
Instituto de Computação
Universidade Estadual de Campinas

Representação de Plantas para Renderização em Tempo Real

Edgar Vilela Gadbem

Este exemplar corresponde à redação final da Dissertação devidamente corrigida e defendida por Edgar Vilela Gadbem e aprovada pela Banca Examinadora.

Campinas, 04 de Novembro de 2011.

Prof. Dr. Hélio Pedrini (Orientador)

Dissertação apresentada ao Instituto de Computação, UNICAMP, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciência da Computação.

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA POR
MARIA FABIANA BEZERRA MÜLLER - CRB8/6162
BIBLIOTECA DO INSTITUTO DE MATEMÁTICA, ESTATÍSTICA E
COMPUTAÇÃO CIENTÍFICA - UNICAMP

G116r Gadbem, Edgar Vilela, 1984-
Representação de plantas para renderização em
tempo real / Edgar Vilela Gadbem. - Campinas, SP :
[s.n.], 2011.

Orientador: Hélio Pedrini.
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de
Campinas, Instituto de Computação.

1. Computação gráfica. 2. Modelos geométricos.
3. Vegetação – Simulação por computador. I. Pedrini,
Hélio, 1963-. II. Universidade Estadual de Campinas.
Instituto de Computação. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em inglês: Plant representation for real-time rendering

Palavras-chave em inglês:

Computer graphics

Geometric modeling

Computer simulation

Área de concentração: Ciência da Computação

Titulação: Mestre em Ciência da Computação

Banca examinadora:

Hélio Pedrini [Orientador]

Esteban Walter Gonzalez Clua

Jorge Stolfi

Data da defesa: 04-11-2011

Programa de Pós-Graduação: Ciência da Computação

TERMO DE APROVAÇÃO

Dissertação Defendida e Aprovada em 04 de novembro de 2011, pela
Banca examinadora composta pelos Professores Doutores:



Prof. Dr. Esteban Walter Gonzalez Clua
Instituto de Computação / UFF



Prof. Dr. Jorge Stolfi
IC / UNICAMP



Prof. Dr. Hélio Pedrini
IC / UNICAMP

Representação de Plantas para Renderização em Tempo Real

Edgar Vilela Gadbem

04 de Novembro de 2011

Banca Examinadora:

- Prof. Dr. Hélio Pedrini (Orientador)
- Prof. Dr. Esteban Walter Gonzalez Clua
Instituto de Computação – UFF
- Prof. Dr. Jorge Stolfi
Instituto de Computação – UNICAMP

Resumo

Com a crescente capacidade gráfica de computadores e outros equipamentos eletrônicos como celulares e videogames, cenas interativas que demandam alto grau de realismo têm se tornado cada vez mais frequentes, sejam em jogos ou em ambientes de realidade virtual. Com uma considerável complexidade, as plantas apresentam um desafio em tais cenas. Devido aos avanços nas técnicas de simulação do crescimento de plantas, obtidos com a aplicação de conhecimentos de botânica nessas simulações, a geração de modelos detalhados de plantas tornou-se possível. Entretanto, estes modelos apresentam uma grande quantidade de triângulos em sua representação. Com a estrutura complexa das plantas, técnicas tradicionais de simplificação de modelos não produzem bons resultados, por isso, vários estudos foram feitos para a criação de técnicas de representação e simplificação específicas para plantas, em busca de manter o realismo e ganhar em desempenho. Este trabalho avalia um conjunto de técnicas de representação com o intuito de combiná-las em uma abordagem mista que proporcione um melhor resultado visual em comparação com a aplicação individual dessas técnicas, bem como oferece melhorias frente aos avanços das placas gráficas e identifica situações de uso de cada técnica com base na estrutura particular de diferentes espécies de plantas. O trabalho apresenta uma estrutura de dados, organizada em ramos e nós terminais, para facilitar a renderização em tempo real dos modelos das plantas em cenas por meio da aplicação das técnicas abordadas.

Abstract

Due to the increasing graphical capabilities of computers and other electronic devices such as cell phones and video games, interactive scenes that require a high degree of realism have become more often, for instance, in games or virtual reality environments. With a considerable complexity, representation of plants is a challenging task in such scenes. Due to advances in simulation techniques for plant growth, obtained by applying knowledge of botany in the simulations, the generation of detailed models of plants became possible. However, these models contain a large number of triangles in their representation. As a consequence of the complex structure of plants, traditional simplification techniques of models do not produce good results, therefore, several studies have been conducted to create techniques for plant representation and simplification with proper balance between realism and performance. This work analyzes a set of representation techniques in order to combine them into a mixed approach that provides better visual results compared to the individual application of these techniques. It also offers improvements through the advances of graphics units and identifies scenarios for each technique based on the particular structure of different plant species. The work presents a data structure, organized into branches and terminal nodes, to facilitate real-time rendering of plant models in scenes with the application of the discussed techniques.

Agradecimentos

Agradeço à minha namorada Roberta, por ter dividido comigo o caminho até aqui, sempre com carinho apoio e motivação.

Aos meus Pais, Edgar e Berenice, por uma ótima criação, apoio e dedicação, e ao meu irmão Edson pelo companheirismo, amizade e apoio.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Hélio Pedrini pelas direções e conhecimentos compartilhados, além do grande apoio e paciência.

Finalmente, agradeço a todos os meus amigos, que me mantiveram motivado durante esse tempo com seu interesse e companhia.

Sumário

Resumo	v
Abstract	vi
Agradecimentos	vii
1 Introdução	1
1.1 Objetivos e Contribuições	2
1.2 Organização do Texto	3
2 Trabalhos Relacionados	4
2.1 Síntese de Modelos	5
2.2 Representação	7
2.2.1 Representação detalhada	7
2.2.2 Representação global	8
2.2.3 Representações multiescala	9
3 Metodologia	14
3.1 Modelagem de Plantas	16
3.1.1 L-Studio	16
3.1.2 Xfrog	17
3.2 Simplificação de Modelos e Multirresolução	18
3.2.1 Separação de ramos e nós terminais	19
3.2.2 Simplificação de ramos	20
3.2.3 Simplificação de nós terminais	24
3.3 Representação e Renderização	26
3.3.1 Representação dos modelos das plantas	27
3.3.2 Renderização dos modelos	28
3.3.3 Seleção dos níveis de detalhe	28

4	Resultados Experimentais	30
4.1	Plataforma	30
4.2	Conjunto de Testes	31
4.2.1	Moleiro-Rosa	31
4.2.2	Lilás-Comum	31
4.2.3	Bordo-Japonês	32
4.2.4	Pinheiro-do-Canadá	33
4.2.5	Árvore-Base	34
4.3	Simplificação de Ramos	35
4.3.1	Simplificação estrutural	35
4.3.2	Substituição de ramos por linhas	40
4.3.3	Combinação das técnicas	44
4.4	Simplificação de Nós Terminais	51
4.4.1	Representação por pontos	51
4.5	Discussão dos Resultados	57
5	Conclusões e Trabalhos Futuros	61
	Bibliografia	63

Capítulo 1

Introdução

Simulações interativas, tais como realidade virtual e jogos, têm recebido importância crescente no cotidiano. Com a evolução do poder de processamento atual, principalmente dos novos equipamentos gráficos, as cenas apresentadas nestas simulações contêm cada vez mais realismo. Cenas naturais, que fazem uso de árvores e outras plantas, são corriqueiras e muito importantes em tais simulações, demandando não apenas o uso de técnicas de representação de plantas com realismo, mas também alto desempenho.

A representação de plantas apresenta certos desafios. Uma modelagem com alto grau de realismo requer um número elevado de polígonos para representar uma planta com todos os seus ramos e suas folhas. Uma cena pode normalmente conter várias árvores, arbustos e outras plantas, tal que o número de polígonos da cena pode superar com facilidade o poder de processamento gráfico atual, impedindo que essa simulação possa ser executada com uma taxa de quadros considerada interativa para uma aplicação. Por esta razão, há várias técnicas [6, 17, 23] que tentam reduzir a complexidade geométrica dos modelos apresentados para atingir as taxas de quadro desejadas.

Técnicas de simplificação geométrica comumente utilizadas em objetos poligonais em geral não fornecem resultados adequados quando aplicadas à renderização de plantas. A estrutura da planta acaba sofrendo alterações indesejadas, espaços vazios são preenchidos e o aspecto geral da planta simplificada difere de seu modelo original. Por isso, estudos específicos têm sido realizados para a simplificação de plantas, tais como técnicas que buscam uma forma de representá-las de forma geral, mantendo seu aspecto com o uso de pouca geometria ou ainda técnicas de simplificação com vários níveis de detalhe para manter o aspecto da planta quando o observador está próximo e simplificá-la levando em conta a distância do observador.

Para a representação de plantas, normalmente realizada de forma artística em pacotes de modelagem 3D, há também abordagens computacionais. Modelos procedurais para representar plantas geralmente utilizam *L-system*, ou seja, uma linguagem formal intro-

duzida por Lindenmayer [20] para a modelagem de divisão celular e hoje utilizada pela grande maioria dos pesquisadores da área. A *L-system* permite a criação de plantas baseadas em suas características biológicas por meio de uma simulação de seu crescimento e ramificação. Tal representação apresenta também a possibilidade de simplificar o modelo gerado baseando-se em sua estrutura, removendo, por exemplo, ramos secundários para manter a aparência geral da planta, diminuindo assim o número de polígonos necessários para representá-la.

Este trabalho investiga e implementa técnicas para a representação de plantas e simplificação de seus modelos. O estudo visa avaliar cada técnica para identificar possíveis melhorias nas próprias técnicas e melhores casos de uso para elas, além da possibilidade de combinação entre técnicas distintas para, assim, sanar seus principais problemas e obter uma abordagem mista com as vantagens de cada técnica utilizada. O trabalho também propõe uma estrutura de dados para facilitar a renderização em tempo real dos modelos das plantas em cenas com a aplicação da metodologia proposta.

1.1 Objetivos e Contribuições

Um dos principais objetivos deste trabalho é o estudo de diferentes técnicas existentes de representação e simplificação de plantas com foco em sua aplicação em cenas de simulações interativas, por exemplo, em realidade virtual, jogos e simuladores de voo. Tal estudo visa avaliar a qualidade da representação por meio do realismo dos modelos de planta e do desempenho destas representações nas cenas geradas.

Um objetivo, ligado a esta análise de desempenho, é a tentativa de identificar pontos de melhoria de desempenho em cada técnica, além da avaliação de possíveis ganhos utilizando-se técnicas recentes como, por exemplo, o uso de *pipeline* programável em suas implementações. Esta análise visa também identificar situações ideais de uso de cada técnica como, por exemplo, a distância ideal do observador ou uma determinada densidade da vegetação.

Outro objetivo deste trabalho é avaliar a possibilidade e o ganho da combinação de técnicas de representação para a criação de uma abordagem mista, adequada para a representação com realismo de cenas naturais a uma taxa de quadros interativa, tirando proveito das principais vantagens identificadas em cada técnica e sanando seus respectivos problemas.

Uma contribuição para o estudo das técnicas de representação de plantas é a criação de um método de representação ideal para a avaliação de desempenho e qualidade visual de cada planta. Este método, apresentado na seção 3.3, facilita novos estudos e desenvolvimento de técnicas de simplificação e representação de plantas, mesmo que específicos para partes das plantas.

A análise aprofundada de técnicas existentes é outra contribuição deste trabalho. Além da simples avaliação visual e de desempenho, a análise de cada técnica em diferentes espécies de plantas, com diferentes estruturas, pode identificar quais abordagens produzem melhores resultados em cada tipo de planta, guiando trabalhos futuros nesta área.

Outras contribuições mais específicas e diretas são a avaliação da técnica de representação de nós terminais das plantas com pontos em plantas já simplificadas com *billboards* (subseção 2.2.2), com uma proposta de tratamento para transparência, ausente nos trabalhos originais, além da implementação desta mesma técnica utilizando *vertex shaders* para a viabilização de seu uso em distâncias variadas e menores do que na técnica original.

Finalmente, a combinação de técnicas de simplificação existentes mostrou-se superior em termos de desempenho e qualidade visual em relação às técnicas aplicadas de forma isolada.

1.2 Organização do Texto

O texto está organizado da seguinte forma. O capítulo 2 descreve alguns trabalhos importantes da literatura para representação e renderização de plantas. No capítulo 3 é apresentada a metodologia deste trabalho na busca pelos objetivos citados anteriormente. Os resultados obtidos com a aplicação da metodologia são apresentados e discutidos no capítulo 4. Finalmente, no capítulo 5 são apresentadas as conclusões deste trabalho, juntamente com propostas para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Trabalhos Relacionados

Este capítulo apresenta alguns trabalhos existentes na literatura relacionados ao problema sob investigação, os quais são agrupados de acordo com a ênfase dada à representação de plantas em uma cena.

Primeiramente, estudos relacionados à modelagem de plantas são apresentados na seção 2.1. Estes estudos foram utilizados neste trabalho de maneira indireta, mas ainda assim são muito importantes, por determinar a construção dos modelos de plantas. Revisões mais detalhadas sobre modelagem de plantas podem ser encontradas em [28] e [29].

Na seção 2.2, são apresentados estudos relativos à representação dos modelos de plantas em cenas de computação gráfica. Esses estudos, por sua vez, são agrupados de acordo com o tipo de representação tratado por eles, seja uma representação mais detalhada, ideal para visualizações científicas, ou uma representação global, com maior ênfase no desempenho da cena do que na precisão da representação. Uma revisão sobre estas representações pode ser encontrada em [5], em que a classificação é baseada no nível de detalhe apresentado, conforme ilustrado na Figura 2.1.

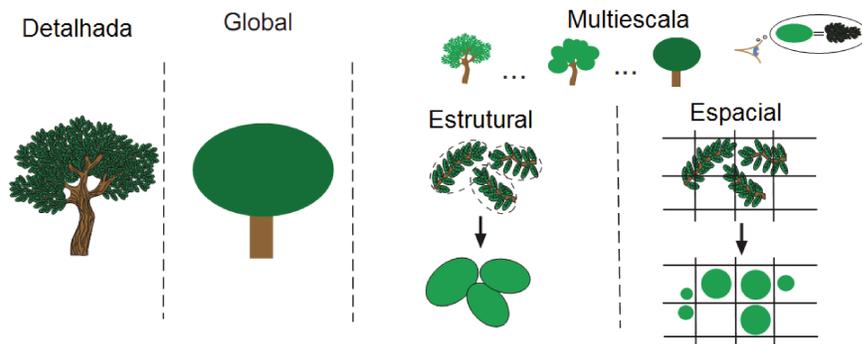


Figura 2.1: Classificação da representação de árvores baseada no nível de detalhe [5].

Finalmente, ainda na seção 2.2, são apresentados trabalhos sobre a simplificação e a

representação multiescala de modelos de plantas. Tais trabalhos tratam da possibilidade de uma estrutura dinâmica de plantas, com variação do nível de detalhe apresentado de acordo com a importância ou o tamanho do modelo na cena, em busca de um maior desempenho geral da mesma.

2.1 Síntese de Modelos

A criação de modelos tridimensionais para a representação de plantas pode ser feita de várias formas. Mais comumente, um modelo de planta pode ser resultado do trabalho de um artista por meio de uma ferramenta de modelagem ou ainda resultado de uma simulação científica. Embora a abordagem artística seja bastante comum, a abordagem científica na área de computação gráfica claramente traz aspectos interessantes e mais relacionados com o escopo deste trabalho. O entendimento da construção dos modelos influencia diretamente técnicas de representação e de simplificação de plantas, por isso o estudo desses trabalhos é de grande importância aqui.

A síntese de modelos de plantas por meio da simulação de seu crescimento e de sua estrutura biológica é um tema recorrente não só da botânica mas também da computação gráfica, principalmente na área de visualização científica. Nas pesquisas sobre este tema, tenta-se reproduzir a estrutura de ramificação, o crescimento de órgãos, a distribuição de nutrientes durante o crescimento e vários outros fatores que determinam o aspecto final de uma planta.

Para modelar esses parâmetros, a maioria dos trabalhos recorre à linguagem formal *L-system*, introduzida por Lindenmayer [20] e estendida por Prusinkiewicz e Lindenmayer [31]. Esta linguagem representa tais parâmetros por cadeias de caracteres que os representam e que são substituídos e reescritos de acordo com regras específicas, visando modelar diferentes fatores no crescimento do organismo da planta. Uma revisão desta linguagem e de suas vantagens pode ser encontrada em [28, 29].

Os trabalhos de síntese de plantas apresentaram historicamente duas vertentes distintas, uma delas trata a planta como uma estrutura arquitetural e outra como uma estrutura auto-organizável.

A vertente arquitetural, inicialmente definida por Honda [16] e com a essência matemática muito bem capturada por Mandelbrot [24] com árvores fractais, considera as plantas como estruturas recursivas auto-similares, que são caracterizadas por parâmetros como ângulos entre ramos e tamanho dos módulos, partes auto-similares da estrutura, nos diferentes níveis de recursão. Esse modelo considera as características de cada espécie de planta no crescimento, regulando assim o tamanho dos ramos e a taxa de criação de novos ramos e gemas, que podem dar origem a novos ramos e flores ou interromper o crescimento, entrando em um estado de dormência. Uma desvantagem desse modelo é

que as plantas tendem a ficar muito regulares, característica presente em algumas espécies apenas enquanto a planta é nova.

Lintermann e Deussen [21] apresentam um método de modelagem e uma interface de usuário amplamente baseados em uma estrutura arquitetural de plantas. Em seu trabalho, partes da planta são representadas por componentes que podem gerar geometria a partir de regras de construção bem definidas, inclusive *L-Systems*, e tais componentes são agrupados com uma relação específica entre si, gerando a estrutura global da planta. Um exemplo do método e da interface pode ser observado na Figura 2.2. Deste trabalho, originou-se o pacote de modelagem *Xfrog* [41].

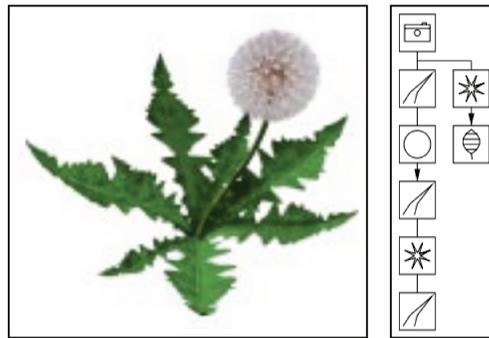


Figura 2.2: Planta dente de leão e seu grafo correspondente. Imagem extraída de [21].

A outra vertente, idealizada inicialmente por Ulam [39], trata a planta como uma estrutura auto-organizável, que regula seu crescimento baseada no espaço a sua volta. Nesse modelo, os ramos da planta crescem buscando espaço livre, uma maior incidência de luz ou outro recurso, o que reflete na competição entre os ramos da própria planta, baseada na percepção das gemas do espaço ao seu redor. O modelo tem a vantagem de simplificar o processo de síntese por não exigir muitas informações sobre a distribuição dos ramos e de levar em conta a influência dos ramos entre si, no entanto, os modelos gerados totalmente baseados na competição por recursos tendem a ser bastante desorganizados. Os trabalhos de Sachs e seus colaboradores [35, 36] observaram que esta vertente representa melhor a essência do desenvolvimento de árvores quando comparada com a representação arquitetural.

Palubicki et al. [27] apresentam um método que utiliza simultaneamente as duas abordagens anteriores, com o uso de uma estrutura auto-organizável com competição por espaço e luz entre os ramos e também com o uso de parâmetros de estrutura arquitetural para distribuição de gemas, além de um mecanismo de controle apical. Este método consegue extrair as principais vantagens de ambas as abordagens utilizadas e gerar um conjunto de plantas com bom nível de realismo, conforme ilustrado na Figura 2.3.



Figura 2.3: Cena sintética com árvores auto-organizáveis [27].

2.2 Representação

Além da simulação do crescimento da planta para a geração de um modelo detalhado com realismo, há também estudos de formas de representar geometricamente as plantas, sendo que a representação detalhada por meio de um modelo tridimensional é uma delas.

Esses estudos são geralmente motivados pela complexidade das cenas a serem exibidas, e buscam formas alternativas de representar plantas de maneira convincente, reduzindo o grande custo computacional envolvido na exibição de um modelo poligonal de planta muito detalhado.

As seguintes seções abordam diferentes formas de representação de plantas relevantes para este trabalho e os estudos a elas relacionados.

