ISSN 2447-6102

Article

OTIMIZAÇÃO DO TRÁFEGO URBANO UTILIZANDO O ALGORITMO DE FORD-FULKERSON: UMA ABORDAGEM PARA REDUZIR CONGESTIONAMENTOS EM CIDADES

Cardinot, D.A. [1], Silva, T.B. [1], Barbosa, H.M. [1], Libotte, G.B. [1,*]

[1] Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Instituto Politécnico - Nova Friburgo, RJ, Brasil
* Correspondence: gustavolibotte@iprj.uerj.br

Received: 18/01/2024; Accepted: 25/01/2024; Published: 31/01/2024

Resumo: O problema do fluxo máximo é uma abstração versátil que pode ser aplicada em várias disciplinas, como transporte de materiais, redes de energia, distribuição de água, entre outras. Este estudo aplicou o algoritmo de Ford-Fulkerson para otimizar o tráfego em uma cidade, identificando pontos de congestionamento e propondo ajustes na direção das ruas para melhorar o fluxo. A análise considerou as capacidades das vias e a conservação do fluxo nos cruzamentos. Os resultados mostraram que vias atingiram a capacidade máxima, indicando potenciais congestionamentos. A mudança na direção de algumas ruas demonstrou ser eficaz na distribuição mais uniforme do tráfego, reduzindo congestionamentos. A inclusão de elementos como semáforos e interrupções de vias também foi discutida para uma análise mais precisa. O algoritmo de Ford-Fulkerson é uma ferramenta valiosa para otimizar o fluxo de tráfego em uma cidade, prevenindo congestionamentos e melhorando a eficiência do sistema viário. Isso contribui para uma melhor qualidade de vida dos cidadãos e economia de tempo de deslocamento.

Palavras-chave: Problema de fluxo máximo; Algoritmo de Ford-Fulkerson; Tráfego urbano

Abstract: The maximum flow problem is a versatile abstraction that can be applied in various disciplines, such as materials transportation, energy networks, water distribution, among others. This study applied the Ford-Fulkerson algorithm to optimize traffic in a city, identifying congestion points and proposing street direction adjustments to improve the flow. The analysis took into account the capacities of the roads and the conservation of flow at intersections. The results showed that some roads reached their maximum capacity, indicating potential congestion. Changing the direction of certain streets proved to be effective in achieving a more uniform traffic distribution, reducing congestion. The inclusion of elements like traffic lights and road interruptions was also discussed for a more precise analysis. The Ford-Fulkerson algorithm is a valuable tool for optimizing traffic flow in a city, preventing congestion, and improving the efficiency of the road system. This contributes to a better quality of life for citizens and time savings in commuting.

Keywords: Maximum flow problem; Ford-Fulkerson algorithm; Urban traffic

1. INTRODUÇÃO

O problema do fluxo máximo oferece uma abstração versátil que pode ser aplicada para modelar uma ampla gama de desafios em várias disciplinas. Por exemplo, ele se presta para descrever o movimento de fluidos em uma rede de tubulações ou para avaliar a capacidade de transporte de mercadorias desde os centros de produção até as residências dos consumidores. Em essência, esse problema visa calcular a taxa máxima na qual é possível transmitir materiais de uma fonte para um destino (sorvedouro), sem violar quaisquer restrições de capacidade impostas sobre as arestas do sistema.

O problema de fluxo máximo pode ser empregado para modelar as mais variadas aplicações, que incluem a otimização de linhas de transmissão de energia (Ferreira et al., 2020; Bulut e Özcan, 2021), rede de distribuição de água (Kyi e Naing (2018)), otimização do uso de largura de banda da rede (Neto e Callou, 2015), redes de telecomunicação (van Hoesel (2005)). Apesar disso, a maior parte das aplicações está relacionada a problemas que visam otimizar o tráfego de veículos, como em Saidane et al. (2002), Gupta e Paruchuri (2016), Dolgopolov et al. (2019) e Gong (2022).

