do receptor (representado pela esfera de cor verde) foram registradas suas alturas e as atenuações para fonte pontual e fonte linear, respectivamente.

Com finalidade apenas de representação, optou-se por mostrar nas imagens tais posições para a faixa de frequência de 1000 Hz, uma vez que se encontra mais centralizada em relação ao espectro geral adotado no trabalho. Além disso, não foram registradas variações significativas nas simulações no que diz respeito ao posicionamento do receptor e os melhores resultados da *fitness function* em cada banda de oitava. Desse modo, podem-se destacar, para essa frequência, os valores mais baixos encontrados da atenuação sonora: 5 dB, para fonte puntiforme, e 4,7 dB para fonte linear. Tais resultados são os melhores, entretanto, quando o receptor está a 10,5 m do solo e a barreira tem altura útil de 2,5 m. Já as maiores atenuações, de modo geral, foram encontradas na altura de 1,5 m em relação ao terreno, no limite de seu recuo frontal, quando a dimensão da barreira acima do solo é de 3,5 m: 17,9 dB e 14,5 dB. Portanto, quanto mais alto o obstáculo entre a fonte e o receptor e mais perto este se localiza em relação ao piso e à barreira, maiores serão os resultados da atenuação sonora.

Vista superior



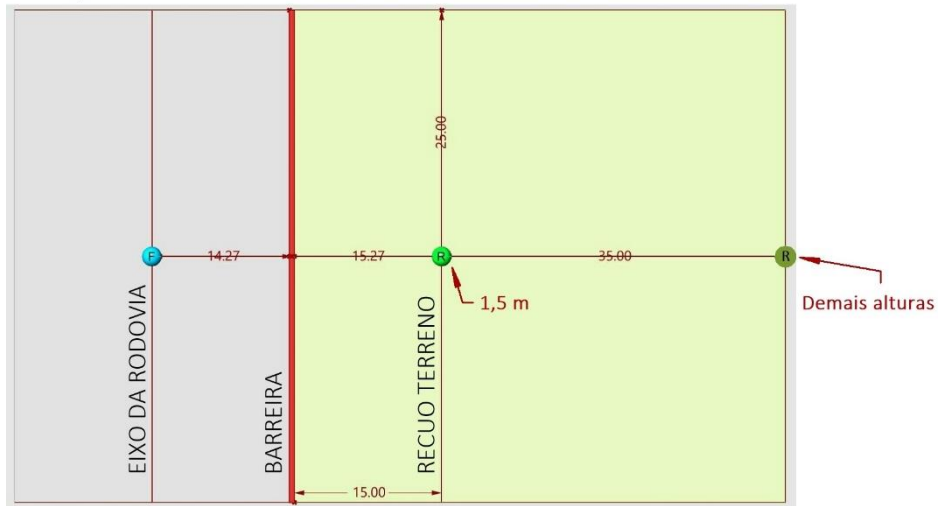
Freq. = 1000 Hz | Altura útil barreira = 3,50 m



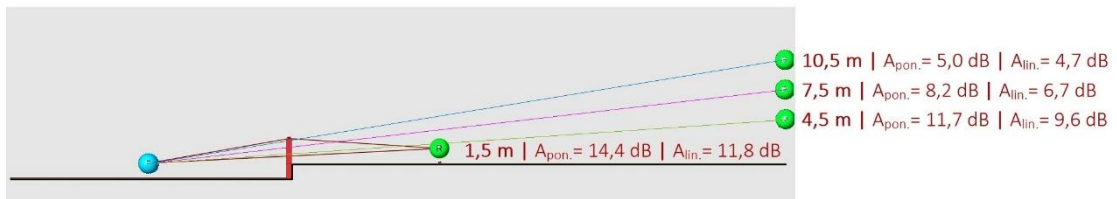
Vista lateral

FIGURA 20: Posições do receptor com maior atenuação sonora e 3,5 m de altura útil da barreira.
FONTE: Autoria própria.

