

SMAC03 - GRAFOS

PLANEJAMENTO URBANO E MOBILIDADE EM REDES VIÁRIAS

2024001197 - Camilly Victal Finamor

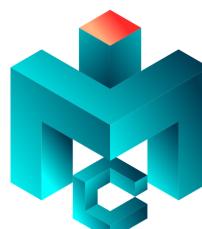
2024008189 - João Victor Jacometti de Assis

2024002372 - Luís Gustavo Riso Santos

2024002292 - Rodolfo Alberti Silva

SMAC03 - GRAFOS

Prof. Rafael Frinhani



INSTITUTO DE
MATEMÁTICA E
COMPUTAÇÃO
UNIFEI - Itajubá



Planejamento Urbano e Mobilidade em Redes Viárias

1 Introdução

O crescimento populacional e a expansão urbana em Brasília/DF têm imposto desafios significativos ao sistema de transporte e mobilidade urbana. O aumento da quantidade de veículos somado ao crescimento algumas vezes desnorteados das vias, resultou em problemas crônicos de engarrafamentos, congestionamentos de vias e dificuldade de acesso às regiões periféricas.

1.1 Cenário de Estudo

A Secretaria Municipal de Mobilidade Urbana busca uma compreensão de como a configuração estrutural da malha viária influencia no fluxo de pessoas e veículos. A análise tradicional do tráfego não se faz suficiente para capturar a complexidade da rede e de como o sistema pode estar interligado. Portanto, este estudo propõe uma análise baseada na Teoria de Grafos, para examinar a rede de ruas em uma área da cidade de Brasília/DF.

A modelagem em grafos pode transformar a infraestrutura viária de uma determinada região em um grafo espacial, permitindo a aplicação de Análise de Redes Complexas. O foco será sobre as medidas de centralidade, se tornando essenciais para a identificação de pontos críticos da rede. Essas métricas oferecem uma percepção crucial sobre o papel de cada rua nesse sistema de deslocamento [Crucitti et al. \(2006\)](#).

A aplicação de algoritmos como Betweenness, Closeness e Core-Periphery se tornam fundamentais para a identificação de quais vias atuam como os principais elos de conexão e quais oferecem o melhor acesso às áreas periféricas. Ao adotar essa abordagem, o objetivo passa a ser não só o mapeamento da estrutura viária original da região de Brasília/DF, mas também simular cenários futuros, incluindo a avaliação de uma expansão planejada de ruas ou um caso de bloqueio de vias.

Sendo assim, essa iniciativa busca oferecer a Secretaria Municipal de Mobilidade Urbana uma possibilidade de analisar a rede viária de forma mais estratégica, priorizando a otimização da mobilidade viária da região, garantindo a integração e a acessibilidade a todas as regiões da área.

1.2 Objetivos do Projeto

O objetivo principal deste projeto é modelar em grafos uma abordagem analítica que permita à Secretaria Municipal de Mobilidade Urbana de Brasília/DF entender e propor melhorias para o sistema viário da região de estudo.

Para alcançar tais objetivos, o projeto se propõe a compreender: O comportamento da estrutura da rede, analisando a conectividade da malha viária a partir do conjunto de dados fornecidos; Identificar os pontos críticos, utilizando medidas

de centralidade como Betweenness e Closeness; Apoiar decisões estratégicas, fornecendo um quadro analítico que pode ser usado como base para a Secretaria ajudando a reorganizar o tráfego e a infraestrutura.

2 Referencial Teórico

A gestão de mobilidade urbana em grandes centros, como em Brasília, exigem um bom entendimento sobre a estrutura da malha viária e de como ela pode facilitar o deslocamento. Esta seção tem como principal objetivo estabelecer a ontologia do trabalho, apresentando os conceitos centrais que sustentam a análise do sistema viário, usando os conceitos de planejamento urbano e mobilidade, Teoria de Grafos e aplicação dessas ferramentas na modelagem de redes urbanas.

2.1 Planejamento Urbano e Mobilidade

O planejamento urbano é essencial para a distribuição da infraestrutura, visando o desenvolvimento equilibrado e a qualidade de vida das pessoas. Sendo assim, a mobilidade urbana tem como foco principal a facilidade e eficiência com que as pessoas se deslocam. Um bom sistema viário tem como resultado não só uma redução no tempo de locomoção, mas também promove a integração entre as regiões centrais e periféricas.

Com a crescente expansão e desenvolvimento urbano, as vias podem enfrentar congestionamentos, apresentando custos, principalmente sociais, significativos. Portanto, a análise topológica de um sistema viário se torna essencial para identificar desequilíbrios no tráfego e apoiar tomadas de decisões estratégicas para preservar a infraestrutura e a organização, segundo [Boeing \(2025\)](#).