Neste trabalho, empregaremos o algoritmo de Ford-Fulkerson, uma abordagem que se baseia no conceito de redes residuais. Nesse contexto, as redes residuais são definidas por arestas com capacidades que indicam a viabilidade de ajustes no fluxo ao longo das arestas. Além disso, exploraremos o conceito de caminhos aumentadores, que consistem em trajetos da fonte até o sorvedouro na rede residual, e o conceito de cortes, que representam partições no grafo. Em particular, estaremos interessados nos cortes mínimos, que se caracterizam por terem a capacidade mínima em comparação com outros cortes na mesma rede.

Este algoritmo será aplicado para solucionar o problema de fluxo máximo em uma cidade com diversas vias interligadas. O objetivo primordial é otimizar o fluxo de veículos entre diferentes pontos da cidade, com o propósito de minimizar os congestionamentos. A situação descrita pode ser adequadamente modelada por meio de grafos, onde a cidade é representada por um grafo $G=(V,E)$. Aqui, V representa o conjunto de vértices que simbolizam os cruzamentos e interseções na cidade, enquanto E denota o conjunto de arestas que representam as ruas conectando dois cruzamentos. Maiores detalhes sobre o problema serão abordados nas seções subsequentes.

2. PROBLEMA DE FLUXO MÁXIMO EM GRAFOS

Com o propósito de identificar a rota mais curta entre dois pontos em um mapa rodoviário, é viável empregar grafos direcionados. Esses grafos podem ser considerados como uma rede de fluxo, e além dessa aplicação, podem ser utilizados para abordar questões relacionadas ao fluxo de materiais (Cormen et al. (2009)). Dentro desse contexto, imagine um material fluindo por um sistema, desde o seu ponto de origem, onde é gerado a uma taxa constante, até o destino final (sorvedouro), onde é consumido a uma taxa equivalente à sua produção inicial. O fluxo desse material, em qualquer ponto do sistema, reflete a velocidade com que ele se desloca.

Nessa perspectiva, podemos conceber cada aresta direcionada em uma rede de fluxo como um canal designado para o transporte do material em movimento. Cada um desses canais possui uma capacidade pré-estabelecida, que reflete a taxa máxima na qual o material pode fluir através do canal. Para ilustrar, em cenários mencionados anteriormente, podemos ter, por exemplo, uma capacidade de 20 ampères de corrente elétrica em um condutor ou uma taxa de 200 litros de líquido por hora em um tubo.

Por outro lado, os vértices podem ser pensados como pontos de convergência dos condutos, onde o material flui sem acúmulo, à exceção dos casos da fonte e do sorvedouro. Essa abordagem garante a conservação do fluxo, o que significa que a taxa na qual o material entra em um vértice deve ser igual à taxa na qual o material o abandona.

Utilizando os princípios dos grafos e da teoria de fluxo, o desafio do fluxo máximo tem como objetivo principal calcular a taxa máxima na qual podemos encaminhar substâncias da fonte até o destino, respeitando rigorosamente as restrições de capacidade previamente definidas. Uma rede de fluxo, denotada por $G=(V,E)$, é um grafo direcionado no qual cada aresta $(u,v)\in E$ é associada a uma capacidade não negativa $c(u,v)>0$. Além disso, quando uma conexão é estabelecida na direção de (u,v), não é permitida a existência de outra conexão na direção oposta, ou seja, (v,u) não é permitido. Adicionalmente, se uma aresta (u,v) não pertence a E, sua capacidade é definida como nula, ou seja, $c(u,v)=0$.

Na estrutura de uma rede de fluxo, dois vértices assumem um papel particularmente significativo: a fonte s e o sorvedouro t. É pressuposto que todos os demais vértices estejam localizados em algum caminho que se estende desde a fonte até o sorvedouro. Em outras palavras, para qualquer vértice $v\in V$, a rede de fluxo inclui um percurso $s\rightarrow v\rightarrow t$. Consequentemente, o grafo é conexo e, dado que cada vértice, exceto a fonte, possui pelo menos uma aresta de entrada, podemos afirmar com validade que $|E|\geq|V|-1$, o que indica que o número mínimo de arestas é igual ao número de vértices menos um.

