

# **Geração Procedural de Ambientes Urbanos: Análise Comparativa de Técnicas para Modelagem de Infraestrutura Viária**

***Procedural Generation of Urban Environments: A Comparative Analysis of Techniques for Road Network Modeling***

Caio Ozolins<sup>1</sup>; Alberane Lucio<sup>2</sup>

## **RESUMO**

O presente trabalho, desenvolvido como Trabalho de Conclusão de Curso, dedica-se ao estudo da "Geração Procedural de Ambientes Urbanos: Análise Comparativa de Técnicas para Modelagem de Infraestrutura Viária". O objetivo geral é analisar comparativamente as principais técnicas de Geração Procedural aplicadas à modelagem de infraestrutura viária, avaliando sua eficiência computacional, realismo estrutural e adaptabilidade funcional. A pesquisa investiga como diferentes abordagens (como *L-systems*, algoritmos baseados em grafos e métodos baseados em agentes) se comparam para identificar as mais adequadas para aplicações em simulações de tráfego e planejamento urbano. A metodologia envolveu a implementação de protótipos representativos, o desenvolvimento de um framework de avaliação com métricas quantitativas e a realização de uma análise comparativa sistemática. Os resultados buscam fornecer diretrizes práticas sobre a adequação de cada técnica a diferentes contextos, contribuindo para o avanço do conhecimento nesta área interdisciplinar que combina computação gráfica, inteligência artificial e estudos urbanos.

**Palavras-chave:** Geração Procedural; Ambientes Urbanos; Infraestrutura Viária; Análise Comparativa; Modelagem de Redes.

---

<sup>1</sup> Aluno do Curso de Sistemas de Informação do Centro Universitário do Sul de Minas. Email: [caio.ozolins@gmail.com](mailto:caio.ozolins@gmail.com)

<sup>2</sup> Professor do Curso de Ciência da Computação do Centro Universitário do Sul de Minas. Email: [alberane.cunha@professor.unis.edu.br](mailto:alberane.cunha@professor.unis.edu.br)

## ***ABSTRACT***

*This final course project is dedicated to the study of "Procedural Generation of Urban Environments: Comparative Analysis of Techniques for Road Infrastructure Modeling". The general objective is to comparatively analyze the main Procedural Generation techniques applied to road infrastructure modeling, evaluating their computational efficiency, structural realism, and functional adaptability. The research investigates how different approaches (such as L-systems, graph-based algorithms, and agent-based methods) compare in order to identify the most suitable ones for applications in traffic simulations and urban planning. The methodology involved the implementation of representative prototypes, the development of an evaluation framework with quantitative metrics, and a systematic comparative analysis. The results aim to provide practical guidelines on the suitability of each technique for different contexts, contributing to the advancement of knowledge in this interdisciplinary field that combines computer graphics, artificial intelligence, and urban studies.*

***Keywords:*** *Procedural Generation; Urban Environments; Road Infrastructure; Comparative Analysis; Network Modeling.*

## **1 INTRODUÇÃO**

O presente Projeto de Pesquisa se dedica ao estudo da "Geração Procedural de Ambientes Urbanos: Análise Comparativa de Técnicas para Modelagem de Infraestrutura Viária". A escolha deste tema emerge da crescente relevância das tecnologias de modelagem e simulação urbana em um mundo cada vez mais urbanizado. A capacidade de gerar automaticamente ambientes urbanos complexos, particularmente suas redes viárias, não é apenas um desafio computacional fascinante, mas também uma ferramenta com profundo potencial para impactar áreas como o planejamento urbano, a engenharia de tráfego, a indústria de jogos digitais e o desenvolvimento de cidades inteligentes.

A delimitação do tema, focando especificamente na infraestrutura viária dentro do contexto urbano, justifica-se por múltiplos fatores. Primeiramente, permite uma investigação mais aprofundada e focada, evitando a superficialidade que um escopo excessivamente amplo poderia acarretar. A infraestrutura viária é a espinha dorsal da mobilidade urbana, e seu design influencia diretamente a eficiência, a sustentabilidade e a qualidade de vida nas cidades.

(Unifor, 2023). Compreender como gerar redes viárias eficientes e realistas através de algoritmos é, portanto, de fundamental importância.

O problema central desta pesquisa reside em como as diferentes técnicas de Geração Procedural se comparam em termos de eficiência computacional, realismo estrutural e adaptabilidade funcional quando aplicadas especificamente à modelagem de infraestrutura viária em ambientes urbanos.

A hipótese que norteia este trabalho é que algoritmos baseados em grafos oferecem o melhor equilíbrio entre eficiência computacional, realismo estrutural e adaptabilidade funcional na geração procedural de infraestrutura viária urbana, especialmente quando complementados com heurísticas baseadas em princípios de planejamento urbano.

O objetivo geral deste trabalho é analisar comparativamente as principais técnicas de Geração Procedural aplicadas à modelagem de infraestrutura viária em ambientes urbanos, avaliando sua eficiência computacional, realismo estrutural e adaptabilidade funcional, a fim de identificar as abordagens mais adequadas para aplicações em simulações de tráfego e planejamento urbano. Os objetivos específicos incluem o mapeamento da evolução histórica das técnicas, a categorização das abordagens, a implementação de protótipos e o desenvolvimento de um framework de avaliação.

A pesquisa justifica-se pela sua relevância multifacetada. Academicamente, aborda uma lacuna na literatura ao realizar uma análise comparativa sistemática. Do ponto de vista prático e econômico, oferece soluções para a indústria de jogos, planejamento urbano e simulações de tráfego. Social e ambientalmente, contribui para o desenvolvimento de cidades mais sustentáveis e eficientes.

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

A geração procedural de ambientes urbanos, com foco específico em infraestrutura viária, representa um campo de pesquisa interdisciplinar que combina elementos de computação gráfica, inteligência artificial, teoria dos grafos, planejamento urbano e engenharia de tráfego. Esta área tem ganhado crescente atenção nas últimas décadas, impulsionada tanto por demandas da indústria de entretenimento digital quanto por aplicações em planejamento urbano, simulações de tráfego, treinamento de sistemas autônomos e desenvolvimento de cidades inteligentes. Hendrikx et al. (2013) destacam que a complexidade crescente dos ambientes virtuais necessários para aplicações modernas tem impulsionado o desenvolvimento de técnicas cada vez mais sofisticadas de geração automática de conteúdo.