2.2.1 Representação detalhada

A representação detalhada de plantas é a forma tradicional de representação utilizando polígonos para delinear precisamente a planta e seus diversos órgãos, assim como texturas detalhadas nestes polígonos para a obtenção de uma grande fidelidade do modelo em relação à planta por ele representada.

Como exemplo desta representação, um dos primeiros trabalhos na área de modelagem de plantas foi realizado por Bloomenthal [4]. Nesse trabalho, são abordados detalhes como distribuição de texturas pelo tronco e galhos, alterações no modelo em juntas de galhos

ao tronco e em bifurcações e texturização de folhas.

Outros exemplos podem ser encontrados nos resultados dos processos de síntese citados anteriormente, que são apresentados com esta representação, uma vez que os objetivos da síntese são a reprodução fiel da planta por meio da simulação de seu crescimento e a interação com o meio.

Essa grande quantidade de detalhes faz com que, geralmente, os modelos de plantas detalhados sejam proibitivos em ambientes interativos, devido ao alto custo computacional de sua renderização.

2.2.2 Representação global

Em aplicações que necessitam de uma alta taxa de quadros em suas cenas, a representação detalhada pode ser muito custosa, conforme mencionado anteriormente. Por isso, técnicas que tentam representar plantas de forma geral e menos detalhadas foram desenvolvidas. Estas técnicas se baseiam na percepção do observador do aspecto geral das plantas e utilizam formas mais simples e com menos geometria para representá-las.

Muitas destas técnicas utilizam primitivas diferentes de um modelo triangulado para a representação global de plantas. Técnicas baseadas em imagens, por exemplo, utilizam poucos triângulos apenas para dispor texturas que carregam em si todo o detalhe da planta.

Essas abordagens apresentam um alto ganho em desempenho e, por isso, são amplamente utilizadas. No entanto, vários problemas visuais surgem desta representação incompleta, afetando o realismo da cena. Destes, os mais comuns são problemas de iluminação. Apesar disso, às vezes é válido comprometer realismo por desempenho, tal que o estudo dessas técnicas se faz necessário.

Billboards

Uma técnica bastante utilizada para renderização em tempo real de plantas é o uso de *billboards* [34]. *Billboards* são imagens que estão sempre voltadas para a câmera em uma cena 3D, que no caso de plantas geralmente apresentam a restrição para que a rotação ocorra apenas no eixo vertical (ao longo do tronco da planta). Esta técnica simples é usada ainda hoje por ser extremamente eficiente. Com uma ou poucas imagens é possível apresentar uma grande quantidade de detalhes de uma planta utilizando pouquíssima geometria.

O *billboard* clássico, com apenas uma primitiva orientada segundo à câmera, não apresenta paralaxe, que é a alteração da posição angular de dois pontos estacionários relativos um ao outro em movimento. Por isso, um outro modo usual de representação são *billboards* cruzados, que não estão voltados para a câmera mas sim dispostos radialmente

em torno de um eixo e, por isso, apresentam paralaxe, apesar de também apresentarem artefatos quando algum dos *billboards* é visto sob um ângulo muito estreito. Ambos os métodos têm as restrições de não permitirem animação e de ter a iluminação estática nas imagens pré-processadas.

Uma extensão da técnica de *billboards* cruzados foi proposta por Jakulin [19], em que o tronco principal e os membros são representados com geometria poligonal e a folhagem com diversas fatias em *billboards*. Essa abordagem apresenta um resultado convincente e pode aproximar uma iluminação dinâmica por meio das normais de cada fatia. Algumas ferramentas gráficas comerciais como, por exemplo, o *SpeedTree* [18], utilizam uma técnica parecida na representação de plantas, modelando o tronco e os membros geometricamente e representando grupos de folhas como *billboards* tradicionais. Assim, pode-se também fazer uma animação básica em cada grupo de folhas, aumentando-se um pouco o realismo da planta.

Algumas outras extensões para *billboards* têm sido apresentadas para tentar melhorar a qualidade visual do método de Jakulin. Qin et al. [32] apresentam uma estrutura que combina vários *buffers* 2D para, além da imagem da árvore, obter também outros atributos, tais como normais, sombras e uma profundidade relativa, de modo a poder aplicar uma iluminação mais realista ao modelo de *billboard*.

A criação dos *billboards* pode ser feita como pré-processamento com as imagens desejadas ou em tempo de execução como o caso da técnica de impostores. Os impostores são *billboards* gerados a partir da renderização do próprio modelo. A geração destes impostores pode ser realizada dinamicamente [12, 13], o que pode exigir muito processamento gráfico se a geração ocorrer frequentemente. Uma outra forma de gerar os impostores é a renderização do modelo em diversos pontos de vista em tempo de pré-processamento [1, 25, 37] e interpolar estes pontos de vista em tempo de execução.

2.2.3 Representações multiescala

Com a representação global das plantas, ganha-se o desempenho tão necessário para aplicações interativas, porém, perde-se qualidade na representação. As plantas perdem realismo quando vistas mais de perto e os defeitos das simplificações realizadas se tornam mais perceptíveis. Levando em conta ainda o alto custo de uma representação detalhada, pode-se notar a importância de técnicas multiescala para aplicações interativas.

Representações em multiescala variam a complexidade e o detalhamento dos modelos de acordo com a distância do observador, por isso, são também chamadas de representações em nível de detalhe (*level of detail* - LOD). Há várias técnicas de simplificação geométrica para a criação de níveis de detalhe de objetos reduzindo seu número de polígonos para níveis mais baixos [15, 17]. Tais técnicas, no entanto, não produzem bons

resultados para plantas, pois tendem a unir polígonos de ramos diferentes, alterando sua representação visual, além de mudanças não só na estrutura geométrica como também na iluminação do modelo. Por esses motivos, técnicas multiescala baseadas na estrutura e representação da planta foram desenvolvidas e são apresentadas a seguir.

Hierarquia de billboards

Uma extensão para a técnica de *billboards*, apresentada anteriormente e que tem uma abordagem multiescala, é a de se representar a árvore com uma estrutura hierárquica de *billboards*. Assim, em um nível de detalhe menor, a árvore é representada como um único *billboard* e, em níveis de maior detalhe, este número aumenta podendo chegar a utilizar algumas centenas de polígonos para a representação (Figura 2.4).



Figura 2.4: *Billboards* hierárquicos em multiescala [6].

Os *billboards* são dispostos para representar principalmente a folhagem da árvore, de forma que o nível de detalhe diminui, agrupando-se *billboards* de um mesmo nível hierárquico, por exemplo, grupos de folhas de um determinado ramo em um único *billboard*. Um problema desta abordagem é a transição brusca entre os níveis de detalhe, que pode ser minimizada realizando-se uma transição entre os níveis com variação de transparência por pixel. Outro problema é que tal técnica não é isenta de problemas de paralaxe quando o observador está próximo da árvore. Assim, visões de baixo ou de cima da árvore normalmente apresentam resultados incorretos.

Colditz et al. [6] utilizam um modelo com toda a geometria como o primeiro nível de detalhe e gradualmente passam, por meio de transparência, para uma representação completamente por *billboards*. Assim, evita-se o problema de paralaxe em movimentos próximos e também evita-se transições bruscas entre os níveis de detalhe. No entanto, quando há várias árvores próximas do observador, existem vários modelos geométricos completos sendo renderizados ao mesmo tempo, fazendo com que o desempenho nessas

situações decresça significativamente, dificultando a manutenção de uma taxa de quadros interativa em cenas com um grande número de plantas com o observador próximo a elas. O resultado geral, no entanto, é bastante satisfatório, conseguindo sanar os problemas visuais citados.

Uma outra técnica híbrida já citada é o uso do tronco e galhos principais como um modelo com geometria e a representação da folhagem como *billboards*. A aplicação da abordagem multiescala apresentada acima se aplica às folhas nesta representação e a simplificação da geometria com a distância do observador se aplica ao tronco e galhos principais. Tipicamente, quando há uma grande distância do modelo ao observador é utilizado apenas um *billboard* simples para representação de toda a árvore como último nível de detalhe.

Representação baseada em pontos e linhas

Seguindo a abordagem da representação global para níveis de detalhe menores, alguns estudos propõem a substituição da geometria triangulada dos modelos por primitivas mais simples como linhas e pontos¹, distribuídos espacialmente de forma a manter o aspecto geral da planta quando observada de longe.

Uma grande vantagem da utilização destas primitivas mais simples no lugar dos triângulos aparece quando a distância ao observador é muito grande e os triângulos passam a ocupar frações de pixels. Nestas condições, o processamento gráfico necessário para a renderização destes triângulos é desperdiçado.

No caso de árvores e outras plantas, comumente um grande número de pequenos triângulos forma sua folhagem, o que torna possível a substituição desses triângulos por uma representação simplificada por pontos. Além disso, os ramos apresentam, de modo geral, uma forma razoavelmente linear, sendo assim considerados bons candidatos a serem substituídos por linhas.

Nos trabalhos [9, 11, 40] são apresentados modelos de renderização de árvores usando-se uma combinação de polígonos, pontos e linhas. Para conciliar qualidade com desempenho obtido pelos pontos, utiliza-se essa combinação como uma abordagem multiescala. A geometria da planta é reinterpretada como pontos para a folhagem e linhas para os ramos à medida em que o observador se afasta. Dessa forma, o modelo vai se tornando mais simples geometricamente à medida em que ele se distancia do observador, porém, mantendo seu aspecto geral.

Ainda em [9], uma combinação entre os triângulos de um modelo e os pontos que os substituem é implementada utilizando a área visível dos triângulos como parâmetro. Além disso, uma estrutura hierárquica de pontos simplifica também o conjunto de pontos

¹Neste trabalho, assim como nos trabalhos relacionados, “pontos” são primitivas de renderização que podem ser quadrados ou círculos, e não a primitiva adimensional de posição no espaço.

que já substitui os triângulos, agrupando-os em pontos únicos, com a soma da área e média da posição, quando a área visível dos anteriores é menor que um pixel.

Simplificação estrutural

Uma abordagem interessante de representação de plantas em multiescala é reduzir a complexidade do modelo utilizado baseando-se na estrutura da planta. Removendo partes da planta que não seriam muito bem percebidos de uma certa distância e que não alterariam a estrutura geral, pode-se obter um modelo mais simples, que exige menos processamento gráfico e que apresenta um aspecto geral bastante similar ao original.

Esta simplificação pode ser feita manualmente por meio de um pacote de modelagem, ficando a critério de quem está simplificando o modelo selecionar quais ramos devem ser removidos em níveis de detalhe menores. No entanto, em modelos gerados proceduralmente, suas regras de construção podem ser utilizadas para esta seleção.

Lluch et al. [22] desenvolveram uma abordagem para essa simplificação baseando-se na estrutura paramétrica de representação gerada com *L-systems*. A partir da cadeia gerada para uma representação de árvore, encontram-se, com uma métrica pré-definida como o comprimento do ramo, altura, ordem de geração, entre outras, os ramos que menos contribuem para a representação visual da planta e os removem em cada nível de detalhe menor, como pode ser observado na Figura 2.5.

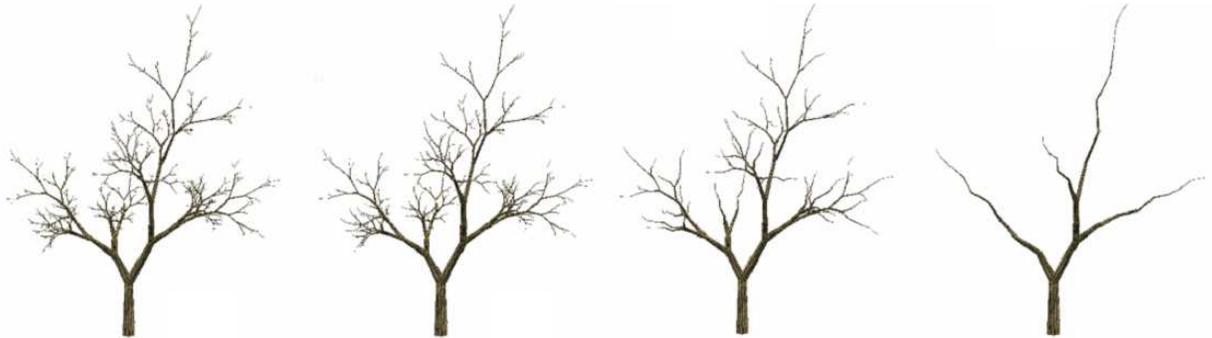


Figura 2.5: Modelo multiescala simplificado proceduralmente baseado na estrutura da árvore [22].

Simplificação dependente da visão

A posição do observador e seu campo de visão são fatores extremamente importantes para uma cena interativa. Objetos podem ser ignorados pelo renderizador e animações e movimentos podem ser desconsiderados. Um exemplo destas simplificações na área de

renderização de plantas pode ser encontrado em [14], que gera e anima grama apenas no campo de visão da câmera virtual, economizando-se, assim, processamento e espaço em memória desses dados.

Uma característica bastante marcante em várias espécies de plantas é a grande densidade de folhas. Esta densidade faz com que a posição do observador seja também um fator importante como potencial de simplificação, uma vez que nessas espécies ocorre muita auto-occlusão.

Com uma quantidade grande de folhas ou ramos ocluindo a visão de parte da planta, é possível utilizar uma representação simplificada desta parte, com poucos polígonos apenas para preencher volumetricamente o modelo. Esta é a abordagem explorada nos trabalhos [7, 8, 33]. Neles, a posição do observador é utilizada para identificar nos modelos de plantas quais folhas e ramos têm menor probabilidade de serem vistos ou menor importância no aspecto da planta. Essas partes são então simplificadas pela junção dos triângulos de suas folhas para a criação da representação simplificada.

Um exemplo, extraído de [33], pode ser visto na Figura 2.6. Nela é possível perceber o pequeno impacto visual para o observador, principalmente levando-se em consideração o potencial ganho de desempenho.



Figura 2.6: Exemplo de resolução variável na folhagem. Reproduzido de [33].

Capítulo 3

Metodologia

Este capítulo descreve a metodologia proposta para simulação, modelagem e renderização de plantas, com o intuito de representar vegetação com um elevado grau de realismo e com desempenho suficiente para a utilização em ambientes interativos.

A metodologia pode ser dividida em etapas pelas quais passa um modelo de uma planta desde a sua criação, em programas de modelagem de vegetação como o *L-Studio* [30] e o *XFrog* [41], passando pela simplificação do modelo gerado com a aplicação de técnicas como as mencionadas no capítulo 2, cujas aplicações e adaptações são discutidas neste capítulo, até finalmente sua visualização em uma cena, em que as técnicas de simplificação trabalham em conjunto para aumentar o desempenho e o realismo da renderização dos modelos e atingir, assim, os objetivos deste trabalho.

Um dos focos da metodologia é a máxima independência entre suas etapas. Técnicas que atuam na modelagem devem ser aplicadas apenas nesta etapa, sem interferir em técnicas que atuam diretamente no modelo final da planta. Desta forma, uma planta modelada artisticamente e não por simulação pode ser utilizada no ambiente ignorando-se as etapas iniciais de modelagem e também se beneficiar das técnicas que atuam diretamente no modelo.

Esta modularidade torna a metodologia mais aplicável e flexível, facilitando a incorporação e a avaliação de novas técnicas, além de possibilitar uma fácil comparação da interação entre técnicas diferentes.

Uma visão geral dos métodos utilizados e dos passos realizados é dada na Figura 3.1. Cada retângulo representa uma etapa da metodologia e cada círculo representa as entradas das etapas. Cada uma dessas etapas é descrita em mais detalhes nas próximas seções. A seções 3.1 e 3.2.1 descrevem respectivamente as etapas de modelagem (1) e separação dos nós terminais (2). A seção 3.2.2 descreve a etapa de simplificação estrutural (4), a conversão dos ramos em linhas (5) e a combinação de ambas as técnicas (6). A simplificação de nós terminais com pontos (3) é descrita na seção 3.2.3. Finalmente, a seção 3.3 descreve

a renderização dos modelos resultantes no ambiente (7). A área pontilhada no diagrama da Figura 3.1 representa etapas estudadas neste trabalho, no entanto, sua implementação e avaliação foram deixadas como extensões futuras.

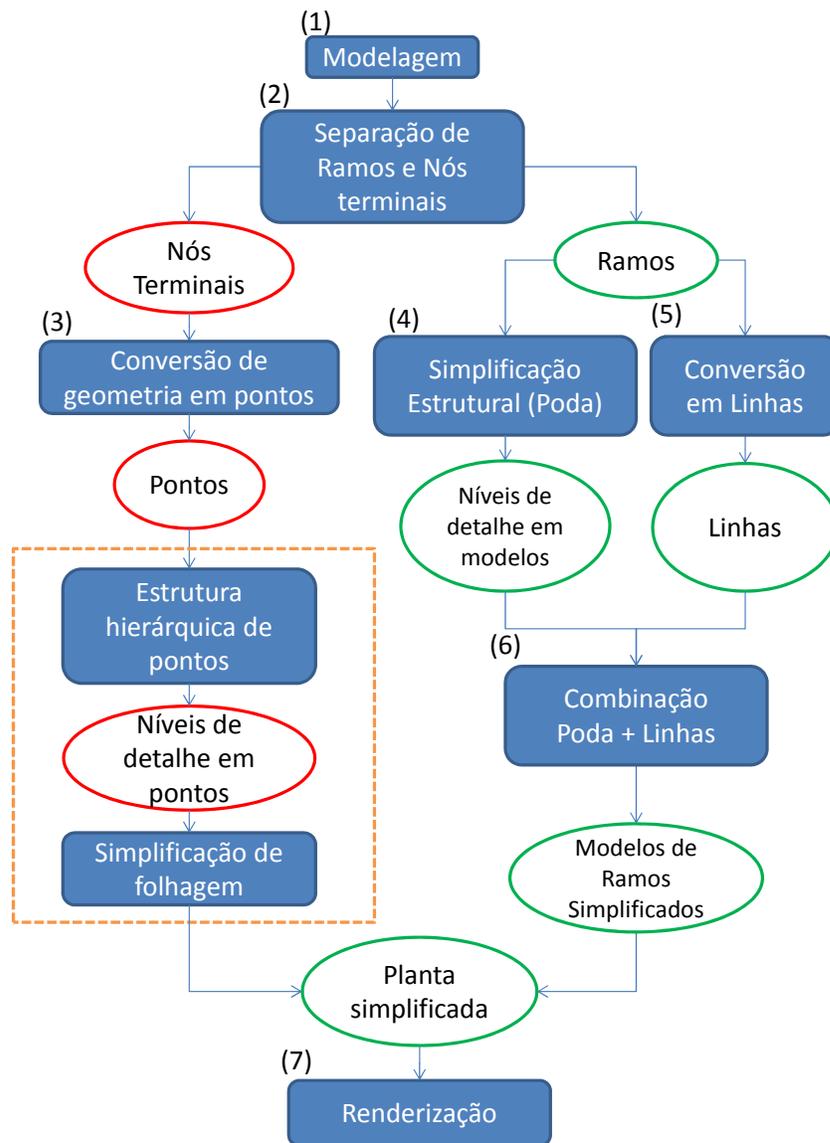


Figura 3.1: Visão geral da metodologia.

3.1 Modelagem de Plantas

A criação procedural de plantas foi utilizada como forma de síntese dos modelos utilizados neste trabalho. Esta forma de modelagem utiliza características biológicas de cada espécie de planta representadas em linguagens formais para simular seu crescimento e desenvolvimento, conforme já mencionado no capítulo 2. Tal forma de simulação produz plantas realistas e detalhadas.

Uma das grandes vantagens de se trabalhar com modelos procedurais é que sua representação é paramétrica e muito bem definida, possibilitando a criação de técnicas de simplificação ou representação baseadas na estrutura da planta e não apenas em seu modelo final. Nas seguintes seções são descritas algumas formas de representação procedural de plantas por meio da descrição de ferramentas computacionais utilizadas para a síntese desses modelos.

3.1.1 L-Studio

Como mencionado na seção 2.1, a representação procedural mais utilizada em pesquisas botânicas e de simulações computacionais de vegetação é o *L-System*, criado por Lindenmeyer [20]. O pacote *L-Studio* [30] permite a criação dos modelos com *L-System*, com edição do código para a simulação e também manipulação dos materiais aplicados à planta. Esta foi a ferramenta utilizada neste trabalho para a criação de modelos a partir de simulações com *L-Systems*.

