

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM MODELAGEM COMPUTACIONAL DE
CONHECIMENTO

FILIPE EMANUEL SILVA COSTA

**O USO DE CONTROLABILIDADE ESTRUTURAL NA AVALIAÇÃO DE
DISSEMINAÇÃO DE DADOS EM REDES VEICULARES**

Maceió-AL
Fevereiro de 2019

FILIPE EMANUEL SILVA COSTA

**O USO DE CONTROLABILIDADE ESTRUTURAL NA AVALIAÇÃO DE
DISSEMINAÇÃO DE DADOS EM REDES VEICULARES**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Modelagem Computacional de Conhecimento do Instituto de Computação da Universidade Federal de Alagoas.

Orientador(a): Raquel da Silva Cabral

Maceió-AL

Fevereiro de 2019

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico

Bibliotecária Responsável: Helena Cristina Pimentel do Vale

C837u Costa, Filipe Emanuel Silva.
O uso de controlabilidade estrutural na avaliação de disseminação de dados em redes veiculares / Filipe Emanuel Silva Costa. – 2019.
105 f. : il.

Orientadora: Raquel da Silva Cabral
Dissertação (mestrado em Modelagem Computacional de Conhecimento) –
Universidade Federal de Alagoas. Instituto de Computação. Maceió, 2019.

Bibliografia: f. 57-62.
Apêndices: f. 63-67.

1. Redes complexas - Controlabilidade. 2. Redes veiculares. 3. VANETs
4. Disseminação de dados. I. Título.

CDU: 004.7



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS/UFAL
Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional de Conhecimento
Avenida Lourival Melo Mota, Km 14, Bloco 12, Cidade Universitária
CEP 57.072-900 – Maceió – AL – Brasil
Telefone: (082) 3214-1364/1825



Membros da Comissão Julgadora da Dissertação de Mestrado de Filipe Emanuel Silva Costa, intitulada: “O uso de controlabilidade estrutural na avaliação de disseminação de dados em redes veiculares”, apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Modelagem Computacional de Conhecimento da Universidade Federal de Alagoas, em 26 de fevereiro de 2019, às 10h00min, na sala 207 do Instituto de Computação da Ufal.

COMISSÃO JULGADORA

Raquel da Silva Cabral

Profa. Dra. Raquel da Silva Cabral

Ufal – Arapiraca

Orientadora

AA

Prof. Dr. André Luiz Lins de Aquino

Ufal – Instituto de Computação

Eunice Palmeira da Silva

Profa. Dra. Eunice Palmeira da Silva

Ufal – Instituto Federal de Alagoas

Maceió, 26 de fevereiro de 2019.

Dedico este trabalho a minha família e amigos por sempre estarem comigo em todos os momentos.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por todas as bênçãos que me concedeu e por ter me guiado em todos os momentos da minha vida.

À minha esposa Bruna Damares, que sempre me apoiou e me deu forças para continuar, por todo seu carinho e cuidado, amo você.

A todos da minha família que sempre me deu forças em todas as etapas que já passei em minha vida, em especial: Dilian, minha querida mãe, que me direcionou no caminho que deveria trilhar, incentivou e sempre esteve ao meu lado; a Jorge, Vanessa, Allan, Allan Emanuel, Aninha, Sandra, Marcelo, Mirelly e Afrânio pelo incentivo e carinho; e a meu Pai Manoel Rocha (in memoriam) por todos os ensinamentos que deixou.

A todos que fazem parte do programa de pós-graduação em modelagem computacional do conhecimento (MOCOCO) e a Universidade Federal de Alagoas, todos os excelentes professores do programa, e em especial ao professor André Aquino, por suas contribuições na qualificação.

À minha querida orientadora, Profa. Dra. Raquel Cabral, por sua paciente e competente orientação. Sua atenção, presença e excelência em todos os momentos fizeram que eu buscasse o melhor de mim. Um verdadeiro exemplo de pessoa e de profissional.

Aos meus caros colegas e amigos da turma de modelagem, em especial a Yana, Igor, Fillipe, César e Fábio, por todo incentivo, auxílio e amizade.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), por todo apoio a mim proporcionado, muitíssimo obrigado.