Vista superior



Freq. = 1000 Hz | Altura útil barreira = 2,50 m



Vista lateral

FIGURA 21: Posições do receptor com maior atenuação sonora e 2,5 m de altura útil da barreira.
FONTE: Autoria própria.

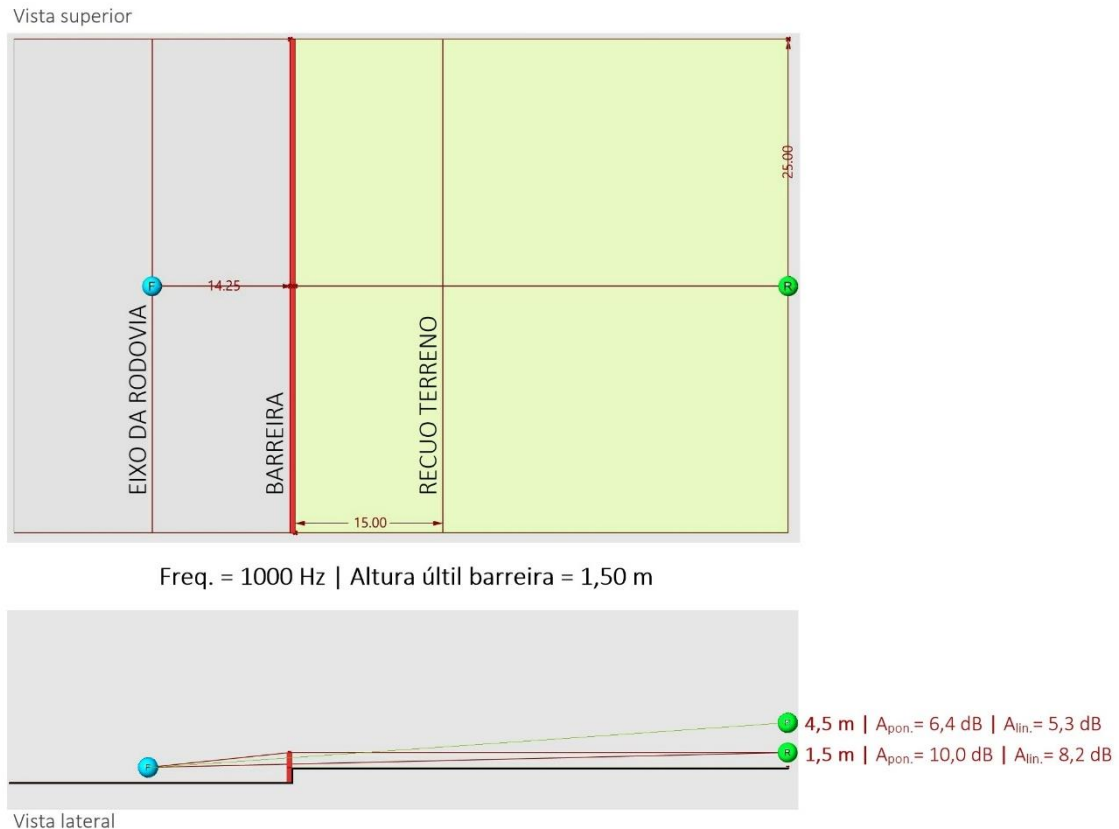


FIGURA 22: Posições do receptor com maior atenuação sonora e 1,5 m de altura útil da barreira.

FONTE: Autoria própria.

Como o gráfico de coordenadas paralelas gerado pelo *Galapagos* não exibe claramente todas as configurações dos parâmetros utilizados (ver Figura 16), optou-se por construí-los no ambiente do modelo para melhor ilustrar cada situação. Na Figura 23, Figura 24 e Figura 25 são demonstrados os valores da atenuação sonora para fonte linear e as características dos genomas em cada altura da barreira e, assim como na Figura 20, Figura 21 e Figura 22, foi mantida a banda de oitava da frequência de 1000 Hz. Para efeito de comparação, apenas as duas posições do receptor com maior atenuação – nas alturas de 1,5 m e 4,5 m – aparecem nesses gráficos. Os genes dos eixos verticais representam, respectivamente, as coordenadas – X, Y e Z – do receptor em relação ao terreno e a altura útil da barreira. As porcentagens referem-se aos valores limites definidos para cada *number slider* desses parâmetros.