Considerando a representação da rede de fluxo como $G=(V,E)$, na qual a função de capacidade c está definida, com s indicando a fonte e t o sorvedouro, o fluxo nessa estrutura é descrito como uma função real $f: V\times V$, a qual deve satisfazer três propriedades fundamentais, como apresentado a seguir.

A primeira restrição a ser considerada diz respeito à capacidade, onde o fluxo em uma aresta, representado como $f(u,v)$, deve ser não negativo e não pode ultrapassar a capacidade atribuída a essa mesma aresta. Em outras palavras,

$$0\leq f(u,v)\leq c(u,v) \tag{1}$$

Adicionalmente, é essencial assegurar a conservação do fluxo, o que implica que a quantidade de fluxo que ingressa em um vértice deve ser igual à quantidade que dele parte. Portanto, para qualquer vértice u pertencente a V, desde que u seja distinto tanto de s (a fonte) quanto de t (o sorvedouro), a seguinte relação se aplica:

$$\sum_{v \in V} f(v,u) = \sum_{v \in V} f(u,v) \tag{2}$$

Quando $(u,v) \notin E$, não se pode haver fluxo de u a v, assim $f(u,v) = 0$.

Além disso, o termo $f(u,v)$ é utilizado para representar o fluxo que ocorre do vértice u para o vértice v. O valor total do fluxo, denotado por $|f|$, é definido como:

$$|f| = \sum_{v \in V} f(s,v) - \sum_{v \in V} f(v,s) \tag{3}$$

Isso significa que o fluxo total que emerge da fonte é calculado subtraindo o fluxo que converge para a fonte. Tipicamente, em uma rede de fluxo, não se encontram arestas que se conectem diretamente à fonte, e, consequentemente, o fluxo que ingressa na fonte é nulo (representado como $\sum f(v,s) = 0, \forall v \in V$).

3. APLICAÇÃO DO PROBLEMA DE FLUXO MÁXIMO EM REDES DE TRÂNSITO

Quando examinamos o cenário das redes de tráfego, torna-se evidente que ele pode ser eficazmente representado por meio de um grafo direcionado. Essa representação proporciona a oportunidade de empregar técnicas que viabilizam a determinação da taxa máxima pela qual os veículos podem ser direcionados desde a origem até o ponto de destino final, estritamente aderindo às limitações de capacidade previamente estabelecidas (Bassan e (Avi) Ceder (2008)).

Abordaremos uma cidade com uma complexa rede de ruas interconectadas, com o objetivo de otimizar o fluxo de veículos entre pontos urbanos distintos, visando assim a redução dos congestionamentos. Para representar essa cidade, utilizaremos um grafo direcionado, que será denotado por $G = (V,E)$. No contexto desse grafo, o conjunto V consiste em vértices, onde cada vértice representa um cruzamento ou uma interseção dentro da cidade. O conjunto E, por sua vez, é composto por arestas, e cada aresta representa uma rua que liga dois cruzamentos específicos. A direção das arestas indicará as direções permitidas para o tráfego, contribuindo para a modelagem detalhada do sistema viário urbano.

Cada aresta está associada a uma capacidade que representa o número máximo de veículos que podem atravessá-la dentro de um intervalo de tempo definido, sem ocasionar congestionamentos. A consideração dessas capacidades assume um papel fundamental na prevenção da sobrecarga no tráfego.

O grafo $G = (V,E)$ foi gerado de maneira aleatória, levando em consideração todas as restrições estabelecidas para o problema de fluxo máximo em grafos. Foi determinado um número específico de vértices e arestas para o grafo G onde, para o trabalho proposto, foram utilizados dez vértices e dez arestas, e a direção de cada aresta, assim como suas capacidades, foi definida de forma aleatória. Como o problema é resolvido com base em uma configuração aleatória, ele é capaz de resolver qualquer situação em uma cidade, contanto que essa cidade esteja em conformidade com as restrições previamente estabelecidas.