2.2 Modelagem de redes urbanas com Grafos e Conceitos de Centralidade

A Teoria de Grafos, conforme apresentado por [Boeing \(2025\)](#) permite que uma estrutura viária de uma cidade seja modelada de forma abstrata, onde os vértices representam os cruzamentos e as arestas representam os segmentos de ruas. Segundo [Jinyoung Pung \(2022\)](#), essa abstração exige métodos eficientes, como algoritmos de centralidade ou de simplificação de redes que preservam suas propriedades essenciais, garantindo que a análise seja fiel ao comportamento real do sistema.

O foco da análise topológica está nas Métricas de Centralidade, que avaliam a importância relativa de cada componente da rede, sendo: Centralidade de Proximidade usada como indicador de acessibilidade geral e Centralidade de Intermediação medindo a frequência com que um vértice ou aresta

se encontra nos caminhos mais curtos entre todos os pares dos vértices na rede, conforme [Crucitti et al. \(2006\)](#). O estudo de redes conectadas, como redes de ruas, se enquadra na área de Redes Complexas, segundo [Latora et al. \(2017\)](#).

Vias com alto grau de centralidade são essenciais para o tráfego e se removidas ou congestionadas, causam um grande impacto na fluidez geral do trânsito, atuando como gargalos. Sendo assim, de acordo com [Alec Kirkley \(2018\)](#), a identificação desses pontos se torna um processo essencial para avaliar a vulnerabilidade do sistema viário de Brasília e apoiar a expansão planejada de novas ligações.

2.3 Trabalhos Correlatos

Os trabalhos correlatos demonstram a aplicação prática e validam a metodologia proposta. Metodologias topológicas utilizam conceitos similares a teoria de grafos para analisar a configuração espacial e a conexão das ruas. Em um estudo de caso realizado em um contexto brasileiro, demonstra como a estrutura de malha influencia diretamente os padrões de acessibilidade e ocupação urbana, fornecendo uma boa base para planejamento.

Segundo [Boeing \(2025\)](#), a aplicação prática da Teoria de Grafos é facilitada por modelos de redes urbanas a partir de dados reais, validando a abordagem metodológica para a análise de grandes áreas urbanas.

3 Desenvolvimento

3.1 Modelagem

A modelagem da rede viária constitui uma etapa fundamental para a aplicação das métricas de análise de grafos utilizadas neste estudo. A partir do recorte espacial que correspondente a 2,5 km² da malha viária de Brasília, foi extraído um conjunto de dados contendo 179 interseções (vértices) e 230 segmentos viários, representando uma amostra significativa da estrutura urbana local.

Os dados foram organizados de forma a preservarem a topologia original da rede por meio das suas coordenadas, assegurando que as análises realizadas refletissem as condições reais da infraestrutura. A estrutura permitiu representar a malha viária como um grafo ponderado e não direcionado, no qual cada vértice corresponde a uma interseção e cada aresta representa um trecho de via entre duas posições adjacentes com seus pesos sendo os comprimentos das vias e seu grafo foi construído por meio de um dicionário de adjacências. Esse formato favoreceu o cálculo das métricas de centralidade e das simulações de vulnerabilidade, já que permite acesso eficiente aos vizinhos diretos e aos comprimentos das rotas.

As coordenadas geográficas presentes no arquivo foram utilizadas para gerar a visualização espacial do grafo. O layout geográfico forneceu uma representação próxima a topologia real da cidade, permitindo interpretar os resultados diretamente sobre a estrutura viária. A Figura 1 apresenta a visualização espacial completa da rede modelada, onde é possível observar a distribuição geográfica das interseções e a densidade variável de conexões ao longo da região estudada. Nota-se uma concentração maior de vértices em determinadas áreas centrais, enquanto regiões periféricas apresentam conectividade mais esparsa, padrão que será explorado nas análises subsequentes de centralidade e acessibilidade.

Rede Viária de Brasília - Estrutura Original
179 interseções e 230 vias
Visualização sem análise de centralidade

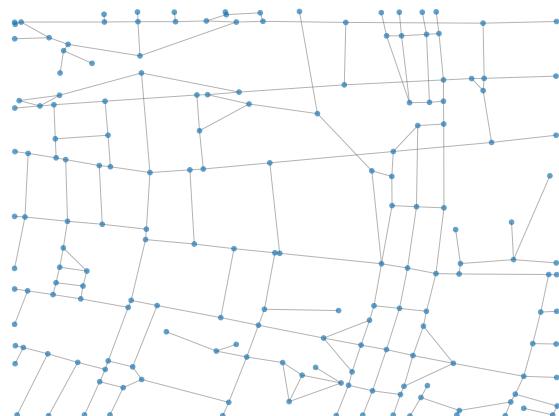


Figura 1: Representação espacial completa da rede viária de Brasília modelada como grafo.

A construção do grafo seguiu três etapas principais. Primeiro, as arestas foram carregadas a partir do arquivo e armazenadas em um dicionário de adjacências. Em seguida, as posições dos nós foram extraídas das coordenadas geográficas para compor os mapas utilizados nas figuras da seção de resultados. Por fim, o grafo foi convertido para o formato da biblioteca NetworkX, o que permitiu gerar mapas de calor, histogramas e visualizações comparativas apresentadas nas análises subsequentes.

