LI Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional
Limeira–SP, 02 a 06 de setembro de 2019

AVALIAÇÃO DE CONTROLABILIDADE ESTRUTURAL EM REDES VEICULARES

Filipe Emanuel Silva Costa
Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional do Conhecimento (PPGMCC)
Universidade Federal de Alagoas (UFAL)
57072-900 - Maceió-AL - Brasil
filipeemanuel10@hotmail.com

Raquel da Silva Cabral
Instituto de Computação
Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)
Caixa Postal 6176 – 13.084-970 – Campinas – SP – Brasil
raquelcabral@lrc.ic.unicamp.br

RESUMO

As Redes *Ad Hoc* Veiculares (VANETs) estabelecem um novo paradigma na computação móvel, que consiste em possibilitar a comunicação sem fio entre os veículos. Este trabalho mapeou a topologia das VANETs em Redes Complexas, para identificar nós influenciadores nas redes. Para isso, utilizamos uma métrica de controlabilidade estrutural com a finalidade de avaliar a complexidade de controle das redes em diferentes intervalos de tempo. Na avaliação, foram utilizados cinco cenários reais, sendo quatro cenários utilizando comunicação entre veículos (V2V) e um cenário utilizando comunicação de veículos para infraestruturas (V2I). Para realizar a análise de controlabilidade, as VANETs também foram modeladas como grafos agregados e diferentes raios de alcance foram considerados. Os resultados revelaram o comportamento de controle de cada cenário considerando a evolução temporal da rede. Assim, foi constatado que para obter o controle total das redes aqui analisadas, é necessário alcançar cerca de 70% do total de nós da rede.

PALAVRAS CHAVE. Redes Complexas, Controlabilidade, Redes Veiculares.

Tópicos: TAG - Teoria e Algoritmos em Grafos.

ABSTRACT

Vehicular Ad Hoc Networks (VANETs) establish a new paradigm in mobile computing, which is to enable wireless communication between vehicles. This work mapped the topology of VANETs in Complex Networks to identify influencing nodes in networks. For this, we use a structural controllability metric in order to evaluate the complexity of network control at different time intervals. In the evaluation, five real scenarios were used, four scenarios using communication between vehicles (V2V) and a scenario using vehicle communication for infrastructures (V2I). To perform the controllability analysis, the VANETs were also modeled as aggregate graphs and different range radius were considered. The results revealed the control behavior of each scenario considering the temporal evolution of the network. Thus, it was found that in order to obtain total control of the networks analyzed, it is necessary to reach about 70% of the total nodes of the network.

KEYWORDS. Complex Networks. Controlability. Vehicle Networks.

Paper topics: TAG - Theory and Algorithms in Graphs.

https://proceedings.science/p/106959?lang=pt-br

1. Introdução

Uma Rede Veicular *Ad Hoc* (VANET) pode ser definida como um conjunto de veículos que utilizam comunicação sem fio para trocar informações entre si. As redes veiculares são um tipo de rede sem fio com crescimento constante proporcionado pelos avanços na indústria automobilística. Esses avanços tecnológicos, possibilitam agregar novas tecnologias aos veículos, provendo aos usuários acesso a novos serviços, tais como, as informações sobre o ambiente, condições do trânsito, alertas de perigos nas vias e conexão com a Internet [Macedo et al., 2013]. As VANETs permitem a comunicação, tanto de veículos para veículos (V2V), quanto de veículos para uma infraestrutura (V2I), proporcionando a disseminação de dados [Wang e Tsai, 2013].

A disseminação consiste no envio de dados de um elemento de origem a um destino, nesse caso, são levados em conta requisitos de qualidade das aplicações, tais como, a alta taxa de entrega de pacotes, curto atraso de entrega e baixa sobrecarga da rede. Em uma VANET, a disseminação de dados eficiente é estudada constantemente, visto que existem diversos desafios, dentre eles a cobertura da rede, a densidade dinâmica, as falhas na comunicação V2V devido a alta mobilidade e a comunicação de curto alcance [Wu et al., 2004]. As VANETs podem ser representadas como grafos, em que os veículos são considerados vértices e os enlaces entre eles, arestas. Baseado nesse grafo, é possível investigar o comportamento da rede a partir de métricas de redes complexas. As Redes Complexas são grafos que apresentam crescimento constante [Barabasi, 2003] e permitem modelar estruturas e aspectos do mundo real por meio de elementos e conexões entre eles, ou seja, por meio de grafos [Newman, 2003]. As relações entre os componentes do grafo, não seguem nenhum padrão específico, podendo reproduzir tanto grafos totalmente aleatórios, como grafos que seguem uma estrutura bem regular. Atualmente, existem várias redes reais que são estudadas com o propósito de compreender seu comportamento e topologia, entre elas estão as redes sociais, cadeias alimentares, citações de trabalhos acadêmicos, circuitos elétricos, redes de transporte (veicular, ferroviário e aéreo) entre outros [Liu et al., 2011].

Nos últimos anos surgiram muitos trabalhos que utilizam as métricas de Redes Complexas para estudar redes reais, permitindo avaliar sua estrutura e o seu comportamento. Uma dessas métricas, é conhecida como controlabilidade e é utilizada para identificar os nós controláveis da rede, que são elementos bem localizados na topologia e se acionados podem oferecer o controle total sobre a rede. A partir da identificação desses elementos, pode-se intervir sobre possíveis instabilidades da rede, além de permitir a compreensão sobre o fluxo de informações que nelas trafegam. Este trabalho propõem avaliar a controlabilidade das redes veiculares, considerando intervalos temporais com o propósito de verificar o comportamento de controle estrutural a medida em que o tempo evolui.