A fonte e o sorvedouro foram arbitrariamente definidos como o primeiro e o último vértice do grafo direcionado, mas podem ser escolhidos de acordo com as necessidades específicas da cidade que está sendo analisada. O fluxo de veículos, por sua vez, corresponde à quantidade de automóveis que circula por cada aresta do grafo em um momento específico. A nossa proposta consiste em otimizar esse fluxo de veículos, permitindo que o tráfego flua de forma eficiente, com o objetivo principal de minimizar ao máximo os congestionamentos.

A abordagem do problema de fluxo máximo com o intuito de mitigar o congestionamento demanda a consideração de certas restrições:

- O fluxo de veículos através de cada aresta não deve ultrapassar a capacidade máxima da respectiva rua representada por esta aresta.
- Nos cruzamentos (vértices), é fundamental preservar a continuidade do fluxo, implicando que a quantidade de veículos que ingressa em um cruzamento deve ser equilibrada com a quantidade que sai do mesmo.

Quando o fluxo de veículos em uma aresta atinge sua capacidade máxima, essa aresta é destacada com coloração vermelha no grafo direcionado, como mostramos nos resultados a seguir. Com o intuito de prevenir sobrecargas no trânsito, inverte-se o sentido da rua e verifica-se se houve uma melhora na fluidez do tráfego (ou seja, se a quantidade de arestas vermelhas diminuiu). Portanto, a inversão do sentido da aresta é realizada com base nas arestas em que o fluxo atinge a capacidade máxima.

4. O ALGORITMO DE FORD-FULKERSON

O Método de Ford-Fulkerson apoia-se sobre três conceitos essenciais: redes residuais, caminhos aumentadores e cortes. Esses conceitos não apenas embasam o funcionamento do método em si, mas também estão intrinsecamente ligados ao Teorema do Fluxo Máximo/Corte Mínimo (Cormen et al. (2009)), o qual determina o valor de um fluxo com base nos cortes presentes na rede.

O procedimento inicializa com um fluxo de valor zero, ou seja, $f(u,v) = 0$ para todos os pares de vértices u e v pertencentes ao conjunto V. Em cada iteração subsequente, o algoritmo incrementa gradualmente o valor do fluxo no grafo G. Para tanto, ele identifica caminhos aumentadores na rede residual associada, possibilitando aprimoramentos nos fluxos das arestas do grafo original.

O objetivo consiste em repetir este processo iterativo até que não mais se identifiquem caminhos aumentadores na rede residual. É importante destacar que o Teorema do Fluxo Máximo/Corte Mínimo assegura que esse método culminará na obtenção de um fluxo máximo na rede representada pelo grafo G.

No contexto das redes residuais, que são denotadas por uma rede de fluxo G e um fluxo f, G_f representa uma representação das capacidades remanescentes nas arestas da rede original após a inicialização de um fluxo f. A capacidade residual c_f de uma aresta (u,v) é calculada como a diferença entre a capacidade original $c(u,v)$ e o fluxo atual $f(u,v)$. A rede residual não apenas incorpora as arestas diretas da rede original, mas também pode incluir arestas invertidas para representar a possibilidade de reduzir o fluxo em uma aresta específica. Formalmente, considerando uma rede $G = (V,E)$ com fonte s e sorvedouro t, e um par de vértices u, v, a capacidade residual $c_f(u,v)$ é definida por:

$$c_f(u,v) = \begin{cases} c(u,v) - f(u,v) & \text{se } (u,v) \in E \\ f(v,u) & \text{se } (v,u) \in E \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \tag{4}$$

onde $c(u,v)$ é a capacidade original da aresta (u,v) e $f(u,v)$ é o fluxo atual nessa aresta.