3.2 Método de Solução

A metodologia desenvolvida neste estudo segue o modelo CRISP-NET, que integra o processo CRISP-DM com técnicas de análise de redes, conforme apresentado por [Acuña-Cid et al. \(2025\)](#). O uso desse modelo não se restringe à organização das tarefas, mas orienta as decisões técnicas tomadas ao longo do desenvolvimento do projeto.

Tomando como base o problema abordado e modelo de negócio da malha viária de Brasília, dividiu-se a análise em etapas, visando traduzir o modelo CRISP-NET, e obteve-se o seguinte diagrama de processos:



Figura 2: Diagrama Operacional seguindo o modelo CRIP-NET.

Diferentemente de uma abordagem puramente computacional, o CRISP-NET permite alinhar as análises às necessidades reais da Secretaria de Mobilidade Urbana, garantindo que cada etapa, desde o entendimento do problema até a avaliação dos resultados, mantenha vínculo direto com a tomada de decisão pública. Obteve-se o seguinte diagrama de processos:

3.2.1 Análise Estrutural Preliminar para Definição dos Algoritmos

Com base nos itens [1] a [3] do diagrama da Figura 2 e no diagnóstico inicial da Secretaria, definiram-se quatro questões estruturais que orientariam toda a análise:

- Quais vias funcionam como gargalos estruturais?
- Quais regiões possuem menor acessibilidade estrutural?
- O quão vulnerável é a rede à remoção/bloqueio de vias?
- Quais zonas pertencem ao núcleo estrutural da rede?

Essas perguntas nortearam a seleção dos algoritmos, garantindo que cada métrica respondesse a uma dimensão específica do problema urbano e permitisse construir uma visão integrada da rede viária.

3.2.2 Desdobramento Metodológico para Aplicação dos Algoritmos

Para responder às questões levantadas, adotou-se um conjunto complementar de algoritmos consolidados na literatura de redes. A escolha fundamenta-se na literatura e na aderência conceitual entre os métodos, assegurando cobertura analítica das diferentes dimensões estruturais da rede.

Dessa forma, a solução passou a incorporar duas métricas clássicas de centralidade (Betweenness e Closeness), um método de decomposição estrutural para identificação de núcleo e periferia (K-Core), e um modelo específico para análise de resiliência e robustez, representado pelo algoritmo de Vulnerabilidade de Arestas.

Esses algoritmos foram escolhidos por sua alta capacidade de interpretação operacional: cada um produz indicadores que dialogam diretamente com a gestão de tráfego, planejamento de obras e definição de prioridades de investimento.

3.2.3 Betweenness Centrality

A centralidade de intermediação mede quantas vezes um nó participa de caminhos mínimos entre pares de nós. Conforme formulado por [Brandes \(2001\)](#), essa métrica identifica interseções que desempenham papel crítico como articuladores de fluxo.

Em redes urbanas, a betweenness está fortemente associada a corredores estruturantes e pontos que concentram trassessias obrigatórias, frequentemente correlacionados a congestionamentos e vulnerabilidades operacionais.

O cálculo da centralidade Betweenness foi operacionalizado por meio do algoritmo proposto por [Brandes \(2001\)](#), que reduz o custo computacional do método clássico ao reutilizar informações dos caminhos mínimos a partir de cada vértice fonte. A aplicação dessa métrica permite localizar nós que concentram fluxo desproporcional, funcionando como articuladores essenciais da conectividade.

Algorithm 1: Betweenness Centrality | Versão baseada em [Brandes \(2001\)](#) e resumida

```

1 Grafo não direcionado  $G = (V, E)$  Vetor de centralidade
    $CB[v]$  para todo  $v \in V$ 
2 foreach  $v \in V$  do
3   |    $CB[v] \leftarrow 0$ 
4 end
5 foreach  $s \in V$  do
6   |   executar caminhos mínimos a partir de  $s$  (Dijkstra)
7   |   registrar predecessores e quantidade de caminhos
     |   mínimos  $\sigma$ 
8   |   acumular dependências  $\delta$  percorrendo os nós em ordem
     |   inversa
9   |   atualizar  $CB[w]$  para cada  $w \neq s$  usando as dependências
10 end
11 return  $CB$ 
```

3.2.4 Vulnerabilidade de Arestas

A robustez de uma rede viária pode ser analisada por meio da eficiência global, definida por [Latora & Marchiori \(2001\)](#). Esse indicador avalia o quão eficiente é o deslocamento entre todos os pares de nós da rede.

Essa abordagem é particularmente relevante em contextos urbanos, pois permite simular bloqueios causados por acidentes, obras ou falhas estruturais, identificando vias cuja interrupção gera grande impacto na rede. A vulnerabilidade estrutural é um indicador fundamental para planejamento de contingência e priorização de investimentos.