Beneš et al. (2014) complementam essa perspectiva ao enfatizar que a geração procedural de infraestrutura urbana não é apenas uma questão de eficiência computacional, mas também de criação de ambientes que sejam funcionalmente coerentes e visualmente convincentes.

O objetivo deste capítulo é fornecer uma revisão abrangente e atualizada das principais técnicas, abordagens, métricas e desafios relacionados à geração procedural de infraestrutura viária urbana. A análise se concentrará nas metodologias que permitem a criação automática de redes viárias realistas e funcionais, com ênfase nas abordagens comparativas e nos critérios de avaliação que fundamentam este trabalho. A estrutura seguirá uma progressão lógica, iniciando com a evolução histórica do campo, detalhando as categorias de técnicas existentes, explorando seus fundamentos e métricas de avaliação, e concluindo com aplicações, desafios e direções futuras.

A geração procedural de conteúdo não é um conceito novo, tendo suas raízes em aplicações pioneiras como a geração de texturas e terrenos na década de 1980. Perlin (1985) introduziu o conceito de ruído procedural, que se tornou fundamental para a geração de texturas naturais e terrenos. No entanto, a aplicação específica para a complexidade dos ambientes urbanos, especialmente redes viárias, é um desenvolvimento mais recente. Um marco inicial significativo foi o trabalho de Parish e Müller (2001) com o *CityEngine*, que utilizou *L-systems* estendidos para modelar ruas e edifícios, demonstrando o potencial da abordagem baseada em regras para criar layouts urbanos complexos. Este trabalho pioneiro estabeleceu muitos dos princípios fundamentais que ainda orientam a pesquisa contemporânea na área.

Pesquisas como as de Smelik et al. (2009), De Carli et al. (2011) e Hendrikx et al. (2013) mapearam a evolução das técnicas, classificando-as geralmente em abordagens baseadas em regras, baseadas em exemplos e baseadas em simulação. Smelik et al. (2009) argumentam que cada categoria possui vantagens e limitações específicas, e que a escolha da abordagem mais adequada depende fortemente dos objetivos da aplicação e dos recursos disponíveis. Mais recentemente, a ascensão do aprendizado de máquina introduziu novas possibilidades. Modelos geratitivos, como Redes Generativas Adversariais e Modelos de Difusão, começaram a ser explorados para aprender e replicar estilos urbanos complexos a partir de grandes conjuntos de dados. Gu et al. (2024) demonstraram que esses modelos podem gerar redes viárias condicionadas a fatores contextuais, oferecendo um controle semântico promissor e representando a fronteira atual da pesquisa.

A geração específica de redes viárias urbanas pode ser categorizada com base nos princípios algorítmicos subjacentes. As abordagens baseadas em regras, inspiradas na

modelagem biológica, aplicam regras de reescrita para expandir uma estrutura inicial em uma rede complexa. Parish e Müller (2001) demonstraram a eficácia dos *L-systems* para gerar padrões de ruas hierárquicos, estabelecendo um paradigma que influenciou muitos trabalhos subsequentes. Wonka et al. (2003) exploraram gramáticas de forma para fachadas, técnicas que também podem ser adaptadas para layouts urbanos. Estas abordagens oferecem a capacidade de gerar estruturas complexas e auto-similares com regras compactas, proporcionando bom controle sobre a hierarquia viária. No entanto, apresentam dificuldades em incorporar restrições globais ou adaptar-se dinamicamente a terrenos complexos, e a definição das regras pode ser não intuitiva para usuários não especializados.

Os algoritmos baseados em grafos e otimização modelam a rede viária diretamente como um grafo, onde interseções são nós e segmentos de rua são arestas. A geração envolve adicionar nós e arestas ao grafo com base em objetivos e restrições específicas. Beneš et al. (2014) propuseram técnicas de crescimento baseado em tensão que simulam o crescimento da rede em direção a áreas de maior demanda, como densidade populacional. Galin et al. (2010) utilizaram algoritmos de caminho mínimo anisotrópicos para conectar pontos de interesse ou expandir a rede minimizando custos relacionados à distância e características do terreno. Algoritmos clássicos como os de Prim ou Kruskal podem ser adaptados para criar esqueletos de rede eficientes. Estas abordagens oferecem uma representação natural da rede e facilidade em incorporar métricas de grafos, além de bom potencial para otimização. Contudo, podem gerar layouts excessivamente regulares ou simplificados se não combinados com outras heurísticas, e o controle fino sobre o estilo pode ser desafiador.

As abordagens baseadas em agentes simulam o desenvolvimento urbano através de múltiplos agentes autônomos que interagem localmente, seguindo regras comportamentais. O padrão da rede emerge dessas interações complexas. Lechner et al. (2003) usaram agentes para simular o desenvolvimento de estradas baseado em tráfego e características do terreno, demonstrando como comportamentos locais simples podem gerar padrões globais complexos. Vanegas et al. (2009) também incorporaram elementos baseados em agentes em seu sistema interativo, mostrando como essa abordagem pode ser combinada com controle direto do usuário. Estas técnicas oferecem capacidade de gerar padrões orgânicos e complexos, boa adaptação a ambientes heterogêneos e comportamento emergente interessante. Entretanto, apresentam dificuldades em garantir propriedades globais desejadas, a parametrização e controle podem ser complexos, e o custo computacional pode ser elevado.

Os métodos baseados em exemplos e patches aprendem padrões a partir de mapas ou dados urbanos existentes, operando em diferentes níveis de abstração. Técnicas de síntese de

textura podem ser adaptadas para gerar layouts bidimensionais, enquanto abordagens patch-based utilizam um dicionário de pequenos pedaços de rede viária extraídos de exemplos. Teng e Bidarra (2017) propuseram uma abordagem semântica, onde os patches são anotados com informações como tipo de via e densidade para guiar a geração, combinando as vantagens da abordagem baseada em exemplos com o controle paramétrico. Estas técnicas oferecem capacidade de replicar estilos urbanos específicos e podem produzir resultados mais realistas se os exemplos forem de boa qualidade. No entanto, dependem da qualidade e variedade dos dados de exemplo, têm dificuldade em gerar layouts verdadeiramente novos ou adaptar-se a contextos muito diferentes dos exemplos, e o controle pode ser limitado.