Aos meus estimados amigos do Karitas Dei que sempre me apoiaram e me deram forças para continuar. A música é um dos melhores presentes que uma pessoa pode receber, uma verdadeira dádiva.

Por fim, agradeço a todos que me ajudaram direto ou indiretamente ao longo do mestrado, que Deus os abençoe grandemente.

*“Deem graças ao Senhor, porque ele é bom.
O seu amor dura para sempre!”
(Salmos 136:1)*

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 uma Rede Complexa para identificar nós influenciadores da rede. Para isso foi usada uma métrica de controlabilidade estrutural com a finalidade de avaliar a complexidade de controle das redes em intervalos temporais. A controlabilidade estrutural é uma métrica utilizada no contexto de Redes Complexas, sua finalidade é identificar vértices importantes para o controle de uma rede. Para a realização da avaliação, foram utilizados cinco cenários reais, sendo quatro cenários utilizando comunicação somente entre veículos (V2V) e um cenário utilizando comunicação de veículos para infraestruturas (V2I). A análise da controlabilidade nas redes veiculares foi executada de forma segmentada, permitindo avaliar cada momento da linha do tempo em particular. Conjuntamente, foi realizada uma análise de controlabilidade considerando diferentes raios de comunicação entre veículos, objetivando compreender a influência da topologia no controle das redes. A análise também foi realizada considerando um grafo agregado para cada cenário. Os resultados revelaram como se deu o comportamento de controle de cada cenário, considerando a evolução temporal da rede. Além disso, foi possível compreender que existem momentos em que a rede possui um melhor controle proporcionando um momento apropriado para disseminação de informação. À vista disso, 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-chaves: Redes Complexas; Controlabilidade; Redes Veiculares; VANETs; Disseminação de dados.

ABSTRACT

Vehicle 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 a Complex Network to identify nodes influencing the network. For this, a structural controllability metric was used in order to evaluate the complexity of network control at time intervals. Structural controllability is a metric used in the context of Complex Networks, its purpose is to identify important vertices for the control of a network. In order to carry out the evaluation, five real scenarios were used, four scenarios using communication between vehicles only (V2V) and a scenario using vehicle communication for infrastructures (V2I). The analysis of the controllability in the vehicular networks was executed in a segmented way, allowing to evaluate each moment of the particular time line. Together, a controllability analysis was performed considering different radii of communication between vehicles, aiming to understand the influence of the topology in the control of the networks. The analysis was also performed considering an aggregate graph for each scenario. The results revealed how the control behavior of each scenario occurred, considering the temporal evolution of the network. In addition, it was possible to understand that there are times when the network has a better control providing an appropriate moment for dissemination of information. In view of this, it was found that to obtain total control of the networks analyzed here, it is necessary to reach about 70% of the total nodes of the network.