O restante do artigo está organizado da seguinte forma. A Seção 2 define problema tratado neste trabalho. A Seção 3 apresenta a fundamentação teórica necessária para o entendimento do trabalho. A Seção 4 descreve o modelo utilizado. A Seção 5 apresenta o método utilizado. A Seção 6 apresenta os resultados. A Seção 7 conclui o trabalho e apresenta alguns trabalhos futuros. E por fim na Seção 8, os agradecimentos.

2. Definição do Problema

Seja uma VANET constituída dos conjuntos de veículos (V) e ligações (L) entre os mesmos. O conjunto de veículos presentes em uma topologia rodoviária pode ser representado pelo conjunto $V = \{v_1, v_2, v_3 ... v_{MAX}\}$. As relações entre os veículos podem ser representadas por $L = \{l_1, l_2, l_3 ... l_{MAX}\}$, sendo essas ligações definidas pelo raio de alcance de cada veículo. A Figura 1 ilustra como se estabelece uma aresta do grafo.

https://proceedings.science/p/106959?lang=pt-br

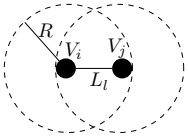


Figura 1: Estabelecimento de uma conexão L_l entre os veículos V_i e V_j em uma rede veicular com raio de alcance R, **Fonte:** Autor.

Desta forma, neste trabalho, temos o seguinte questionamento:

Qual o momento em que se obtém o melhor controle em redes veiculares?

A problemática deste trabalho está relacionada com a análise da topologia das redes veiculares a partir do reconhecimento de nós de controle. À vista disso, foi levantada a seguinte hipótese:

H1: A controlabilidade permite identificar nós de controle e definir o seu percentual em redes veiculares, evidenciando a complexidade de controle em intervalos temporais.

Para responder a questão de pesquisa, calculamos o percentual de nós de controle presentes na rede, para determinar o melhor instante em que a rede pode ser controlada.

3. Fundamentação Teórica

Esta Seção apresenta os conceitos necessários para o entendimento do trabalho: redes veiculares, grafos agregados e a métrica de controlabilidade.

Segundo [Li et al., 2007], uma VANET é uma rede *Ad Hoc* dinâmica constituída por um conjunto de veículos que utilizam comunicação sem fio para trocar informações com os elementos da rede durante o seu deslocamento. A ideia é fornecer uma conectividade constante para usuários móveis nas estradas, e comunicações eficientes de veículo para veículo, permitindo um sistema de transporte inteligente (ITS). Os avanços tecnológicos contribuem para o desenvolvimento de novos veículos que comportam tecnologias de comunicação, permitindo que os veículos estejam conectados entre si ou conectados a algum sistema de apoio. Esse tipo de rede contribui de várias formas para a sociedade, pois a partir dessa tecnologia é possível evitar congestionamentos, acidentes e ataques à segurança pública. As redes veiculares podem ser mapeadas em forma de grafo, possibilitando que sejam realizadas análises comportamentais e estruturais a partir da Teoria das Redes Complexas. O alto dinamismo nos padrões de mobilidade da comunicação das redes veiculares, causa várias alterações na topologia da rede, o que implica em uma conectividade frágil e desconexões. Essas características nos motiva a conhecer um pouco mais sobre essas redes.

Uma VANET é uma rede dinâmica, e pode ser modelada de várias formas. Segundo [Kim e Anderson, 2012], uma rede dinâmica pode ser representada como uma série de grafos estáticos $G1$, $G2$, ..., G_N. A notação $G_t(1 \leq 6t \leq n)$ representa o grafo agregado que consiste de um conjunto de vértices V e um conjunto de arestas E_t onde uma aresta (u, v) ϵ E_t existe somente se uma aresta temporal $(u, v)_{i,j}$ ϵ $E_{0,T}$ existe entre os vértices v e u no intervalo de tempo $[i, j]$ tal que $i \leq wt$ e $j > w(t-1)$. G_t é a t-ésima janela temporal de uma rede dinâmica $G^D_{0,t}$ durante a t-ésima janela de tempo. Considerando que a duração de um intervalo observado é finito, a partir de um tempo inicial t_{start} e tempo final t_{end}, dado um t_{start} = 0 e t_{end} = T, uma rede dinâmica $G^D_{0,t} = (V, E_{0,T})$, consiste em um conjunto de vértices e arestas temporais existentes no intervalo de tempo $[0, T]$, sendo os vértices V e conjunto de arestas temporais $E_{0,T}$, onde uma aresta $(u, v)_{i,j}$ ϵ $E0, T$ existe entre vértices u e v em um intervalo de tempo $[i, j]$, tal que $i \leq T$ e$j \leq 0$.