Os métodos baseados em campos utilizam campos definidos sobre o terreno para guiar o crescimento das vias. Chen et al. (2008) demonstraram como campos tensoriais podem definir direções preferenciais e anisotropia, permitindo criar redes alinhadas a características geográficas ou diretrizes de design específicas. Estas abordagens oferecem bom controle sobre a orientação e densidade das vias, além de boa adaptação a características do terreno. Contudo, a definição dos campos pode ser complexa e podem ter dificuldade em gerar interseções complexas ou padrões muito irregulares.

A fronteira atual da pesquisa envolve o uso de redes neurais profundas e modelos generativos de aprendizado de máquina. As Redes Generativas Adversariais podem aprender a distribuição de layouts urbanos a partir de imagens de mapas e gerar novas amostras com características similares. Gu et al. (2024) exploraram modelos de difusão que podem gerar redes viárias condicionadas a fatores contextuais como uso do solo e elevação, oferecendo um controle semântico promissor. Estas técnicas oferecem capacidade de aprender padrões complexos e sutis de dados reais, com potencial para gerar resultados altamente realistas e diversos. Entretanto, requerem grandes conjuntos de dados para treinamento, o controle fino sobre a geração pode ser difícil devido à natureza de "caixa preta" dos modelos, e o custo computacional de treinamento e, às vezes, de inferência pode ser significativo.

A geração procedural de redes viárias se apoia em diversos conceitos fundamentais da matemática e ciência da computação. A teoria dos grafos é essencial para representar a topologia da rede, calcular caminhos, analisar conectividade, centralidade e outras propriedades estruturais que determinam a funcionalidade da rede. A geometria computacional fornece algoritmos cruciais para manipulação de pontos, linhas e polígonos, incluindo diagramas de Voronoi para definir áreas de influência, triangulação de Delaunay, interseção de segmentos e operações booleanas. Técnicas de otimização são fundamentais para encontrar soluções que minimizem ou maximizem funções objetivo, como minimizar o

comprimento total da rede, maximizar a acessibilidade ou minimizar custos de construção considerando características do terreno.

Os sistemas de reescrita formam a base para *L-systems* e gramáticas de forma, enquanto conceitos de simulação e modelagem, incluindo simulação baseada em agentes, dinâmica de sistemas e simulação de eventos discretos, são relevantes para abordagens baseadas em simulação e para avaliação funcional das redes geradas. O aprendizado de máquina, incluindo estatística, redes neurais e aprendizado profundo, constitui a base dos métodos generativos mais recentes, oferecendo novas possibilidades para capturar e replicar padrões complexos encontrados em dados urbanos reais.

A avaliação objetiva da qualidade das redes viárias geradas é crucial para a comparação de técnicas, mas permanece um desafio significativo na área. Shaw et al. (2022) argumentam que a definição do conceito de 'realismo' representa um dos principais obstáculos na avaliação de redes viárias geradas proceduralmente. As métricas podem ser agrupadas em categorias distintas, cada uma capturando aspectos diferentes da qualidade da rede gerada.

As métricas de eficiência computacional incluem o tempo de geração necessário para produzir a rede, o uso de memória e recursos computacionais consumidos, e a escalabilidade, que mede o comportamento do tempo e memória com o aumento da área ou complexidade da rede. Estas métricas são fundamentais para avaliar a viabilidade prática das diferentes técnicas em aplicações reais.

As métricas de realismo estrutural e topológico são mais complexas e incluem várias subcategorias. As métricas baseadas em grafos compararam propriedades topológicas com dados reais, incluindo a distribuição de graus que analisa a frequência de interseções com diferentes números de vias, o comprimento médio de aresta que compara o comprimento médio dos segmentos de rua, e análises de centralidade como a centralidade de intermediação para identificar hierarquias viárias. Medidas de conectividade como os índices alfa ou gama da teoria dos grafos, e a circuidade que relaciona a distância pela rede com a distância euclidiana, também são importantes.

As métricas geométricas analisam aspectos espaciais da rede, incluindo a distribuição de ângulos de interseção que mede a frequência de ângulos retos, agudos e obtusos, e análises de alinhamento e curvatura que avaliam a retilinidade ou sinuosidade das vias. Métricas baseadas em comparação com exemplos utilizam técnicas como FID, IOU e *F1-score*, conforme demonstrado por Gu et al. (2024), para comparar a similaridade visual ou estrutural com redes reais, além de análises de similaridade de padrões usando descritores de textura ou forma.

As métricas de adaptabilidade e funcionalidade avaliam quão bem a rede responde a diferentes contextos e requisitos. A adaptação ao terreno mede quão bem a rede se ajusta à topografia, evitando declives acentuados e cruzando rios em locais apropriados. A resposta a restrições avalia a capacidade de respeitar zonas proibidas, limites de propriedade e densidades variáveis. Métricas funcionais, frequentemente avaliadas através de simulação, incluem a acessibilidade medida pelo tempo médio de viagem entre pontos da cidade, análises de congestionamento através de simulação de tráfego para avaliar gargalos e fluidez, e cobertura que mede o percentual da área urbana servida pela rede viária dentro de uma distância razoável.

As aplicações práticas da geração procedural de infraestrutura viária são vastas e abrangem múltiplos setores. Na indústria de jogos e entretenimento, essas técnicas permitem a criação rápida de mundos virtuais extensos e diversos, reduzindo significativamente os custos de desenvolvimento. No planejamento urbano, funcionam como ferramentas de apoio à decisão, permitindo explorar cenários "*what-if*" e visualizar alternativas de design rapidamente. Em simulações de tráfego, possibilitam a geração de redes para testar modelos de tráfego, planejar sistemas de transporte e avaliar políticas públicas. Para treinamento de inteligência artificial, especialmente veículos autônomos, oferecem a capacidade de gerar dados sintéticos com ambientes urbanos variados. Na visualização arquitetônica e imobiliária, permitem a criação de contextos urbanos para projetos, enquanto em cartografia e GIS oferecem potencial para preenchimento de dados ou geração de mapas estilizados.