Dada a rede anterior, juntamente com um fluxo f, podemos construir a rede residual $G_f = (V, E_f)$, onde G_f desempenha um papel fundamental na determinação de como o fluxo pode ser incrementado na rede original. Especificamente, o aumento de fluxo ocorre ao longo dos caminhos aumentadores na rede residual. Seja f' um fluxo na rede residual G_f. Então, a função $f \uparrow f'$ quantifica o acréscimo de fluxo na rede original G devido a f', assegurando que esse aumento de fluxo respeite as capacidades das arestas e mantenha a conservação de fluxo nos vértices. É de relevância destacar que a função $f \uparrow f'$ produz um fluxo válido em G cujo valor corresponde à soma dos valores dos fluxos f e f'.

Quando se abordam os caminhos aumentadores, estamos nos referindo a trajetos específicos em uma rede residual G_f, composta por arestas cujas capacidades residuais permitem o incremento do fluxo sem ultrapassar as capacidades originais. Um caminho aumentador, denotado como p, consiste em um percurso simples da fonte s ao sorvedouro t na rede residual G_f. Para qualquer caminho aumentador p, a capacidade residual $c_f(u,v)$ de suas arestas (u,v) é o valor máximo pelo qual o fluxo pode ser aumentado na direção de p. A capacidade residual de p é definida como

$$c_f(p) = \min\{c_f(u,v) : (u,v) \in p\}$$

e determina a quantidade máxima de fluxo que pode ser adicionada ao longo do caminho p.

Com base nisso, é possível estabelecer que, na presença de um caminho aumentador p em G_f, podemos definir uma função f_p em termos de $c_f(p)$ para representar um novo fluxo em G_f. Este fluxo, f_p, possui um valor equivalente à capacidade residual de p e pode ser rigorosamente demonstrado como válido dentro do contexto de G_f. O resultado essencial é que, ao incrementarmos o fluxo f por meio do acréscimo do fluxo f_p ao longo do caminho p, obtemos um novo fluxo em G, cujo valor se aproxima cada vez mais do fluxo máximo possível.

No que diz respeito aos cortes, um corte (S, T) em uma rede de fluxo $G = (V, E)$ representa a divisão dos vértices em dois conjuntos: S e $T = V - S$, onde $s \in S$ e $t \in T$. Essa definição guarda semelhanças com o conceito de "corte" utilizado em árvores geradoras mínimas, com a distinção de que, neste contexto, estamos particionando um grafo direcionado e enfatizando que $s \in S$ e $t \in T$.

Quando um fluxo f é estabelecido, é possível definir o fluxo líquido $f(S, T)$ que atravessa o corte e, a partir disso, mensurar a capacidade do corte (S, T). Notavelmente, em relação à capacidade, consideram-se apenas as arestas que conectam S a T, excluindo aquelas com direção inversa. Em contrapartida, no que se refere ao fluxo, avalia-se tanto o fluxo de S para T quanto o fluxo na direção oposta, de T para S. Consequentemente, podemos afirmar que, para um dado fluxo f, o fluxo líquido através de qualquer corte é uniforme e equivale a $|f|$. Essa definição é obtida por meio da reformulação da condição de conservação de fluxo para um nó $u \in V - \{s, t\}$.

Ademais, é viável estabelecer um limite superior para o valor de um fluxo f por meio da capacidade de qualquer corte em G. Esse aspecto implica que o valor máximo de um fluxo não excede a capacidade de um corte mínimo, em conformidade com o conhecido Teorema do Fluxo Máximo/Corte Mínimo. Este teorema afirma que um fluxo é máximo quando três condições são satisfeitas:

1. f representa um fluxo máximo em G;
2. A rede residual G_f não contém nenhum caminho aumentador;
3. $|f| = c(S, T)$ para algum corte (S, T) em G.

O algoritmo a seguir mostra em alto nível o funcionamento do método de Ford-Fulkerson.