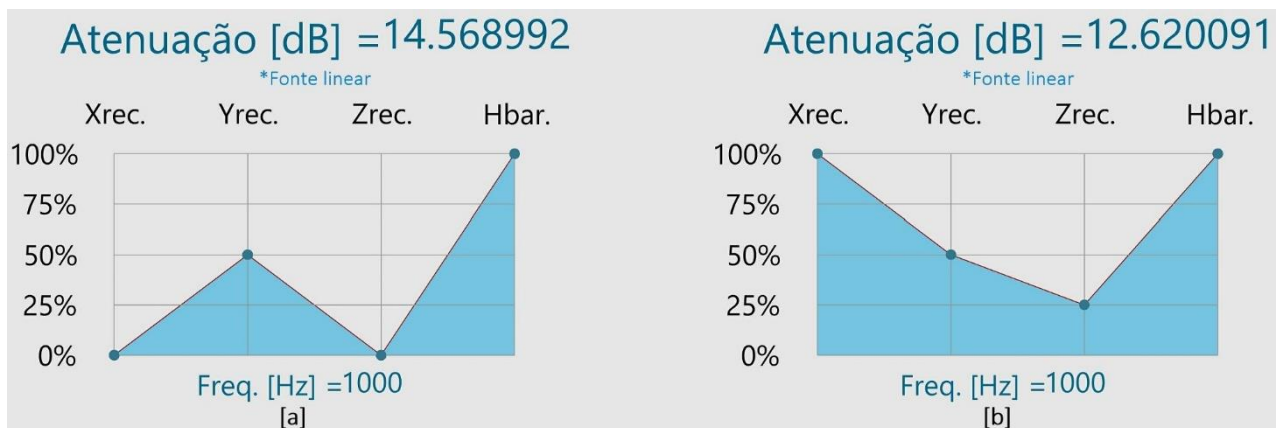


FIGURA 23: Gráfico de coordenadas paralelas e atenuação sonora para fonte linear com 3,5 m de altura útil da barreira: [a] receptor a 1,5 m do solo; e [b] receptor a 4,5 m do solo.

FONTE: Autoria própria.

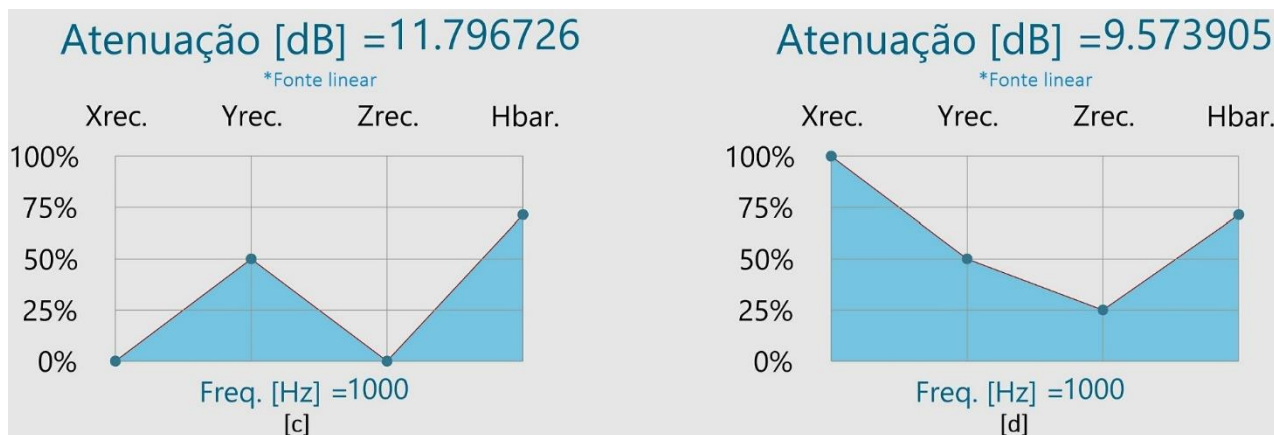


FIGURA 24: Gráfico de coordenadas paralelas e atenuação sonora para fonte linear com 2,5 m de altura útil da barreira: [c] receptor a 1,5 m do solo; e [d] receptor a 4,5 m do solo.