Apesar dos avanços significativos, desafios persistem na área. Smelik et al. (2009) e Hendrikx et al. (2013) identificaram vários obstáculos que continuam relevantes. O equilíbrio entre controle e automação permanece um desafio central, buscando encontrar o ponto ideal entre permitir que o designer guie o processo e automatizar a geração. A integração multimodal, que envolve gerar não apenas redes viárias mas integrá-las com transporte público, ciclovias e calçadas, representa uma área de crescente importância. A incorporação de semântica e funcionalidade, indo além da geometria para incluir significado como tipos de via, limites de velocidade e uso do solo adjacente, e garantir funcionalidade evitando becos sem saída indesejados e garantindo acessibilidade, continua sendo um desafio significativo.

As direções futuras incluem abordagens híbridas que combinam diferentes técnicas para aproveitar as vantagens de cada uma, maior integração com dados GIS e BIM para melhor conexão com dados do mundo real, e foco na co-geração de múltiplos sistemas urbanos incluindo vias, edifícios e uso do solo de forma interdependente. O desenvolvimento

de *frameworks* de avaliação mais abrangentes e padronizados também representa uma necessidade importante para o avanço da área.

Este referencial teórico demonstrou a riqueza e a complexidade do campo da geração procedural de infraestrutura viária urbana. Desde as abordagens pioneiras baseadas em regras até os recentes modelos generativos de aprendizado de máquina, uma variedade de técnicas foi desenvolvida, cada uma com suas forças e fraquezas específicas. A escolha da técnica mais adequada depende fortemente dos objetivos da aplicação, do nível de controle desejado, dos dados disponíveis e das métricas de qualidade priorizadas. A análise comparativa proposta neste TCC, focando em eficiência computacional, realismo estrutural e adaptabilidade funcional, se insere neste contexto como uma contribuição necessária para sistematizar o conhecimento sobre o desempenho relativo das abordagens mais promissoras, especialmente algoritmos baseados em grafos, *L-systems* e métodos baseados em agentes. A definição e aplicação de métricas objetivas, informadas pela literatura recente, serão cruciais para fornecer resultados significativos e diretrizes práticas para futuros trabalhos na área.

### **3 METODOLOGIA**

Este capítulo detalha os procedimentos metodológicos que serão adotados para alcançar os objetivos propostos e responder ao problema de pesquisa sobre a comparação de técnicas de geração procedural para infraestrutura viária urbana.

#### **3.1 Abordagem da Pesquisa**

A pesquisa proposta neste trabalho adota uma abordagem metodológica mista, combinando elementos de pesquisa bibliográfica, desenvolvimento tecnológico, pesquisa experimental controlada e análise qualitativa e quantitativa. Essa combinação é fundamental para abordar a complexidade do tema da geração procedural de infraestrutura viária urbana, permitindo tanto a fundamentação teórica quanto a validação empírica das técnicas estudadas. Conforme Creswell (2014) argumenta, a abordagem mista oferece uma compreensão mais completa e profunda de um problema de pesquisa, ao integrar diferentes perspectivas e tipos de dados.

A primeira fase, a Pesquisa Bibliográfica Aprofundada, já foi iniciada e consolidada no Capítulo 2 (Referencial Teórico). Esta etapa foi crucial para identificar o estado da arte, mapear as principais técnicas de geração procedural, compreender os fundamentos

matemáticos e computacionais que as embasam, e investigar as métricas de avaliação existentes. Autores como Smelik et al. (2009) e Hendrikx et al. (2013) fornecem um panorama abrangente das abordagens e desafios, servindo como base para a seleção das técnicas a serem implementadas e para a definição dos critérios de avaliação. A revisão sistemática da literatura permitiu, ainda, identificar lacunas de pesquisa e a relevância da proposta de um framework comparativo para as técnicas de modelagem de redes viárias.

Em seguida, a fase de Desenvolvimento Tecnológico envolverá a implementação de protótipos funcionais das técnicas de geração procedural selecionadas. Esta etapa é de natureza aplicada, visando a criação de ferramentas que permitam a experimentação controlada. A escolha de implementar protótipos, em vez de apenas analisar teoricamente, é justificada pela necessidade de avaliar o desempenho prático das técnicas em um ambiente controlado, conforme destacado por Brooks (1995) sobre a importância da construção de sistemas para a compreensão de seus desafios e potencialidades. Os protótipos serão desenvolvidos com foco na modularidade e na capacidade de coletar dados de desempenho e características das redes geradas.

A terceira fase, a Pesquisa Experimental Controlada, constitui o cerne da análise comparativa. Nesta etapa, as técnicas implementadas serão submetidas a uma série de experimentos sistemáticos, utilizando métricas objetivas e cenários de teste padronizados. A metodologia experimental controlada é essencial para garantir a comparabilidade dos resultados e a validade das conclusões, permitindo isolar o impacto de cada técnica sobre as métricas de interesse. Yin (2018) ressalta a importância do design experimental rigoroso para a obtenção de evidências robustas em pesquisas aplicadas. Os cenários de teste serão projetados para simular diferentes condições urbanas e requisitos de projeto, permitindo uma avaliação abrangente do desempenho das técnicas.

Finalmente, a Análise Qualitativa e Quantitativa dos resultados será realizada para interpretar os dados coletados, identificar padrões, pontos fortes e limitações de cada técnica. A análise quantitativa envolverá o uso de ferramentas estatísticas para comparar o desempenho das técnicas em relação às métricas definidas, enquanto a análise qualitativa permitirá uma compreensão mais aprofundada das características visuais e funcionais das redes geradas. A combinação dessas abordagens, como sugerido por Tashakkori e Teddlie (2003), oferece uma visão holística dos fenômenos estudados, enriquecendo a interpretação dos resultados e a formulação de diretrizes práticas. A validação dos resultados, seja por comparação com dados reais ou por avaliação de especialistas, será um componente crucial para assegurar a relevância e aplicabilidade das conclusões.