A análise de vulnerabilidade de arestas foi conduzida com base na formulação de eficiência global proposta por [Latora & Marchiori \(2001\)](#).

O algoritmo simula a remoção temporária de cada via e mensura a perda de eficiência resultante. Vias cuja retirada causa maior perda de desempenho são consideradas criticamente vulneráveis, indicando trechos que devem receber atenção prioritária em planos de contingência, manutenção preventiva e rotas operacionais.

Algorithm 2: Vulnerabilidade de Arestas | Versão baseada em [Latora & Marchiori \(2001\)](#) e resumida

```

1 Grafo ponderado  $G = (V, E)$  Vulnerabilidade  $V_e$  para cada
   aresta  $(u, v)$ 
2 Calcular a eficiência global original  $E_0$  da rede
3 foreach aresta  $(u, v) \in E$  do
4   |   remover temporariamente  $(u, v)$  de  $G$ 
5   |   recalcular a eficiência global  $E_{\text{rem}}$ 
6   |    $V_e \leftarrow (E_0 - E_{\text{rem}})/E_0$ 
7   |   registrar o par  $((u, v), V_e)$  e restaurar a aresta
8 end
9 return lista de pares  $((u, v), V_e)$ 
```

3.2.5 Closeness Centrality

O algoritmo de centralidade Closeness quantifica o inverso da distância média de um nó para todos os demais, servindo como indicador direto da rapidez com que um ponto pode atingir o restante da malha. Interseções com baixos valores tendem a estar isoladas, distantes ou mal conectadas, indicando possíveis déficits de mobilidade.

A identificação desses pontos apoia decisões de expansão viária, reconfiguração de rotas e priorização de investi-

mentos em infraestrutura, contribuindo para uma mobilidade mais equilibrada e eficiente.

O cálculo da centralidade Closeness foi estruturado em cima de [Freeman \(1979\)](#) e permite identificar vértices que apresentam maior acessibilidade estrutural.

Algorithm 3: Closeness Centrality | Versão baseada em [Freeman \(1979\)](#) e resumida

```

1 Grafo ponderado  $G = (V, E)$  Centralidade de proximidade
   $C[v]$ 
2 foreach  $v \in V$  do
3   calcular distâncias mínimas  $d(v, u)$  para todo  $u$ 
4   soma  $\leftarrow$  somatório das distâncias finitas
5   if  $soma > 0$  then
6     |  $C[v] \leftarrow 1/soma$ 
7   else
8     |  $C[v] \leftarrow 0$ 
9   end
10 end
11 return  $C$ 
```

3.2.6 Core-Periphery

O algoritmo K-Core utilizou como base a abordagem proposta por [Seidman \(1983\)](#). Sua escolha ocorreu devido a sua capacidade de identificar a organização estrutural interna da rede, distinguindo regiões altamente conectadas (núcleo) de áreas mais frágeis (periferia).

Em redes urbanas, essa técnica revela a hierarquia estrutural da malha, distinguindo regiões robustas (alto grau de conectividade interna) de áreas periféricas mais propensas à fragilidade estrutural ou baixa diversidade de rotas. Os resultados obtidos orientam decisões estratégicas de planejamento urbano, especialmente na identificação de áreas que demandam reforço de conectividade ou expansão de infraestrutura.

Algorithm 4: Decomposição K-Core | Versão baseada em [Seidman \(1983\)](#) e resumida

```

1 Grafo não direcionado  $G = (V, E)$  Número de core  $core[v]$ 
2 Inicializar  $core[v]$  com o grau de cada vértice  $v$ 
3 Marcar todos os vértices como não removidos
4 while existirem vértices não removidos do
5   selecionar  $u$  com menor  $core[u]$ 
6   marcar  $u$  como removido
7   foreach vizinho  $w$  de  $u$  ainda não removido do
8     | if  $core[w] > core[u]$  then
9     |   |  $core[w] \leftarrow core[w] - 1$ 
10    | end
11   end
12 end
13 return  $core$ 
```

3.2.7 Validação dos Modelos e Solução

Após a execução das etapas dos itens [5] a [8] da Figura 2, procedeu-se à validação integrada dos modelos aplicados, sendo conduzida em duas frentes complementares.

A primeira consistiu na avaliação estrutural dos resultados, por meio da comparação cruzada entre as métricas produzidas pelos algoritmos, verificando se suas propriedades teóricas eram preservadas ao serem aplicadas ao mesmo grafo.

A segunda envolveu a inspeção visual dos mapas e valores gerados, permitindo identificar padrões recorrentes nas

diferentes análises e avaliar se a interpretação gráfica era compatível com o comportamento esperado para cada métrica.

Esse procedimento assegurou que os algoritmos empregados tivessem coerência interna e compatibilidade metodológica, estabelecendo a confiabilidade necessária para prosseguir com a interpretação dos resultados e todos os artefatos gerados durante a execução dessas etapas podem ser acessados pelo Github do Projeto: [Urban-Mobility](#).