Keywords:Complex Networks; Controlability; Vehicle Networks; VANETs; Data Dissemination.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Rede de amizades numa escola secundária americana, Fonte: James Moody.	14
Figura 2 – Rede Veicular, Fonte: (ALVES; CAMPBELL, 2009)	18
Figura 3 – Exemplos de representação (METZ et al., 2007).	20
Figura 4 – Exemplo de Grafo não-direcionado, Fonte: Autor.	21
Figura 5 – Grau do Vértice, Fonte: Autor.	21
Figura 6 – Exemplo de Grafo Direcionado, Fonte: Autor.	22
Figura 7 – Exemplo de Grafo Bipartido, Fonte: Autor	22
Figura 8 – Exemplo de grafo agregado. Autor: (KIM; ANDERSON, 2012)	23
Figura 9 – Pontes de Königsberg, Fonte: (NEWMAN, 2003)	24
Figura 10 – Diferentes aplicações de Redes Complexas	25
Figura 11 – Exemplo de controle em uma rede simples, Fonte: (LIU; SLOTINE; BARABASI, 2011a).	28
Figura 12 – Exemplo de Emparelhamento, Fonte: Autor.	30
Figura 13 – Exemplo de caminho alternante, Fonte: Autor.	30
Figura 14 – Exemplo de caminho de aumento, Fonte: Autor.	31
Figura 15 – Grafo com emparelhamento maximal, Fonte: Autor.	31
Figura 16 – Grafo com emparelhamento máximo, Fonte: Autor.	31
Figura 17 – Sistema Controlável - Adaptado de Liu et al. (LIU; SLOTINE; BARABASI, 2011a)	37
Figura 18 – Exemplo 1 - Identificação de nós de controle, Fonte: Autor	43
Figura 19 – Passo 1 - Definição do emparelhamento e do caminho de aumento, Fonte: Autor	43
Figura 20 – Passo 2 - Aumento do emparelhamento, Fonte: Autor	44
Figura 21 – Passo 3 - Identificação do nó de controle, Fonte: Autor	44
Figura 22 – Creteil, France Fonte: (LEBRE; MOUEL, 2017)	45
Figura 23 – Rodovias A6 e M40, Fonte: (OpenStreetMap contributors, 2018)	46
Figura 24 – Colônia, Alemanha Fonte: (UPPOOR DIALA NABOULSI, 2016)	46
Figura 25 – Fluxograma de passos realizados, Fonte: Autor.	47
Figura 26 – Estabelecimento de uma conexão L_l entre os veículos V_i e V_j em uma rede veicular com raio de comunicação R , Fonte: Autor.	47
Figura 27 – Diagrama de particionamento, Fonte: Autor.	48
Figura 28 – Percentual de Controlabilidade para cada intervalo de tempo, Fonte: Autor.	51
Figura 29 – Percentual de Controlabilidade considerando diferentes raios de comunicação sugeridos por BASAGNI; LEE	52
Figura 30 – Percentual de Controlabilidade considerando diferentes raios de comunicação.	53
Figura 31 – Percentual de Controlabilidade para o cenário Colônia V2I, Fonte: Autor	55
Figura 32 – Nuvem de palavras, Fonte: Autor.	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Trabalhos Relacionados à Disseminação de Dados	36
Tabela 2 – Controlabilidade de Redes Veiculares	49
Tabela 3 – Controlabilidade de redes veiculares (Agregado).	50
Tabela 4 – Características e controlabilidade de redes reais, Fonte: Autor	54
Tabela 5 – Percentual de Controlabilidade para cada intervalo de tempo, Fonte: Autor	55
Tabela 6 – Método 1 ; Passo 1	60

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Definição do Problema	15
1.2	Objetivos	15
1.3	Contribuições	15
1.4	Organização do Trabalho	16
2	FUNDAMENTOS	17
2.1	VANETs	17
2.1.1	Características das Redes Veiculares	18
2.2	Teoria dos Grafos	20
2.2.1	Grafo Agregado	23
2.3	Distância Euclidiana	24
2.4	Redes Complexas	24
2.4.1	Métricas de Centralidade	26
2.5	Controlabilidade de Redes Complexas	27
2.5.1	Emparelhamento em Grafos	29
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	32
3.1	Disseminação em Redes Complexas	32
3.1.1	Identificação de Elementos Disseminadores	33
3.2	Disseminação de Dados em VANETs	34
3.2.1	Protocolos de Comunicação Baseados em métricas de Redes Complexas	34
4	CONTROLABILIDADE ESTRUTURAL	37
4.0.1	Controlabilidade por Emparelhamento Máximo	39
5	MÉTODO	45
5.0.1	Cenários	45
5.0.2	Abordagem Experimental	47
5.0.3	Informações Adicionais	48
6	RESULTADOS	49
7	CONCLUSÃO	57
A	APÊNDICE: MÉTODOS DE REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	58
A.1	Metodologia da Revisão Bibliográfica	58
A.2	Revisão Cronológica	59

B	APÊNDICE: ALGORITMOS E FERRAMENTAS UTILIZADAS . . .	61
B.1	Algoritmo de Mapeamento	61
B.2	Algoritmo de Particionamento	62
B.3	Ferramenta Analítica de Controlabilidade	62
B.3.1	Ferramenta de Otimização	62
	REFERÊNCIAS	63

1 INTRODUÇÃO

Uma Rede Veicular ad-hoc (VANET) pode ser definida como um conjunto de veículos que utilizam comunicação sem fio para trocar informações com os integrantes da rede durante o seu deslocamento. 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). Neste contexto, as VANETs permitem a comunicação, tanto de veículos para veículos (vehicle-to-vehicle - V2V), quanto de veículos para uma infraestrutura (vehicle-to-infrastructure - V2I), proporcionando a disseminação de dados. (WANG; TSAI, 2013).

