

2

Modelando a Propagação do Som

Como é feito em alguns sistemas de reprodução de áudio 3D, a propagação do som em um ambiente também pode ser calculada utilizando método de elementos finitos ou de contorno, criados a partir da equação de onda [21]. Esses métodos, no entanto, não são adequados para aplicações de tempo real, devido ao seu alto custo computacional. Assim, sua utilização é mais comum no projeto e análise acústica de auditórios e salões de concerto.

A modelagem da propagação do som em ambientes muitas vezes é tratada apenas geometricamente, sem levar em consideração sua natureza ondulatória. Essa abordagem é conhecida como *acústica geométrica* [49].

Apesar de não ser fisicamente correta, a acústica geométrica pode, em determinadas ocasiões, fornecer uma boa aproximação, permitindo realizar uma análise qualitativa da acústica de um ambiente. Ao substituímos o conceito de onda pelo conceito de raios de som, limitamos a fidelidade do modelo à propagação de sons de alta frequência, que corresponde aos casos em que o comprimento de onda da onda sonora é pequeno em relação às dimensões do ambiente e de suas paredes[49]. De forma geral, os algoritmos geométricos usados para a propagação de som também podem ser usados para calcular a propagação de luz e de sinais de rádio com poucas mudanças. Entre elas, o cálculo da atenuação e as diferentes velocidades de propagação das ondas.

A Figura 2.1 ilustra um ambiente composto de duas salas e diversos caminhos de propagação do som entre uma fonte sonora e um receptor. Considere que a fonte emite um único impulso sonoro. A frente de onda desse impulso interage com as paredes do ambiente se fragmentando em diversas frentes de onda devido à reflexão, difração, absorção e transmissão através das paredes. É essa interação do impulso sonoro com o ambiente que cria os diversos caminhos de propagação ilustrados. Como, de forma geral, cada caminho tem um comprimento diferente e interage com objetos diferentes do ambiente ao longo de seu percurso, cada uma dessas novas frentes de onda alcança o receptor com um atraso e uma atenuação diferentes. Assim,

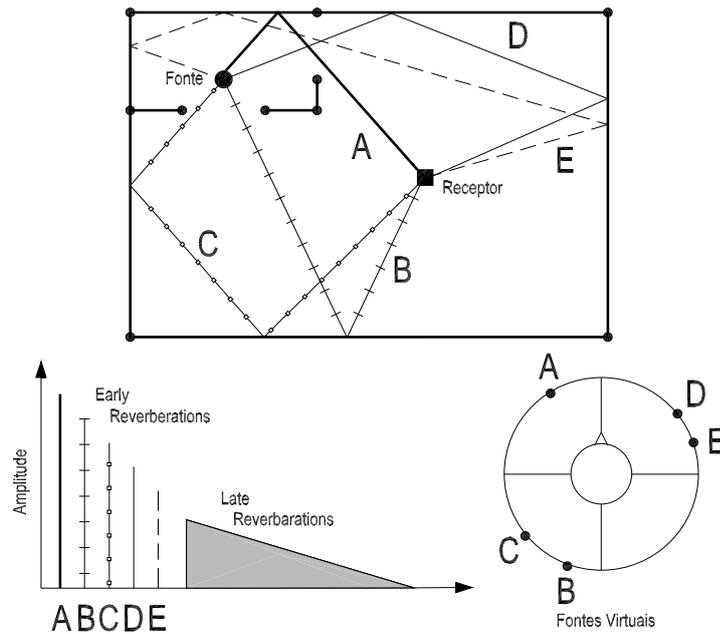


Figura 2.1: Caminhos de Propagação e Fontes Virtuais

para cada impulso emitido pela fonte, temos um conjunto de impulsos diferentes que chegam ao receptor. O conjunto de impulsos resultante forma a resposta do ambiente ao impulso [56].