Com o *L-Studio* é possível se obter a cadeia (*string*) final gerada pela simulação e que representa toda a estrutura da planta e nela aplicar técnicas de simplificação baseadas na estrutura da planta como, por exemplo, a simplificação procedural apresentada em [22]. Também é possível ler uma cadeia final e fazer com ela a representação, obtendo-se modelos que podem ter sido simplificados pela manipulação dos resultados da simulação completa feita no próprio *L-Studio*.

Além disso, a manipulação da representação paramétrica permite que facilmente se separem os ramos da planta dos seus nós terminais, como flores ou frutos (Figura 3.2). Isso é de extrema importância para este trabalho, pois assim podem ser aplicadas técnicas específicas e que apresentam resultados melhores para cada grupo de órgãos das plantas.

Apesar de estar claramente voltado às tarefas de simulação e visualização e não possuir uma grande capacidade de exportação de modelos em formatos mais comuns para uso externo, o *L-Studio* é bastante utilizado em diversas publicações de simulação com o uso do *L-System*, como em [27]. O único formato disponível para exportação é o OBJ [26]. Ainda que incompleto, a aplicação manual das características presentes no *L-Studio* como, por exemplo, os materiais, é uma tarefa direta e fácil, tal que os ganhos no uso desse ambiente de simulação superam este problema.

a liberdade de concentrar esforços em cada componente ou na ramificação e, ao mesmo tempo, facilita a reutilização de modelos para a criação de outros similares. Uma descrição mais aprofundada do funcionamento deste sistema pode ser encontrada no trabalho de Lintermann e Deuseen [21].

Os modelos gerados pelo *Xfrog* podem ser exportados em vários formatos, inclusive o OBJ. No entanto, a exportação neste caso é muito mais completa se comparada ao *L-Studio*, pois é gerado um arquivo de materiais utilizados pela planta e cada componente é separado em um grupo. Dessa forma, a separação entre ramos e nós terminais desejada neste trabalho pode ser feita com base nos materiais de cada grupo, diretamente no modelo exportado.

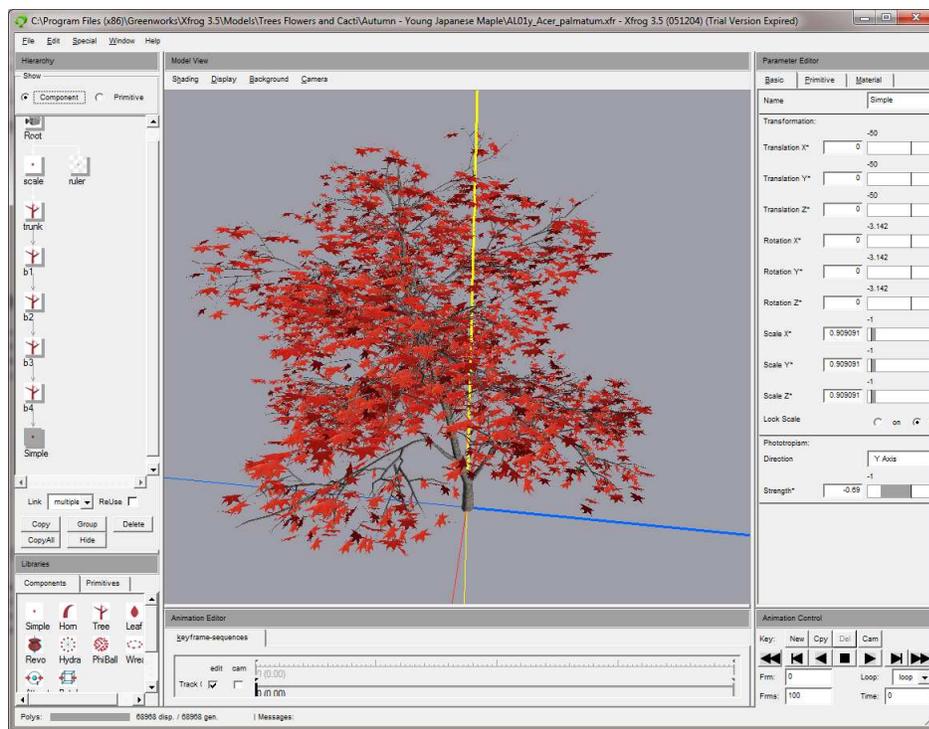


Figura 3.3: Exemplo de interface do pacote *Xfrog*.

3.2 Simplificação de Modelos e Multirresolução

Modelos de plantas com realismo possuem uma grande quantidade de detalhes e consomem muitos recursos para serem representados com fidelidade. Dessa forma, cenas com várias plantas se tornam um grande desafio para manutenção de taxas de quadro interativas. Para abordar este problema, deve-se considerar a criação de níveis de detalhe

simplificados para a representação de plantas com menos visibilidade, seja pela distância ou por estarem encobertas por outras plantas ou objetos.

Como mencionado anteriormente, modelos de plantas nem sempre podem se beneficiar de técnicas de simplificação de objetos mais tradicionais devido ao seu formato complexo e à distribuição da geometria que os compõe. Por isso, o estudo e a implementação de técnicas específicas de simplificação de plantas são o principal foco deste trabalho.

3.2.1 Separação de ramos e nós terminais

A grande diferença estrutural entre os órgãos da planta, como ramos, flores, folhas e frutos, faz com que cada técnica de simplificação tenha um foco bem específico. Desta forma, uma técnica muito especializada em um órgão pode não apresentar bons resultados na planta como um todo, pois sua aplicação nos demais órgãos pode gerar resultados insatisfatórios. Como exemplo, tem-se que a representação da árvore com pontos produz excelentes resultados para a folhagem, porém, falha ao simplificar ramos, produzindo pontos que não representam adequadamente a estrutura destes.

Com esta observação, um dos primeiros passos deste trabalho foi a separação dos modelos das plantas em conjuntos de órgãos que possibilitassem a aplicação de cada uma das técnicas apenas nos grupos em que produziriam bons resultados e, assim, buscar extrair e combinar apenas os pontos positivos de cada técnica na simplificação dos modelos.

Esta separação é completamente dependente da modelagem da planta e, portanto, foi realizada de formas distintas para cada um dos pacotes utilizados neste trabalho para a síntese dos modelos.

No pacote *L-Studio*, algumas edições no arquivo fonte da simulação produzem a planta com apenas alguns conjuntos de órgãos. Como pode ser observado na Figura 3.2, a troca do símbolo de deslocamento e desenho de um ramo no *L-System* por um de apenas deslocamento, neste caso “F” por “f”, produz a planta somente com nós terminais, enquanto que a substituição dos símbolos responsáveis por descrever os nós terminais por outros com produções vazias é suficiente para gerar uma planta contendo apenas os ramos.

Já no pacote *Xfrog*, a exportação completa e detalhada do modelo faz com que seja simples realizar a separação diretamente no modelo final, baseando-se para tal nos materiais distintos da planta. Neste trabalho, uma funcionalidade de remover grupos de materiais foi adicionada àquelas implementadas para a manipulação de arquivos no formato OBJ. Desta forma, pode-se selecionar um material a ser removido do modelo, o que elimina todos os grupos de triângulos que utilizam este material. Com esta funcionalidade, pode-se partir de um modelo completo e remover os materiais referentes aos ramos para se obter um modelo apenas com nós terminais, ou partir de um modelo completo e remover os materiais referentes aos nós terminais para se obter um modelo apenas com

ramos. Assim, neste trabalho, os ramos foram separados dos nós terminais nos modelos provenientes do *Xfrog*.

Finalmente, é perfeitamente possível que esta separação seja feita inteiramente de forma manual, facilitando o processo no caso de a planta ter sido modelada artisticamente e não por uma ferramenta computacional de simulação. Desta forma, a característica de flexibilidade do ambiente resultante deste trabalho é mantida.

3.2.2 Simplificação de ramos

A estrutura ramificada das plantas é um dos fatores que desfavorece o uso das técnicas mais gerais de simplificação de geometrias, pois tais técnicas tendem a juntar vértices de ramos distintos quando estes são próximos, descaracterizando a planta. No entanto, plantas com uma grande quantidade de polígonos, como por exemplo aquelas geradas por uma simulação com *L-System*, podem se beneficiar destas técnicas desde que sejam aplicadas apenas aos ramos de forma independente, isto porque os ramos tendem a ter uma estrutura bem definida e que se assemelha a um sólido simples como um cilindro.

Ainda assim, para se obter resultados realmente satisfatórios na simplificação dos modelos de plantas, sua estrutura deve ser levada em consideração. Por isso, técnicas específicas voltadas à simplificação de plantas baseadas na estrutura da ramificação foram investigadas e aplicadas neste trabalho. Tais técnicas, suas vantagens e sua aplicação no ambiente desenvolvido são descritas a seguir.

Simplificação estrutural

A simplificação estrutural de uma planta ocorre quando partes da estrutura de ramificação da planta são removidas para a geração de um modelo mais simples. Esta remoção de ramos altera a estrutura da planta e deve seguir critérios cautelosos para que a remoção não afete excessivamente a aparência geral da planta e ainda melhore o desempenho da renderização da mesma.

A técnica de multirresolução procedural, descrita na seção 2.2.3, é uma abordagem de simplificação estrutural e consiste na remoção de ramos com menor importância na estrutura geral da planta para a criação de níveis de detalhe mais simples. Para medir a importância dos ramos é possível utilizar a representação procedural da planta, resultante de simulações como as do *L-System*.

Com o pacote *L-Studio*, ao final da simulação tem-se acesso à representação procedural da simulação como uma cadeia em *L-System*. A partir de uma análise sintática nesta cadeia, pode-se separar os ramos buscando os símbolos de ramificação do *L-System* como em [22].

Avalia-se então a estrutura da planta como uma árvore com pesos (*weighted tree*), em que os ramos são os nós e, em cada ramificação, é criada uma subárvore. Atribui-se, então, um peso para cada nó baseado no peso do próprio nó e dos nós-filhos. Para a avaliação da importância do ramo, pode-se levar em conta qualquer uma de suas características como, por exemplo, o número de filhos, tamanho ou quantidade de nós terminais (folhas, flores e frutos).

Após a construção da árvore com pesos, os níveis de detalhe da planta são extraídos percorrendo-se a árvore da raiz às folhas por meio dos nós com maior peso. Assim, primeiramente é extraído um nível de detalhe com apenas um ramo. Os próximos níveis são incrementais, os nós já extraídos são decrescidos de seus pesos e os nós com filhos são reavaliados. O processo é então repetido extraíndo-se apenas os nós que ainda não foram utilizados em outros níveis. O novo nível de detalhe é mais completo que o anterior, pois além dos nós agora extraídos, ele também contém o nível anterior. A Figura 3.4 mostra uma cadeia de caracteres, sua árvore com pesos e os níveis de detalhe dela extraídos.

Apesar desta técnica se basear em uma representação procedural da planta, existe uma forma de aplicá-la mesmo em plantas modeladas artisticamente. Basta que a definição dos ramos seja feita manualmente, mesmo que de forma simples, como pode ser observado na cadeia da Figura 3.4. Utilizando-se então uma relação das definições criadas para os ramos com uma descrição de grupos presentes em um arquivo de modelo, como no formato OBJ, pode-se então processar tal arquivo para extrair dele os níveis de detalhe computados na cadeia manual.

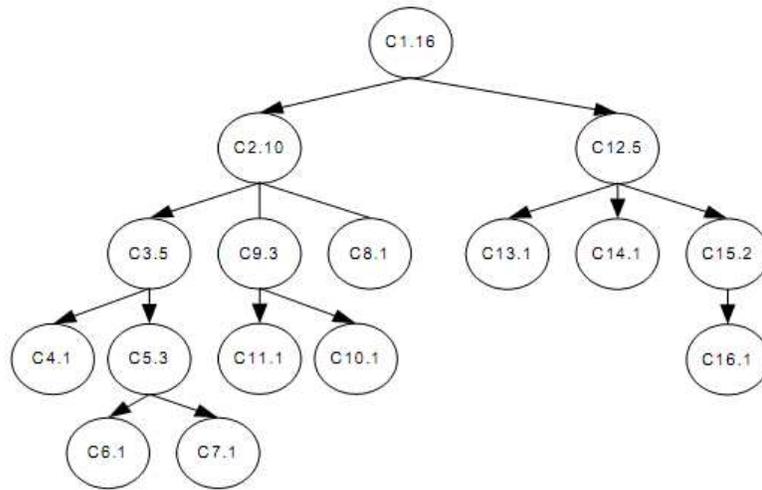
Uma outra forma ainda mais simples de realizar simplificação estrutural de um modelo de planta é a remoção manual de ramos menos importantes utilizando-se algum pacote de modelagem 3D. Esta remoção pode seguir qualquer critério desejado por quem a está efetuando, desde ramos menores e menos visíveis a ramos mais ocultos por folhas.

Neste trabalho, esta simplificação manual foi realizada nos modelos gerados com o pacote *Xfrog* utilizando-se o pacote de modelagem *Blender* [3]. Um exemplo é ilustrado na Figura 3.5. O critério utilizado nesta remoção foi o grau de parentesco do ramo a ser removido com o tronco principal. Assim, primeiramente foram removidos ramos mais externos e sem filhos e, posteriormente, seus pais imediatos e assim por diante.

Representação com linhas

Quando observada a uma distância considerável, uma planta pode ser reconhecida apenas pela sua estrutura de ramificação, já que detalhes de seus ramos, como por exemplo sua textura, não podem ser vistos. Com essa ideia, a representação dos ramos de uma árvore como linhas, sugeridas em diversos trabalhos de simplificação de plantas [9, 11, 40], torna-se uma forma interessante de reduzir detalhes e complexidade gráfica substituindo as primitivas clássicas de polígonos por uma mais simples e de tratamento mais fácil e

$C1[C2[C3[C4][C5[C6][C7]]][C9[C11][C10]][C8]][C12[C13][C14][C15[C16]]]$



LOD 1: C1 SAVE(1) C2 SAVE(2) C3 SAVE(3) C5 SAVE(5) C6
 LOD 2: LOD 1 + RESTORE(2) C9 SAVE(9) C11
 LOD 3: LOD 2 + RESTORE(1) C12 SAVE(12) C15 C16
 LOD 4: LOD 3 + RESTORE(3) C4
 LOD 5: LOD 4 + RESTORE(5) C7
 LOD 6: LOD 5 + RESTORE(9) C10
 LOD 7: LOD 6 + RESTORE(12) C13
 LOD 8: LOD 7 + RESTORE(2) C8
 LOD 9: LOD 8 + RESTORE(12) C14

Figura 3.4: Árvore com pesos de uma representação procedural e seus níveis de detalhe. Imagem adaptada de [22].

rápido, como as linhas, pelos equipamentos gráficos.

Para realizar tal substituição, deve-se identificar cada ramo da planta, para que ele possa então ser substituído por uma linha de direção e comprimento equivalentes. Felizmente, os pacotes de modelagem utilizados neste trabalho produzem um resultado em sua exportação que agrupa, no modelo OBJ, os vértices e as faces pertencentes a cada ramo. Desta forma, estes grupos podem ser processados para a geração das linhas que irão substituir os respectivos grupos.

Neste trabalho, a maneira mais simples de encontrar uma linha para representar cada grupo consiste em identificar os vértices mais distantes dentro do grupo e traçar entre eles uma linha. Este processo produz linhas que representam bem ramos retos ou com curvas bastante suaves, o que engloba uma grande quantidade de plantas. No entanto, plantas com ramos muito curvos acabam tendo uma representação grosseira. Um exemplo da

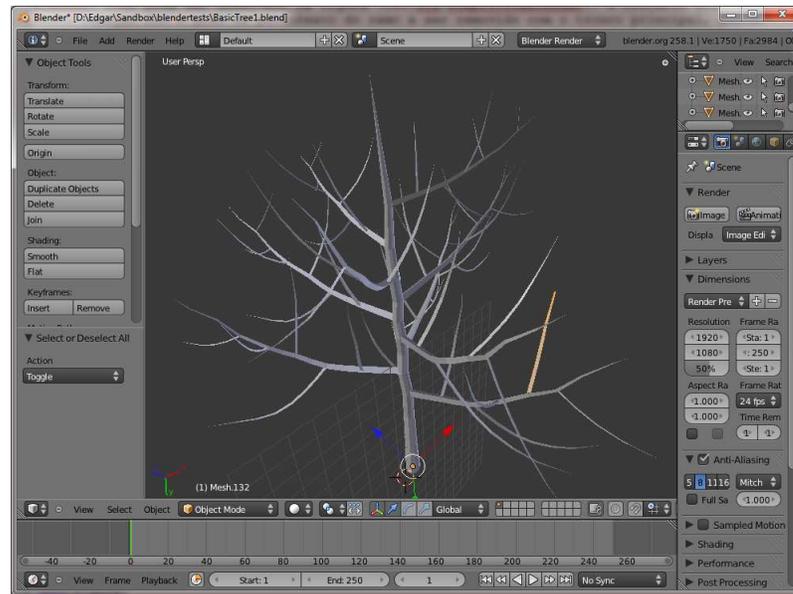


Figura 3.5: Simplificação manual do modelo “Basic Tree” realizada no pacote *Blender*.

implementação desta técnica neste trabalho pode ser observado na Figura 3.6.



Figura 3.6: Exemplo de substituição de ramos por linhas.

Uma outra limitação do uso de linhas é a falta de normais para iluminação adequada e também a falta de informação de textura, tal que a cor da linha é ditada pelo material utilizado pela planta. Estas limitações, no entanto, não desqualificam a técnica e sim definem uma situação mais adequada para seu uso nos níveis de detalhe mais baixos e utilizados para grandes distâncias entre o observador, pois, nestas situações, a substituição produz um resultado visual bastante satisfatório e um alto ganho de desempenho.

Por agir diretamente no modelo da planta separado em grupos, esta técnica é independente da forma de modelagem. Até mesmo a limitação de representação de ramos

curvos pode ser superada se tais ramos forem separados em grupos que o segmentem, melhorando o resultado visual da simplificação com linhas. Esta melhoria poderia ser futuramente automatizada com uma aproximação do ramo por uma curva utilizando seus vértices e a posterior segmentação desta.

Combinação das técnicas

A remoção de ramos na técnica de multirresolução procedural não é facilmente notada em plantas com muitas folhas. Este fato, aliado ao grande ganho de desempenho da substituição de ramos por linhas, torna as duas técnicas ótimas candidatas a serem combinadas. Nesta combinação, os ramos removidos pela primeira são então substituídos por linhas nos moldes da segunda. Para isso, é necessário que, para cada nível de detalhe gerado pela técnica de multirresolução procedural, seja gerado um modelo complementar com os ramos removidos em relação à planta completa, para que nele seja aplicada a substituição por linhas.

Neste trabalho, a criação dos modelos complementares é gerada automaticamente pelo ambiente desenvolvido e neles é aplicada a substituição. Cada nível de detalhe da planta é então descrito por um par modelo/linhas em que ambos são renderizados simultaneamente. Esta criação do modelo complementar é feita comparando-se os centróides dos grupos de um modelo de nível de detalhe menor com o modelo principal. Os grupos no modelo principal que não possuem um centróide equivalente no modelo simplificado são considerados removidos e são então adicionados ao modelo complementar.

Esta combinação de técnicas produz um resultado visual mais realista, sem ramos faltando e uma transição muito mais suave entre os níveis de detalhe. Além disso, a representação com linhas traz um ganho de desempenho tão significativo que a representação com o par possui desempenho similar à multirresolução procedural utilizada individualmente. Assim, exceto pelo processamento adicional da geração dos modelos complementares, esta combinação apresenta apenas vantagens, sem consequências negativas.

3.2.3 Simplificação de nós terminais

Os modelos dos nós terminais das plantas, ou seja, flores, frutas e folhas, quando analisados individualmente, são bem definidos estruturalmente e são bem comportados quando submetidos às técnicas de simplificação tradicionais. Sua redução poligonal não esbarra nos problemas de descaracterização que acontecem nos ramos da planta por unir partes visualmente diferentes, mas próximas. No entanto, são comuns espécies de plantas que apresentam milhares destes modelos e a simplificação individual não é suficiente para uma grande melhoria de desempenho. Mais grave ainda, algumas técnicas de representação de

plantas, como citado na seção 2.2.3, já utilizam modelos geometricamente muito simples, como planos com imagens, tornando a redução de geometria praticamente impossível.