A disseminação consiste em enviar dados de um elemento de origem a um destino, enquanto são levados em conta requisitos de qualidade das aplicações, 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 constantemente estudada, visto que não é uma tarefa simples, pois as VANETs possuem vários desafios, entre eles pode-se observar a cobertura, a densidade dinâmica, as falhas na comunicação V2V devido a alta mobilidade e a comunicação de curto alcance (WU et al., 2004). Na atualidade, diversos pesquisadores tratam os desafios encontrados na disseminação utilizando novos protocolos de roteamento/disseminação de informações, avaliações de infraestrutura e topologia nas redes. Existem diversas características neste tipo de rede que tornam a disseminação mais complexa, por exemplo, a topologia sofre modificações em função da mobilidade alta, dado que existem diversos veículos em diferentes velocidades e posicionamentos, podendo ocorrer em diferentes instantes de tempo.

Nesse sentido, as redes podem ser representadas através de um grafo, na qual 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 os elementos, com finalidade de solucionar problemas específicos, 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 (todos os nós com mesmo grau, por exemplo). Atualmente, existem várias redes reais que são estudadas com o propósito de compreender seus comportamentos e topologia, tais como, a rede social representada pela figura 1, cadeias alimentares, citações de trabalhos acadêmicos, circuitos elétricos, redes de transporte (veicular, ferroviário e aéreo) entre outros (LIU; SLOTINE; BARABASI, 2011a).

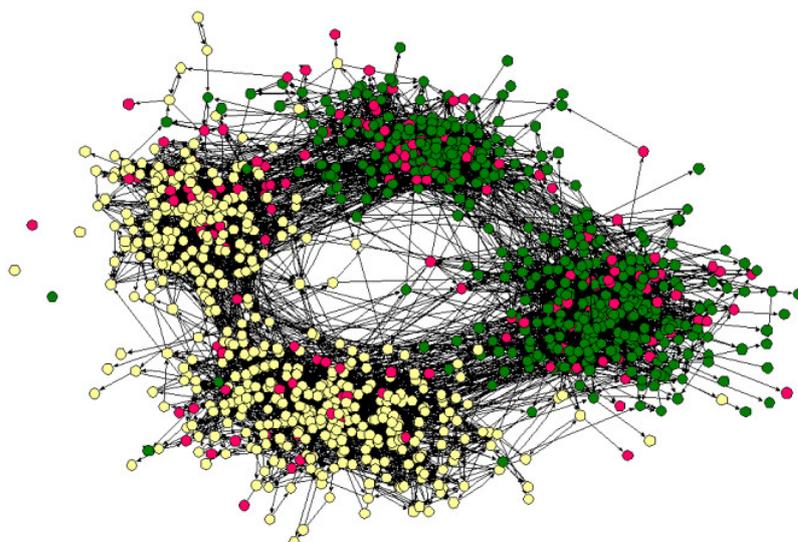


Figura 1 – Rede de amizades numa escola secundária americana, **Fonte:** James Moody.

Modelar as VANETs como grafos, permite avaliar as interações entre veículos e como elas impactam na rede como um todo (WANG; TSAI, 2013). Essa avaliação, pode ser realizada com base nas métricas e ferramentas encontradas na teoria de Redes Complexas. 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. Diversas medidas são utilizadas para entender o seu funcionamento, como as medidas de centralidade, as quais podem identificar vértices ou arestas que são importantes dentro da rede, e a controlabilidade, que aponta os nós controláveis.

É importante ressaltar que, os autores (LIU; SLOTINE; BARABASI, 2011a) discutem que o fluxo de informação em uma rede é o que permite aos vértices renovarem seus estados. Os estados são informações pré-definidas e comuns para cada elemento de uma rede. A principal parte da discussão seria entender quais fatores influenciam no comportamento da rede, ou seja, como a informação é compartilhada, e como os vértices recebem esta informação e atualizam seus “estados”.