FONTE: Autoria própria.

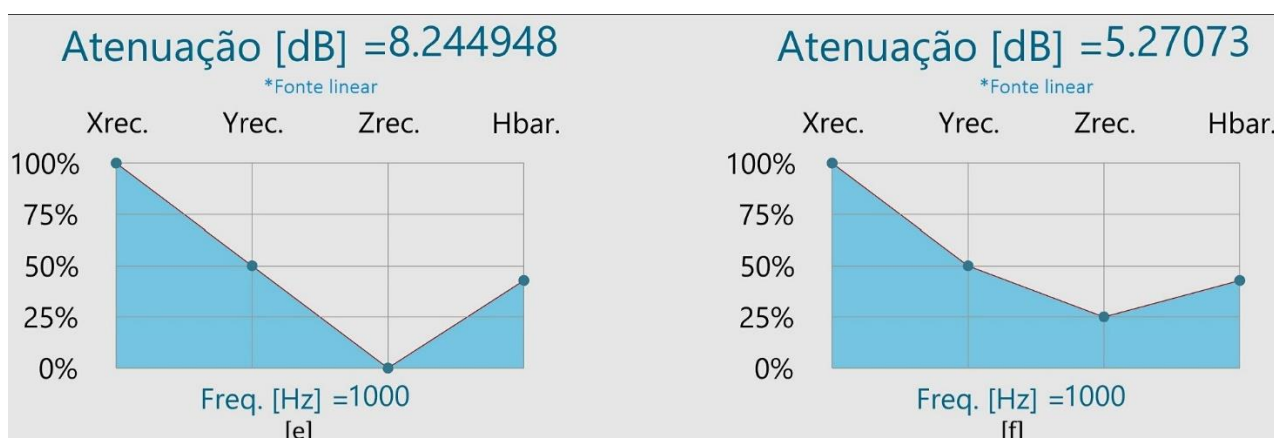


FIGURA 25: Gráfico de coordenadas paralelas e atenuação sonora para fonte linear com 1,5 m de altura útil da barreira: [e] receptor a 1,5 m do solo; e [f] receptor a 4,5 m do solo.

FONTE: Autoria própria.

6. CONCLUSÕES

A construção de barreiras acústicas representa uma solução para o controle do ruído de tráfego rodoviário próximo a regiões habitadas, mas o processo de projeto desses elementos – geralmente baseado em um ciclo de tentativa e erro – demanda muito tempo e energia do projetista.

Este trabalho empenhou-se em propor uma metodologia alternativa de modelagem, dimensionamento e avaliação de desempenho para barreiras acústicas através da programação visual e do design generativo. Assim, a partir de um cenário hipotético, a atenuação sonora da barreira foi calculada considerando-se dois tipos de fonte sonora: puntiforme e linear. Esses valores permitiram comparar dois métodos de cálculo encontrados na literatura pesquisada, ambos atribuídos a Maekawa (1968), e embasaram as simulações em busca dos pontos no terreno com a maior atenuação possível para cada posição do receptor e altura da barreira.

Tais simulações foram realizadas com o *Galapagos*, uma ferramenta baseada em algoritmo evolutivo, o qual atuou na maximização da atenuação da barreira e esta, por sua vez, teve sua geometria e critérios de análise definidos no *Grasshopper* – um plugin dentro do software de modelagem 3D *Rhinoceros*. Deve-se ressaltar que, embora suficientemente genéricas a ponto de permitir aplicações em diversas áreas do conhecimento, esses programas não têm como finalidade os projetos de acústica. Isso fez com que todos os processos referentes aos fenômenos acústicos fossem criados de forma elementar,

necessitando instruir o software em todas as etapas, o que não impactou negativamente em sua execução, dadas as simplificações adotadas nesse estudo.