4 Resultados

A aplicação dos algoritmos permitiu analisar a malha viária sob quatro perspectivas estruturais complementares: fluxo, resiliência, acessibilidade e hierarquia interna na rede viária de Brasília. Os resultados foram organizados conforme abordagem metodológica aplicada, permitindo observar como diferentes análises revelam propriedades complementares da rede. As evidências são apresentadas por meio de representações visuais e indicadores numéricos, que auxiliaram no entendimento da estrutura e comportamento da rede urbana.

4.1 Análise da Centralidade de Betweenness

A centralidade de betweenness foi aplicada com o objetivo de identificar quais cruzamentos atuam como pontos críticos de fluxo na rede. A Figura 3 apresenta o mapa de calor da betweenness normalizada para todos os nós da rede (variando de 0 a 1), com destaque para as dez interseções mais importantes.

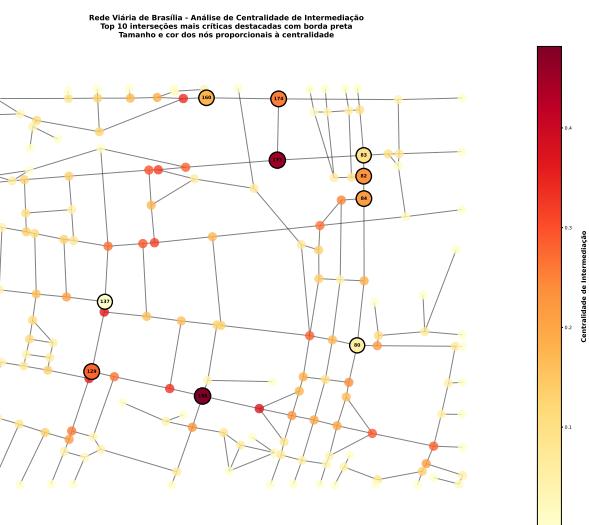


Figura 3: Distribuição da centralidade de betweenness normalizada na rede viária de Brasília, com destaque para as dez interseções mais críticas.

A análise revela que a rede apresenta um conjunto pequeno de interseções com valores mais altos de intermediação, tendo como média geral o valor de 0,1074. O nó 158 apresentou a maior centralidade (0,4817), seguido de 173 (0,4751), 129 (0,4408), 174 (0,4357) e 82 (0,4309). Esses vértices representam o núcleo estrutural da rede, atuando como pontos estratégicos para a conectividade global, pois participam de um grande número de rotas mínimas. Além disso, observa-se uma grande diferença na distribuição da betweenness, com grande parte dos nós exibindo valores próximos de zero. Isso indica que a maioria das interseções desempenham um papel local,

sem influência significativa sobre as rotas globais da rede. A presença de poucos vértices com valores muito elevados demonstra forte assimetria, com uma estrutura vulnerável a falhas nesses pontos, possuindo baixa redundância de rotas e forte dependência de um número restrito de vias principais, e sua remoção potencialmente interrompe um grande número de caminhos mínimos.

4.2 Análise de Vulnerabilidade Estrutural da Rede

A fim de medir a robustez estrutural da rede analisada, foi avaliado o impacto da remoção de cada aresta sobre a eficiência global do grafo. Essa métrica quantifica a capacidade média da rede de conectar pares de vértices por rotas curtas, permitindo avaliar como a eliminação de uma única conexão altera o desempenho global do sistema. Essa abordagem complementa a análise de betweenness, uma vez que a remoção de arestas conectadas aos nós mais centrais tende a produzir perdas de eficiência mais graves.

A distribuição dessas vulnerabilidades, ilustrada no histograma da Figura 4, confirma um padrão altamente assimétrico, no qual poucas arestas concentram valores elevados e sendo altamente dependente desses trechos, enquanto a grande maioria contribui de maneira marginal para o desempenho global. Observa-se que a maior parte das arestas apresenta vulnerabilidade próxima de zero (0.0081 em média), indicando que sua ausência causa pouco impacto na conectividade geral.

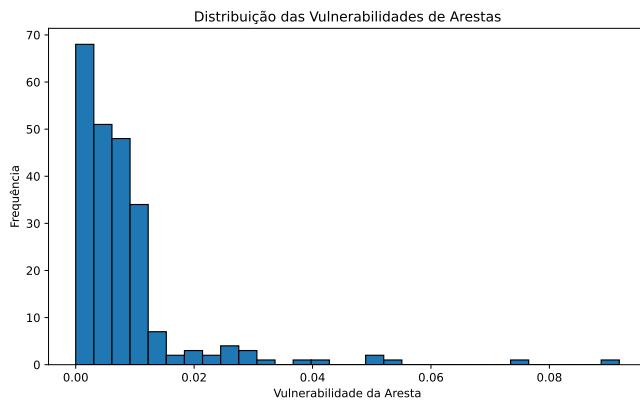


Figura 4: Histograma da vulnerabilidade estrutural da rede viária de Brasília.