O conceito de controlabilidade de rede é considerado novo e ainda apresentará avanços significativos, podendo melhorar o entendimento sobre a dinâmica das redes. Entretanto, a controlabilidade estrutural é conceituada habitualmente como uma métrica utilizada para estimar a quantidade mínima de nós que se deve excitar para se ter controle global de uma rede (LIU; SLOTINE; BARABASI, 2011a).

1.1 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 $V = \{v_1, v_2, v_3 \dots v_{MAX}\}$ e estão presentes na topologia rodoviária. As relações entre os veículos podem ser representadas por $L = \{l_1, l_2, l_3 \dots l_{MAX}\}$, sendo essas ligações definidas pelo raio de alcance de cada veículo.

Desta forma, temos o seguinte questionamento:

Qual o melhor momento para disseminar dados em uma VANET garantindo que a maior quantidade de veículos seja alcançada?

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, utilizamos o percentual de nós de controle presentes na rede, para determinar o melhor instante em que a rede pode ser controlada.

1.2 Objetivos

Este trabalho tem como proposta aplicar o modelo de controlabilidade estrutural em grafos originados a partir do mapeamento de VANETs, com a finalidade de avaliar a topologia e o controle dessas redes, assim como aceitar a hipótese levantada.

Tem-se como objetivos:

- Definir nós de controle em VANETs, utilizando o modelo de controlabilidade de (LIU; SLOTINE; BARABASI, 2011a);
- Compreender o comportamento das VANETs com base na controlabilidade estrutural, como por exemplo o fluxo de informações e a disseminação de dados.

1.3 Contribuições

Nesta seção, são apresentadas as contribuições deste trabalho. A contribuição efetiva deste trabalho está na utilização de um modelo consolidado de controlabilidade estrutural, para identificar nós controláveis em redes veiculares, além disso, temos:

- A realização de uma análise comportamental das redes veiculares mapeadas como Redes Complexas em relação a disseminação de dados e dinâmica das redes;
- O uso de controlabilidade estrutural de Redes Complexas no contexto de redes veiculares;
- Identificação dos nós de controle em redes veiculares, para definir o percentual de controle da rede;

Os resultados obtidos nesta dissertação foram publicados no seguinte evento:

- ANÁLISE DE CONTROLABILIDADE EM REDES VEICULARES. Em: L Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional (SBPO). Rio de Janeiro, 2018 (COSTA, 2018).

1.4 Organização do Trabalho

Os demais capítulos estão estruturados da seguinte forma: no Capítulo 2 é apresentada a fundamentação do trabalho; no Capítulo 3 é apresentada a revisão bibliográfica juntamente com os trabalhos relacionados; no Capítulo 4 é apresentado o modelo de Controlabilidade Estrutural; no Capítulo 5 são apresentados os métodos e materiais utilizados no presente trabalho; no Capítulo 6 são apresentados os resultados e, por fim, no Capítulo 7 é apresentada a conclusão do trabalho e os direcionamentos para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTOS

Neste capítulo, são abordados os conceitos relacionados com as atividades desenvolvidas neste trabalho. Abordaremos inicialmente, os conceitos e as principais características de VANETs. Em seguida, trataremos acerca da Teoria dos Grafos, incluindo uma seção sobre grafos agregados e emparelhamentos em grafos. Neste capítulo também são apresentados os conceitos a respeito da Teoria das Redes Complexas, incluindo uma seção sobre controlabilidade estrutural em Redes Complexas.

2.1 VANETs

Segundo LI; WANG; CAROLINA(LI; WANG; CAROLINA, 2007), 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. As VANETs são consideradas novas tecnologia para integrar a capacidade de redes sem fio de nova geração para veículos. 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. A figura 2, exemplifica os principais tipos de comunicação utilizados no contexto de redes veiculares. A comunicação entre os veículos é chamada de V2V (Vehicle-to-Vehicle), enquanto que na comunicação entre veículos e infraestruturas são chamadas de V2I (veículo para infraestrutura). As infraestruturas, são pontos de acesso (antenas), dispostas ao longo das rodovias. Também há comunicação híbrida na qual existe comunicação tanto de veículo para veículo como de veículo para infraestrutura. A conexão entre os veículos, se dá através de um raio de comunicação respeitando o modelo de comunicação adotado para a determinada rede.