A grande vantagem nesse método foi a automatização implementada na fase final de avaliação da atenuação, cujos melhores resultados puderam ser selecionados facilmente e a visualização das soluções foi feita em tempo real, gerando um feedback instantâneo.

Os resultados obtidos mostraram um comportamento das curvas de atenuação que corresponde às expectativas existentes antes das simulações, ou seja, quanto mais elevado o receptor em relação à barreira, menor o efeito da atenuação sonora, o que comprova a correta modelagem e a eficiência do método utilizado. No entanto, por tratar-se de uma primeira experiência do autor com essa abordagem, outros fatores que afetam o desempenho de uma barreira acústica devem ser considerados em estudos futuros. Tais aspectos, conforme recomendam a norma ISO 9613-2 (1996) e Bistafa (2018), incluem as características materiais da barreira e de seu entorno, bem como as variáveis climáticas pertinentes no local de implantação da estrutura.

O presente trabalho demonstrou que a aplicação do design generativo nas fases iniciais do projeto de barreiras para controle de ruído do tráfego rodoviário é um caminho viável e a implementação desse processo permite ao projetista focar nas decisões importantes e executar menos tarefas manuais. Assim, a fim de que essas vantagens venham a ser melhor exploradas futuramente, sugere-se que outros *evolutionary solvers*, capazes de lidar com maior número de variáveis simultâneas – como o *Wallacei* e o *Octopus* – sejam testados e seus resultados comparados entre si e com softwares específicos para acústica. Semelhantemente, a avaliação a partir de outros métodos de cálculo da atenuação sonora, disponíveis na literatura sobre o assunto, pode ser realizada para que os valores alcançados gerem maior confiabilidade.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10152: Acústica — Níveis de pressão sonora em ambientes internos a edificações**. Rio de Janeiro. 2017, 21 p. Versão corrigida 2020.

_____. **NBR 10151: Acústica - Medição e avaliação de níveis de pressão sonora em áreas habitadas - Aplicação de uso geral**. Rio de Janeiro. 2019. 25 p. Versão corrigida 2020.

BISTAFA, S. **Acústica aplicada ao controle do ruído**. São Paulo: Blucher, 2018, 436 p.

BRASIL. Lei nº 13.913, de 25 de novembro de 2019. Altera a Lei nº 6.766, de 19 de dezembro de 1979, para assegurar o direito de permanência de edificações na faixa não edificável contígua às faixas de domínio público de rodovias e para possibilitar a redução da extensão dessa faixa não edificável por lei municipal ou distrital. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2019/lei/L13913.htm>. Acesso em: 06 maio 2023.

CAETANO, I.; SANTOS, L.; LEITÃO, A. Computational design in architecture: Defining parametric, generative, and algorithmic design. **Frontiers of Architectural Research**, v. 9, n. 2, jun. 2020. p. 287-300. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foar.2019.12.008>. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095263520300029?via%3Dihub>>. Acesso em: 06 maio 2023.

CRUZ, R. G. da.; ARCIPRESTE, C. M.; PINHEIRO, R. L.; RIBAS, R. A. de J. Generative design: information flow between genetic algorithm and parametric design in a steel structure construction. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 21, n. 4, p. 271–289, out./dez. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1590/s1678-86212021000400569>. Disponível em: <<http://www.scielo.br/j/ac/a/f5dkBmGvDYV8hDNgxHRXxYz/?lang=en>>. Acesso em: 06 maio 2023.

CELANI, G. Algorithmic Sustainable Design: uma visão crítica do projeto generativo. **Resenhas Online**, ago. 2011. Disponível em: <<https://www.vitruvius.com.br/revistas/read/resenhasonline/10.116/3995>>. Acesso em: 06 maio 2023.

GENERATIVE. In: CAMBRIDGE DICTIONARY. Cambridge: Cambridge University Press, 2021. Disponível em: <<https://dictionary.cambridge.org/us/dictionary/english/generative>>. Acesso em: 31 maio 2022.