No modelo agregado, um conjunto de vértices V é sempre o mesmo enquanto o conjunto de arestas existentes mudam no tempo. w é usado para especificar a duração de cada janela de tempo, T/n, apresentado em alguma unidade de tempo, como segundos ou horas.

https://proceedings.science/p/106959?lang=pt-br

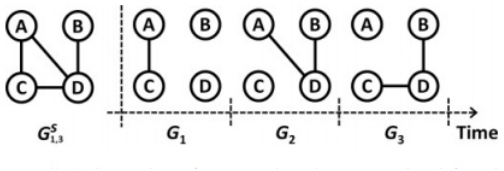


Figura 2: Exemplo - Modelo Agregado. **Autor:** [Kim e Anderson, 2012]

A figura 2, exemplifica um grafo agregado, onde $G^S_{1,3}$ representa o grafo agregado e G_1, G_2 e G_3 representam cada janela temporal, considerada ao longo de um determinado intervalo. Neste trabalho utilizamos o modelo agregado para avaliar o controle das redes considerando as arestas temporais.

4. Controlabilidade de Redes Complexas

As Redes Complexas possuem diversas aplicações, a medida que os estudos dessas redes foram se aprofundado, estudiosos da área começaram a questionar se era possível "controlar" o comportamento das redes, e uma vez que o fosse possível, como fazê-lo [Liu et al., 2011]. Com base nisso, os autores [Liu et al., 2011], propuseram a teoria de controlabilidade de Redes Complexas, para avaliar a complexidade do controle das redes. A seguir, é feita uma descrição introdutória desse modelo.

Equação de Espaço de Estado: Na teoria de sistemas lineares, a equação (ou representação) de espaço de estado é definida como:

$$\frac{dx(t)}{dt} = Ax(t) + Bu(t) \tag{1}$$

Onde $x(t)$ captura o estado de um sistema de N nós no tempo t, ou seja, a representação dos estados atuais de cada nó em um determinado tempo. A matriz A, que caracteriza a matriz de adjacência, na qual refere-se a topologia da rede. E por fim, a matriz B, simbolizando a matriz de entrada, identificando os nós controlados por um controlador externo. O sistema é controlado usando o vetor de entrada dependente do tempo $u(t)$ [Lin, 1974]. Para a controlabilidade proposta por [Liu et al., 2011], temos a seguinte definição:

Definição 1: (Controlabilidade) Um sistema é dito controlável se existe um sequência de entradas capaz de transferir o estado inicial $x(t0)$ do sistema para qualquer outro estado $x(tf)$ em um tempo finito.

Para se controlar um sistema, primeiramente é necessário identificar o conjunto de nós que, se acionados por sinais diferentes, pode oferecer controle total sobre a rede, estes nós são chamados de **nós de controle**. O principal objetivo da controlabilidade é identificar os nós de controle (N_D), cujo conjunto mínimo, é suficiente para controlar totalmente a dinâmica de um sistema. O sistema descrito pela equação 1 é dito ser controlável, se existe um sequência de entradas capaz de transferir o estado inicial $x(t0)$ do sistema, para qualquer outro estado $x(tf)$ em um tempo finito. O que é possível, se e somente se, a matriz de controlabilidade, representada pela equação 2, obtiver $rank$ completo.

$$C = (B, AB, A^2B, ..., A^{N-1}B) \tag{2}$$

Ou seja, a condição de $rank$ representada pela equação 3, deve ser satisfeita para que o sistema seja considerado controlável.

$$rank(C) = N \tag{3}$$

O $rank$ representa a condição matemática para controlabilidade, no qual C representa a matriz de controlabilidade e N o número total de nós presentes na rede. O $rank$ é chamado de condição de classificação de controlabilidade de [Kalman, 1963]. Na prática, a controlabilidade também pode ser colocada da seguinte forma: Identifique o mínimo número de nós de controle, de tal forma que a equação 3 seja satisfeita, ou seja, para ser totalmente controlado, todos os nós pertencentes a um sistema, devem alterar seus estados em um tempo finito. Os estados de cada nó da rede, são representados por seu peso, no caso de redes não-ponderadas o valor do estado deve ser considerado diferente de zero, pois o zero é um elemento neutro para algumas operações. Neste trabalho o valor considerados para o estado é igual a um.

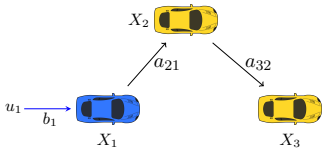


Figura 3: Sistema Controlável - Adaptado de Liu et al. [Liu et al., 2011]

A figura 3 mostra três veículos X_1, X_2 e X_3, recebendo uma informação (entrada) u_1 e através de X_1 o restante dos vértices recebem o valor da entrada (b_1) e alteram seus estados.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}1(t) \\ \dot{x}2(t) \\ \dot{x}3(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ a_{21} & 0 & 0 \\ 0 & a_{32} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x1(t) \\ x2(t) \\ x3(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{4}$$

A equação 4, mostra a relação entre a matriz de adjacência da rede representada na figura 3 e o vetor de entradas recebidas através do vértice X_1. Nesta equação, são considerados os estados iniciais para cada um dos vértices, dado que ao final da operação, é esperada uma comparação para evidenciar que os nós realmente sofreram alterações em seus estados.

$$C = \left[B, A \cdot B, A^2 \cdot B\right] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & a_{21} & 0 \\ 0 & 0 & a_{32}a_{21} \end{bmatrix} \tag{5}$$