Além destas particularidades, pode-se notar que, de modo geral, a importância desses nós para a representação da planta está no seu conjunto e no aspecto geral fornecido por este ao modelo. Isto leva, por exemplo, ao uso tão comum e bem aceito de representação destes órgãos com imagens em planos. Por isso, assim como na simplificação dos ramos, uma abordagem robusta deveria levar em conta o conjunto de nós como um todo e seu aspecto, pois as técnicas tradicionais apresentam falhas no tratamento do grupo de nós, por exemplo, a união de folhas independentes, e uma análise das características do grupo pode levar a melhores técnicas de simplificação.

Em [11], os autores fazem uma análise do aspecto volumétrico de uma floresta como um “material” e observam que a folhagem de suas árvores, principalmente a distâncias grandes ou quando em um conjunto mais denso, assemelha-se a uma grande massa, quase como um fluido. Essa analogia traz boas ideias para o tratamento do conjunto de nós terminais, como a representação com pontos, descrita neste mesmo trabalho. Esta foi a abordagem utilizada para a simplificação de nós terminais neste trabalho e está descrita mais detalhadamente a seguir.

Representação por pontos

Seguindo uma ideia similar àquela utilizada na simplificação de ramos, substituir as folhas, flores e frutas por primitivas mais simples, mas que preservem a estrutura geral da planta, é uma boa forma de simplificar os modelos quando exibidos a distâncias maiores. Uma das técnicas mais utilizadas para representação de plantas, a representação baseada em imagens ou *billboards*, já utiliza uma estrutura mais simples do que o modelo completo, aplicando texturas detalhadas das folhas ou até mesmo de árvores completas em planos voltados para a câmera.

Com o intuito de remover ainda mais detalhes e de representar a estrutura espacial da planta de forma mais realista que a técnica baseada em imagens, a técnica de representação com pontos utiliza primitivas muito simples para substituir a massa formada pelos nós terminais da planta por um conjunto de pontos coloridos corretamente distribuídos espacialmente. Esta simplificação é particularmente eficaz em plantas com folhagem volumosa ou em florestas e conjuntos de plantas em que as folhas se sobrepõem. Nestes casos, o aspecto de uma massa de folhas pode ser bem obtido com um conjunto denso de pontos com coloração similar às folhas, mas sem tanto detalhes em termos de geometria e textura. Com esta simplificação de primitivas, pode-se obter um bom ganho de desempenho e preservar o aspecto geral da planta que, quando observada à distância, é a principal característica.

Para substituir a geometria tradicional por pontos, estes são computados com base

nos triângulos originais do modelo. A área de cada ponto é igual à área do triângulo que será substituído e seu centro geométrico do triângulo é usado como centro do ponto. A cor do ponto é determinada pela integração da textura aplicada ao triângulo. Na Figura 3.7 é ilustrado um exemplo da aplicação desta técnica.



Figura 3.7: Substituição de triângulos dos nós terminais por pontos.

Uma extensão ao trabalho original de representação por pontos feita neste trabalho foi a consideração de transparência. No trabalho original, os triângulos eram todos opacos. Essa consideração é feita de forma simples, tal que para o cálculo da cor do ponto apenas os pixels que não são completamente transparentes são considerados, enquanto que, para o cálculo de transparência do ponto, o canal alfa de todos os pixels são levados em consideração, gerando um ponto com transparência proporcional àquela do triângulo que o gerou. A extensão foi feita para que esta técnica pudesse ser aplicada a plantas que têm as folhas representadas por *billboards*, permitindo a avaliação do ganho de desempenho entre ambas as técnicas.

3.3 Representação e Renderização

Os resultados de todas as etapas da metodologia descritas acima são representações de diferentes partes da planta em diferentes níveis de detalhe. Estes resultados precisam ser combinados em uma única representação de toda a planta que atenda aos objetivos deste trabalho. Para isso, é preciso que esta representação não só permita a renderização completa da planta em uma cena, mas também faça o uso ideal dos resultados das etapas anteriores para manter nesta cena um aspecto visual adequado e exigir menos processamento gráfico com as simplificações, viabilizando a interatividade desta cena.

A seguir é descrita a forma de agrupamento dos resultados em uma representação da planta. Também é descrita a forma de renderização utilizada neste trabalho para a

avaliação das técnicas, além da utilização dos níveis de detalhe dos resultados anteriores nesta representação nas cenas de teste.

3.3.1 Representação dos modelos das plantas

Este trabalho aborda as diferenças entre os ramos e os nós terminais de uma planta aplicando separadamente as técnicas que apresentem melhores resultados para cada grupo de órgãos em particular. Para a manutenção destes resultados, foi então importante encontrar uma forma de representar as plantas com essa independência aplicada à renderização. Para isso, os modelos de planta utilizados para a visualização apresentam uma estrutura de dados que divide os nós terminais dos ramos e que pode ser observada na Figura 3.8.

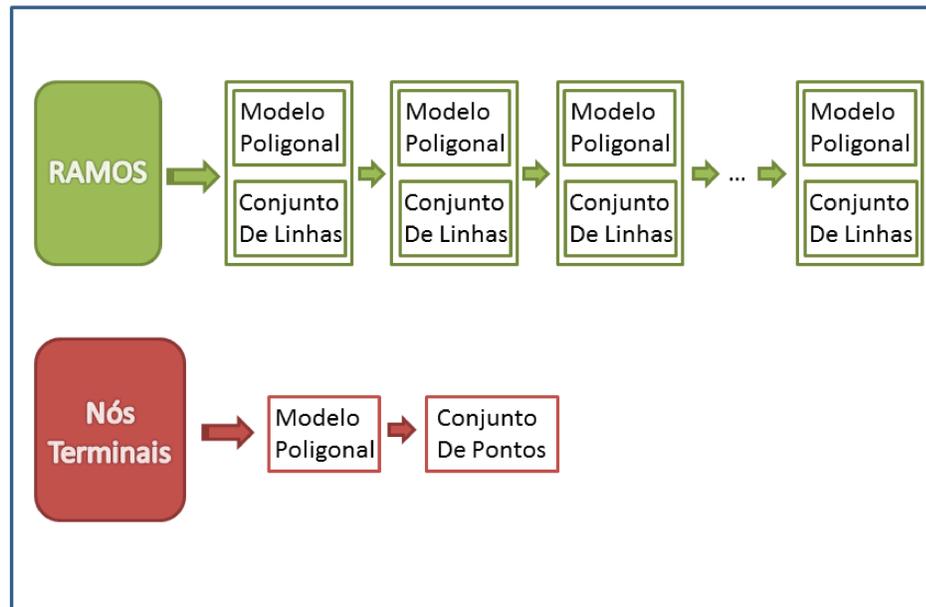


Figura 3.8: Visão geral da estrutura de dados que representa as plantas.

Esta estrutura de dados é formada por sub-modelos representados por três classes. Uma classe para modelos poligonais, que armazena e renderiza triângulos, uma classe para conjuntos de linhas que armazena os vértices das linhas e as renderiza e, finalmente, uma classe para conjuntos de pontos armazenando a posição e as características dos pontos.

A parte da estrutura referente aos ramos é organizada em uma lista de níveis de detalhe. Cada elemento desta lista é um par formado por um modelo poligonal e um conjunto de linhas. Este par implementa a combinação das técnicas mencionada na seção 3.2.2 com o conjunto de linhas sendo a parte complementar do modelo poligonal que se torna mais simples a cada nível de detalhe.

Os nós terminais também são organizados em uma lista de níveis de detalhe. Neste trabalho, esta lista contém apenas dois elementos, sendo o primeiro nível um modelo poligonal representando os nós terminais de forma detalhada e o segundo um conjunto de pontos com a simplificação por pontos descrita na seção 3.2.3.

3.3.2 Renderização dos modelos

A última etapa da metodologia se refere à exibição dos modelos gerados pelas técnicas apresentadas anteriormente. Neste trabalho, a exibição dos modelos tridimensionais foi realizada utilizando a biblioteca OpenGL 2.0. Para se obter um melhor desempenho, os modelos foram otimizados para a utilização de *vertex arrays*, em que os dados dos vértices, como posição, normais e coordenadas de textura, estão agrupados em *arrays* e são passados juntos para a GPU no momento da renderização, ao invés de utilizar o tradicional modo direto, em que os dados dos vértices são passados um a um para a GPU dentro do contexto de renderização delimitado pelas funções *glBegin()* e *glEnd()*. No entanto, otimizações significativas não foram implementadas nesta etapa, uma vez que não era o foco deste trabalho.

Mais notavelmente, não foram utilizados VBOs (*vertex buffer objects*), pois estes mantêm os dados na memória de vídeo, resultando em um bom ganho de desempenho para dados que não se alteram, como é o caso dos modelos aqui utilizados, entretanto, mascarando assim a carga de processamento necessária para a transferência de dados que ocorre quando não há espaço para armazenar tais modelos o tempo todo na placa gráfica.

A renderização dos modelos foi realizada com *shaders* específicos para minimizar o processamento gráfico necessário de acordo com as necessidades de cada modelo. Na técnica de pontos, os cálculos do tamanho dos pontos de acordo com a projeção são realizados diretamente na placa gráfica no *vertex shader* destinado a esta técnica, aproveitando as transformações geométricas e de projeção já presentes e necessárias para a renderização de qualquer modelo. Além deste, foi feita uma diferenciação dos *shaders* que trabalham com textura daqueles que necessitam apenas de cores para os triângulos.

3.3.3 Seleção dos níveis de detalhe

Um aspecto importante deste trabalho é a seleção dos níveis de detalhe gerados pelas técnicas de simplificação de forma mais adequada de acordo com a distância de observação

de cada planta. A variação de densidade de folhas e também na diferença da espessura dos ramos de cada planta faz com que, mesmo com a aplicação da mesma técnica, a distância ideal seja particular. Além disso, cada técnica produz resultados mais adequados para diferentes distâncias de observação.

Para manter o controle dos níveis e viabilizar tal avaliação, a seleção de níveis de detalhe foi mantida manual neste trabalho. Assim é possível, além de exibir mais detalhadamente as simplificações, observar os pontos em que estas não apresentam diferenças visuais consideráveis e que seriam perfeitamente utilizáveis sem prejuízo para a imersão e o realismo da cena. Também com o intuito de melhorar a extração dos resultados e a avaliação de cada técnica, os níveis de detalhe dos ramos e dos nós terminais são selecionados de forma totalmente independente e manual.

Capítulo 4

Resultados Experimentais

Os resultados experimentais obtidos a partir da aplicação da metodologia são descritos neste capítulo. Primeiramente, a plataforma utilizada para a realização dos testes, bem como as ferramentas e as linguagens de programação utilizadas durante o trabalho são descritas na seção 4.1. A seção 4.2 apresenta as plantas utilizadas como testes neste trabalho. As seções 4.3 e 4.4 apresentam, respectivamente, os resultados obtidos na avaliação e adaptação das técnicas de simplificação de ramos e nós terminais. Finalmente, os resultados obtidos neste trabalho são avaliados e discutidos, de forma conjunta, na seção 4.5.

4.1 Plataforma

Os resultados deste trabalho são avaliados por meio do desempenho da renderização das plantas e, portanto, é extremamente dependente da plataforma utilizada nos testes. Os experimentos foram realizados apenas em um computador, cuja configuração possui sistema operacional Windows(R) 7 Professional 64-bits, processador Intel(R) Core(TM) i5 de 2.80GHz, 4GB de memória RAM e placa gráfica NVIDIA(R) GeForce GTX 465 com 1GB de memória e 600MHz de processamento.

A implementação da visualização dos modelos com a aplicação das técnicas foi realizada na linguagem de programação C++ com OpenGL 2.0. Todos os modelos são renderizados com *shaders* próprios para cada conjunto de dados e os cálculos necessários no momento da visualização. Por exemplo, os tamanhos dos pontos na técnica de representação de folhagem com pontos são realizados nos *shaders* e, conseqüentemente, executados na placa gráfica.

As técnicas relacionadas à geração de níveis de detalhe foram implementadas de forma a serem executadas antes da etapa interativa do sistema e são executadas no processador principal. A implementação da técnica de multirresolução procedural foi realizada

na linguagem Python e é executada nos modelos fora do sistema, em uma etapa de pré-processamento. As demais técnicas de simplificação são implementadas em C++ dentro do próprio sistema, porém, na etapa de leitura dos arquivos de modelo. Todas as implementações neste trabalho são independentes do sistema operacional.

4.2 Conjunto de Testes

Nesta seção, são apresentados os modelos utilizados como testes das técnicas descritas no capítulo 3. O conjunto de testes foi definido para que cada modelo represente uma planta com características específicas com relação à estrutura de ramificação, volume e modo de representação de folhas e número de triângulos. O conjunto consiste em cinco plantas diferentes: *Lychnis coronaria* (moleiro-rosa), *Syringa vulgaris* “Congo” (lilás-comum), *Acer palmatum* (bordo-japonês), *Picea glauca* (pinheiro-do-Canadá) e uma árvore-base.

Além das descrições de cada modelo, será apresentada uma imagem da planta em seu nível de detalhe mais alto, a quantidade de triângulos utilizados na representação de cada grupo e o desempenho da renderização do modelo completo neste nível de detalhe.

4.2.1 Moleiro-Rosa

O modelo moleiro-rosa, gerado pelo *L-Studio*, apresenta uma quantidade média de folhas, flores e ramos bastante visíveis. Sua representação completa utiliza um grande número de triângulos, sendo 23744 para os ramos e 57220 para as folhas e flores.

A coloração do modelo é feita apenas com materiais e não utiliza texturas. A representação de folhas e flores é realizada com modelos complexos e um grande número de triângulos, sendo estes órgãos os que demandam mais processamento gráfico pela quantidade de pequenos triângulos. Sua renderização é realizada em 3 *draw calls*, pois utiliza materiais diferentes para os ramos, folhas e flores. No equipamento utilizado para testes, a renderização levou aproximadamente 3.1ms. O resultado da renderização completa pode ser visto na Figura 4.1.

4.2.2 Lilás-Comum

O modelo lilás-comum, gerado pelo *L-Studio*, apresenta uma grande quantidade de flores e ramos pouco visíveis, com a exceção do início do ramo principal. Sua representação completa utiliza um número relativamente baixo de triângulos para os ramos (9520) e um número grande de triângulos nas flores (50640).

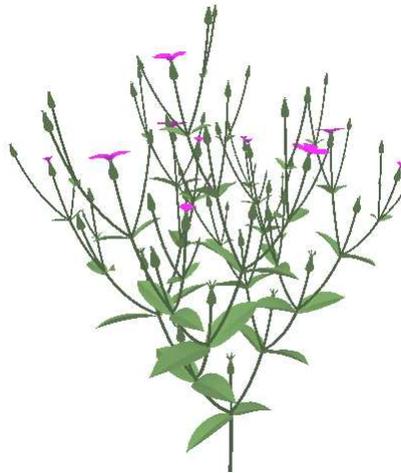


Figura 4.1: Planta moleiro-rosa.

Este modelo não utiliza texturas e a representação das flores é feita com modelos complexos e muitos triângulos, sendo responsáveis pela maior carga de processamento gráfico. Sua renderização é realizada em 2 *draw calls* por utilizar materiais diferentes para os ramos e flores, e, na máquina de testes utilizada, levou aproximadamente 2.47ms. O resultado da renderização completa pode ser visto na Figura 4.2.

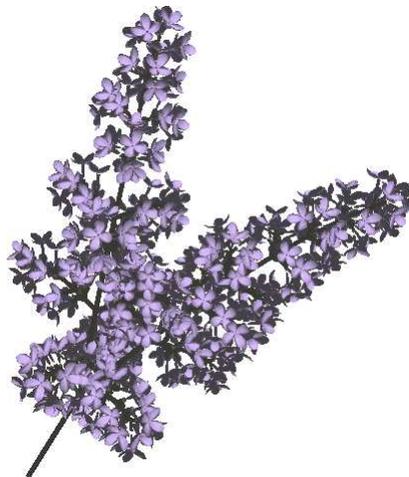


Figura 4.2: Planta lilás-comum.

4.2.3 Bordo-Japonês

O modelo bordo-japônes, gerado pelo *Xfrog*, apresenta uma grande quantidade de folhas e ramos parcialmente encobertos, com apenas os ramos principais bem visíveis.

Sua representação completa utiliza um grande número de triângulos para os ramos (50528 triângulos texturizados) e a representação das folhas é realizada com *billboards* utilizando apenas 7324 triângulos texturizados, dependendo bastante da textura das folhas para o aspecto final da planta e com a maior carga de processamento gráfico se concentrando na grande quantidade de triângulos usada nos ramos.

A renderização é realizada em 2 *draw calls*, pois utiliza materiais diferentes para os ramos e folhas. A renderização levou aproximadamente 0.86ms e o resultado pode ser visto na Figura 4.3.

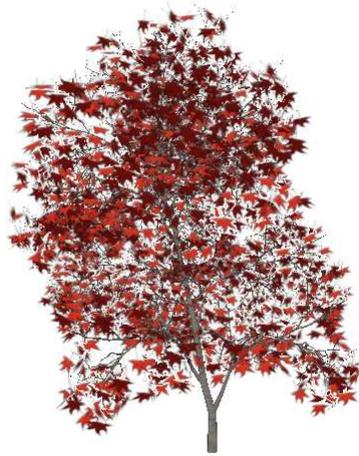


Figura 4.3: Planta bordo-japonês.

4.2.4 Pinheiro-do-Canadá

O modelo pinheiro-do-Canadá, gerado pelo *Xfrog*, apresenta uma quantidade e uma densidade muito grande de folhas, fazendo com que apenas o tronco principal seja bem visível. Sua representação completa utiliza um grande número de triângulos para os ramos (130208 triângulos texturizados) e a representação das folhas é baseada em imagens. Devido ao grande número de folhas, utiliza 94230 triângulos texturizados.

O aspecto geral da planta depende dessa grande densidade de folhas, porém, a carga de processamento gráfico é bastante equivalente entre ramos e folhas, com um pouco mais de exigência pelos ramos devido ao maior número de triângulos. A renderização é realizada em 2 *draw calls*, pois utiliza materiais diferentes para os ramos e folhas. A renderização levou aproximadamente 8ms e o resultado pode ser visto na Figura 4.4.



Figura 4.4: Planta pinheiro-do-Canadá.

4.2.5 Árvore-Base

O modelo árvore-base, gerado pelo *Xfrog*, é utilizada como exemplo de uma árvore genérica e básica modelada pela ferramenta. O modelo apresenta uma grande quantidade de pequenas folhas, porém, ramos bem visíveis. Sua representação completa utiliza um grande número de triângulos, representando também as folhas com modelos geométricos, sendo 50307 triângulos para os ramos e 70722 para as folhas.

A representação do modelo não utiliza textura, apenas cores nos materiais. A renderização é realizada em 3 *draw calls*, uma para cada material, sendo dois materiais para folhas e um para tronco. No equipamento de testes utilizado, a renderização levou aproximadamente 4.69ms. O resultado da renderização completa pode ser visto na Figura 4.5.

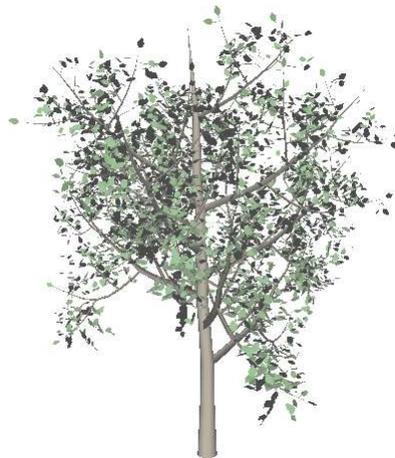


Figura 4.5: Planta árvore-base.

4.3 Simplificação de Ramos

Analisando o conjunto de testes, pode-se observar a importância da simplificação de ramos nas plantas. Mesmo os modelos em que o aspecto final depende quase que exclusivamente das folhas e flores, que encobrem os ramos, nota-se a grande quantidade de triângulos usada na representação dos ramos e sua grande participação no processamento gráfico exigido pelo modelo final.

4.3.1 Simplificação estrutural

A simplificação estrutural dos modelos atua na estrutura da planta removendo os ramos de menor importância para seu aspecto geral. Esta abordagem gera modelos com menos triângulos que, conseqüentemente, exigirão menos processamento gráfico. No entanto, a remoção de ramos pode ser perceptível se realizada muito próxima ao observador, comprometendo a imersão da cena e afetando o realismo.