A reprodução do áudio pode ser feita criando, para cada caminho de propagação, fontes virtuais localizadas ao redor do usuário. Cada fonte tendo a atenuação e atraso correspondentes ao caminho de propagação que ela representa. Outra alternativa para a reprodução de áudio consiste em convoluir a resposta do ambiente ao impulso com um sinal de áudio. Esta convolução tem como resultado um novo sinal que corresponde ao sinal original, adicionado das atenuações e atrasos codificados na resposta ao impulso [21].

Como o número de caminhos de propagação do som em um ambiente pode ser muito grande, apenas os caminhos mais curtos são realmente calculados geometricamente. Dessa forma a resposta ao impulso do ambiente é dividida em dois conjuntos. O primeiro deles, correspondente aos menores caminhos de propagação, é conhecido como *early reverberations* (ou reverberações iniciais). O segundo conjunto, que geralmente é criado utilizando aproximações estatísticas, é conhecido como *late reverberations* (ou reverberações tardias). A Figura 2.1 ilustra a resposta ao impulso de um ambiente, com a divisão entre os dois tipos de reverberações.

O foco deste trabalho será no cálculo das reverberações iniciais. Para um tratamento bastante completo sobre os diversos algoritmos para o

cálculo das reverberações tardias, sugerimos a consulta a [33] e [61].

Em termos de localização, o tratamento mais cuidadoso dos menores caminhos de propagação é apropriado, pois são esses caminhos que dão a maior parte da informação espacial de um ambiente, devido às suas amplitudes relativamente mais altas, direções mais reconhecíveis e tempos distintos de chegada [2].

O cálculo dos caminhos de propagação do som em um ambiente pode ser feito utilizando três técnicas diferentes:

- Método de fontes virtuais (*Image Source Methods*)
- *Ray tracing*
- *Beam tracing*

2.1

Método das Fontes Virtuais

O método de fontes virtuais consiste em criar, a partir de uma fonte real, as fontes virtuais que permitem calcular a reflexão em cada parede do ambiente que leve até o receptor (como é feito para reflexão de fontes luminosas em planos) [32, 49]. As fontes virtuais também podem dar origem a novas fontes virtuais, permitindo criar caminhos com diversos números de reflexões até o receptor. Como as fontes virtuais são geralmente criadas sem utilizar critérios de visibilidade, é preciso verificar a validade de uma fonte virtual, para que não sejam criados caminhos de propagação inválidos. Estes podem, por exemplo, atravessar oclusores do ambiente. O grande número de fontes virtuais criadas neste método e a necessidade de validar as fontes virtuais torna o método bastante ineficiente.

2.2

Ray Tracing e Beam Tracing

Ray tracing e *beam tracing* [14, 16] são técnicas comuns para visualização e podem ser adaptadas para modelar a propagação de ondas sonoras [32, 36, 2, 55], e de sinais de rádio [37, 27] em ambientes.

Ray tracing trata facilmente de superfícies curvas e também de fenômenos como reflexão especular, difração e refração. Sua maior desvantagem está nos problemas de *aliasing*. Raios lançados de uma mesma fonte podem se distanciar muito ao se afastarem da mesma, o que pode levar a erros na propagação, devido às lacunas existentes entre os raios. No espaço

existente entre os raios poderia existir, por exemplo, um ocluser que deveria causar uma reflexão. Uma forma de tentar evitar erros como esse é aumentar o número de raios criados, mas isso pode afetar o desempenho do algoritmo.

O método de *beam tracing* corrige o problema de *aliasing* lidando com feixes de luz ou som, ao invés de raios individuais. Como os feixes representam uma região do espaço, os erros causados pelo uso de raios individuais são eliminados. *Beam tracing* também é capaz de tratar fenômenos de reflexão especular, difração e refração. A principal desvantagem do método de *beam tracing* é a necessidade de operações geométricas mais complexas, o que acaba limitando o seu uso a ambientes poliédricos, que permitem simplificar as operações geométricas e a representação do feixe utilizada.

2.2.1

Beam Tracing para Propagação de Som

Para simplificar a explicação, nos concentraremos no caso de ambientes 2D e fontes sonoras fixas. Depois veremos as modificações necessárias para inclusão de fontes móveis.