A equação 5, mostra a matriz de controlabilidade, neste caso particular, o valor de $rank$ é igual ao número de vértices da rede, dessa forma, dizemos que o sistema é controlável, dado que todos os vértices alteraram seus estados. Na prática, aplicando o exemplo na matriz da figura 3, obtemos três para $rank$ (equação 6) (retorna o número de nós que alteraram seus estados), logo o valor de $rank$ é igual a N (número total de vértices), então o sistema é dito controlável.

$$rank(C) = 3 = N \tag{6}$$

Identificando o número mínimo de nós de controle (N_D) de uma rede, torna-se possível conhecer o quão controlável uma rede é, ou seja, estes definem a complexidade de controle de uma rede. No entanto, a teoria clássica do controle (condição de $rank$) é considerada proibitiva, pois possui complexidade de $O(2^n)$, tornando assim esta técnica inviável para redes com algumas centenas de nós, o que dificulta encontrar nós de controle em redes reais (que possuem milhares ou milhões de nós). Assim, torna-se essencial o uso de uma técnica alternativa, surge como opção, o

https://proceedings.science/p/106959?lang=pt-br

emparelhamento máximo em grafos, que possui complexidade próxima a $O(e\sqrt{v})$, onde v representa o número de vértices e e o número de arestas.

O problema de emparelhamento está associado a vários modelos de otimização e é extremamente útil na determinação de agrupamentos de afinidades e designações de associações. O emparelhamento (matching) em um grafo, é um subconjunto de arestas que pertencem a um grafo, no qual cada aresta não tem nenhum vértice em comum com nenhuma outra aresta do subconjunto. Neste trabalho, foi utilizada a ferramenta analítica proposta por [Liu et al., 2011], trata-se de uma adaptação do algoritmo de Hop-Croft-Karp. O algoritmo, tem como objetivo encontrar um emparelhamento máximo em um dado grafo. Recebeu esse nome pois foi apresentado pela primeira vez em 1971 por John Hopcroft e Richard Karp [Hopcroft e Karp, 1971]. Sua principal ideia é dividir o grafo em camadas que alternam entre arestas que estão no emparelhamento e as que não estão. A adaptação realizada por [Liu et al., 2011] para o contexto de controle, considera apenas como nó de controle, aquele que inicialmente recebe uma informação e a repassa para o seguinte.

5. Método

Neste capítulo contém os materiais utilizados e os passos realizados para obtenção dos resultados.

Nesse trabalho, foram utilizados cinco cenários reais de redes veiculares com os tipos de comunicação V2V e V2I. Buscando dar ao estudo um maior realismo no que se refere a um ambiente de rede veicular, os cenários analisados foram obtidos a partir das mobilidades veiculares de projetos consolidados e que são utilizados em diferentes abordagens.

Os cenários **Trace07-09** e **Trace17-19**, são bases de dados que representam a movimentação de veículos da cidade de Creteil, França [Lebre e Mouel, 2017]. No cenário, os veículos trafegaram por uma rotatória com seis entradas/saídas, estradas de duas ou três vias, uma rodovia, quatro mudanças de faixa, 15 semáforos. Os dados compreendem cerca de 10.000 viagens em horários de pico, de duas horas pela manhã (das 7h às 9h) com 3.129 veículos e duas horas à noite (das 17h às 19h) com 2.968 veículos. Os cenários **A6** e **M40**, foram obtidos a partir das mobilidades veiculares de duas rodovias próximas a Madri, Espanha [Gramaglia et al., 2017]. A trace **A6** possui mobilidade com 1.507 veículos enquanto que a trace **M40** possui 2.012 veículos. O cenário **Colônia** foi encontrado no projeto (TAPASCologne) idealizado por [Sandesh Uppoor, 2016]. A trace resultante do tráfego de carros em uma cidade de Colônia cobre uma região de 400 quilômetros quadrados por um período de 24 horas. Neste trabalho foram utilizados os dados referentes a duas horas: 06:00 às 08:00.

As bases de dados utilizadas neste trabalho, possuem variáveis que representam a linha do tempo em que ocorrem as relações (arestas) entre os veículos (nós) e a identificação de cada veículo, e ainda, as coordenadas de posicionamento de cada veículo. Os experimentos foram subdivididos em quatro passos: mapeamento, particionamento, execução do algoritmo de controlabilidade e análise estatística dos resultados, como representado no fluxograma da figura 4.

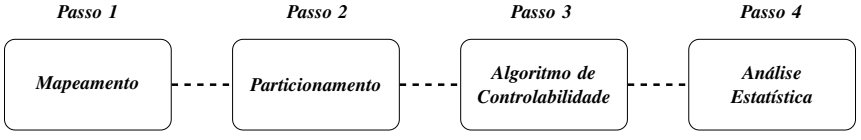


Figura 4: Fluxograma de passos realizados, **Fonte:** Autor.

O **passo 1**, consistiu em modelar as bases de dados para a obtenção de dados no formato de um grafo, ou seja, a realização do mapeamento da topologia das redes. As relações entre os

vértices da rede foram feitas com base no cálculo de distância euclidiana que realiza as ligações entre veículos no raio de 100 metros conforme descrito em [Basagni e Lee, 2002] para abordagens experimentais. Um algoritmo de mapeamento foi utilizado nesta etapa, o algoritmo recebe uma base de dados e verifica a distância euclidiana entre os veículos, caso os veículos possuam uma distância de $100m$, ou seja, se estiverem no mesmo raio de alcance definido, o algoritmo define uma relação entre os mesmos, como é mostrado na figura 1. Como resultado o algoritmo retorna um grafo com os nós identificados e suas relações. Além disso, o algoritmo de mapeamento mostra em qual momento se deu cada relação entre os veículos, essa informação é importante para a fase de fragmentação e por isso é preservada.