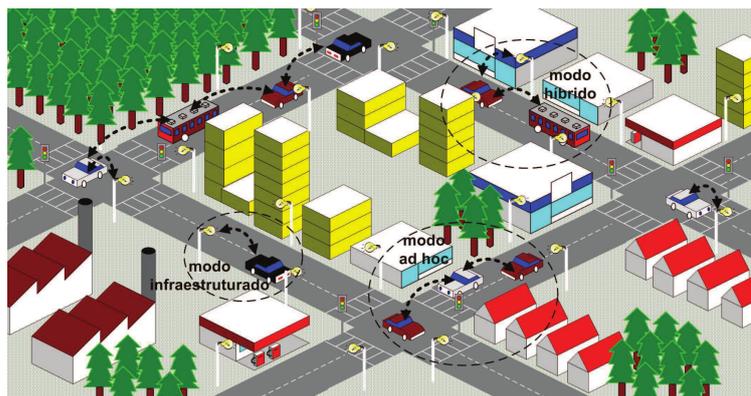


Figura 2 – Rede Veicular, **Fonte:** (ALVES; CAMPBELL, 2009)

2.1.1 Características das Redes Veiculares

Em uma rede veicular os veículos são os principais componentes, e são chamados de nós. Eles possuem uma interface de comunicação sem fio para enviar, receber ou trocar informações. Segundo (WANG; TSAI, 2013), as Redes Veiculares possuem características importantes, são elas:

- **Densidade da rede:** a densidade de uma rede veicular pode variar em dois extremos, de muito alta, a exemplo de um engarrafamento ou horários de maior movimentação no trânsito, ou muito baixa, como em horários noturnos ou dias que possuem menor movimentação no trânsito;
- **Escala da rede:** a escala de uma rede veicular pode abranger áreas de grande densidade, como os grandes centros de cidades ou rodovias movimentadas;
- **Mobilidade:** essa é uma característica muito importante em uma rede veicular, pois os veículos (nós) estão sempre se movimentando em variadas velocidades e direções;
- **Topologia:** a topologia de uma rede veicular sofre várias alterações devido a alta mobilidade dos veículos, desta forma a topologia muda muito rapidamente. O tempo de comunicação entre os veículos geralmente é muito curto, por exemplo: em uma rodovia veículos em direções contrárias podem se comunicar quando estiverem no mesmo raio de comunicação, mas a partir do momento em que os carros começam a se distanciar, a comunicação não será preservada pois os veículos não estarão ao alcance um do outro;
- **Desconexões:** como visto nas características anteriores, uma rede veicular possui uma topologia muito dinâmica, a alta mobilidade e vários outros fatores podem causar desconexões frequentes dos veículos;
- **Conectividade:** em uma rede veicular as rápidas mudanças da topologia, podem levar a fragmentação frequente nas redes, desta forma o tempo de vida de uma ligação pode precisar ser prolongado o quanto for possível. O alongamento do tempo de ligação entre

dois veículos pode ser feito através do aumento da potência de transmissão, porém esta solução pode diminuir a autonomia do veículo por precisar gastar mais energia.

As VANETs possuem uma variedade de aplicações, como monitoramento de tráfego cooperativo (BAUZA; GOZALVEZ, 2012), controle de fluxos de tráfego (BRENNAND et al., 2015), prevenção de colisões (WANG; TSAI, 2013), serviços de informações e informações em tempo real para desvio de rotas (ACER et al., 2011). As aplicações referentes a redes veiculares podem ser classificadas como: segurança no trânsito, entretenimento e assistência ao motorista. As aplicações relacionadas a segurança, possuem como principal objetivo divulgar rapidamente as informações para que os condutores tenham tempo hábil para reagir a determinada situação de perigo, prevenindo assim situações de risco à vida. As informações divulgadas pela classe de segurança são pertinentes a acidentes, ocorrências no trânsito e sobre condições adversas de ruas e estradas. Na classe de entretenimento a Internet se destaca como veículo de compartilhamento de conteúdos como músicas, filmes e imagens. Por fim, a classe de assistência ao condutor do veículo pode apresentar por exemplo: informações turísticas, localização de postos de abastecimento e etc.