Para o caso de fontes fixas, o algoritmo, apresentado em [32], é dividido em duas etapas. A primeira etapa, feita como pré-processamento, cuida da propagação dos feixes de som no ambiente, sem levar em consideração a posição do receptor. A segunda etapa, realizada em tempo de execução, cuida da descoberta dos caminhos de propagação até o receptor, ou seja, ela calcula a resposta do ambiente ao impulso em um determinado ponto.

Como não se sabe a posição do receptor durante o pré-processamento, feixes são criados de forma a cobrir o máximo possível do ambiente, parando a criação de novos feixes apenas quando a atenuação do som fica muito grande ou quando a quantidade de memória utilizada aumenta significativamente.

O pré-processamento consiste na construção da estrutura de dados conhecida como *beam tree*. A *beam tree* é uma estrutura de árvore em que cada nó corresponde a um feixe de som, que aponta para o feixe de som que o originou. Isso permite que, dado um feixe, possamos descobrir qual sua fonte. É fazendo esse caminho entre um feixe e sua fonte que os caminhos de propagação entre fonte e receptor são calculados sobre uma *beam tree*. Cada nó do caminho percorrido entre a fonte e um feixe adiciona um novo segmento a um caminho de propagação.

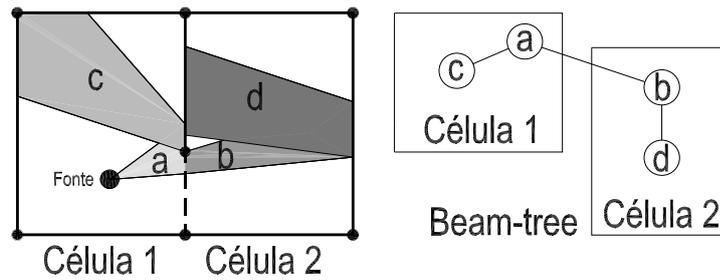


Figura 2.2: Feixes Provenientes de uma Fonte Direcional e sua *Beam Tree*

A determinação da resposta do ambiente ao impulso em tempo de execução é feita descobrindo que feixes contêm o receptor e então percorrendo a *beam tree* até a fonte de cada feixe. A determinação de que feixes contêm o receptor pode ser feita de forma bastante eficiente, como será mostrado a seguir.

Quando um feixe irradia sobre uma superfície, ele dá origem a novos feixes, sendo que estes novos feixes podem ser de reflexão, difração ou transmissão.

Para criar os feixes de propagação corretamente, é preciso saber como os oclusores estão posicionados em relação a um feixe. Isso é necessário, pois um oclusor pode impedir que o feixe incida sobre os demais. Esse posicionamento pode ser determinado de forma eficiente com a construção de uma árvore BSP [13] cujos planos de divisão sejam os mesmos que contêm os oclusores do ambiente.

Além de permitir ordenar rapidamente os oclusores de um ambiente, a construção da árvore BSP divide o ambiente em regiões (ou células) convexas. A fronteira de cada célula é formada por oclusores (regiões opacas) e por regiões transparentes que devem ser conhecidas, pois é a partir delas que os feixes se propagam para as células vizinhas.

Quando um feixe incide sobre uma região transparente da fronteira de uma célula, ele dá origem a um novo feixe de transmissão. Limitar os feixes a uma região convexa permite simplificar a representação dos mesmos e permite também descobrir de forma eficiente que feixes contêm o receptor em um determinado instante. Para isto, basta associar a cada região convexa os feixes criados em seu interior. Assim, em tempo de execução, basta descobrir a região que contém o receptor e então verificar os feixes contidos na mesma. A Figura 2.2 ilustra a *beam tree* correspondente à propagação do som proveniente de uma fonte direcional e a associação dos feixes às regiões convexas definidas pela árvore BSP.