GIRALDO-CLAVIJO, P.; YANG, J. J. **A comparative study of insertion loss of traffic noise barriers in Georgia.** *In: International Conference on Transportation and Development 2020.* American Society of Civil Engineers, Siattle, Washington, 2020. p. 131-139. DOI: 10.1061/9780784483138.012. Disponível em: <<https://ascelibrary.org/doi/10.1061/9780784483138.012>>. Acesso em: 06 maio 2023.

HANNAH, L. The Effect of Environment on Sound Propagation. **New Zealand Acoustics**, v. 20, n. 1, 2007a. p. 3-9. Disponível em: <https://www.acoustics.org.nz/sites/www.acoustics.org.nz/files/journal/pdfs/Hannah_L_NZA2007_b.html>. Acesso em: 13 mar. 2023.

_____. Wind and Temperature Effects on Sound Propagation. **New Zealand Acoustics**, v. 20, n. 2, 2007b. p. 22-29. Disponível em: <https://www.acoustics.org.nz/sites/www.acoustics.org.nz/files/journal/pdfs/Hannah_L_NZA2007_a.html>. Acesso em: 06 maio 2023.

HUANG, S.; SUN, Z.; Liu, H.; WANG, Y.; YUAN, M. Key Points of Acoustic Consultation for Highway Noise barrier Design Optimization. *In: E3S Web of Conferences.* **Anais...** v. 145, fev. 2020. p. 02008. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202014502008>. Disponível em: <https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2020/05/e3sconf_iaecst2020_02008/e3sconf_iaecst2020_02008.html>. Acesso em: 01 maio 2023.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 9613/2: Acoustics — Attenuation of sound during propagation outdoors — Part 2: General method of calculation.** Genebra. 1996, 18 p.

KAWAKITA, C. Y. **Medição do ruído de tráfego na rodovia SP 270 e avaliação da satisfação quanto ao conforto acústico de seus moradores.** 174 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2008. DOI: 10.11606/D.3.2008.tde-30052008-105650. Disponível em: <<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3146/tde-30052008-105650/pt-br.php>>. Acesso em: 06 maio 2023.

KURZE, U. J.; ANDERSON, G. S. Sound attenuation by barriers. **Applied Acoustics**, v. 4, n. 1, p. 35-53, jan. 1971. DOI: [https://doi.org/10.1016/0003-682X\(71\)90024-7](https://doi.org/10.1016/0003-682X(71)90024-7). Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0003682X71900247>>. Acesso em: 06 maio 2023.

MAEKAWA, Z. Noise reduction by screens. **Applied Acoustics**, v. 1, n. 3, p. 157-173, jul. 1968. DOI: [https://doi.org/10.1016/0003-682X\(68\)90020-0](https://doi.org/10.1016/0003-682X(68)90020-0). Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0003682X68900200>>. Acesso em: 05 maio 2023.

MELLO, R. B. D. Do Projeto Paramétrico ao Projeto Generativo – Parte 1: O que é projeto generativo. **Mundo AEC - Autodesk Brasil**, 19 jan. 2017a. Disponível em: <<https://blogs.autodesk.com/mundoaec/projeto-generativo-parte-1/>>. Acesso em: 06 maio 2023.

_____. Do Projeto Paramétrico ao Projeto Generativo – Parte 2: Projeto Algorítmico e Dynamo (com apostila). **Mundo AEC - Autodesk Brasil**, 02 fev. 2017b. Disponível em: <<https://blogs.autodesk.com/mundoaec/projeto-generativo-parte-2/>>. Acesso em: 05 maio 2023.

MITCHELL, W. J. The Theoretical Foundation of Computer-Aided Architectural Design. **Environment and Planning B: Planning and Design**, Londres, v. 2, n. 2, p. 127-150, 01 dez. 1975. DOI: <https://doi.org/10.1068/b020127>. Disponível em: <<https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1068/b020127>>. Acesso em: 04 maio 2023.