Após o término do mapeamento da topologia, foi executado o **passo 2**. A partir do grafo originado na etapa anterior, foi possível realizar o particionamento do grafo considerando o momento em que aconteceram as relações entre veículos, em outras palavras, esta etapa teve como objetivo segmentar os grafo em diferentes partes considerando a linha do tempo em que os vértices do grafo constituíram relações. Um algoritmo de particionamento foi utilizado nessa etapa, sua finalidade é receber um grafo e particioná-lo considerando os respectivos momentos em que os vértices se correlacionam, dessa forma torna-se possível avaliar o controle estrutural tempo a tempo.

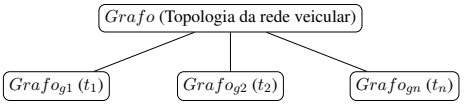


Figura 5: Diagrama de particionamento, **Fonte:** Autor.

O **passo 3** consistiu em executar o algoritmo de controlabilidade de [Liu et al., 2011] para cada parte resultante da etapa anterior, nesta fase foi utilizada a aplicação **Netctrl** de [Nepusz e Vicsek, 2012], que compreende os modelos controlabilidade estrutural de [Liu et al., 2011] e [Nepusz e Vicsek, 2012]. A fase de particionamento, me permitiu avaliar a controlabilidade em cada janela temporal, e ainda, avaliar o controle da rede desde o seu momento inicial até o momento final.

Por fim, no **passo 4** foi realizada uma análise da controlabilidade estrutural a partir dos gráficos e percentuais de controle.

6. Resultados

Na tabela 1 são apresentadas a identificação dos cenários, a quantidade de veículos presentes em cada cenário, os nós de controle (N_D), o percentual médio de controlabilidade (N_DMed), o percentual mínimo de controlabilidade (N_DMin), o percentual máximo de controlabilidade (N_DMax) e o intervalo de confiança.

Tabela 1: Controlabilidade de Redes Veiculares (V2V)

Cenário	Veículos	N_D	N_DMed	N_DMin	N_DMax	Intervalo de Confiança
A6	1.507	1.096	0.3957	0,0058	0.7272	(0.2689, 0.5224)
M40	2.012	1.514	0.4205	0.0032	0.7524	(0.2878, 0.5532)
Trace 07-09h	3.129	3.078	0.8845	0.0439	0.9837	(0.8522, 0.9168)
Trace 17-19h	2.968	2.926	0.8874	0.0329	0.9857	(0.8552, 0.9196)

As redes **Trace 07-09h** e **Trace 17-19h** obtiveram resultados semelhantes desde o tempo inicial até o final. Isso pode ser explicado pelo fato de ambas utilizarem o mesmo trajeto rodoviário, além disso, a quantidade de veículos desses cenários é aproximada. Outro ponto relevante é que a rodovia na qual a rede foi desenvolvida, possui rápida variação em sua topologia pois trata-se

https://proceedings.science/p/106959?lang=pt-br

de uma rotatória, onde os veículos entram e saem da rodovia com frequência. Desta forma a alta mobilidade contribui para a conexão e desconexão de vários veículos. Devido ao alto valor do percentual de controlabilidade dessas redes, seria necessário alcançar praticamente todos os nós para controlar a rede completamente.

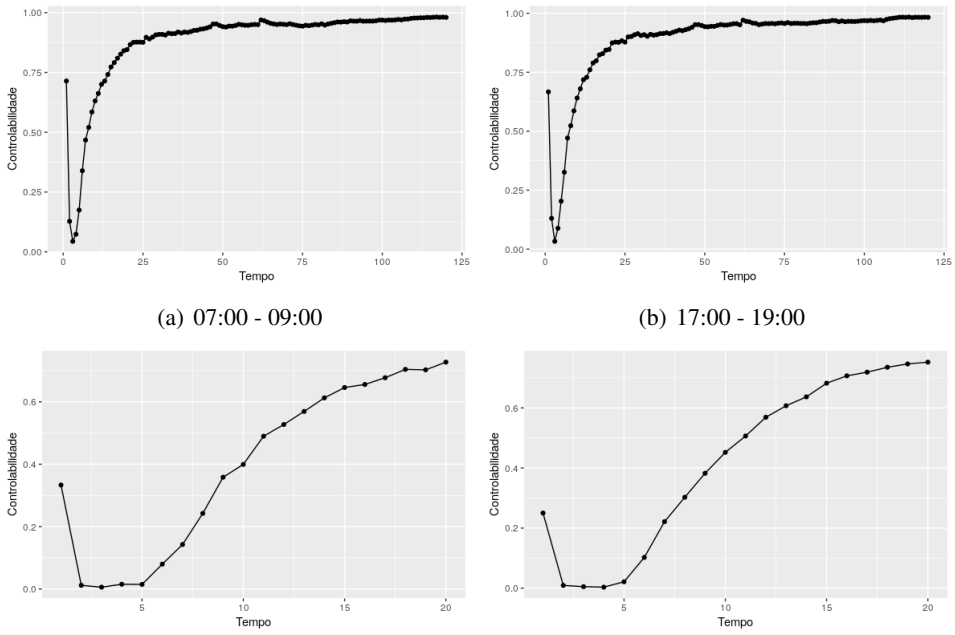
Com o elevado número de veículos trafegando pela rodovia, é possível que os veículos presentes naquele momento estivessem passando por um tráfego lento, fazendo com que cada veículo possuísse um alto número de conexões justificado pela proximidade entre veículos. Sendo desta forma evitados pelos nós de controle, confirmando assim, que os nós de controle evitam nós de alto grau por serem nós mais complexos de se controlar. Dado o importante papel que os hubs (nós com alto grau) têm em manutenção da integridade estrutural das redes contra falhas e ataques, é natural esperar que o controle dos hubs seja essencial para controlar rede. Para testar a validade dessa hipótese, os autores Liu et al., dividiram os nós em três grupos de tamanho igual de acordo com o seu grau, k (baixo, médio e alto). A fração de nós de controle foi significativamente maior entre os nós de baixo k do que entre os hubs, indicando que em sistemas reais, os nós de controle tendem a evitar os hubs. Destaca-se que para obter um maior controle sobre uma rede, é necessário que o percentual de controle se aproxime de zero, ou seja, quanto menor a quantidade de nós de controle em uma rede, menor a quantidade de nós necessários para obter o controle total da rede (melhor percentual de controle).