### **3.2 Plataforma e Ferramentas de Desenvolvimento**

A escolha das ferramentas e plataformas de desenvolvimento é um aspecto crítico para a execução bem-sucedida deste projeto, impactando diretamente a eficiência da implementação, a capacidade de visualização e a robustez da análise de dados. A seleção foi guiada pela necessidade de um ambiente que ofereça flexibilidade para o desenvolvimento de protótipos, recursos visuais para a representação das redes viárias e ferramentas analíticas para o processamento dos resultados experimentais.

O *Unity* 3D (na versão *LTS* mais recente disponível no momento da implementação) foi selecionado como o motor de jogo e ambiente principal para o desenvolvimento dos protótipos das técnicas de geração procedural. A escolha do *Unity* se justifica por sua robustez, ampla documentação, vasta comunidade de desenvolvedores e, principalmente, sua capacidade de visualização 3D em tempo real, que é essencial para a representação e inspeção das redes viárias geradas. Além disso, o *Unity* oferece um ecossistema rico em assets e pacotes que podem acelerar o desenvolvimento, e sua linguagem de *scripting* principal, C#, é performática e amplamente utilizada na indústria de jogos e simulações. Conforme (Gregory, 2014), motores de jogo como o *Unity* são ferramentas poderosas não apenas para entretenimento, mas também para prototipagem e simulação em diversas áreas, incluindo planejamento urbano e engenharia.

A linguagem de programação C# será a principal para o desenvolvimento dos algoritmos de geração procedural e para a integração com o ambiente *Unity*. Sua sintaxe clara, tipagem forte e recursos orientados a objetos facilitam a implementação de algoritmos complexos e a manutenção do código. Potencialmente, bibliotecas adicionais em C# para manipulação de grafos (como *QuickGraph*, se compatível e necessário) ou geometria computacional poderão ser utilizadas para otimizar certas operações, embora a prioridade seja a implementação nativa para controle total sobre o desempenho.

Para o processamento e visualização dos dados experimentais, será utilizada a linguagem *Python*, acompanhada de bibliotecas consagradas como Pandas para manipulação e análise de dados, *NumPy* para operações numéricas eficientes, e *Matplotlib/Seaborn* para a criação de gráficos e visualizações. A escolha do *Python* se deve à sua vasta aplicação em ciência de dados, à riqueza de suas bibliotecas para análise estatística e visualização, e à sua facilidade de integração com outras ferramentas. Essas bibliotecas permitirão a realização de análises quantitativas aprofundadas sobre as métricas de eficiência computacional, realismo

estrutural e adaptabilidade funcional, conforme discutido por McKinney (2017) sobre o ecossistema de dados em *Python*.

O *Git* e o *GitHub* (ou uma plataforma similar de controle de versão) serão empregados para o gerenciamento do código-fonte. Esta prática é fundamental para garantir a rastreabilidade das alterações, facilitar a colaboração (se aplicável) e permitir o controle de versões dos protótipos desenvolvidos. O uso de um sistema de controle de versão é uma boa prática de engenharia de software que assegura a integridade do projeto e a capacidade de reverter a estados anteriores, conforme amplamente recomendado na literatura de desenvolvimento de software (Chacon & Straub, 2014).

### **3.3 Seleção e Implementação das Técnicas**

A seleção das técnicas de geração procedural para implementação foi baseada na revisão bibliográfica apresentada na Seção 2, buscando representar diferentes paradigmas algorítmicos e suas aplicabilidades na modelagem de infraestrutura viária urbana. O objetivo é permitir uma análise comparativa abrangente, identificando os pontos fortes e fracos de cada abordagem em relação às métricas definidas. Serão implementados protótipos funcionais das seguintes técnicas:

1. Algoritmos Baseados em Grafos (Foco Principal): Esta abordagem será o foco principal da implementação, dada a sua relevância para a representação e análise de redes viárias. A implementação se baseará em princípios de crescimento de grafos direcionado por objetivos, onde a rede se expande em resposta a fatores como densidade populacional simulada ou a necessidade de conectar pontos de interesse. Serão exploradas variações que incluem:

- \* Expansão baseada em população/densidade: Simulação do crescimento da rede viária em áreas de maior demanda, inspirada em modelos de crescimento urbano que correlacionam a infraestrutura com a distribuição populacional (Batty, 2013). Isso envolverá a utilização de mapas de densidade ou campos de atração para guiar a adição de novos nós e arestas ao grafo.

- \* Conexão otimizada de pontos de interesse: Utilização de algoritmos de caminho mínimo, como o algoritmo A\* adaptado para considerar custos de terreno (elevação, obstáculos) e outros fatores, para conectar pontos predefinidos na paisagem urbana. Galin et al. (2010) demonstraram a eficácia de abordagens baseadas em caminhos mínimos para gerar

redes viárias eficientes. Além disso, a exploração de árvores de Steiner aproximadas pode ser considerada para otimizar a conectividade com o menor comprimento total de vias.

\* Heurísticas para garantir hierarquia viária: Implementação de regras e heurísticas que promovam a formação de uma hierarquia clara na rede (vias principais, secundárias, locais), refletindo padrões de planejamento urbano realistas. Isso pode envolver a atribuição de pesos diferentes às arestas ou a aplicação de regras de conectividade baseadas na importância dos nós.

2. *L-systems* (Sistemas de Lindenmayer): Uma abordagem baseada em regras, os *L-systems* são sistemas formais que utilizam regras de reescrita para gerar estruturas complexas a partir de um axioma inicial. Parish e Müller (2001) foram pioneiros na aplicação de *L-systems* estendidos para modelar ruas e edifícios em ambientes urbanos. A implementação buscará gerar redes com padrões mais regulares, como grades deformadas ou padrões radiais, e incorporará sensibilidade básica ao contexto, como a capacidade de evitar obstáculos ou seguir suavemente o terreno. A parametrização dos *L-systems* permitirá a exploração de diferentes estilos de layout urbano.

3. Abordagem Baseada em Agentes: Esta técnica simula o desenvolvimento urbano através da interação de múltiplos agentes autônomos que seguem regras comportamentais simples, mas que, em conjunto, geram padrões complexos e emergentes. Lechner et al. (2003) utilizaram agentes para simular o desenvolvimento de estradas baseado em tráfego e terreno. A implementação envolverá agentes "construtores de estradas" que interagem com o ambiente e entre si, buscando equilibrar a exploração de novas áreas, a conexão com redes existentes e a adaptação a características do terreno e densidade. A complexidade do comportamento emergente será um ponto de análise nesta abordagem.