Para as VANETs, a disseminação de dados é um processo muito importante pois qualquer falha ou problema de comunicação, pode impossibilitar que algum veículo receba a informação. Um exemplo de disseminação de dados, seria o envio de mensagens na ocorrência de um acidente, encorajando os condutores a reduzir a velocidade dos veículos e, também, comunicando sobre outras rotas possíveis a serem tomadas de forma a evitar a região onde o acidente ocorreu. Diante disso, os benefícios incluem a melhora no fluxo dos veículos e um serviço de emergência mais eficiente, atendendo de forma ágil os possíveis feridos.

Um dos problemas enfrentados pelos condutores no trânsito é o acidente automobilístico. Um dos problemas que as redes veiculares podem tratar já que a comunicação entre os veículos pode prevenir colisões. De acordo com dados da Organização Mundial de Saúde (OMS, 2017), todos os anos aproximadamente 1,3 milhões de pessoas morrem vítimas da imprudência ao volante. Dos sobreviventes, cerca de 50 milhões vivem com sequelas. O levantamento foi feito em 178 países. Além disso, o trânsito é a nona maior causa de mortes do planeta. O congestionamento de veículos é outro grande problema dos centros urbanos. Hoje devido a alta quantidade de veículos. Os condutores perdem muito tempo presos em congestionamentos, uma alta quantidade de combustível é gasta, o meio ambiente sofre com os gases poluentes emitidos pelos veículos e ainda destaca-se a degradação das ruas ou rodovias gerando despesas aos cofres públicos (BAUZA; GOZALVEZ, 2013).

As VANETs têm atraído interesses de pesquisas da academia e da indústria. As redes veiculares surgiram a partir da ideia de que com o aumento da segurança dos veículos, seria possível diminuir o número de acidentes, reduzindo a quantidade de mortos e feridos, seja em vias urbanas ou em rodovias. Além disso, existem outros tipos de aplicações que objetivam melhorar a fluidez do trânsito, diminuindo engarrafamentos ou informando aos motoristas vias

de circulação com melhores condições de tráfego, fornecendo conectividade à Internet, entre várias outras aplicações (YOUSEFI; MOUSAVI; FATHY, 2006). Desta forma percebemos a importância da comunicação entre veículos, sendo muito importante a realização de estudos que envolvem disseminação de dados para aperfeiçoar os métodos de comunicação entre os veículos.

Os conceitos abordados nesta seção auxiliam no tratamento dos desafios propostos assim como na realização de análises de disseminação de dados em redes veiculares e de sua estrutura. Neste trabalho buscamos compreender a topologia e o fluxo de informações das redes veiculares mapeando-as em uma Rede Complexa com finalidade da utilização das métricas e medidas que esta dispõe.

2.2 Teoria dos Grafos

A partir da teoria dos grafos percebemos as mais diversas aplicações, na maior parte das vezes, na representação de algum sistema em que indivíduos participantes interagem entre si utilizando relações. As representações são diversas, desde o mapeamento de rotas de voos até as redes de computadores e redes biológicas.

Definição 1: (Grafo) Um grafo é dado por um par $G = (V, E)$, em que V representa um conjunto arbitrário de vértices, e E são subconjuntos de V conhecidos como arestas.

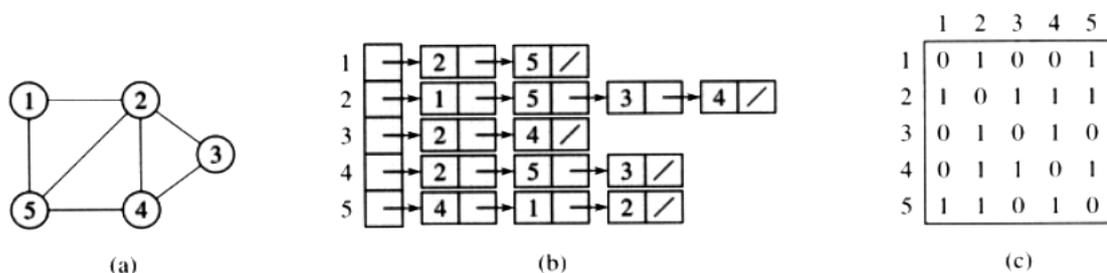


Figura 3 – Exemplos de representação (METZ et al., 2007).