FordFulkerson(G, s, t)
- **for** cada aresta $(u, v) \in G.E$ **do**
  - $(u, v).f \leftarrow 0$
- **while** existir um caminho p de s a t na rede residual G_f **do**
  - $c_f(p) \leftarrow \min\{c_f(u, v) : (u, v)$ está em $p\}$
  - **for** cada aresta (u, v) em p **do**
    - **if** $(u, v) \in G.E$ **then**
      - $(u, v).f \leftarrow (u, v).f + c_f(p)$
    - **else**
      - $(v, u).f \leftarrow (v, u).f - c_f(p)$

Algoritmo 1: Pseudocódigo do método de Ford-Fulkerson.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com base no entendimento do problema do fluxo máximo em redes de trânsito e na aplicação do algoritmo de Ford-Fulkerson, construiu-se um grafo que representa o sistema viário da região de uma cidade hipotética. Neste grafo, cada vértice corresponde a um cruzamento na cidade, e cada aresta representa uma rua que conecta diferentes cruzamentos, tal que os fluxos são atribuídos aleatoriamente.

Para identificar as ruas onde o fluxo máximo estava prestes a atingir ou exceder a capacidade da via, situando-se no limiar do congestionamento, optou-se por uma codificação visual utilizando cores distintas. Sob esse sistema, as ruas que exibiam essa condição crítica foram realçadas por meio de arestas vermelhas, enquanto as vias nas quais o fluxo máximo ainda estava distante do limite de capacidade foram representadas por arestas na cor azul.

Como ilustrado na Fig. 1, notamos que a aresta que une os vértices 0 e 9 está destacada em vermelho, indicando que sua capacidade residual está completamente utilizada, atingindo o fluxo máximo. Essa condição sugere que qualquer incremento adicional no fluxo acarretaria congestionamento. No contexto de uma cidade real, esta informação poderia ser adquirida por meio de estatísticas de fluxo de trânsito, com dados agregados por meio do monitoramento contínuo dos sistemas de vigilância em trânsito.

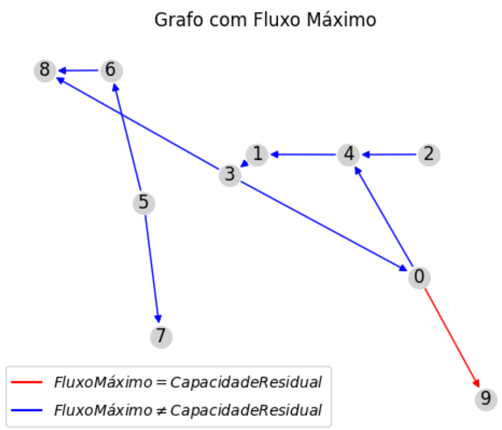

Figura *1*. Representação da cidade, análoga à figura anterior, mas com a troca de sentido da rua com fluxo máximo (antes representada em vermelho).

Ao identificar o número de vias em que essa situação ocorre, é possível calcular a proporção de vias com fluxo máximo em seu limite em relação ao total de arestas analisadas. No caso do modelo analisado, representa 10% das ruas presentes no grafo.

Com o objetivo de diminuir a proporção de vias operando à sua capacidade máxima de tráfego e aprimorar a fluidez do trânsito em toda a cidade, foi conduzida uma investigação para avaliar se a alteração do sentido de uma rua específica poderia otimizar o fluxo de veículos na área correspondente. Após a modificação da direção da rua que conecta os vértices cujo fluxo atingia a sua capacidade residual máxima, obteve-se o seguinte resultado em termos de otimização do fluxo de tráfego na região, como mostrado na Fig. 2.

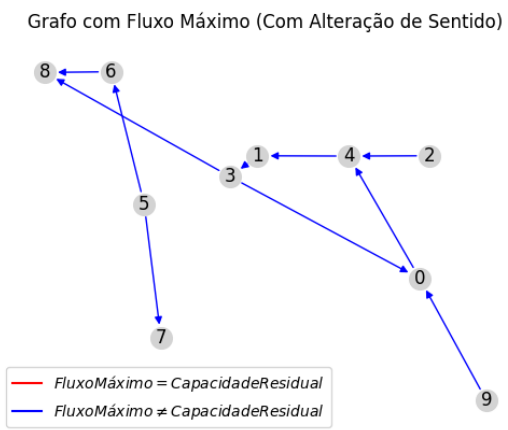

Figura 2. Representação da cidade, análoga à figura anterior, mas com a troca de sentido da rua com fluxo máximo (antes representada em vermelho).