Nos modelos criados pelo *L-Studio* [30], esta simplificação é realizada diretamente na cadeia de caracteres que descreve o resultado da simulação com *L-System*, aplicando-se a técnica de multirresolução procedural descrita no capítulo 3. Já nos modelos criados com o *Xfrog* [41], a simplificação estrutural foi realizada de forma manual, utilizando o pacote de modelagem *Blender* [3].

A avaliação da importância dos ramos a serem removidos foi realizada de maneira visual durante este processo e o critério utilizado foi a visibilidade do ramo e seu nível na hierarquia de ramos da planta.

Moleiro-Rosa

A simplificação estrutural deste modelo foi realizada pela técnica de multirresolução procedural aplicada a sua cadeia de caracteres gerada pela simulação.

A execução da ferramenta de simplificação em sua cadeia gerou novas cadeias para 195 diferentes níveis de detalhe, separando todas as ramificações da planta. O maior nível de detalhe foi escolhido como a representação completa, e, além deste, outros 3 níveis de detalhe foram escolhidos de forma distribuída entre estes 195, a saber: níveis 50, 100 e 150.

As cadeias foram então carregadas novamente no *L-Studio* e os modelos resultantes foram exportados no formato OBJ [26]. Escolheu-se essa quantidade de níveis de detalhe por representarem visualmente de forma adequada a estrutura da planta, tal que as simplificações possam passar despercebidas com a distância e, ainda assim, obter ganhos de desempenho.

Na Figura 4.6 são apresentados os níveis de detalhe com a quantidade de triângulos usada e o tempo de renderização no equipamento de testes apenas para os ramos. Ao lado de cada nível, é mostrada a planta completa com o nível de detalhe dos ramos juntamente com os nós terminais completos.

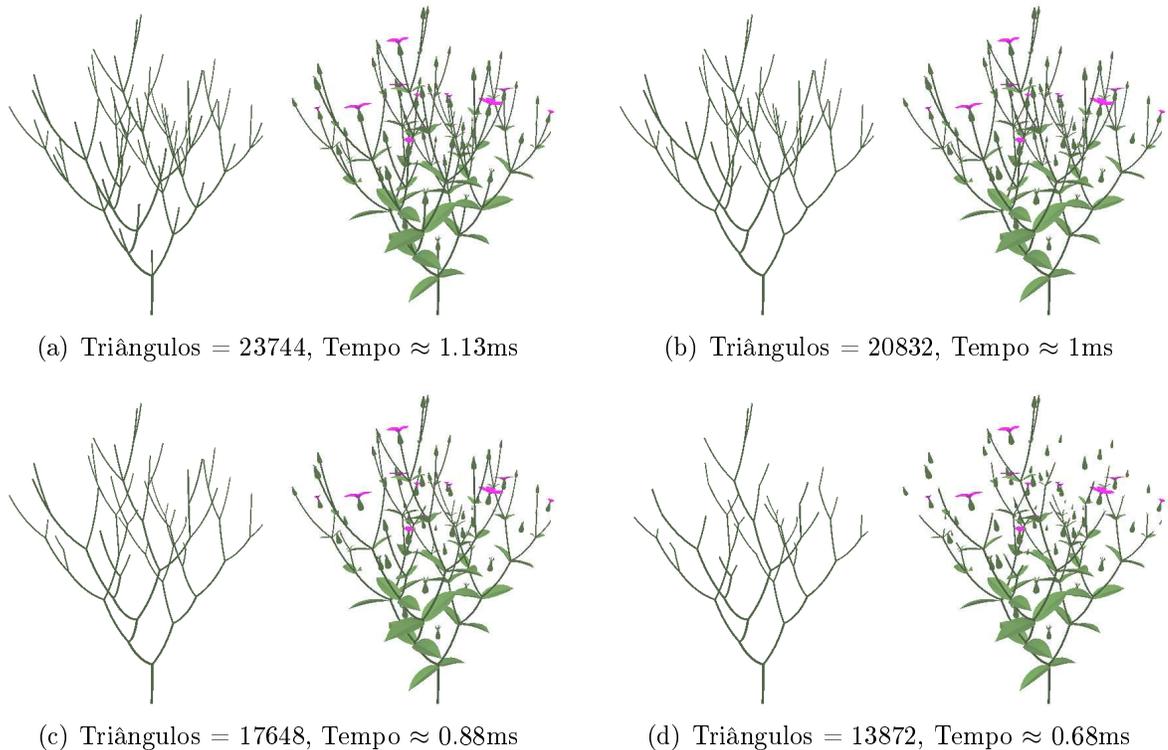


Figura 4.6: Resultados da simplificação estrutural para a planta moleiro-rosa.

Lilás-Comum

Assim como o modelo anterior, a simplificação estrutural foi realizada com a técnica de multirresolução procedural.

A execução da ferramenta de simplificação gerou 339 novas cadeias representando diferentes níveis de detalhe. Novamente, a representação completa foi utilizada como o maior nível de detalhe. Desta vez, porém, outros níveis escolhidos de forma distribuída não apresentaram simplificações significativas devido ao aspecto do modelo, que é ditado majoritariamente pelos ramos principais. Assim, foram escolhidos visualmente outros dois níveis, 112 e 1, que apresentaram simplificações consideráveis e mantiveram o aspecto principal.

Analisando os níveis de detalhe gerados para este modelo, torna-se clara a importância de utilizar uma métrica mais adequada para os pesos calculados na multirresolução proce-

dural, já que a utilização do tamanho da cadeia, como no modelo da planta moleiro-rosa, não produziu resultados tão bons. Uma métrica diferente que excluísse primeiramente todos os pequenos ramos finais produziria melhores resultados. Ainda assim, a grande quantidade de pequenas flores neste modelo faz com que a poda passe quase despercebida. Mesmo a uma pequena distância é possível utilizar o segundo nível de detalhe e a uma distância média já é possível utilizar o último nível sem que se perceba as podas realizadas.

Na Figura 4.7 são apresentados os níveis de detalhe com a quantidade de triângulos usada e o tempo de renderização apenas para os ramos. Ao lado de cada nível é mostrada a planta completa com o nível de detalhe dos ramos juntamente com os nós terminais completos.

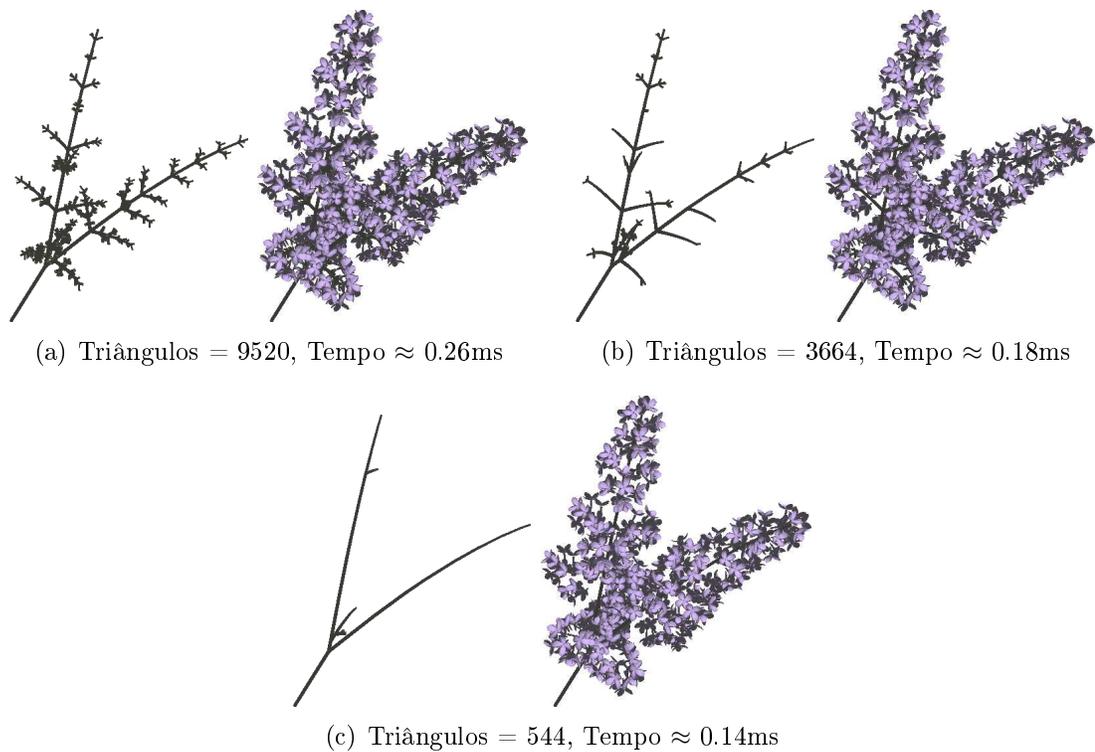


Figura 4.7: Resultados da simplificação estrutural para a planta lilás-comum.

Árvore-Base

A escolha dos níveis foi realizada de acordo com a hierarquia dos ramos da planta. Primeiramente, foram removidos os ramos mais terminais e mantidos apenas os ramos de segunda geração ou menos em relação ao tronco. No nível seguinte, apenas os ramos de primeira geração e o tronco foram mantidos.

Por apresentar uma boa visibilidade do tronco e dos seus principais ramos, os níveis de detalhe podem ser utilizados com uma distância média sem perdas visuais significativas, porém, com bons ganhos de desempenho.

Na Figura 4.8 são apresentados os níveis de detalhe com a quantidade de triângulos usada e o tempo de renderização apenas para os ramos. Ao lado de cada nível é mostrada a planta completa com o nível de detalhe dos ramos juntamente com os nós terminais completos.

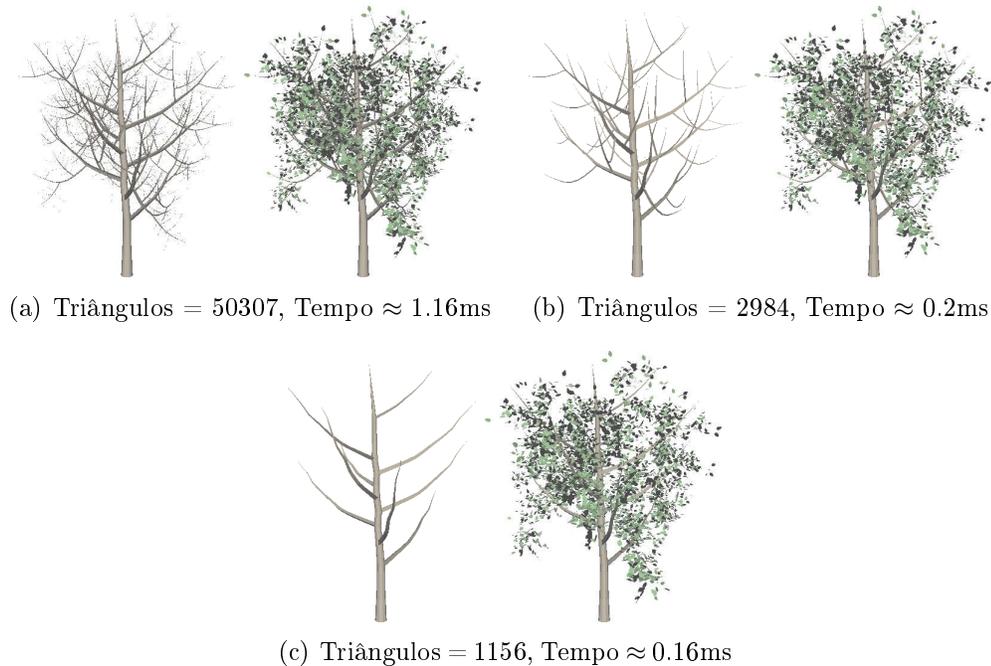


Figura 4.8: Resultados da simplificação estrutural para a planta árvore-base.

Bordo-Japonês

Este modelo teve sua simplificação estrutural realizada de forma manual com o pacote de modelagem *Blender*. Assim como no modelo árvore-base, a escolha dos níveis foi realizada de acordo com a hierarquia dos ramos da planta. Este modelo apresenta vários ramos terminais de diferentes gerações e, na primeira simplificação, foram mantidos apenas os ramos de segunda geração ou menos em relação ao tronco. No nível seguinte, apenas os ramos de primeira geração e o tronco foram mantidos e, no próximo, apenas o tronco.

Esta planta apresenta uma grande densidade de folhas, ocultando a maior parte dos ramos. Por esta razão, a simplificação estrutural apresenta resultados visuais bastante satisfatórios mesmo para pequenas distâncias e até mesmo com simplificações mais intensivas como a utilização apenas do tronco no último nível de detalhe. Aliado ao bom ganho

de desempenho devido à grande quantidade de triângulos utilizados nos ramos agora removidos, os resultados visuais fazem com que a utilização da simplificação neste modelo seja bastante vantajoso.

Na Figura 4.9 são apresentados os níveis de detalhe com a quantidade de triângulos usada e o tempo de renderização apenas para os ramos. Ao lado de cada nível é mostrada a planta completa com o nível de detalhe dos ramos juntamente com os nós terminais completos.

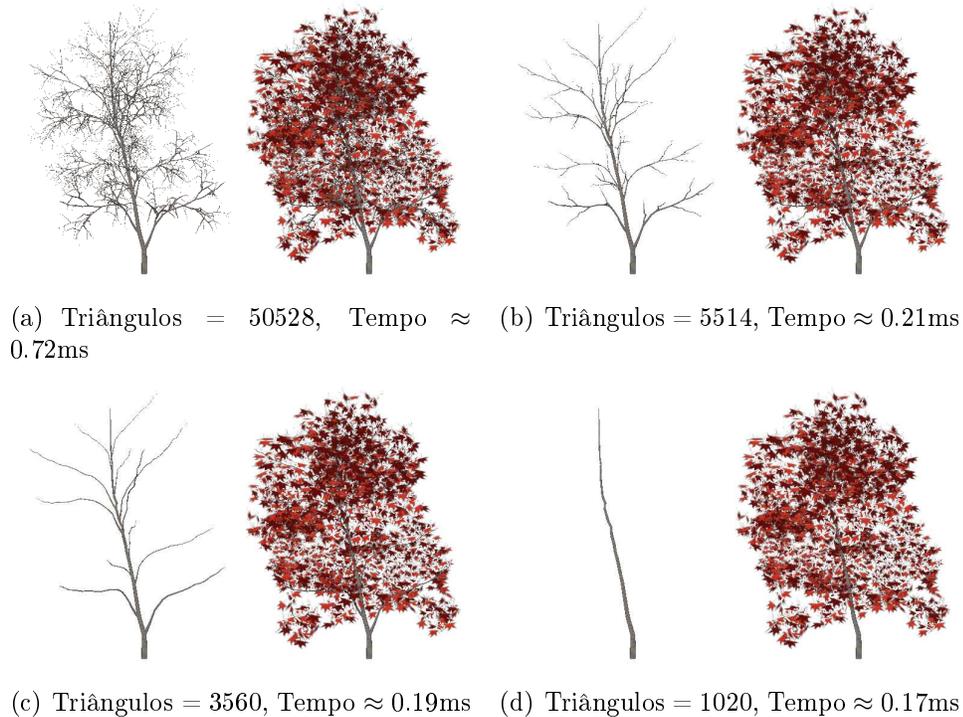


Figura 4.9: Resultados da simplificação estrutural para a planta bordo-japonês.

Pinheiro-do-Canadá

A escolha dos níveis foi realizada de acordo com a hierarquia dos ramos da planta. Por apresentar uma grande quantidade de pequenos ramos terminais, o primeiro nível de detalhe, que não inclui esses ramos, apresenta uma enorme redução poligonal, o próximo nível de detalhe mantém apenas o tronco, diferentemente da simplificação realizada no modelo árvore-base, aqui este nível é viável devido à grande densidade de folhas e ao fato de que este modelo não apresenta muitos níveis hierárquicos de ramos.

Com a grande densidade de folhas citada, os níveis de detalhe deste modelo podem ser utilizados até mesmo com pequenas distâncias pois o aspecto geral da planta se mantém

razoavelmente inalterado devido à folhagem. Este uso das simplificações mesmo com uma certa proximidade pode ser melhor justificado observando-se o enorme ganho de desempenho devido à grande redução de polígonos nos modelos simplificados.

Na Figura 4.10 são apresentados os níveis de detalhe com a quantidade de triângulos usada e o tempo de renderização na máquina de testes apenas para os ramos, ao lado de cada nível é mostrada a planta completa com o nível de detalhe dos ramos juntamente com os nós terminais completos.

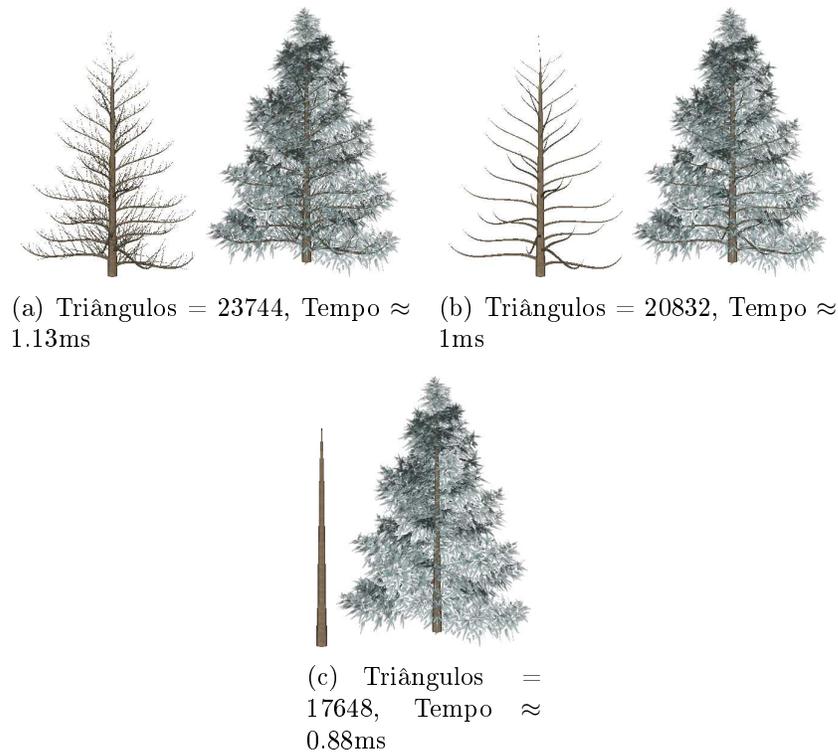


Figura 4.10: Resultados da simplificação estrutural para a planta pinheiro-do-Canadá.

4.3.2 Substituição de ramos por linhas

A substituição de ramos por linhas é outra técnica de simplificação de modelos adequada para algumas estruturas de plantas. Esta substituição produz ganhos elevados de desempenho, devido principalmente à redução de geometria e ao uso de uma primitiva mais leve para renderização.

A geometria do modelo é quase totalmente eliminada, tal que milhares de triângulos passam a ser representados por apenas uma linha. Todo o conjunto de ramos, cujos testes demandaram intensivo processamento gráfico, reduz-se a algumas dezenas de linhas. Além

disso, o uso de linhas no lugar de triângulos produz vantagens para a placa gráfica, pois ocupam menos memória de vídeo e são processadas mais rapidamente que triângulos.

Visualmente, entretanto, esta técnica possui deficiências, pois o aspecto visual da planta é bastante alterado, afetando o realismo. As linhas não possuem normais, portanto, perdem a iluminação. O controle de espessura das linhas utilizando o *pipeline* do OpenGL 2.0 não torna possível o ajuste adequado à espessura de cada ramo, pois para isso o número de *draw calls* iria aumentar demais, desperdiçando muito processamento. Assim, todas as linhas têm a mesma espessura. Por esses motivos, esta técnica é usada apenas para criar o menor dos níveis de detalhe, que será usado em grandes distâncias de observação. A Figura 4.11 ilustra o uso deste nível de detalhe na planta moleiro-rosa.

A geração das linhas se baseia na divisão dos ramos da planta em grupos no modelo OBJ. Cada grupo é processado e os dois vértices mais distantes entre si são usados para definir a reta que representará aquele ramo. Esta abordagem exige um tempo considerável de processamento, pois investiga todos os vértices contra todos os outros dentro de um grupo e, por isso, é realizada durante a carga do modelo. Outra desvantagem é que, embora esta representação seja satisfatória para ramos retos ou com curvas suaves, ramos muito irregulares ou com curvas acentuadas são mal representados.