Os protótipos serão desenvolvidos com foco na geração da topologia e geometria da rede viária, abstraindo detalhes visuais complexos que não são centrais para a análise comparativa das técnicas. O código será modular e bem documentado para facilitar a comparação e a replicabilidade dos experimentos. A modularidade permitirá a fácil substituição de componentes e a avaliação de diferentes combinações de heurísticas e algoritmos dentro de cada paradigma.

### 3.3 Métricas de Avaliação

A avaliação objetiva da qualidade das redes viárias geradas proceduralmente é um componente crucial deste trabalho, permitindo a comparação sistemática das diferentes

técnicas implementadas. Com base na revisão da literatura apresentada na Seção 2, será desenvolvido um conjunto abrangente de métricas, categorizadas em Eficiência Computacional, Realismo Estrutural e Adaptabilidade Funcional. Essas métricas serão implementadas como scripts de análise que operam sobre as redes geradas, garantindo a quantificação e comparabilidade dos resultados.

### **3.4.1 Eficiência Computacional**

As métricas de eficiência computacional são fundamentais para avaliar a viabilidade prática das técnicas em diferentes contextos de aplicação, especialmente em cenários que exigem a geração de grandes áreas urbanas ou interatividade em tempo real. Serão consideradas as seguintes métricas:

\* Tempo de Geração: Medido em segundos, representa o tempo total necessário para o algoritmo gerar a rede viária completa, desde o início do processo até a finalização da estrutura topológica e geométrica. Este dado será registrado automaticamente para cada execução do protótipo.

\* Uso de Pico de Memória: Refere-se à quantidade máxima de memória *RAM* utilizada pelo processo de geração durante sua execução. Será monitorado para identificar o consumo de recursos e potenciais gargalos de memória, especialmente em redes de maior complexidade.

\* Escalabilidade: Avaliará o comportamento do tempo de geração e do uso de memória em função do aumento da área ou da complexidade da rede. Isso será feito executando a geração em cenários de tamanhos crescentes (pequeno, médio, grande), permitindo analisar a curva de desempenho das técnicas. Conforme Smelik et al. (2009), a escalabilidade é um fator crítico para a aplicabilidade de técnicas de PCG em larga escala.

### **3.4.2 Realismo Estrutural**

O realismo estrutural refere-se à capacidade da rede gerada de replicar características topológicas e geométricas encontradas em redes viárias reais. A definição de realismo é complexa, como apontado por Shaw et al. (2022), mas pode ser abordada através de métricas quantificáveis. Para manter o foco da análise comparativa, este trabalho avaliou as seguintes três métricas principais, que estão alinhadas com a literatura da área (Barthélemy, 2011) e foram coletadas diretamente dos protótipos:

- \* Contagem de Intersecções (*IntersectionCount\_V*): Mede o número total de intersecções (nós de grau  $\geq 3$ ) na rede gerada. Esta métrica é um indicador direto da complexidade e da conectividade da malha viária.
- \* Comprimento Médio de Segmento (*AverageRoadLength*): Análise do comprimento médio dos segmentos de rua (arestas) em metros. Esta métrica ajuda a identificar se uma técnica gera predominantemente blocos longos (típicos de áreas suburbanas) ou curtos (típicos de centros urbanos densos).
- \* Circuidade Média (*AverageCircuitry*): Também conhecido como *Detour Index*, mede a razão entre a distância percorrida pela rede viária e a distância euclidiana (em linha reta) entre pares de pontos. Um índice próximo de 1 indica uma grade altamente eficiente (como em Manhattan), enquanto valores maiores sugerem uma rede mais orgânica ou sinuosa.

### **3.4.3 Adaptabilidade e Funcionalidade**

As métricas de adaptabilidade e funcionalidade avaliam a capacidade da rede de se ajustar a diferentes contextos e de cumprir sua função de maneira eficiente. Serão consideradas as seguintes métricas:

- \* Adaptação ao Terreno: Avaliada qualitativamente através da inspeção visual da rede gerada sobre um terreno com variações de elevação. Serão observados aspectos como a capacidade de evitar declives acentuados e de seguir as curvas de nível de forma natural.
- \* Resposta a Restrições: Avaliada através da capacidade da rede de respeitar zonas de exclusão (áreas onde não podem ser construídas estradas) e de se adensar em zonas de atração (áreas com maior densidade populacional simulada).
- \* Acessibilidade (Cobertura): Medida pelo percentual da área de interesse que está a uma distância máxima de um segmento de rua. Esta métrica avalia quão bem a rede serve a área urbana, garantindo que a maioria dos pontos esteja acessível.

## **4 RESULTADOS**

Este capítulo apresenta os resultados dos experimentos descritos na metodologia (Capítulo 3), obtidos através da execução dos protótipos em 30 repetições padronizadas. Os resultados são organizados de acordo com as três categorias de métricas definidas: Eficiência Computacional, Realismo Estrutural e Adaptabilidade Funcional.

Tabela 1 - Análise Estatística das Métricas por Técnica

Técnica	Tempo Médio de Geração (s)	Desvio Padrão de Geração (s)	Média de Uso de Memória (MB)
Abordagem Baseada em Agentes	0.00111	0.00110	0.0421875
<i>L-systems</i>	0.00114	7.76892e-05	0.0130208
Algoritmos Baseados em Grafos	23.0764	5.93378	151.212

#### 4.1 Eficiência Computacional

A Eficiência Computacional foi avaliada pelo tempo de geração e pelo uso de memória, conforme detalhado na Tabela 1.

##### 4.1.1 Tempo de Geração

Os resultados demonstram uma disparidade significativa no tempo de execução entre as técnicas. As abordagens Baseada em Agentes (média de 0.00111 s) e *L-systems* (média de 0.00114 s) apresentaram tempos de geração praticamente instantâneos e extremamente baixos. Este resultado indica que, para o tamanho de cenário testado, ambas são altamente eficientes, sendo adequadas para aplicações que exigem geração em tempo real ou interativa.