MONKS, M.; OH, B. M.; DORSEY, J. Audiooptimization: goal-based acoustic design. **IEEE Computer Graphics and Applications**, v. 20, n. 3, p. 76- 90, May./June 2000. DOI: 10.1109/38.844375. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/844375?casa_token=Vm6OPGI6_hsAAAAA:dsDczH-_cvQoMC-VLNFcCw6gcYQrxYIO5cUaICN9nk205hLsbyf10w6n7SpoHTQtaR3WTTm87k>. Acesso em: 04 maio 2023.

NAGY, D. Evolving design. **Medium**, 26 jan. 2017. Disponível em: <<https://medium.com/generative-design/evolving-design-b0941a17b759>>. Acesso em: 6 maio 2023.

NORTON, C. W. **Changing space and sound: parametric design and variable acoustics.** 139 p. Thesis (Master of Building Science) - University of Southern California, School of Architecture. Los Angeles, 2013. Disponível em: <<https://www.proquest.com/openview/e8581a5e9662f509d373ab0a92db6d7d/1?pq-origsite=gscholar&cbl=18750>>. Acesso em: 06 maio 2013.

PARAMETER. *In*: LEXICO.COM. Oxford: Oxford University Press (OUP), 2021. Disponível em: <<https://www.lexico.com/definition/parameter>>. Acesso em: 27 abr. 2022.

SHIFFMAN, D. Chapter 9. The Evolution of Code. **The Nature of Code**, 6 dez. 2012. 521 p. Disponível em: <<https://natureofcode.com/book/chapter-9-the-evolution-of-code/>>. Acesso em: 22 maio 2020.

SILVA, J. R. A. **Caracterização do ruído emitido por veículos rodoviários num troço da EN109 em Vagos**. Aveiro, 2009. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro (Portugal). Disponível em: <<https://core.ac.uk/download/pdf/15562618.pdf>>. Acesso em: 06 maio 2023.

SPAETH, A. B.; MENGES, A. Performative Design for Spatial Acoustics: concept for an evolutionary design algorithm based on acoustics as design driver. *In*: Conference on Education in Computer Aided Architectural Design in Europe (eCAADe), 21-24 sep. 2011, Ljubljana. **Anais: Respecting fragile places : proceedings of the 29th Conference on Education in Computer Aided Architectural Design in Europe**. Ljubljana, Slovenia: 2011. 982 p. p. 461-468. Disponível em: <http://papers.cumincad.org/data/works/att/eCAADe_2011-lowres.pdf#page=463>. Acesso em: 06 maio 2023.

VELOSO, G. P.; OLIVEIRA, D. M.; RIBEIRO, C. RIBEIRO, S. Design generativo aplicado às estruturas: Otimização do plano de corte dos painéis de tela soldada em paredes de concreto. *In*: 4º Congresso Português de Building Information Modelling. 2020. **Anais...** p. 361-370. DOI: <https://doi.org/10.21814/uminho.ed.32.30>. Disponível em: <<https://ebooks.uminho.pt/index.php/uminho/catalog/view/32/132/1643-1>>. Acesso em: 06 maio 2023.

VENÂNCIO, R. Sombreamento com iluminação: desenvolvimento e teste de modelo paramétrico para facilitar o projeto de proteções solares. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 20, n. 4, p. 59-77, out./dez. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/s1678-86212020000400460>. Disponível em: <<http://www.scielo.br/j/ac/a/rch8V4zy5Cx5N5Wv3P5v4Zy/?lang=pt>>. Acesso em: 05 maio 2023.

XIAO, Y.; LAI, H.; LI, Q.; WANG, X.; WANG, X. Improved interference-type sound barriers: Use of hyperbolic phase modulation. **Applied Acoustics**, v. 161, p. 107186, 1 abr. 2020. DOI: <http://www.scielo.br/j/ac/a/rch8V4zy5Cx5N5Wv3P5v4Zy/?lang=pt>. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0003682X19309363>>. Acesso em: 23 abr. 2023.

ZHANG, J.; LIU, N.; WANG, S. Generative design and performance optimization of residential buildings based on parametric algorithm. **Energy and Buildings**, v. 244, p. 111033, 1 ago. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111033>. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778821003170>>. Acesso em: 05 maio 2023.