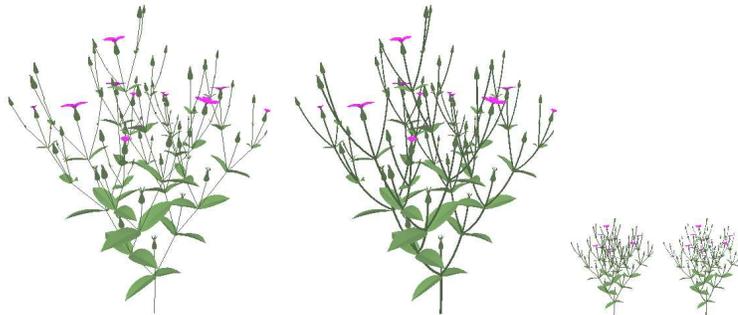


Figura 4.11: Exemplo da simplificação da planta moleiro-rosa com linhas (esquerda) comparado ao modelo completo (direita) observados a uma distância pequena e, em seguida, a uma distância grande.

Moleiro-Rosa

Com os ramos bastante visíveis, a utilização das linhas deve ser feita apenas com grandes distâncias. São utilizadas 130 linhas para representar todos os ramos e a renderização leva apenas 0.126ms aproximadamente. Na Figura 4.12, pode-se comparar o modelo com linhas com o original sem os nós terminais e também com eles.



Figura 4.12: Comparação entre a representação de linhas e o modelo original da planta moleiro-rosa.

Lilás-Comum

O modelo da planta lilás-comum apresenta ramos bastante encobertos por suas pequenas flores, o que torna possível o uso das linhas já com distâncias médias. São utilizadas 419 linhas para representar todos os ramos e a renderização leva aproximadamente 0.13ms. Na Figura 4.13, pode-se comparar o modelo com linhas com o original sem os nós terminais e também com eles.

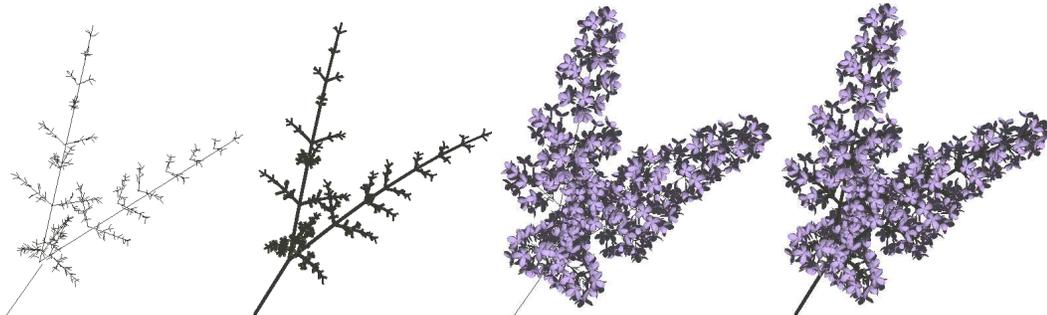


Figura 4.13: Comparação entre a representação de linhas e o modelo original para a planta lilás-comum.

Árvore-Base

Este modelo tem o ramo principal bastante visível, embora os ramos menores estejam bastante encobertos por suas pequenas folhas. Por isso, as linhas devem ser usadas com uma grande distância para evitar a impressão de que o tronco principal desapareceu. A representação de todos os ramos utiliza 1246 linhas e sua renderização leva aproximadamente 0.15ms. As comparações dos ramos em linhas com os ramos completos e da planta utilizando linhas com a planta original podem ser observadas na Figura 4.14.

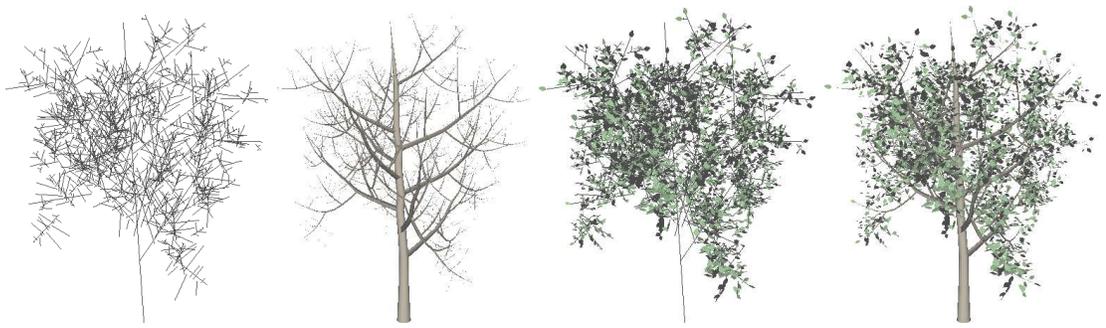


Figura 4.14: Comparação entre a representação de linhas e o modelo original para a planta árvore-base.

Bordo-Japonês

Esta planta apresenta ramos bastante encobertos, com a exceção do início do tronco principal. Por esse motivo, as linhas podem ser utilizadas com distâncias não tão grandes sem a impressão de que os ramos desapareceram e esta distância só não é menor pois a substituição do ramo principal é bastante perceptível.

A representação de todos os ramos deste modelo utiliza 1456 linhas e sua renderização leva aproximadamente 0.18ms. As comparações dos ramos em linhas com os ramos completos e da planta utilizando linhas com a planta original podem ser observadas na Figura 4.15.



Figura 4.15: Comparação entre a representação de linhas e o modelo original para a planta bordo-japonês.

Pinheiro-do-Canadá

Este modelo tem os ramos bastante encobertos por apresentar uma grande quantidade de folhas, nem mesmo o início do tronco principal é muito bem visível, o que torna possível o uso das linhas mesmo com distâncias médias. São utilizadas 795 linhas para representar

todos os ramos e sua renderização leva aproximadamente 0.148ms. Na Figura 4.16 é apresentada a comparação do modelo com linhas com o original sem os nós terminais e também com eles.



Figura 4.16: Comparação entre a representação de linhas e o modelo original para a planta pinheiro-do-Canadá.

4.3.3 Combinação das técnicas

Como se pode notar pelos resultados da substituição dos ramos por linhas, esta representação exige pouquíssimo processamento gráfico. Por isso, mesmo com seu resultado visual limitado, a representação de linhas pode complementar a simplificação estrutural para um resultado final mais fiel em termos visuais e com um bom ganho de desempenho.

Na simplificação estrutural das plantas, a remoção de ramos traz bom ganho de desempenho, entretanto, no caso de ramos mais visíveis, há a quebra de imersão na cena, pois o observador é capaz de notar os ramos faltantes, a menos que a distância seja suficientemente grande para que apenas o aspecto geral da planta, juntamente com os nós terminais, sejam suficientes para sua representação.

Se ao invés de remover os ramos, estes forem substituídos por linhas, os níveis de detalhe podem ser utilizados com distâncias menores sem que o observador perceba a troca. Além disso, com o pouquíssimo processamento exigido pelas linhas, os ganhos de desempenho da remoção de ramos serão mantidos praticamente inalterados, como mostram os resultados apresentados a seguir.

Moleiro-Rosa

Por apresentar ramos bem visíveis, este modelo representa um bom teste visual para a combinação de técnicas. Além disso, seus ramos são finos e sem muitas curvas, o que beneficia a representação de ramos removidos como linhas.

Os resultados visuais obtidos pela substituição foram muito bons, realmente auxiliando na representação e viabilizando o uso de níveis de detalhe menores com distâncias menores

do que seria necessário com a remoção dos ramos. O desempenho da cena se mostrou inalterado em relação à simples remoção, apresentando tempos significativamente menores em alguns casos, o que não significa uma melhoria em relação aos testes anteriores, mas sim uma equivalência, mostrando que a representação de algumas linhas é totalmente encoberta em termos de desempenho pelo restante da cena.

Na Figura 4.17 são apresentados os ramos com a remoção ao lado da combinação e a planta inteira com remoção também ao lado da combinação. O número de triângulos dos ramos, número de linhas e tempo para renderização dos ramos são também apresentados.

Lilás-Comum

Os ramos deste modelo são curtos, não muito finos e pouco visíveis devido à grande quantidade de flores. Esta estrutura já favorecia a simples poda dos ramos em níveis de detalhe menores, enquanto a espessura e o comprimento dos ramos desfavorecem a substituição por linhas em distâncias curtas.

Com estas características, os resultados visuais não foram muito alterados na combinação das técnicas em relação à poda, com exceção da preservação da densidade visual da planta, ligeiramente reduzida na poda. Com relação ao desempenho, houve uma pequena queda com a adição das linhas, o que é compreensível devido à quantidade considerável de pequenos ramos removidos, principalmente no último nível de detalhe antes da substituição completa por linhas. Por não se tratar de uma queda significativa de desempenho, a combinação ainda é vantajosa para níveis de detalhe menor por manter a densidade da planta, embora desnecessária no primeiro nível simplificado.

Na Figura 4.18 são apresentados os ramos com a remoção ao lado da combinação e a planta inteira com remoção também ao lado da combinação. O número de triângulos dos ramos, número de linhas e tempo para renderização dos ramos são também apresentados.

Árvore-Base

A grande visibilidade dos ramos principais deste modelo foram levados em conta na sua simplificação estrutural, porém, a poda dos ramos secundários ainda pode ser percebida em pequenas distâncias. Isto acontece porque esses pequenos ramos contribuem visualmente para o volume da copa da árvore e, sem eles, tem-se a impressão de que a folhagem é menos densa.

Com a substituição dos ramos por linhas, o aspecto denso da folhagem é retomado e as linhas mal podem ser diferenciadas dos pequenos ramos originais. Pode-se observar na Figura 4.19 que, com esta substituição, os níveis de detalhe podem ser utilizados com bastante proximidade, sem que seja notada nenhuma perda.

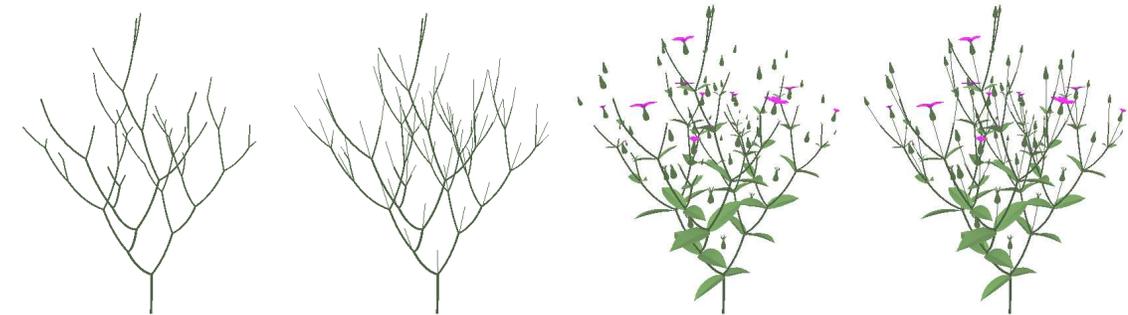
(a) Triângulos = 20832, Linhas = 14, Tempo \approx 1ms(b) Triângulos = 17648, Linhas = 33, Tempo \approx 0.91ms(c) Triângulos = 13872, Linhas = 63, Tempo \approx 0.70ms

Figura 4.17: Resultados da combinação de técnicas para a planta moleiro-rosa. Todos os dados apresentados na figura referem-se apenas aos ramos com a combinação da simplificação estrutural com a representação com linhas para os ramos removidos.

Um outro aspecto interessante desta substituição é a enorme redução poligonal realizada no modelo e a grande quantidade de linhas geradas. Com esta grande quantidade de linhas, o processamento gráfico para sua renderização não é insignificante como em outros modelos, mas ainda assim é consideravelmente pequeno. Observa-se um desempenho ligeiramente inferior à poda, mas com um resultado visual bastante próximo ao modelo original, caracterizando adequada troca entre processamento e qualidade.

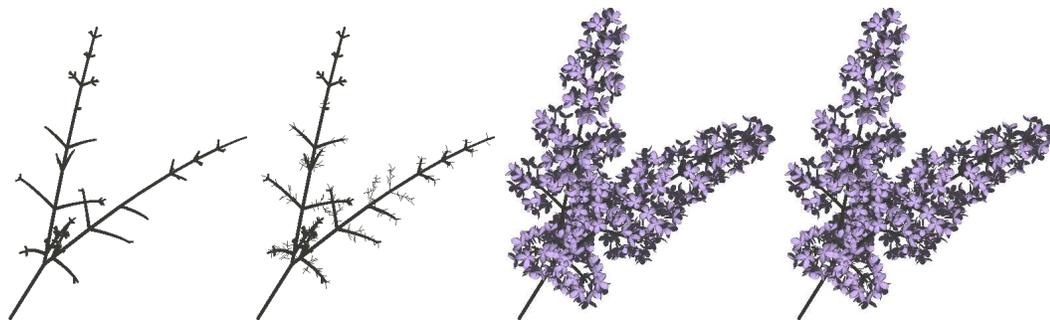
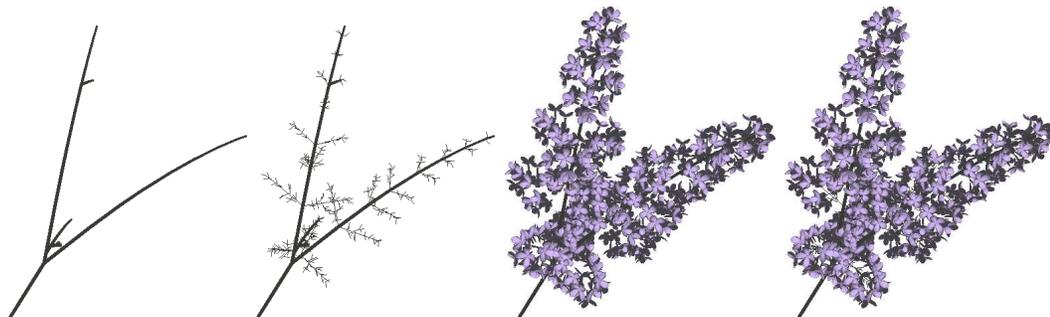
(a) Triângulos = 3664, Linhas = 312, Tempo \approx 0.19ms(b) Triângulos = 544, Linhas = 411, Tempo \approx 0.16ms

Figura 4.18: Resultados da combinação de técnicas para a planta lilás-comum. Todos os dados apresentados na figura referem-se apenas aos ramos com a combinação da simplificação estrutural com a representação com linhas para os ramos removidos.

Na Figura 4.19 são apresentados os ramos com a remoção ao lado da combinação e a planta inteira com remoção também ao lado da combinação. O número de triângulos dos ramos, número de linhas e tempo para renderização dos ramos são também apresentados.

Bordo-Japonês

Este modelo apresenta uma folhagem consideravelmente densa, fazendo com que os ramos sejam bastante ocluídos, com a exceção do início do ramo principal. Assim, a poda dos ramos menos importantes não é muito notada, exceto pela redução da densidade da folhagem, a exemplo do modelo árvore-base.

Com a substituição dos ramos por linhas, o efeito de redução de densidade neste modelo não só é eliminado mas, como os ramos secundários são muito pequenos e quase invisíveis, é possível notar um pequeno aumento desta densidade com as linhas, pois algumas delas são mais visíveis que os ramos que substituíram. Este efeito não é prejudicial e apresenta um resultado melhor que a poda, como pode ser observado na Figura 4.21.

Dada a visibilidade do tronco principal, um nível de detalhe com apenas o tronco

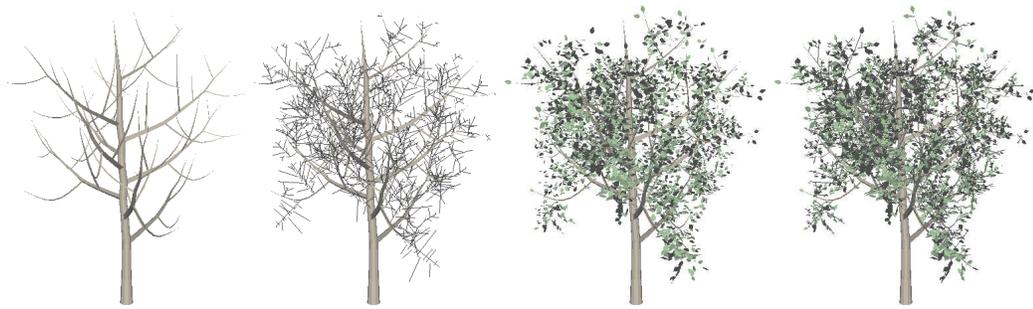
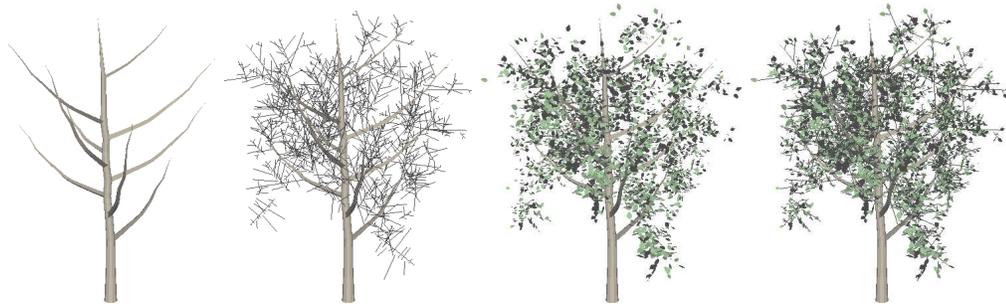
(a) Triângulos = 2984, Linhas = 1155, Tempo \approx 0.24ms(b) Triângulos = 1156, Linhas = 1205, Tempo \approx 0.19ms

Figura 4.19: Resultados da combinação de técnicas para a planta árvore-base. Todos os dados apresentados na figura referem-se apenas aos ramos com a combinação da simplificação estrutural com a representação com linhas para os ramos removidos.

em modelo e todos os ramos representados por linhas pode ser utilizado para grandes distâncias, sem que a transformação do tronco em linha seja notada, mas com grande ganho de desempenho.

A simplificação estrutural deste modelo reduz significativamente seu número de polígonos. Por possuir um grande número de pequenos ramos, são geradas muitas linhas para substituí-los. Esta quantidade de linhas exige um processamento gráfico não desprezível como em outros modelos, fazendo com que a combinação de técnicas apresente um desempenho inferior à poda, mas com um melhor resultado visual.

Na Figura 4.20 são apresentados os ramos com a remoção ao lado da combinação e a planta inteira com remoção também ao lado da combinação. O número de triângulos dos ramos, número de linhas e tempo para renderização dos ramos são também apresentados.

Pinheiro-do-Canadá

Como apenas o tronco principal é bastante visível neste modelo, com os ramos principais com uma visibilidade média e os secundários quase imperceptíveis, a poda dos ramos secundários quase não pode ser percebida, exceto por uma leve redução na densidade da

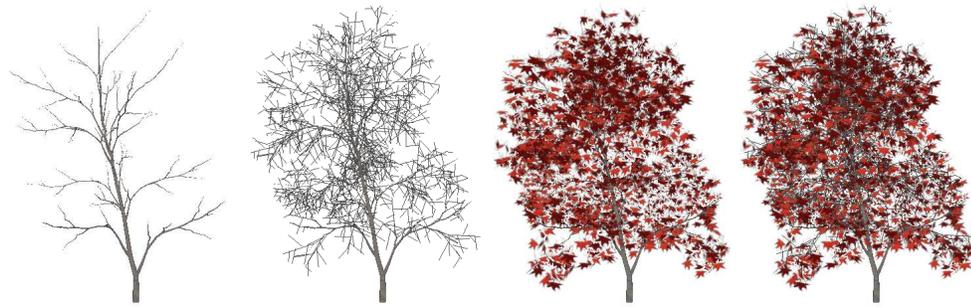
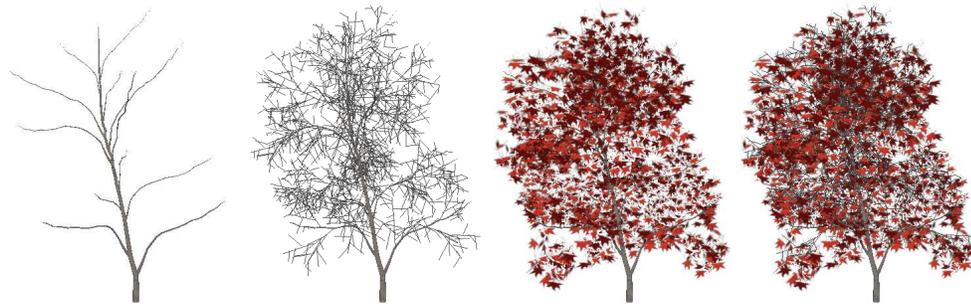
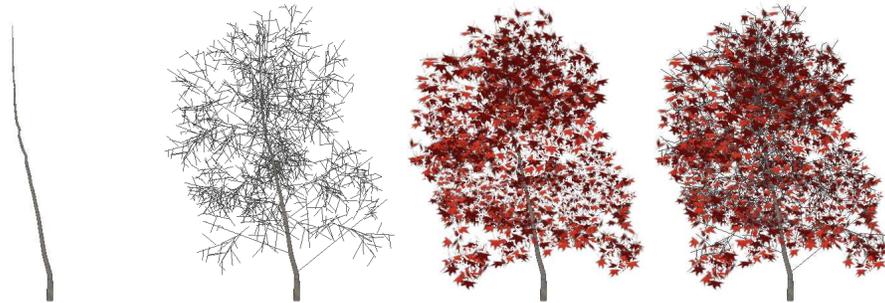
(a) Triângulos = 5514, Linhas = 1389, Tempo \approx 0.25ms(b) Triângulos = 3560, Linhas = 1443, Tempo \approx 0.23ms(c) Triângulos = 1020, Linhas = 1455, Tempo \approx 0.20ms

Figura 4.20: Resultados da combinação de técnicas para a planta bordo-japonês. Todos os dados apresentados na figura referem-se apenas aos ramos com a combinação da simplificação estrutural com a representação com linhas para os ramos removidos.

folhagem. Este efeito é similar ao descrito para o modelo árvore-base, mas consideravelmente menos acentuado.