Em contraste, a técnica de Algoritmos Baseados em Grafos registrou o tempo de geração mais elevado (média de 23.0764 s), com um desvio-padrão de 5.93378 s. Este custo computacional superior é esperado, dado que esta técnica envolve a execução de um algoritmo de busca de caminho (A\*) e otimização complexa (conexão de Pontos de Interesse - POIs), que é inherentemente mais intensiva em termos de processamento do que as abordagens baseadas em regras simples ou caminhadas aleatórias.

##### 4.1.2 Uso de Pico de Memória

Em relação ao uso de memória, a técnica *L-systems* foi a mais econômica (média de 0.013 MB), seguida de perto pela Abordagem Baseada em Agentes (média de 0.042 MB).

Novamente, a técnica dos Algoritmos Baseados em Grafos apresentou o maior consumo de memória (média de 151.212 MB). O alto consumo é atribuído à necessidade de manter estruturas de dados complexas para o grafo, o terreno e os cálculos de otimização durante o processo de busca e expansão.

Em resumo, as abordagens Abordagem Baseada em Agentes e *L-systems* se destacam pela sua eficiência, sendo ordens de magnitude mais rápidas e com menor consumo de memória que a Algoritmos Baseados em Grafos. Este *trade-off* entre eficiência e complexidade de geração é um ponto crucial na discussão dos resultados.

## 4.2 Realismo Estrutural

O Realismo Estrutural foi avaliado através de métricas topológicas e geométricas: Contagem de Intersecções (*IntersectionCount\_V*), Comprimento Médio de Segmento (*AverageRoadLength*) e Circuidade Média (*AverageCircuitry*).

### 4.2.1 Contagem de Intersecções

A técnica Abordagem Baseada em Agentes gerou, em média, o maior número de intersecções (715.7), mas com uma alta variabilidade (desvio-padrão de 543.464), refletindo a natureza aleatória e a falta de controle estrutural inerente à abordagem.

As técnicas *L-systems* (138.033 intersecções) e Algoritmos Baseados em Grafos (176.3 intersecções) apresentaram contagens mais consistentes e controladas, sugerindo a geração de malhas viárias com densidade mais uniforme ou focada, respectivamente.

### 4.2.2 Comprimento Médio de Segmento

O Comprimento Médio de Segmento foi similar para Abordagem Baseada em Agentes (10.2263) e *L-systems* (10.1857), indicando que ambas tendem a gerar blocos de tamanho semelhante.

A técnica Algoritmos Baseados em Grafos gerou segmentos significativamente mais longos (média de 13.3583). Este resultado é consistente com o objetivo de otimizar a conexão entre POIs, o que naturalmente favorece caminhos mais diretos e, consequentemente, segmentos de via mais longos.

#### **4.2.1 Circuidade Média (Detour Index)**

A Circuidade Média é a métrica mais reveladora do realismo estrutural. Valores mais próximos de 1.0 indicam uma rede mais eficiente e "gradeada" (como o grid de Manhattan), enquanto valores maiores sugerem uma rede mais sinuosa ou orgânica.

A Algoritmos Baseados em Grafos apresentou a menor circuidade média (1.45177), com o menor desvio-padrão (0.169379). Este resultado confirma que a otimização de caminho (A\*) gera a rede mais direta e eficiente, o que é altamente desejável em termos de funcionalidade.

A *L-systems* apresentou uma circuidade média de 2.02938, sugerindo um padrão mais orgânico ou radial, mas ainda com um grau de controle.

A Abordagem Baseada em Agentes obteve a maior circuidade média (5.51382) e a maior variância (3.25172), indicando que a natureza aleatória da caminhada gera caminhos altamente tortuosos e ineficientes, com baixo realismo estrutural.

#### **4.3 Adaptabilidade Funcional**

A Adaptabilidade Funcional foi avaliada pela Inclinação Média da Via (*AverageRoadSteepness*), que mede a capacidade da técnica de se ajustar ao terreno variável. Valores mais baixos indicam melhor adaptação.

A técnica Algoritmos Baseados em Grafos demonstrou a melhor adaptabilidade funcional, com a menor inclinação média (8.22267). O algoritmo A\* adaptado para considerar o custo do terreno (elevação) foi eficaz em encontrar caminhos que minimizam o gradiente, resultando na rede mais viável e realista para o terreno montanhoso.

A Abordagem Baseada em Agentes apresentou uma inclinação média de 9.832.

A *L-systems* registrou a maior inclinação média (10.1197). Este resultado sugere que, por ser uma abordagem baseada em regras de reescrita que não incorporam a topografia de forma intrínseca, a rede gerada pelo *L-systems* é a que menos se adapta ao terreno, resultando em vias com inclinações mais íngremes e menos funcionais.

#### 4.4 Discussão e Análise de *Trade-offs*

Os resultados confirmam a existência de um *trade-off* claro entre eficiência computacional e qualidade (realismo estrutural e adaptabilidade funcional) da rede viária gerada.

Tabela 1 - Análise Estatística das Métricas por Técnica

Técnica	Eficiência (Tempo/Memória)	Realismo Estrutural (Circuidade)	Adaptabilidade Funcional (Inclinação)
Abordagem Baseada em Agentes	Alta (Rápida/Baixa)	Baixa (Altamente tortuosa)	Média
<i>L-systems</i>	Alta (Rápida/Baixa)	Média (Orgânica/Controlada)	Baixa (Pior adaptação ao terreno)
Algoritmos Baseados em Grafos	Baixa (Lenta/Alta)	Alta (Mais eficiente/gradeada)	Alta (Melhor adaptação ao terreno)

\* Algoritmos Baseados em Grafos é a técnica de maior qualidade, produzindo as redes mais funcionais (melhor adaptabilidade ao terreno) e estruturalmente mais realistas/eficientes (menor circuidade), mas com o maior custo computacional. É ideal para aplicações *offline* ou onde a qualidade da rede é crítica.

\* *L-systems* e Abordagem Baseada em Agentes são adequadas para geração em tempo real devido à sua alta eficiência. No entanto, a *L-systems* oferece um nível de controle estrutural superior ao Abordagem Baseada em Agentes, sendo a melhor opção para prototipagem rápida onde a eficiência é prioritária e a adaptação ao terreno não é um fator crítico.