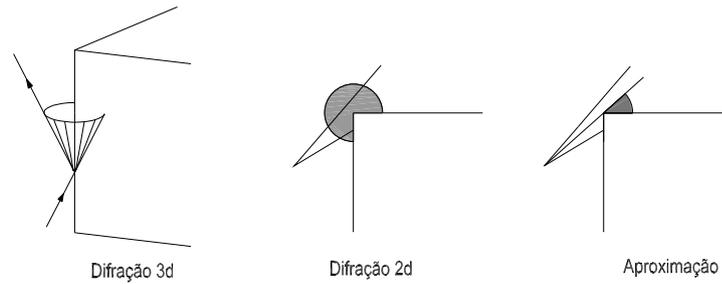


Figura 2.3: Feixes de Difração 3D e 2D

Feixes de reflexão são criados quando um feixe incide sobre uma região opaca da fronteira de uma célula. A fonte do novo feixe é obtida refletindo-se a fonte do feixe incidente sobre o plano da região opaca. Os limites do novo feixe são determinados pela interseção da região opaca com o feixe incidente.

Feixes de difração ocorrem sempre que um feixe incide sobre uma quina do ambiente. A teoria geométrica uniforme da difração [37, 55] pode ser usada para modelar esse fenômeno de espalhamento. A difração pode ser descrita como uma reflexão que ocorre em todas as direções ao redor de uma quina. O ângulo com que os raios difratados saem da quina é igual ao ângulo de incidência da frente de onda, o que dá origem à figura de um cone, cujo ápice se localiza no ponto de incidência da onda. A teoria geométrica da difração também permite calcular a atenuação da amplitude de uma onda decorrente de uma difração. A Figura 2.3 ilustra os feixes formados por uma difração.

Como a difração espalha o som em todas as direções ao redor de uma quina, o número de novos feixes criados a partir de um feixe de difração pode ser muito grande. Para evitar um grande aumento no número de feixes, a aproximação adotada em [55] foi utilizada. Ao invés de propagar o som em todas as direções, apenas a região de sombra (destacada na Figura 2.3 em “aproximação”) é utilizada. A utilização da difração apenas na região de sombra pode ser justificada devido à grande atenuação que a onda difratada sofre. Nas regiões localizadas fora da região de sombra, a contribuição da onda difratada ao campo de pressão pode ser desconsiderada, sem que isso cause perdas significativas, já que a intensidade sonora da onda difratada é muito menor que a das ondas incidentes e refletidas.

É importante armazenar na *beam tree* o tipo de cada um de seus nós, já que cada tipo de nó corresponde a um fenômeno com tratamento diferenciado dos demais. A Figura 2.4 ilustra como um caminho de propagação

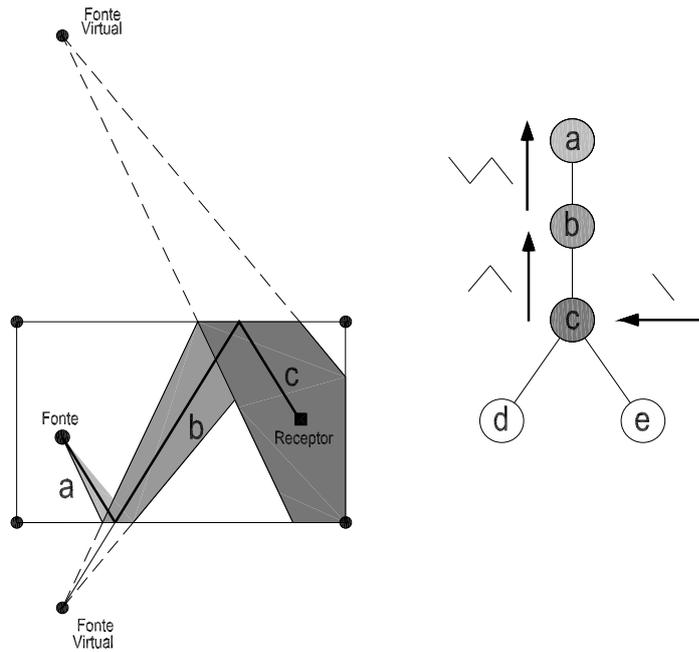


Figura 2.4: Construção de Caminhos de Propagação sobre *Beam Trees*

é montado. Os feixes *d* e *e* foram omitidos para simplificar a figura. Note como o caminho é formado ao longo do percurso entre o feixe que contém o receptor e a fonte (indicado sobre as setas localizadas ao lado da árvore).