A rede **A6**, apresentou o melhor percentual de controlabilidade entre as redes analisadas. Como pode ser observado na tabela 1, **A6** é o cenário que possui o menor intervalo de confiança, caracterizando que o percentual de controle é mais próximo de zero em comparação com os demais cenários. A rede **M40**, possui um percentual de controle aproximado ao da rede **A6** como pode ser visto na tabela 1, porém um pouco maior. As rodovias possuem uma certa semelhança e uma pequena diferença de percentual de controle. Essa pequena diferença pode ser explicada pela maior quantidade de veículos apresentados no cenário **M40**.

Tabela 2: Controlabilidade de redes veiculares (Agregado).

Cenário	Controlabilidade - Agregado	Controlabilidade - Estático
A6	0.0564035	0.00066357
M40	0.0457256	0.000497018
07-09h	0.013408	0.000980584
17-19h	0.0113748	0.00140084

A tabela 2 mostra a controlabilidade das redes considerando o modelo agregado em que o grafo é obtido pela união do componente espacial de todas as arestas em todos os instantes de tempo. Este resultado considera um único grafo (rede), possibilitando calcular a controlabilidade estrutural agregada. O resultado mostra que o percentual de controle estrutural agregado obtido, é melhor do que o percentual de controle encontrado com o particionamento, pois utilizando o modelo agregado, observou-se que a quantidade de nós de controle é inferior ao de cada parte obtida no particionamento. Utilizando o modelo agregado, as redes **Trace07-09h** e **Trace17-19h** obtiveram um melhor resultado em relação as demais redes.

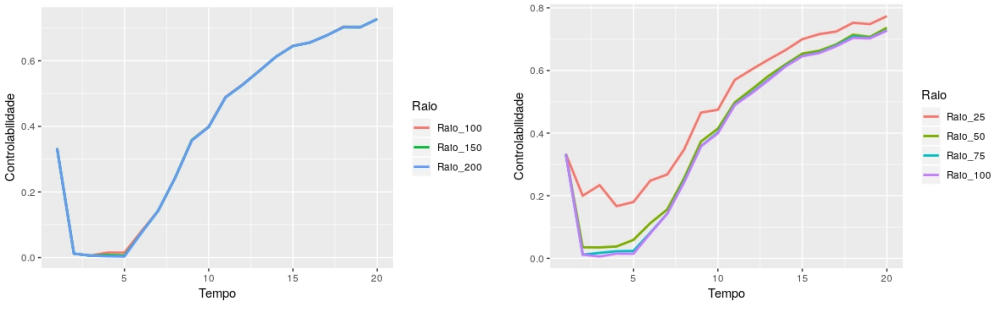


(a) 07:00 - 09:00 (b) 17:00 - 19:00

(c) A6 (d) M40

Figura 6: Percentual de Controlabilidade para cada intervalo de tempo, **Fonte:** Autor.

A figura 6 apresenta gráficos que mostram o percentual de controlabilidade em relação a evolução do tempo. Como se pode observar em todos os cenários, no tempo inicial o percentual de controle é baixo e a medida em que o tempo evolui, o percentual de controle cresce, isso se dá pelo aumento dos nós das redes assim como o seu grau. O controle é melhor, à medida em que o percentual diminui. Em **A6**, (figura 6(c)), no instante 10, a taxa de crescimento do percentual de controle sofre uma pequena diminuição, revelando que neste momento a quantidade de veículos necessários para o controle total da rede, é menor que nos demais instantes, considerando a quantidade de veículos em cada instante. Neste caso, o referido momento torna-se o melhor instante para disseminar dados pois o alcance será maior. Já no cenário **M40**, por exemplo, seria necessário alcançar cerca de 75% dos nós da rede para que todo o sistema fosse controlado, como indicado na tabela 1 ($N_D Max$), significando que há uma alta complexidade para se controlar a rede em questão.



(a) Medidas de raio sugerido por [Basagni e Lee, 2002]. (b) Medidas de raio inferiores.