Ao se comparar as Figuras 1 e 2 nota-se que a mudança do sentido da rua $(0,9)$, onde o fluxo máximo alcançava a capacidade residual possibilitou uma distribuição mais equilibrada de veículos na cidade. Como resultado, não há ruas operando no limite máximo de tráfego em nenhum momento.

Por meio dessa alteração do sentido, foi viabilizada a otimização do fluxo de veículos e a prevenção de congestionamentos em vias específicas. A distribuição mais homogênea do tráfego contribui para uma eficiência aprimorada no deslocamento dos veículos, minimizando os pontos de congestionamento e aprimorando a fluidez do trânsito em toda a cidade.

Outro fator de extrema relevância a ser considerado, especialmente quando se leva em conta a presença de interseções viárias, reside na introdução de elementos externos que se integram ao ambiente urbano e influenciam diretamente na fluidez do tráfego e na redução de acidentes. Estes elementos incluem, por exemplo, semáforos e interrupções nas vias rodoviárias. Portanto, é imperativo que esta inclusão seja contemplada na análise do fluxo máximo, uma vez que esses dispositivos desempenham um papel crucial na gestão do tráfego e na segurança viária.

Uma possível abordagem para incorporar os semáforos nas interseções e integrá-los à análise do fluxo máximo envolve a modelagem do fluxo em cada rua, considerando intervalos de tempo correspondentes aos estados de semáforo (vermelho ou verde). Isso permitiria que o valor do fluxo máximo variasse entre zero e seu valor máximo, dependendo do estado dos semáforos em cada via. Essa abordagem é essencial para calcular o fluxo máximo em cada aresta quando determinados semáforos permitem ou bloqueiam a passagem de veículos. Essa informação é fundamental para uma análise precisa do tráfego e para embasar decisões sobre o gerenciamento do tráfego, incluindo a implantação estratégica de semáforos em áreas críticas da cidade. Além disso, essa ideia pode ser aplicada de maneira semelhante no contexto de obras e obstruções ao longo das vias, permitindo otimizar a direção do fluxo nas vias próximas à obstrução, a fim de evitar congestionamentos decorrentes da mudança forçada no sentido do tráfego devido à obstrução inicial.

6. CONCLUSÕES

Podemos concluir que o algoritmo de Ford-Fulkerson, implementado neste estudo, demonstrou eficácia na determinação do fluxo máximo em um grafo que representa a infraestrutura viária de uma cidade. Este algoritmo faz uso da busca em largura para identificar caminhos aumentantes, ou seja, percursos que permitem o aumento do fluxo de veículos entre pontos de origem e destino.

O fluxo máximo calculado reflete a distribuição ideal de veículos na cidade, otimizando a passagem entre pontos-chave, enquanto considera as limitações de capacidade das vias. Através dessa avaliação, é possível identificar aquelas ruas que estão operando próximo ou acima da capacidade máxima, sugerindo potenciais pontos de congestionamento. É importante notar que o método representa uma abordagem sistemática para o problema de fluxo máximo, evitando que escolhas equivocadas sejam feitas por conta da limitação humana de se avaliar grandes números de combinações, especialmente quando se considera grafos maiores e mais complexos do que o caso estudado.

Para o cenário analisado, verificou-se que 10% das ruas da cidade atingiram o fluxo máximo. Isso indica que qualquer incremento adicional de tráfego nessas vias resultaria em congestionamentos. Entretanto, análises subsequentes demonstraram que é viável realizar ajustes de sentido em algumas dessas ruas, visando otimizar o fluxo de veículos e evitar engarrafamentos específicos. Essas intervenções estratégicas contribuem para uma distribuição mais uniforme do tráfego, reduzindo a carga sobre as vias congestionadas e melhor aproveitando a capacidade das demais estradas. Como revelado pelos resultados obtidos, a modificação do sentido de algumas vias pode efetivamente resultar em considerável redução na quantidade máxima de veículos que as atravessa, consequentemente reduzindo os congestionamentos.