Os resultados quantitativos reforçam essa análise. A aresta mais vulnerável foi (160, 174), cuja remoção provocou uma queda de 9,18% na eficiência global da rede, um impacto significativamente superior ao observado para as demais conexões. Em seguida, destacam-se (101, 103) com 7,41% e (112, 122) com 5,21% de redução. Todas essas arestas pertencem a regiões estruturais estratégicas, conectando subcomponentes do grafo que, quando separados, aumentam de forma expressiva a distância média entre diversos pontos da rede.

É relevante notar que várias das arestas mais vulneráveis estão diretamente associadas aos nós previamente identificados como altamente centrais pela betweenness, tais como os vértices 160, 174, 129, 82 e 84. Essa relação entre métricas distintas indica que os gargalos identificados anteriormente não

representam apenas pontos de articulação teóricos, mas sim fragilidades reais, cuja interrupção compromete a capacidade da rede de manter rotas eficientes. A presença de arestas vulneráveis conectadas a nós de baixa betweenness, embora menos comum, demonstra que a vulnerabilidade estrutural também depende da função específica da aresta no fluxo entre regiões específicas da rede e não apenas da centralidade isolada.

Esses resultados evidenciam que a rede viária analisada apresenta um conjunto restrito de conexões críticas. Na prática, tais conexões correspondem a trechos viários cuja interrupção, seja por obras, acidentes ou bloqueios operacionais, pode causar efeitos negativos na mobilidade urbana, reforçando sua importância para o planejamento e a gestão do tráfego, gerando impactos graves no desempenho global.

4.3 Análise de Acessibilidade e Identificação de Regiões Periféricas da Rede

A acessibilidade da rede viária foi analisada por meio de duas abordagens complementares, sendo elas a estruturação core-periphery da rede e a centralidade de proximidade. Enquanto o modelo core-periphery mostra a posição estrutural de cada vértice com base na conectividade local, a centralidade de proximidade mede a acessibilidade global de cada cruzamento ao quantificar a distância média até todos os demais pontos da malha viária. A combinação desses métodos permite identificar tanto regiões estruturais periféricas quanto áreas de difícil acesso que poderiam receber medidas de intervenção futuras da Secretaria Municipal de Mobilidade Urbana.

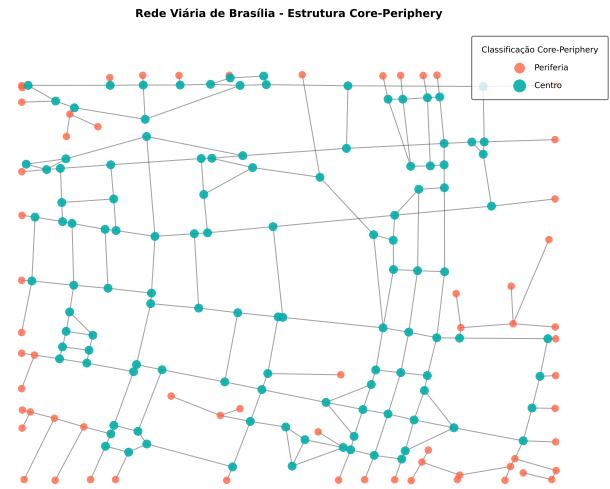


Figura 5: Estrutura core-periphery da rede viária de Brasília, identificada por meio da decomposição em k-core.

A Figura 5 apresenta o resultado do processo de decomposição em k-core, no qual os vértices foram classificados em dois grupos, sendo “centro” os nós com maior envolvimento estrutural e “periferia” os vértices menos integrados localmente. Observa-se que a periferia está concentrada nas regiões externas do grafo, já os nós centrais formam uma estrutura de núcleo no interior da rede, representando áreas mais densamente conectadas.

Em seguida, a centralidade de proximidade foi aplicada para estimar a dificuldade de acesso global de cada vértice, conforme ilustrado na Figura 6. Os resultados revelam um

padrão mais diverso do que o observado na classificação core-periphery, onde além dos pontos extremamente periféricos, surgem regiões que, embora conectadas localmente, possuem baixa acessibilidade global devido à sua distância média elevada em relação aos outros nós. Esses vértices apresentam valores de proximidade menores, indicando maior dificuldade de acesso e maior tempo médio de deslocamento para alcançar outras partes da região estudada.

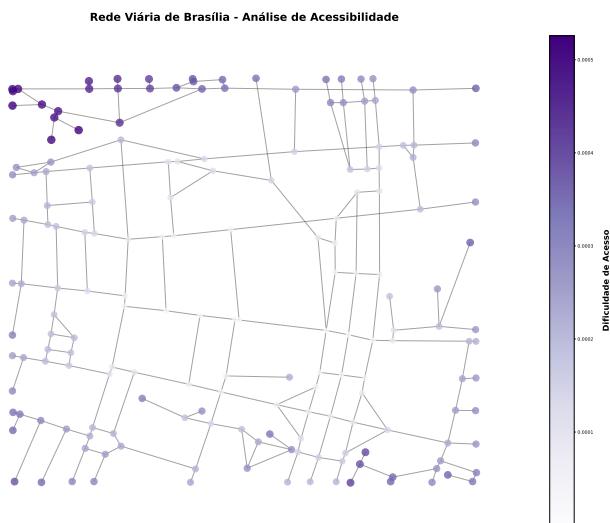


Figura 6: Mapa de calor da acessibilidade global, onde colorações mais escuras indicam vértices com menor centralidade de proximidade.