Figura 7: Percentual de Controlabilidade considerando diferentes raios de alcance, **Fonte:** Autor.

A figura 7(a) representa o percentual de controle considerando diferentes raios de alcance.

Segundo a recomendação de [Basagni e Lee, 2002], os raios de alcance em abordagens experimentais podem variar de 100 a 200 metros. Foram considerados as medidas dos raios de 100, 150 e 200 metros para a rede que obteve o melhor percentual de controlabilidade (**A6**). O resultado mostrou que aproximadamente ao tempo 5, como pode ser observado na figura 7(a), o percentual de controle foi melhor utilizando um raio de comunicação de 200 metros. Assim é notável que a variação de raio de comunicação afeta a topologia da rede alterando consequentemente o controle estrutural, e ainda, a topologia criada a partir da utilização de um raio de alcance maior, proporciona melhores percentuais de controle estrutural. Como podemos perceber no gráfico representado na figura 7(a), na maior parte do tempo, as linhas que representam os raios utilizados se sobrepõem, pois a topologia não sofre mudanças significativas ao ponto de interferir no controle estrutural da rede, desta forma, surge a oportunidade de verificar o comportamento de controle quando o raio de comunicação é alterado.

Para isso, utilizamos a mesma rede (A6), considerando raios de alcance inferiores em relação aos sugeridos por [Basagni e Lee, 2002], para que se possa verificar se com mudanças significativas na medida do raio de alcance da rede, haverá modificações no controle da rede, e ainda, se essas modificações influenciarão positivamente ou negativamente no controle da rede. Os valores 25, 50,75 e 100m foram definidos nesta nova análise. Perceba que o raio de 100 metros foi mantido para que se possa realizar uma comparação entre os valores definidos e os valores sugeridos na literatura. Como podemos observar na figura 7(b), com a modificação do raio para valores inferiores aos sugeridos por [Basagni e Lee, 2002], pode-se perceber que a topologia da rede sofreu modificações significativas a medida em que diminuímos o raio de alcance, sendo desta forma prejudicial ao controle estrutural da rede, destaca-se que o raio sugerido por [Basagni e Lee, 2002], retornou resultados mais significativos em termos de controle do que os demais que foram definidos.

A avaliação também foi feita em uma rede V2I com a finalidade de verificar o comportamento de controle durante a evolução temporal da mesma. Para isso, foi utilizado um cenário chamado **Colônia**. Trate-se de um cenário com uma densa quantidade de características distintas, devido a sua abrangência de aproximadamente 400 quilômetros quadrados em uma região urbana, e 24 horas de mobilidade. O intervalo considerado na avaliação da rede colônia possui duração de duas horas e foi analisada em períodos de 10 minutos, como pode-se observar na figura 8.

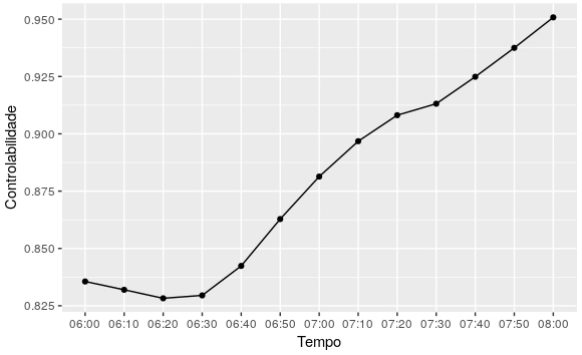


Figura 8: Percentual de Controlabilidade para o cenário Colônia V2I, **Fonte:** Autor

A figura 8 mostra os percentuais de controle obtidos a partir do cenário Colônia V2I. Foi considerado um período de duas horas dentre as 24 horas de mobilidades geradas no cenário, cada ponto representa um momento do intervalo: 06:00 às 08:00 (duas horas). Como se pode observar

no momento 10 (compreende o horário entre 07:20 e 07:30) houve uma diminuição da taxa de crescimento do percentual de controle, representando desta forma um ponto de disseminação ideal, ou seja, se no referido momento uma informação é inserida na rede o controle global será alcançado, necessitando de menos veículos em comparação com os demais momentos.

Tabela 3: Percentual de Controlabilidade para cada intervalo de tempo, **Fonte:** Autor

Momento	**06:00**	**06:10**	**06:20**	**06:30**	**06:40**	**06:50**	**07:00**	**07:10**	**07:20**	**07:30**	**07:40**	**07:50**	**08:00**
Veículos no Cenário	3437	4841	6247	8189	10600	12028	11886	12638	13584	13610	14293	12247	11323
Controlabilidade	0.835	0.831	0.828	0.829	0.842	0.862	0.881	0.896	0.908	0.913	0.924	0.937	0.950

A tabela 3 apresenta os percentuais de controle tempo a tempo, considerando uma evolução a cada 10 minutos, como se pode observar a quantidade de veículos na rede aumenta com o passar do tempo, contudo, às 07:00 nos dois últimos momentos, a topologia sofre uma diminuição de veículos. De acordo com os resultados obtidos, podemos afirmar que o cenário Colônia representa uma rede de difícil controle pois seria necessário uma grande quantidade de veículos de controle para controlar a rede completamente. O melhor percentual de controle encontrado está localizado às 07:30, caracterizando que no referido momento, existe uma diminuição na taxa de crescimento do percentual de controle, significando que para controlar a rede neste momento, exigiria um número de nós de controle inferior em relação aos demais momentos.