Com a implementação deste algoritmo, pudemos conduzir simulações e testes, explorando cenários de tráfego que abrangem variações na capacidade das vias, demanda de veículos e possíveis mudanças de sentido. Além disso, adotamos um modelo hipotético que poderia incorporar variáveis adicionais, como semáforos e potenciais interdições de pistas. Dessa forma, em situações em que ocorram interrupções temporárias no fluxo de veículos de uma rua específica, como durante obras, poderíamos interpretar essa interrupção como a remoção da aresta correspondente no grafo. Isso nos permitiria gerar um novo grafo de fluxo máximo, determinando os sentidos adequados para as vias adjacentes, com o intuito de minimizar o congestionamento causado pela interrupção. Essa capacidade analítica e de otimização teria um impacto direto na redução de congestionamentos, economia de tempo de deslocamento e, consequentemente, na melhoria da qualidade de vida dos cidadãos.

Referências

1. S. Bassan and A. (Avi) Ceder. Analysis of maximum traffic flow and its breakdown on congested freeways. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 387(16-17): 4349-4366, jul 2008. ISSN 03784371. doi: 10.1016/j.physa.2008.02.058.
2. M. Bulut and E. Özcan. Optimization of electricity transmission by Ford-Fulkerson algorithm. Sustainable Energy, Grids and Networks, 28:100544, dec 2021. ISSN 23524677. doi: 10.1016/j.segan.2021.100544.
3. T. H. Cormen, C. E. Leiserson, R. L. Rivest, and C. Stein. Introduction to Algorithms. The MIT Press, 3 edition, 2009. ISBN 0262033844.
4. P. Dolgopolov, D. Konstantinov, L. Rybalchenko, and R. Muhitovs. Optimization of train routes based on neuro-fuzzy modeling and genetic algorithms. Procedia Computer Science, 149: 11-18, 2019. ISSN 18770509. doi: 10.1016/j.procs.2019.01.101.

5. J. Ferreira, G. Callou, P. Maciel, and D. Tutsch. An algorithm to optimise the energy distribution of data centre electrical infrastructures. International Journal of Grid and Utility Computing, 11(3):419, 2020. ISSN 1741-847X. doi: 10.1504/IJGUC.2020.107625.
6. Y. Gong. Traffic Flow Prediction and Application of Smart City Based on Industry 4.0 and Big Data Analysis. Mathematical Problems in Engineering, 2022:1-11, 2022. ISSN 1563-5147. doi: 10.1155/2022/5397861.
7. G. Gupta and P. Paruchuri. Effect of human behavior on traffic patterns during an emergency. In 2016 IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), pages 2052-2058. IEEE, nov 2016. ISBN 978-1-5090-1889-5. doi: 10.1109/ITSC.2016.7795888.
8. M. T. Kyi and L. L. Naing. Application of Ford-Fulkerson Algorithm to Maximum Flow in Water Distribution Pipeline Network. International Journal of Scientific and Research Publications (IJSRP), 8(12), dec 2018. ISSN 2250-3153. doi: 10.29322/IJSRP.8.12.2018.p8441.
9. E. P. Neto and G. Callou. An Approach Based on Ford-Fulkerson Algorithm to Optimize Network Bandwidth Usage. In 2015 Brazilian Symposium on Computing Systems Engineering (SBESC), pages 76-79. IEEE, nov 2015. ISBN 978-1-5090-0182-8. doi: 10.1109/SBESC.2015.21.
10. B. Saidane, H. Manier, and A. El Moudni. Optimisation for urban congestion problems. In IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, volume vol.3, page 5. IEEE, 2002. ISBN 0-7803-7437-1. doi: 10.1109/ICSMC.2002.1176071.
11. S. van Hoesel. Optimization in telecommunication networks. Statistica Neerlandica, 59(2): 180-205, 2005. ISSN 0039-0402. doi: 10.1111/j.1467-9574.2005.00286.x.