A comparação entre as duas métricas revela um aspecto importante da estrutura urbana analisada. Alguns vértices classificados como parte do “centro” pelo modelo core-periphery apresentam, contrariamente, valores reduzidos de centralidade de proximidade. Isso ocorre porque o modelo core-periphery está ligado ao grau local dos nós, ou seja, à quantidade imediata de conexões, enquanto a proximidade se refere à posição do nó na rede como um todo. Nos nós com valores mais próximos de 0, observa-se maior isolamento, com maior distância média até os outros nós da rede, enquanto nós com valores mais próximos de 1 estão mais centrados, com acesso mais fácil às principais rotas. Assim, um cruzamento pode estar fortemente conectado a seus vizinhos próximos, mas ainda assim permanecer distante em termos de rotas mínimas das principais regiões estruturais.

Por outro lado, alguns nós classificados como periféricos pelo core-periphery apresentaram valores de proximidade mais altos, sugerindo que, embora possuam baixo grau local, estão estrategicamente posicionados próximos de partes mais conectadas da rede. Esses vértices atuam como portas de entrada para regiões centrais, o que as torna mais acessíveis globalmente do que sua classificação inicial de core-periphery. Essas diferenças reforçam que a acessibilidade urbana não depende apenas da conectividade local, mas da integração global com a rede.

Áreas que simultaneamente apresentam baixa centralidade de proximidade e pertencem à periferia estrutural configuram os pontos mais críticos da rede, pois combinam isolamento local com dificuldade de acesso global. Esse comportamento é evidenciado na Tabela 1, com nós classificados como periféricos pelo modelo core-periphery e situados entre os menores valores de proximidade da rede. Os vértices represen-

tam regiões cuja ausência de conexões adequadas compromete tanto a circulação interna quanto o acesso às principais rotas da cidade, indicando trechos que deveriam ser priorizados em estudos de abertura de novas vias, criação de alternativas de circulação ou reestruturação do traçado viário a fim de reduzir desigualdades de acesso e melhorar a integração territorial.

Tabela 1: Nós periféricos com menor acessibilidade global na rede viária de Brasília.

Nó	Core-Periphery	Proximidade
1	Periferia	0.000432
4	Periferia	0.000443
9	Periferia	0.000443
30	Periferia	0.000586
35	Periferia	0.000433
36	Periferia	0.000487
38	Periferia	0.000508
98	Periferia	0.000457

4.4 Integração Multialgorítmica dos Resultados

A análise conjunta dos algoritmos revelou padrões como:

- Interseções com alta betweenness coincidem com vias altamente vulneráveis.
- Regiões periféricas no K-Core apresentam baixa acessibilidade (closeness).
- Gargalos estruturais concentram risco operacional elevado.
- A rede possui baixa redundância e forte dependência de eixos específicos.

A metodologia aplicada oferece uma visão multivalorada para a Secretaria, permitindo compreender elementos essenciais para decisões de engenharia e planejamento urbano.

5 Conclusões

O estudo analisou a rede viária de Brasília com base em métricas de centralidade, vulnerabilidade e acessibilidade. A modelagem permitiu transformar o conjunto de dados em um grafo ponderado com representação espacial consistente, o que viabilizou a aplicação dos algoritmos selecionados.

Os resultados revelaram que a região estudada apresenta forte dependência de um conjunto reduzido de interseções e corredores, que concentram grande parte dos caminhos mínimos e configuram gargalos estruturais relevantes. Essa dependência, combinada à baixa quantidade de rotas alternativas, reforça a vulnerabilidade da malha, especialmente em cenários de bloqueios temporários ou falhas operacionais. A análise de vulnerabilidade demonstrou que a retirada de certas vias causa perdas significativas de eficiência global, evidenciando trechos que exigem atenção prioritária.

A acessibilidade estrutural medida pela centralidade de proximidade destacou regiões periféricas que possuem conectividade reduzida em relação ao restante da rede. Essas áreas,

somadas à classificação periférica obtida pela decomposição K-Core, revelam desigualdades estruturais que impactam a mobilidade e dificultam a integração territorial.

A convergência entre as quatro métricas analisadas (gargalos, vulnerabilidades, baixa acessibilidade e posição periférica) indica que a malha viária apresenta fragilidades, que podem comprometer a fluidez e a resiliência urbana caso não recebam intervenções estruturais no médio prazo.