De acordo com os resultados, foi possível estudar o comportamento de controle das redes, assim como identificar os nós de controle, permitindo constatar que em certos momentos da evolução temporal das redes, foram obtidos melhores percentuais de controle. Assim, podemos aceitar a hipótese **H1**.

H1: A controlabilidade permite identificar nós de controle e definir o seu percentual em redes veiculares, evidenciando a complexidade de controle em intervalos temporais.

7. Conclusão e Trabalhos Futuro

Neste artigo, foram realizados o mapeamento de cinco topologias de redes reais: Colônia, 07-09h, 17-19h, A6, M40 e Colônia. Os resultados mostraram que a controlabilidade estrutural, utilizada no contexto de Redes Complexas, pode ser utilizada para identificar elementos influentes nas redes veiculares, essa informação pode ser útil para a disseminação de publicidade, alertas e auxiliar no projeto de redes. Os resultados mostraram que para a obtenção do controle total das VANETs aqui analisadas, é necessário cerca de 70% da totalidade de seus nós, sendo desta forma consideradas redes difíceis de serem controladas, a análise de controle utilizando o modelo agregado, resultou no melhor percentual de controle das redes avaliadas. O experimento realizado utilizando raios de alcance distintos, mostrou que o raio de comunicação sugerido por [Basagni e Lee, 2002], é também ideal para gerar uma topologia de redes que possui uma estrutura satisfatoriamente controlável. Para a rede V2I analisada, foi possível avaliar o controle para cada momento em um intervalo temporal, o cenário Colônia apresenta uma alta complexidade de controle considerando a métrica utilizada, a diversidade do cenário pode ter contribuído negativamente em termos de controlabilidade, visto que os nós de alto grau são evitados. O melhor resultado de controle no cenário Colônia foi de $92,4\%$, ou seja, seria necessário praticamente todos os nós da rede naquele momento específico para controlar a rede.

Como trabalhos futuros, pretende-se estudar: o uso da controlabilidade para definir novos protocolos de disseminação de dados em redes veiculares, a comparação entre os modelos de controlabilidade derivados do modelo proposto por [Liu et al., 2011], e realizar análise de controlabilidade em grafos temporais.

https://proceedings.science/p/106959?lang=pt-br

8. Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro concedido pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

Referências

Barabasi, A. L. (2003). Linked: How everything is connected to everything else and what it means for business, science and everyday life. *Plume*.

Basagni, S. e Lee, S. (2002). Special issue: Mobile ad hoc networking - research, trends and applications. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2(5):439–440. URL https://doi.org/10.1002/wcm.68.

Gramaglia, M., Trullols-Cruces, O., Naboulsi, D., Fiore, M., e Calderon, M. (2017). Madrid Traces. http://www.it.uc3m.es/madrid-traces/. Online; acessado 10 Outubro 2017.

Hopcroft, J. E. e Karp, R. M. (1971). A n5/2 algorithm for maximum matchings in bipartite. In *12th Annual Symposium on Switching and Automata Theory (swat 1971)*, p. 122–125.

Kalman, R. E. (1963). Mathematical Description of Linear Dynamical Systems. *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics Series A Control*, 1(2):152–192. ISSN 0887-4603. URL http://epubs.siam.org/doi/10.1137/0301010.

Kim, H. e Anderson, R. (2012). Temporal node centrality in complex networks. *Physical Review E*, p. 1–8.

Lebre, M.-A. e Mouel, F. L. (2017). Microscopic vehicular mobility trace of Europarc roundabout, Creteil, France. http://vehicular-mobility-trace.github.io/index.html\#dataset. Online; acessado 21 Setembro 2017.

Li, F., Wang, Y., e Carolina, N. (2007). Routing in Vehicular Ad Hoc Networks : A Survey. *Ieee Vehicular Technology Magazine*.

Lin, C.-T. (1974). Structural controllability. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 19(3):201–208. ISSN 0018-9286.

Liu, Y.-Y., Slotine, J.-J., e Barabasi, A.-L. (2011). Controllability of complex networks. *Nature*.

Macedo, R., Melo, R., Melniski, L., Santos, A., e Nogueira, M. (2013). Uma Avaliação Experimental de Desempenho do Roteamento Multicaminhos em Redes Veiculares. *Sbrc2013.Unb.Br*.

Nepusz, T. e Vicsek, T. (2012). Controlling edge dynamics in complex networks. *Nature Physics*, 8.

Newman, M. E. J. (2003). The Structure and Function of Complex Networks. *Siam Review*, 45. URL http://arxiv.org/abs/cond-mat/0303516.

Sandesh Uppoor, M. F., Diala Naboulsi (2016). Vehicular mobility trace of the city of Cologne, Germany. http://kolntrace.project.citi-lab.fr/\#. Online; acessado 10 de dezembro 2018.

Wang, C. e Tsai, H. (2013). Detecting urban traffic congestion with single vehicle. In *2013 International Conference on Connected Vehicles and Expo (ICCVE)*, p. 233–240.

Wu, H., Fujimoto, R., Guensler, R., e Hunter, M. (2004). Mddv: A mobility-centric data dissemination algorithm.

https://proceedings.science/p/106959?lang=pt-br