De acordo com os testes realizados em [32], a criação da *beam tree* como pré-processamento e o procedimento descrito acima para encontrar os caminhos de propagação permite a utilização de caminhos de propagação com um número grande de reflexões em tempo real. Para fontes móveis, segundo o autor, seria necessário aumentar a performance do algoritmo em duas ordens de grandeza.

2.2.2 Beam Tracing e Fontes Móveis

Em [36] foi introduzido o uso de um servidor dedicado para as simulações de áudio. Isso, e três modificações apresentadas, permitiram o uso de fontes móveis em tempo real, mesmo com vários receptores e sem uma etapa de pré-processamento.

As três modificações são:

- *Beam tracing* com prioridade (*priority driven beam tracing*)
- *Beam tracing* bidirecional
- *Beam tracing* amortizado

O novo algoritmo surgido após a inclusão dessas modificações leva em consideração a posição do usuário na hora de traçar os feixes, buscando sempre traçar o menor número possível de feixes. No *beam tracing* com prioridade, a determinação do ramo da *beam tree* que deve ser expandido passa a ser importante e é feita associando diferentes prioridades a cada ramo. As funções de prioridade apresentadas buscam dar ênfase a ramos acusticamente mais importantes, ou seja, os ramos que gerem os caminhos de propagação mais curtos. São esses ramos que apresentam uma amplitude maior e também podem ter sua posição bem identificada. As funções de prioridade apresentadas em [36] podem ser descritas, de forma geral, como a soma da distância percorrida pelo feixe e uma estimativa da distância até o receptor.

A segunda modificação foi introduzida buscando diminuir o custo de traçar caminhos contendo um número elevado de reflexões, já que o tempo de execução do algoritmo original crescia exponencialmente com o número de reflexões presentes em um caminho. Além das *beam trees* criadas a partir de cada fonte sonora, uma *beam tree* adicional é criada para cada receptor, que passa a ser tratado como uma fonte pontual. Como o nome *beam tracing* bidirecional sugere, os caminhos de propagação passam a ser construídos a partir de dois pontos: fontes sonoras e receptores. A união dos caminhos provenientes do receptor e das fontes é conseguida armazenando, em cada oclisor do ambiente, referências para os feixes que incidem sobre o mesmo. Quando um feixe incide sobre um oclisor, a lista de referências do mesmo é percorrida e, caso haja interseção de dois feixes incidentes, um caminho entre a fonte e o receptor pode ser encontrado.

Beam tracing amortizado busca aumentar o desempenho do algoritmo reaproveitando caminhos já traçados. Para isso, os feixes são traçados a partir de uma região do plano ao invés de um ponto. Com isso, o caminho de propagação pode ser calculado para todos os pontos dessa região, amortizando o custo da descoberta de cada caminho. A *beam tree* passa a ser substituída por uma estrutura que não representa exatamente os caminhos de propagação, mas permite a descoberta dos mesmos, uma vez que a posição da fonte e do receptor forem determinadas. Essa estrutura é bastante similar à *beam tree*. A diferença está nos nós que agora representam os oclusores do ambiente, nos quais os feixes refletem e sofrem difração.

Como esta nova árvore não representa os feixes de propagação exatamente, mais tempo será gasto calculando os caminhos de propagação (será necessário resolver um sistema de equações e validar a resposta obtida na resolução). No entanto, o ganho de desempenho obtido com as mudanças

descritas acima não é comprometido.

O aumento de desempenho foi conseguido com as três modificações descritas acima e com o uso de processamento paralelo, tirando proveito da coerência espacial e temporal existente na posição das fontes e receptores enquanto eles se movimentam. Um caminho é traçado inicialmente entre a região que contém a fonte e a região que contém o receptor. Enquanto eles se movimentam dentro dessas regiões o mesmo caminho pode ser utilizado, deixando espaço para o cálculo de um novo caminho, feito em paralelo para as posições que a fonte e o receptor provavelmente ocuparão no futuro.