Do ponto de vista estratégico, este estudo destaca algumas recomendações práticas para a Secretaria de Mobilidade:

- a) Priorizar intervenções de curto prazo nos nós de maior betweenness, incluindo melhoria de sinalização, inteligência semafórica e ações de mitigação de gargalos.
- b) Planejar rotas alternativas e estratégias de contingência nas vias classificadas como altamente vulneráveis, reduzindo o impacto de bloqueios temporários.
- c) Reforçar a conectividade das regiões identificadas com baixa proximidade, por meio de novas ligações viárias ou melhorias de circulação local.
- d) Monitorar o núcleo estrutural identificado pelo K-Core, já que representa a espinha dorsal da rede e qualquer falha nessa região produz efeitos amplificados no sistema.

Além disso, recomenda-se a expansão futura desta metodologia para áreas maiores da cidade, incluindo vias arteriais de maior escala e regiões periféricas mais distantes, de forma a construir um diagnóstico da mobilidade urbana de Brasília.

5.1 Dificuldades Encontradas

Durante o desenvolvimento deste projeto, o grupo enfrentou algumas dificuldades importantes. A primeira surgiu logo no início, no momento de definir se a abordagem adotada deveria priorizar uma análise estrutural da rede ou a construção de uma proposta prática para solucionar o problema apresentado. Essa decisão influenciou a organização do trabalho e exigiu ajustes na forma como os métodos seriam aplicados.

Outra dificuldade relevante foi a complexidade dos algoritmos utilizados nas análises. Parte dos métodos empregados não era familiar para os integrantes da equipe. Isso aumentou o tempo de implementação e exigiu revisões constantes para garantir que as saídas geradas estivessem corretas e alinhadas com o comportamento esperado do dataset. Esse processo incluiu a validação dos resultados e ajustes sucessivos na modelagem para evitar inconsistências.

5.2 Membros

Os membros do projeto e suas respectivas funções estão descritas abaixo:

Camilly Victal Finamor: implementação dos algoritmos de centralidade de proximidade e core-periphery, organização do repositório no GitHub, definição das estratégias analíticas adotadas, escrita da seção “4 Resultados”, elaboração dos slides de apresentação.

João Victor Jacometti de Assis: implementação do algoritmo de betweenness e Dijkstra, definição das estratégias analíticas adotadas no estudo, interpretação do dataset e modelagem da rede viária de Brasília, escrita das seções “3.1 Modelagem” e “5 Conclusões”.

Luís Gustavo Riso Santos: implementação dos algoritmos de análise de vulnerabilidade, definição das estratégias analíticas adotadas no estudo, pesquisa de artigos que aplicam teoria de grafos em problemas de engenharia e redes viárias semelhantes ao tema do projeto, escrita da seção “3.2 Método de Solução”, revisão final do artigo, ajuste dos slides de apresentação.

Rodolfo Alberti Silva: implementação do algoritmo de betweenness e Dijkstra, definição das estratégias analíticas adotadas no estudo, interpretação do dataset e modelagem da rede viária de Brasília, escrita das seções “1 Introdução” e “2 Referencial Teórico”, elaboração dos slides de apresentação.

5.3 Código fonte e Apresentação

GitHub do projeto: [Urban-Mobility](#)

Apresentação em vídeo: [Planejamento Urbano e Mobilidade em Redes Viárias](#)

Referências

- Acuña-Cid, H. A., Ahumada-Tello, E., Ovalle-Osuna, Ó. O., Evans, R., Hernández-Ríos, J. E., & Zambrano-Soto, M. A. (2025). Crisp-net: Integration of the crisp-dm model with network analysis. *Machine Learning and Knowledge Extraction*, 7(3), 101.
- Alec Kirkley, Hugo Barbosa, M. B. G. G. (2018). From the betweenness centrality in street networks to structural invariants in random planar graphs. *Nature Communications*, 20(4).
- Boeing, G. (2025). Modeling and analyzing urban networks and amenities with osmnx. *Geographical Analysis*.
- Brandes, U. (2001). A faster algorithm for betweenness centrality. *Journal of Mathematical Sociology*, 25(2), 163–177.
- Crucitti, P., Latora, V., & Porta, S. (2006). Centrality measures in spatial networks of urban streets. *Physical Review E—Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, 73(3), 036125.
- Freeman, L. C. (1979). Centrality in social networks: Conceptual clarification. *Social Networks*, 1(3), 215–239.
- Jinyoung Pung, Raissa M. D’Souza, D. G. M. Z. (2022). A road network simplification algorithm that preserves topological properties. *Applied Network Science*, 7(79).
- Latora, V. & Marchiori, M. (2001). Efficient behavior of small-world networks. *Physical Review Letters*, 87(19), 198701.
- Latora, V., Nicosia, V., & Russo, G. (2017). *Complex networks: principles, methods and applications*. Cambridge University Press.
- Seidman, S. B. (1983). Network structure and minimum degree. *Social Networks*, 5(3), 269–287.