Com a substituição dos ramos por linhas, o efeito de redução de densidade é praticamente eliminado, já que as linhas praticamente não podem ser diferenciadas dos pequenos ramos originais em meio à densa folhagem desta espécie. Com isso, os níveis de detalhe menores podem ser usados com bastante proximidade sem perdas visuais, como pode ser

observado na Figura 4.21.

Um outro aspecto interessante é a possibilidade de utilizar um nível de detalhe com apenas o tronco em modelo e todos os ramos representados por folhas. Neste nível, a folhagem é responsável por quase todo o aspecto da planta, porém, com as linhas aumentando sua densidade, é possível utilizá-lo para representar a planta a uma grande distância, mas não tanto quanto o necessário para a representação com linhas, em que apenas o aspecto da planta deve ser reconhecido.

Conforme observado anteriormente, a simplificação estrutural reduz drasticamente o número de polígonos deste modelo. Por possuir um grande número de pequenos ramos, são geradas várias linhas para substituí-los. Esta quantidade de linhas exige um processamento gráfico bastante reduzido, mas não insignificante como em outros modelos. Assim, a combinação das técnicas aqui apresenta um desempenho um pouco inferior à poda, mas ainda bastante grande e com um resultado visual mais satisfatório.

Na Figura 4.21 são apresentados os ramos com a remoção ao lado da combinação e a planta inteira com remoção também ao lado da combinação. O número de triângulos dos ramos, número de linhas e tempo para renderização dos ramos são também apresentados.

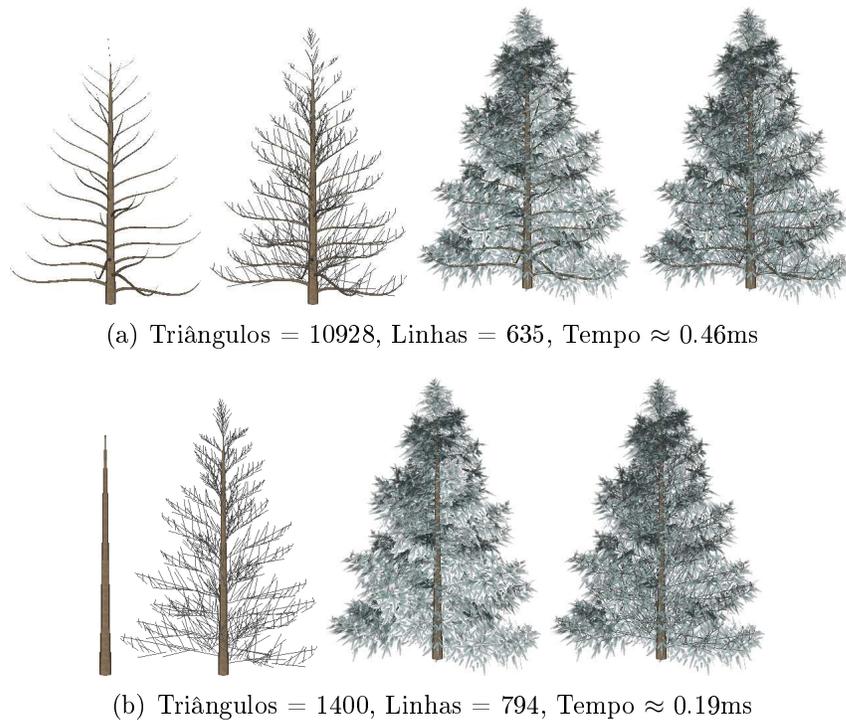


Figura 4.21: Resultados da combinação de técnicas para a planta pinheiro-do-Canadá. Todos os dados apresentados na figura referem-se apenas aos ramos com a combinação da simplificação estrutural com a representação com linhas para os ramos removidos.

4.4 Simplificação de Nós Terminais

Os nós terminais do conjunto de testes deste trabalho apresentam desafios interessantes. Eles são visualmente importantes para o aspecto geral da planta. Na maioria dos modelos, este é o grupo mais importante. Além disso, os nós terminais apresentam mais detalhes do que os ramos, dificultando sua simplificação sem perdas visuais.

Nos modelos gerados com o *L-Studio*, eles são formados por um grande número de pequenos triângulos, representando a maioria dos triângulos dos modelos. Desta forma, sua simplificação pode reduzir bastante o tempo necessário para a renderização da planta como um todo, um dos objetivos deste trabalho.

Já nos modelos criados com o *Xfrog*, os nós terminais utilizam representação baseada em imagens, o que já contribui para um melhor desempenho na renderização e gera uma dificuldade para a simplificação, uma vez que eles já se encontram simplificados. Mesmo assim, a grande quantidade de folhas para os modelos como pinheiro-do-Canadá faz com que este grupo seja responsável por grande parte do processamento gráfico exigido pelo modelo.

4.4.1 Representação por pontos

A representação por pontos simplifica os modelos, substituindo os triângulos da folhagem por pontos de mesma área e com cor equivalente. Esta técnica, concebida para ser utilizada quando os triângulos estão muito pequenos ocupando quase um pixel, foi avaliada em triângulos maiores, com variação de seu tamanho adequada à câmera e em modelos com folhagem já simplificada com imagens.

Em plantas com os nós terminais representados por triângulos, foi avaliada a viabilidade de utilizar pontos com os modelos não tão longes como no trabalho original, aproveitando a grande densidade de triângulos e também dos próprios nós, para substituí-los por uma massa de pontos com aspecto equivalente.

Nos modelos com representação por imagens, a técnica original foi estendida e avaliada para tratar as áreas de transparência encontradas na integração dos triângulos para o cálculo da cor final dos pontos e de sua transparência que viriam a substituí-los.

A seguir são apresentados os resultados e as avaliações desta técnica aplicada a cada um dos modelos do conjunto de testes.

Moleiro-Rosa

A planta moleiro-rosa, como já observado anteriormente, apresenta ramos bastante visíveis e seu aspecto geral depende mais deles do que de seus nós terminais, mas de

forma equilibrada, tal que estes nós também são importantes e mudanças neles são bem perceptíveis.

Os nós terminais da planta moleiro-rosa são formados por pequenas flores abertas e ainda em botões, e também por folhas médias em relação ao tamanho da planta. Estas flores apresentam uma grande densidade de triângulos, o que faz com que a substituição destes por pontos altere muito pouco o aspecto final da planta. Já as folhas apresentam triângulos um pouco maiores, mas ainda pequenos.

A substituição de triângulos por pontos pode ser notada a pequenas distâncias, mas passam despercebidos já a partir de distâncias médias. Analisando os resultados visuais, nota-se que os pontos podem ser utilizados em distâncias muito menores que aquelas propostas no trabalho original, devido à boa densidade de triângulos deste modelo.

Em relação ao desempenho, a substituição dos triângulos por pontos apresentou bons ganhos, os quais poderiam ser mais acentuados no caso da implementação de um agrupamento hierárquico para a fusão de pontos e consequente redução de seu número para distâncias maiores. Na Figura 4.22 pode-se observar os resultados desta simplificação.



(a) Triângulos = 57220, Tempos: Triângulos \approx 0.79ms , Pontos \approx 0.68ms

Figura 4.22: Resultados da simplificação de nós terminais com pontos para a planta moleiro-rosa. Todos os dados apresentados na figura referem-se apenas aos nós terminais da planta.

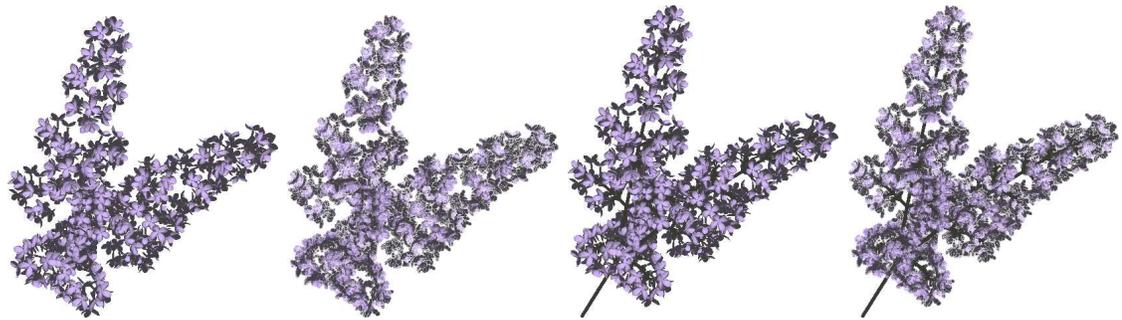
Lilás-Comum

Os nós terminais nesta planta são responsáveis quase que completamente pelo seu aspecto com pequenas flores, representadas com 50640 pequenos triângulos. Com esta densidade de triângulos, sua substituição por pontos não só traz um bom ganho de desempenho, mas também passa visualmente quase despercebida.

Como observado na Figura 4.23, a substituição por pontos pode ser usada nesta planta, mesmo a uma curta distância, sem prejuízo visual, contrariando completamente a proposta original da técnica que utilizava os pontos a enormes distâncias para representar triângulos

com o tamanho de um pixel e validando a alteração realizada neste trabalho para utilizar pontos maiores e de variados tamanhos para plantas mais próximas.

Avaliando estes resultados, pode-se notar que a utilização de uma estrutura hierárquica, para unir os pontos e reduzir seu número à medida em que a distância aumentasse, poderia trazer um ganho ainda maior de desempenho com um ótimo resultado visual.



(a) Triângulos = 50640, Tempos: Triângulos \approx 0.77ms, Pontos \approx 0.58ms

Figura 4.23: Resultados da simplificação de nós terminais com pontos para a planta lilás-comum. Todos os dados apresentados na figura referem-se apenas aos nós terminais da planta.

Árvore-Base

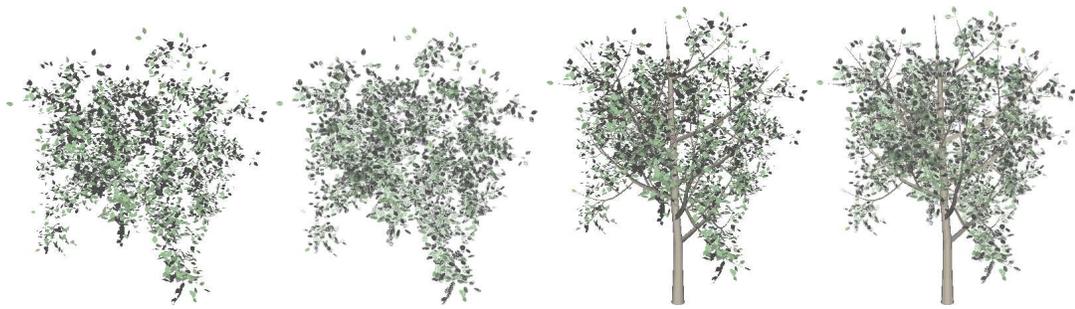
Este modelo apresenta, como nós terminais, várias folhas bastante pequenas e com uma grande densidade de triângulos. Esta configuração é bastante adequada para a substituição por pontos, que neste caso apresenta bons resultados visuais ainda observado a uma distância pequena, como pode ser observado na Figura 4.24.

A substituição dos triângulos por pontos praticamente não altera visualmente a planta e só pode ser facilmente percebida quando observada a curta distância. Em relação ao desempenho, a substituição resulta em um pequeno ganho, mas que é facilmente justificável pela inalteração visual do modelo. Além disso, assim como nos modelos apresentados anteriormente, pode-se notar o potencial de agrupamento dos pontos em distâncias maiores, que deveria aumentar o ganho de desempenho desta técnica.

Bordo-Japonês

Este modelo utiliza uma forma de representação simplificada para suas folhas, a técnica de *billboards*. Esta planta constituiu, portanto, um dos testes da aplicação da técnica de simplificação por pontos em modelos com *billboards* proposta neste trabalho.

Avaliando-se primeiramente o impacto de tal substituição nos nós terminais do modelo, pode-se notar um resultado visual bastante ruim, observado na Figura 4.25. Com a



(a) Triângulos = 70722, Tempos: Triângulos \approx 1.04ms, Pontos \approx 0.9ms

Figura 4.24: Resultados da simplificação de nós terminais com pontos para a planta árvore-base. Todos os dados apresentados na figura referem-se apenas aos nós terminais da planta.

simplificação, apenas o aspecto geral da planta é mantido e as cores dos pontos utilizados em substituição aos triângulos das folhas não são fiéis às originais. Desta maneira, a aplicação desta técnica só seria viável visualmente a distâncias muito grandes ou com um conjunto muito denso de plantas, situações em que apenas o aspecto geral da planta é importante.

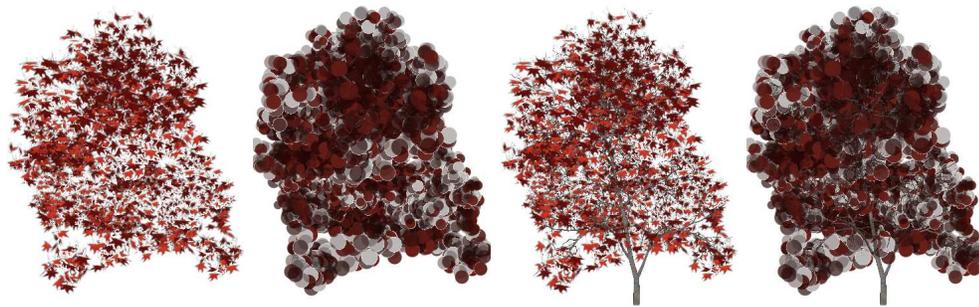


Figura 4.25: Resultados da simplificação de nós terminais com pontos para a planta bordo-japonês. Todos os dados apresentados na figura referem-se apenas aos nós terminais da planta.

Uma outra dúvida em relação à aplicação desta técnica em folhas já simplificadas era o ganho de desempenho. Neste modelo, as medições apresentaram dados curiosos. Ao avaliar somente as folhas, que já apresentam um ótimo desempenho devido ao baixo número de triângulos, observa-se que, com a representação por pontos, o desempenho não só não aumenta, mas sim diminui drasticamente. A renderização das folhas com triângulos levou aproximadamente 0.26ms, enquanto a renderização com pontos levou aproximadamente 0.59ms.

No entanto, se a renderização da planta completa for avaliada, a representação com

triângulos leva aproximadamente 0.94ms, enquanto a representação com pontos leva aproximadamente 0.86ms. Esta diferença pode ser justificada pela falta de *alpha blending* quando as folhas são renderizadas sem os ramos devido a sua ordem em relação à câmera e à grande área transparente presente no *billboard* da folha, que pode descartar pixels renderizados depois, e que não aparece nos pontos. Uma vez renderizados os ramos antes da folhagem, a operação volta a ser executada também nos triângulos e o desempenho se equilibra novamente, mostrando até um pequeno ganho pelos pontos.

O resultado visual ruim da simplificação é decorrente de dois motivos principais. O primeiro é a presença de uma grande área transparente nos triângulos que representam a folha. O tratamento desta transparência, que não é considerado no trabalho original, cria pontos semi-transparentes e com a cor representando a integração dos pixels não transparentes do triângulo. Como a área sem pixels visíveis é bastante grande, o ponto não representa fielmente o triângulo.

Outro problema é a utilização de apenas dois triângulos para representar toda a folha, o que gera pontos grandes que, além de extrapolar a área visível da folha, condensam muita informação de cor. Na Figura 4.26 é apresentado um estudo com 8 triângulos ao invés de 2 e pode-se notar uma maior fidelidade na representação.

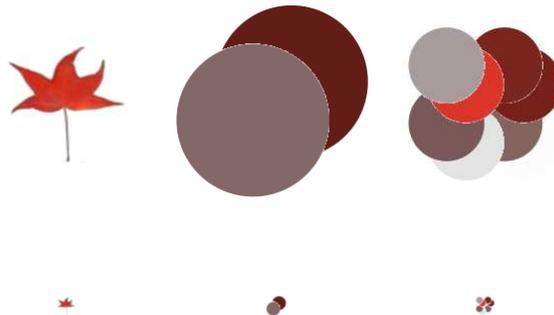


Figura 4.26: Estudo da aplicação de pontos à folha da planta bordo-japonês.

Pinheiro-do-Canadá

Este modelo apresenta um caso interessante de estudo para a simplificação com pontos. Suas folhas utilizam uma representação baseada em imagens, similar à técnica de *billboards* utilizada na planta bordo-japonês, diferentemente desta. Entretanto, as folhas não são simples quadrados e sim uma aproximação de seu formato, como pode ser observado na Figura 4.27.

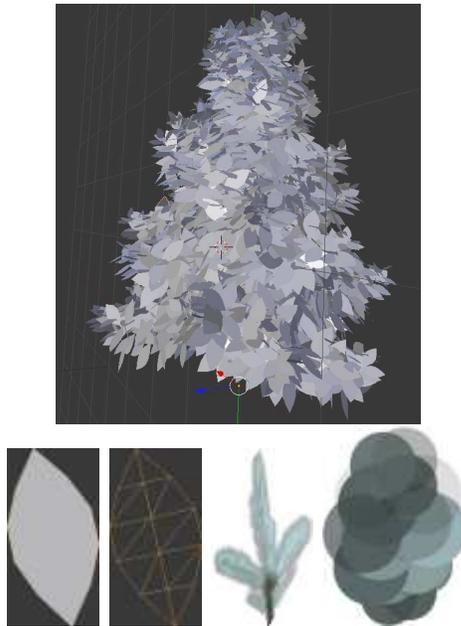


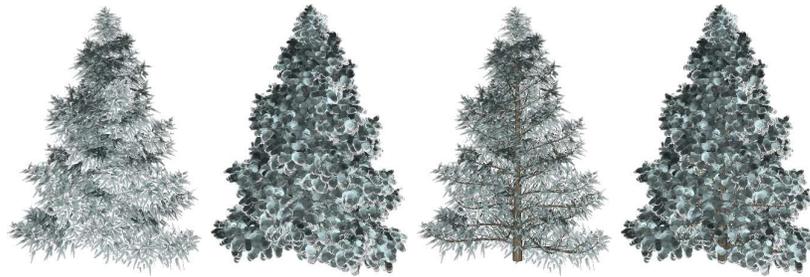
Figura 4.27: Estrutura do modelo de folha na planta pinheiro-do-Canadá.

O formato da folha com seus triângulos beneficia muito a técnica de pontos em comparação aos dois triângulos utilizados nos *billboards* clássicos. Na simplificação são gerados mais pontos, que representam uma área menor da folha e, por isso, apresentam uma fidelidade maior na cor e transparência. O resultado visual desta simplificação ainda não é tão bom quanto os modelos que utilizam a representação geométrica completa para as folhas, mas já apresenta um aspecto muito superior ao obtido na simplificação da planta bordo-japonês.

Assim, esta simplificação ainda não pode ser usada com distâncias muito pequenas, em que o aspecto geral se torne a principal característica da planta. Se a planta estiver localizada entre outras plantas, em uma vegetação densa, a distância para a utilização da técnica pode ser bastante reduzida. Na Figura 4.28 pode-se observar a comparação entre a representação com pontos e a representação original.