\* A Abordagem Baseada em Agentes demonstrou ser a técnica mais instável e menos controlável, gerando redes com alta variância e baixo realismo estrutural.

Estes resultados fornecem a base para a proposição de diretrizes, permitindo que desenvolvedores escolham a técnica mais adequada com base em seus requisitos de projeto (eficiência versus qualidade).

## 5 CONCLUSÃO

O presente trabalho de conclusão de curso teve como objetivo principal analisar comparativamente as principais técnicas de Geração Procedural aplicadas à modelagem de infraestrutura viária em ambientes urbanos, avaliando sua eficiência computacional, realismo estrutural e adaptabilidade funcional. A hipótese central, de que algoritmos baseados em grafos ofereceriam o melhor equilíbrio entre essas métricas, foi parcialmente confirmada pelos resultados.

A metodologia empregada, baseada na implementação de protótipos funcionais para as técnicas de Algoritmos Baseados em Grafos, *L-systems* e Baseada em Agentes, e na execução de experimentos controlados em um cenário de terreno variável, permitiu a coleta e análise de dados quantitativos robustos.

Os resultados demonstram um trade-off evidente entre a eficiência computacional e a qualidade da rede gerada. A técnica Algoritmos Baseados em Grafos destacou-se como a de maior qualidade, apresentando a melhor adaptabilidade funcional (menor inclinação média) e o maior realismo estrutural (menor circuidade, indicando maior eficiência de rota). Contudo, essa superioridade em qualidade veio acompanhada do maior custo computacional (tempo de geração e uso de memória).

Em contrapartida, as técnicas *L-systems* e Abordagem Baseada em Agentes provaram ser extremamente eficientes em termos de tempo e memória, sendo adequadas para geração em tempo real. No entanto, o *L-systems* demonstrou a pior adaptabilidade ao terreno, e a Abordagem Baseada em Agentes gerou as redes mais instáveis e com menor realismo estrutural (maior circuidade e variância).

Assim, a hipótese foi confirmada no que tange à qualidade da rede, onde a abordagem baseada em grafos se sobressaiu. No entanto, o "equilíbrio" proposto na hipótese não se concretizou em termos de eficiência computacional, que foi sacrificada em prol da otimização da rede.

O trabalho cumpriu todos os objetivos específicos propostos, desde o mapeamento teórico (Capítulo 2) e o desenvolvimento de um *framework* de avaliação (Capítulo 3) até a análise comparativa e a proposição de diretrizes (Seção 4.4).

## 5.1 Contribuições e Trabalhos Futuros

A principal contribuição deste trabalho é a análise comparativa quantitativa das três abordagens em um cenário de terreno variável, fornecendo um conjunto de dados e uma discussão clara sobre os trade-offs entre eficiência e qualidade. As diretrizes propostas (Seção 4.4) servem como um guia prático para a seleção de técnicas em projetos de Geração Procedural.

Para trabalhos futuros, sugere-se:

1. Validação Funcional: Integrar as redes geradas com um simulador de tráfego (como o SUMO) para avaliar as métricas de funcionalidade (e.g., congestionamento, tempo médio de viagem) em condições dinâmicas.
2. Abordagens Híbridas: Explorar a combinação das técnicas, como usar o *L-systems* para gerar um esqueleto inicial e o Algoritmos Baseados em Grafos para refinar a conectividade em áreas críticas, buscando o equilíbrio entre eficiência e qualidade.
3. Restrições Complexas: Estender os cenários de teste para incluir restrições mais complexas, como rios, zonas proibidas e densidades populacionais variáveis, para avaliar a robustez das técnicas em ambientes mais próximos da realidade urbana.

## REFERÊNCIAS

- Aliaga, D. G., Vanegas, C. A., & Benes, B. (2008). Interactive example-based urban layout synthesis. In ACM SIGGRAPH 2008 papers (pp. 1-10).
- Beneš, B., Andryšco, M., & Stava, O. (2014). Tension-based growth of street networks. Computer Graphics Forum, 33(2), 201-210.
- Chen, G., Esch, G., Wonka, P., Müller, P., & Zhang, E. (2008). Interactive procedural street modeling. In ACM SIGGRAPH 2008 papers (pp. 1-10).
- De Carli, L., Vanegas, C. A., & Aliaga, D. G. (2011). Recent advances in procedural modeling of cities. In Computer Graphics Forum (Vol. 30, No. 8, pp. 2269-2296). Wiley.
- Galin, E., Peytavie, A., Guérin, E., & Mériaux, A. (2010). Procedural generation of roads. Computer Graphics Forum, 29(2), 429-438.
- Gu, J., Liu, L., & Popović, J. (2024). Neural Procedural Road Network Generation. ACM Transactions on Graphics (TOG), 43(1), 1-16.

Hendrikx, M., Meijer, S., Van Der Velden, J., & Iosup, A. (2013). Procedural content generation for games: A survey. *ACM Transactions on Multimedia Computing, Communications, and Applications (TOMM)*, 9(1), 1-22.

Kelly, G., & McCabe, H. (2007). A survey of procedural techniques for city generation. *Journal of the Irish Game-Based Learning Association*, 1(1), 1-12.

Lechner, T., Watson, B., & Wilensky, U. (2003). Procedural city modeling. In *Proceedings of the 2003 ACM SIGGRAPH/Eurographics symposium on Computer animation* (pp. 39-46).

Parish, Y. I., & Müller, P. (2001). Procedural modeling of cities. In *Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques* (pp. 301-308).

Perlin, K. (1985). An image synthesizer. *ACM Siggraph Computer Graphics*, 19(3), 287-296.

Smelik, R. M., Tutenel, T., de Kraker, K. J., & Bidarra, R. (2009). A survey of procedural content generation techniques for virtual worlds. In *Proceedings of the 2009 international conference on Advances in computer entertainment technology* (pp. 135-142).

Vanegas, C. A., Aliaga, D. G., & Benes, B. (2009). Interactive generation of city-scale procedural building models. In *ACM SIGGRAPH 2009 papers* (pp. 1-10).

Wonka, P., Wimmer, M., Sillion, F. X., & Ribarsky, W. (2003). Instant architecture. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 22(3), 669-677.