O grande número de folhas e triângulos utilizados para sua representação (94230) faz com que os ganhos com sua simplificação sejam bastante grandes. Enquanto a representação da folhagem completa leva aproximadamente 2.10ms, a representação com pontos leva 1,14ms, quase metade do tempo.

Com este ganho e um bom resultado visual, pode-se considerar utilizar esta simplificação, mesmo com uma pequena perda visual no caso de uma proximidade do observador. Assim como nos outros modelos avaliados neste trabalho, os ganhos poderiam ser maiores em grandes distâncias com a implementação de uma estrutura hierárquica para agrupar



(a) Triângulos = 94230, Tempos: Triângulos \approx 2.10ms, Pontos \approx 1.14ms

Figura 4.28: Resultados da simplificação de nós terminais com pontos para a planta pinheiro-do-Canadá. Todos os dados apresentados na figura referem-se apenas aos nós terminais da planta.

o pontos à medida em que estes se tornam muito pequenos.

4.5 Discussão dos Resultados

A Tabela 4.1 apresenta a quantidade de triângulos e a taxa de quadros por segundo (FPS) referente à renderização das plantas completas e de cada grupo de órgãos individualmente. Desta tabela pode-se notar a grande quantidade de triângulos utilizada para a representação dos nós terminais em plantas sem simplificação, caso dos modelos moleiro-rosa, lilás-comum e árvore-base. Nas plantas em que a folhagem utiliza representação baseada em imagens, este conjunto apresenta menos triângulos do que ramos e exige menos processamento gráfico.

Outra observação é a importância da estrutura dos modelos da planta, além da quantidade de triângulos. Nas plantas em que os ramos são mais visíveis, caso dos modelos moleiro-rosa e árvore-base, os nós terminais, mesmo que com uma maior quantidade de triângulos, apresentam taxas de quadros maiores. Isto pode ser justificado pela oclusão de geometria nos nós terminais, que nessas plantas é bem maior do que nos ramos e, por isso, as otimizações do *pipeline* gráfico beneficiam este grupo e não conseguem o mesmo benefício para os ramos que apresentam pouca oclusão.

Esta otimização é notavelmente limitada, não conseguindo reduzir demais o processamento gráfico nas plantas em que o número de triângulos nos nós terminais é bastante maior que nos ramos, mesmo que a oclusão das folhas e flores seja ainda maior nestes casos. Um exemplo disto é a planta lilás-comum, com presença de auto-occlusão, porém, um número muito superior de triângulos nos nós terminais.

A Tabela 4.2 contém os resultados da simplificação de ramos, com a combinação das técnicas de simplificação estrutural e substituição por linhas. Esta combinação proporcionou um ganho visual sem perdas consideráveis de desempenho em todas as plantas.

Planta	Tipo	Nº de Triângulos	FPS
Moleiro-rosa	completa	80964	320
	ramos	23744	882
	nós terminais	57220	1260
Lilás-comum	completa	60160	405
	ramos	9520	3870
	nós terminais	50640	1300
Árvore-base	completa	121029	213
	ramos	50307	850
	nós terminais	70722	964
Bordo-japonês	completa	57852	1160
	ramos	50528	1380
	nós terminais	7324	3760
Pinheiro-do-Canadá	completa	224438	125
	ramos	130208	312
	nós terminais	94230	475

Tabela 4.1: Resultados originais para cada planta sem simplificação.

Os modelos que apresentam uma grande quantidade de ramos têm a maior queda de desempenho, que ainda é uma queda pequena em comparação com o ganho visual da combinação.

A análise destas plantas em relação a seus ramos mostra que plantas com maior grau de ramificação, ou seja, aquelas em que a cadeia de ramos que produz outros ramos é maior, são mais beneficiadas pela simplificação estrutural, aliada ou não à substituição por linhas. Nestas plantas, os ramos menores e menos visíveis são responsáveis por uma grande parte dos triângulos do modelo e sua remoção traz grandes ganhos de desempenho.

Este é o caso de todas as plantas utilizadas nos testes neste trabalho, com exceção da planta moleiro-rosa que apresenta um grau de ramificação menor. Nelas, pode-se notar um grande salto de desempenho logo no primeiro nível de detalhe e uma grande redução do número de triângulos.

Ainda em relação aos ramos, os experimentos apontaram duas divisões claras entre as plantas, aquelas que têm seus ramos bastante ocluídos pelos nós terminais, caso da lilás-comum, bordo-japonês e pinheiro-do-Canadá, e aquelas que têm ramos mais visíveis, caso da moleiro-rosa e da árvore-base. No primeiro grupo, a simplificação dos ramos pode ser usada em distâncias menores sem grandes perdas visuais, já no segundo grupo, esta simplificação deve ser usada apenas com distâncias grandes em relação observador para que se torne imperceptível.

Em relação aos nós terminais, cujos resultados da simplificação podem ser vistos na

Planta	Nível de Detalhe	Nº de Triângulos	Nº de Linhas	FPS
Moleiro-rosa	0	23744	0	882
	1	20832	14	1000
	2	17648	33	1090
	3	13872	63	1415
	4	0	130	7936
Lilás-comum	0	9520	0	3870
	1	3664	312	5132
	2	544	411	6375
	3	0	419	6990
Árvore-base	0	50307	0	850
	1	2984	1155	4140
	2	1156	1205	5140
	3	0	1216	6310
Bordo-japonês	0	50528	0	1380
	1	5514	1389	4060
	2	3560	1443	4400
	3	1020	1455	5060
	4	0	1456	5704
Pinheiro-do-Canadá	0	130208	0	312
	1	10928	635	2170
	2	1400	794	5190
	3	0	795	6600

Tabela 4.2: Resultados da combinação das técnicas de simplificação de ramos para cada planta.

Tabela 4.3, a maior diferença encontrada nos resultados se dá pela forma de representação e não por sua importância ou visibilidade no modelo da planta.

No conjunto de testes deste trabalho, todas as plantas que apresentavam nós terminais com representação detalhada utilizam para tal uma grande quantidade de pequenos triângulos. Esta densidade de triângulos beneficia a simplificação por pontos, produzindo resultados visuais bastante próximos das representações originais, podendo ser utilizados em distâncias não muito grandes do observador. Este é caso das plantas moleiro-rosa, lilás-comum e árvore-base.

Já as plantas que apresentavam uma simplificação em seus nós terminais, utilizando a representação baseada em imagens, não foram abordadas pelo trabalho original de representação com pontos e foram objetos de estudo para a tentativa de extensão desta técnica. Os resultados visuais da aplicação desta técnica em tais modelos deixaram bastante a desejar, mas também apontaram uma solução para os problemas encontrados.

A utilização de número mínimo de triângulos, caso da planta bordo-japonês que utiliza apenas dois triângulos por folha, afeta a técnica por apresentar grandes áreas transparentes nos triângulos. Isto leva a produção de uma simplificação grosseira visualmente. Além disso, a dificuldade de ordenação dos pontos, que agora apresentam transparência, produzem resultados ruins em termos de desempenho, sobrecarregando a placa gráfica.

No entanto, a aplicação da técnica na planta pinheiro-do-Canadá apresenta a solução para esses problemas. Nela, as folhas são representadas por um número maior de triângulos, mesmo que ainda baseados em imagem. Sua substituição por pontos apresenta resultados visuais bastante melhores do que no caso mínimo, mas ainda não tão bons quanto dos modelos com representação detalhada. Em termos de desempenho, com a maior utilização de triângulos, os pontos gerados não representam grandes áreas transparentes e sua ordenação não é mais tão problemática, apresentando ganhos de desempenho sensíveis.

Em ambos os casos, a utilização desta simplificação só pode ser realizada sem prejuízo visual a grandes distâncias ou em uma densidade bastante grande de plantas, caso em que os nós terminais tendem a se misturar entre as plantas, gerando uma grande massa em termos visuais.

Planta	Nº de Triângulos	FPS com Triângulos	FPS com Pontos
Moleiro-rosa	57220	1260	1470
Lilás-comum	50640	1300	1720
Árvore-base	70722	964	1115
Bordo-japonês	7324	3760	1705
Pinheiro-do-Canadá	94230	475	875

Tabela 4.3: Resultados da simplificação dos nós terminais por pontos para cada planta.

Capítulo 5

Conclusões e Trabalhos Futuros

Este trabalho abordou o problema de renderização de plantas em tempo real, mantendo-se um alto nível de realismo na geração das cenas. Técnicas para representação de plantas e simplificação de seus modelos foram investigadas e implementadas com atualizações como o uso de *pipeline* programável. A metodologia também procurou combinar diferentes abordagens no intuito de evitar imperfeições existentes em cada técnica.

A base deste trabalho foi a classificação das diferentes técnicas de renderização e simplificação de plantas de acordo com o grupo de órgãos afetados por elas, separando aquelas que atuam no tronco e nos ramos daquelas que atuam na folhagem e em outros nós terminais. Esta separação forneceu uma primeira possibilidade de combinação das técnicas, aplicando em conjunto abordagens que atuam em partes completamente diferentes da planta. Esta estratégia resultou na criação de um ambiente bem definido para modelagem, simplificação e representação das plantas, permitindo a avaliação e a combinação das técnicas implementadas.

Outra vantagem do desenvolvimento do ambiente foi a possibilidade de utilizar ferramentas de simulação e modelagens diferentes, uma vez estabelecida a interface do ambiente com seus resultados. Isto permitiu a utilização de dois importantes e diferentes pacotes, o *L-Studio* e o *Xfrog*, o primeiro mais voltado a simulações e o segundo à modelagem das plantas.

Seguindo então a estratégia de separação para a avaliação das técnicas, ficou bastante clara a importância da estrutura geral da planta para um bom resultado visual de cada uma das técnicas investigadas. O estudo mais detalhado sobre a estrutura das plantas permitiu que a avaliação de cada técnica não se restringisse apenas à simples medição do tempo necessário para a renderização e a inspeção visual dos resultados, mas também levasse em conta as plantas mais adequadas para a aplicação de cada técnica, com base nos órgãos afetados por ela e nas transformações realizadas neles. Um exemplo desta avaliação específica é a observação de que, em plantas com uma folhagem mais volumosa,

a técnica de simplificação por pontos gera melhores resultados.

A combinação das técnicas se mostrou bastante vantajosa. A aplicação independente de técnicas que afetavam apenas um conjunto de órgãos foi realizada com facilidade devido à representação e apresentou grandes ganhos de desempenho com um bom controle do comprometimento visual.

Além da combinação em órgãos diferentes da planta, outras técnicas que atuam no mesmo conjunto de órgãos foram combinadas, gerando-se bons resultados, caso da combinação da técnica de simplificação procedural para os ramos e a substituição de ramos por linhas. Nesta combinação, a técnica de substituição por linhas evitou o maior problema da simplificação, ou seja, o desaparecimento de ramos. As linhas, por sua vez, puderam ser usadas em distâncias menores, por não representarem todos os ramos da planta.

Outro objetivo alcançado por este trabalho foi a melhoria e a extensão de técnicas existentes. Neste intuito, duas abordagens foram propostas, brevemente destacadas a seguir.

Primeiramente, a implementação das técnicas de representação utilizou o *pipeline* programável das novas placas gráficas. Esta implementação possibilitou uma melhoria da técnica de pontos, que agora pode representar pontos de tamanhos variáveis de acordo com a distância do observador, permitindo maior flexibilidade para a técnica e melhorando o resultado visual desta quando utilizada com distâncias menores.

Outra abordagem visando estender a técnica de pontos foi a avaliação de sua utilização em plantas que já apresentavam uma estrutura simplificada, baseada em imagens, como na técnica de *billboards*. Esta avaliação identificou casos de uso diferentes com resultados bons e ruins e este estudo permitiu identificar formas de aplicar a técnica nas plantas simplificadas com pequenos ganhos de desempenho. Neste caso, os resultados obtidos não foram conclusivos, pois a perda visual e a complexidade de aplicação são bastante consideráveis e o ganho de desempenho não foi tão significativo.

A redução de perdas em qualidade visual, mantendo-se a taxa de renderização, no uso da técnica de pontos é uma das propostas para trabalhos futuros. Investigações e implementações que poderiam ser ainda realizadas incluem a integração de técnicas de simplificação de folhagem e outras técnicas de simplificação de modelos ao ambiente. As técnicas estudadas poderiam também ser avaliadas com o uso de capacidades ainda mais recentes das placas gráficas como *geometric shaders* [10] e *tessellation shaders* [38].

Bibliografia

- [1] A.Meyer, F.Neyret, and P.Poulin. Interactive rendering of trees with shading and shadows. In *Eurographics Workshop on Rendering 2001*, pages 183–196, 2001.
- [2] Autodesk Maya. Maya, 2011. <http://usa.autodesk.com/maya/>.
- [3] Blender. Blender 3D, 2011. <http://www.blender.org/>.
- [4] J. Bloomenthal. Modeling the Mighty Maple. In *Proceedings of the 12th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH'85)*, pages 305–311, New York, NY, USA, 1985.
- [5] F. Boudon, A. Meyer, and C. Godin. Survey on Computer Representations of Trees for Realistic and Efficient Rendering. Technical Report RR-LIRIS-2006-003, LIRIS UMR 5205 CNRS/INSA de Lyon/Université Claude Bernard Lyon 1/Université Lumière Lyon 2/Ecole Centrale de Lyon, Feb. 2006.
- [6] C. Colditz, L. Coconu, O. Deussen, and C. Hege. Real-Time Rendering of Complex Photorealistic Landscapes using Hybrid Level-of-Detail Approaches. In *Trends in Real-Time Landscape Visualization and Participation*, pages 97–106, 2005.
- [7] Q. Deng and X. Zhang. Grid-based View-Dependent Foliage Simplification. In *Journal of Computational Information Systems*, pages 1643–1650, 2008.
- [8] Q. Deng, X. Zhang, and M. Jaeger. View-dependent Hierarchical Foliage Simplification. In *Proceedings of the 2nd International Conference on Technologies for E-learning and Digital Entertainment*, pages 44–55, Berlin, Heidelberg, 2007. Springer-Verlag.
- [9] O. Deussen, C. Colditz, M. Stamminger, and G. Drettakis. Interactive Visualization of Complex Plant Ecosystems. In *Proceedings of the Conference on Visualization*, pages 219–226, Washington, DC, USA, 2002. IEEE Computer Society.
- [10] DirectX with Shader Model. Geometric Shaders, 2011. <http://www.microsoft.com/>.

- [11] G. Gilet, A. Meyer, and F. Neyret. Point-Based Rendering of Trees. In E. Galin and P. Poulin, editors, *Eurographics Workshop on Natural Phenomena*, pages 67–72, Dublin, Irlanda, Aug. 2005. ACM/SIGGRAPH, A.K. Peters.
- [12] G.Schaufler. Dynamically generated impostors. In *Workshop Modeling - Virtual Worlds - Distributed Graphics*, pages 129–135, 1995.
- [13] G.Schaufler. Nailboards: A rendering primitive for image caching in dynamic scenes. In *Eurographics Rendering Workshop 1997*, pages 151–162, 1997.
- [14] S. Guerraz, F. Perbet, D. Raulo, F. Faure, and M.-P. Cani. A Procedural Approach to Animate Interactive Natural Sceneries. In *Proceedings of the 16th International Conference on Computer Animation and Social Agents*, Washington, DC, USA, 2003. IEEE Computer Society.
- [15] P. S. Heckbert and M. Garland. Survey of Polygonal Surface Simplification Algorithms. Technical Report CMU-CS, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA, USA, May 1997.
- [16] H. Honda. Description of the Form of Trees by the Parameters of the Tree-like Body: Effects of the Branching Angle and the Branch Length on the Shape of the Tree-like Body. *Journal of Theoretical Biology*, 31(2):331 – 338, 1971.
- [17] H. Hoppe. Smooth View-Dependent Level-of-Detail Control and its Application to Terrain Rendering. In *Proceedings of the Conference on Visualization*, pages 35–42, Los Alamitos, CA, USA, 1998. IEEE Computer Society Press.
- [18] Interactive Data Visualization, Inc. SpeedTree, 2011. <http://www.speedtree.com/>.
- [19] A. Jakulin. Interactive Vegetation Rendering with Slicing and Blending. In A. d. Sousa and J. C. Torres, editors, *Proceedings of Eurographics (Short Presentations)*, Interlaken, Switzerland, 2000.
- [20] A. Lindenmayer. Mathematical Models for Cellular Interaction in Development: Parts I and II. *Journal of Theoretical Biology*, 18, 1968.
- [21] B. Lintermann and O. Deussen. A Modelling Method and User Interface for Creating Plants. *Computer Graphics Forum*, 17(1):73–82, 1998.
- [22] J. Lluch, E. Camahort, and R. Vivó. Procedural Multiresolution for Plant and Tree Rendering. In *Proceedings of the 2nd International Conference on Computer Graphics, Virtual Reality, Visualisation and Interaction in Africa*, pages 31–38, Cape Town, South Africa, 2003.

- [23] D. Luebke, B. Watson, J. D. Cohen, M. Reddy, and A. Varshney. *Level of Detail for 3D Graphics*. Elsevier Science Inc., New York, NY, USA, 2002.
- [24] B. B. Mandelbrot. *The Fractal Geometry of Nature*. New York, W.H. Freeman and Co., 1983, 495 p., 1983.
- [25] N. Max and K. Ohsaki. Rendering trees from precomputed z-buffer views. In *Eurographics Rendering Workshop*, pages 45–54, 1995.
- [26] O’Reilly. Online Mirror of the Encyclopedia of Graphics File Formats. <http://www.fileformat.info/format/wavefrontobj/>.
- [27] W. Palubicki, K. Horel, S. Longay, A. Runions, B. Lane, R. Měch, and P. Prusinkiewicz. Self-organizing Tree Models for Image Synthesis. *ACM Transactions on Graphics*, 28(3):1–10, 2009.
- [28] P. Prusinkiewicz. Modeling of Spatial Structure and Development of Plants: A Review. *Scientia Horticulturae*, 74:113–149, 1998.
- [29] P. Prusinkiewicz, M. Hammel, J. Hanan, and R. Měch. Visual Models of Plant Development. In *Handbook of Formal Languages, vol. 3: beyond words*, pages 535–597. Springer-Verlag New York, Inc., New York, NY, USA, 1997.
- [30] P. Prusinkiewicz, R. Karwowski, and B. Lane. L-studio 4.0, 2011. <http://algorithmicbotany.org/lstudio/index.html>.
- [31] P. Prusinkiewicz and A. Lindenmayer. *The Algorithmic Beauty of Plants*. Springer-Verlag New York, Inc., New York, NY, USA, 1996.
- [32] X. Qin, E. Nakamae, K. Tadamura, and Y. Nagai. Fast Photo-Realistic Rendering of Trees in Daylight. In *Computer Graphics Forum*, Interlaken, Switzerland, 2003.
- [33] I. Remolar, M. Chover, J. Ribelles, and O. Belmonte. View-Dependent Multiresolution Model for Foliage. In *Journal OF WSCG*, 2003.
- [34] J. Rohlfs and J. Helman. IRIS Performer: A High Performance Multiprocessing Toolkit for Real-Time 3D Graphics. In *Proceedings of the 21st Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, pages 381–394, New York, NY, USA, 1994. ACM.
- [35] T. Sachs. Self-Organization of Tree Form: A Model for Complex Social Systems. *Journal of Theoretical Biology*, 230(2):197 – 202, 2004.

- [36] T. Sachs and A. Novoplansky. Tree Form: Architectural Models do not Suffice. *Israel Journal of Plant Sciences*, 43:203–212, 1995.
- [37] S.E.Chen and L.Williams. View interpolation for image synthesis. In *Computer Graphics*, volume 27, pages 279–288, 1993.
- [38] Triangle Tessellation. Triangle Tessellation with OpenGL 4.0, 2011. <http://www.opengl.org/>.
- [39] S. Ulam. On Some Mathematical Properties Connected with Patterns of Growth of Figures. In *Proceedings of Symposia on Applied Mathematics*, volume 4, pages 215–224, 1962.
- [40] J. Weber and J. Penn. Creation and Rendering of Realistic Trees. In *Proceedings of the 22nd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques (SIGGRAPH'95)*, pages 119–128, New York, NY, USA, 1995.
- [41] XFrog Inc. Xfrog, 2011. <http://xfrog.com/>.