Existem três formas mais utilizadas para descrever um grafo, como se pode observar na figura 3, são elas: representação gráfica (a), listas de adjacências (b) e matrizes de adjacência (c). Neste trabalho utilizamos as representações gráficas e matriz de adjacência.

No estudo da teoria dos grafos, encontramos várias características e formas de classificação que definem as diferentes estruturas de grafos, aqui são apresentados conceitos utilizados neste trabalho.

Definição 2: (Grafo não direcionado) Um grafo não direcionado G é um par (V, A) , onde o conjunto de arestas A é constituído de pares de vértices não ordenados.

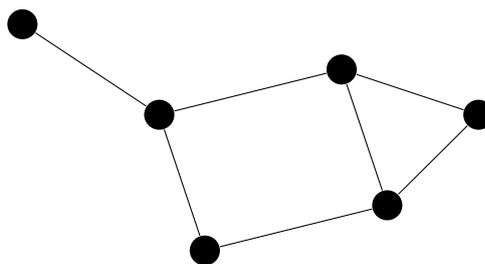


Figura 4 – Exemplo de Grafo não-direcionado, **Fonte:** Autor.

O grafo é uma das formas de representarmos relações entre elementos, como está representado na figura 4, e é normalmente utilizado no estudo das redes (redes aéreas, redes de computadores, redes sociais, redes de citações e etc), ou seja, pode-se resolver diversos problemas que envolvam relações entre elementos, por exemplo, relações em uma cadeia alimentar entre espécies, representar indivíduos influentes em uma organização, resultados em torneios, modelar relações entre pessoas, colaboração entre pesquisadores, chamadas telefônicas, mapas rodoviários e etc. Neste trabalho, o grafo é utilizado para representar as relações entre veículos na topologia rodoviária.

Definição 3: (Grau) O grau de um vértice v representa o número de arestas que incidem em v , será denotado por $g_G(v)$. Como mostrado na figura 5.

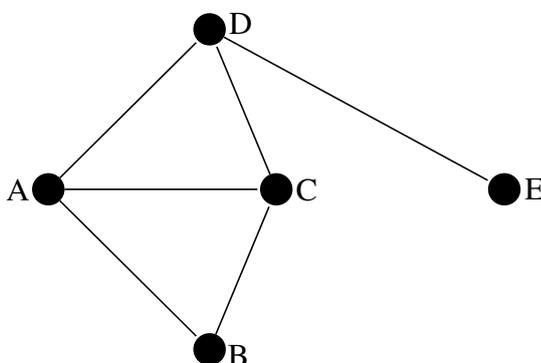


Figura 5 – Grau do Vértice, **Fonte:** Autor.

A partir da definição pode-se afirmar que o grau do vértice A do grafo representado na figura 5 é igual a três. O grau é uma característica importante a ser mencionada pois revela a importância de determinado elemento presente na rede, isto é, quanto maior o grau de um vértice, maior sua importância, para mais, os vértices que possuem um valor de grau alto, podem ser chamados de hubs.

Definição 4: (Grafo Direcionado) Um grafo direcionado G é um par (V, A) , onde V é um conjunto finito de vértices e A é uma relação binária em V . Exemplo: figura 6.

Em outras palavras, um Grafo é dito direcionado ou Digrafo, quando o sentido das ligações entre os vértices é considerado. Neste caso denomina-se de arco a aresta direcionada.

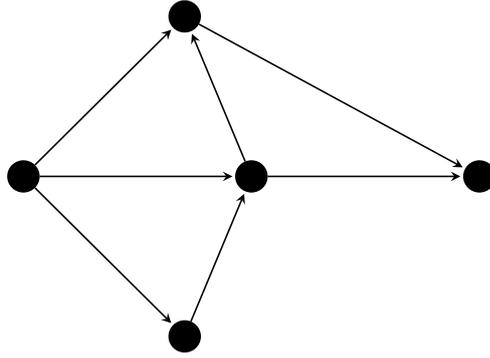


Figura 6 – Exemplo de Grafo Direcionado, **Fonte:** Autor.

Quando se descreve um grafo orientado, usa-se uma seta apontando de um vértice para outro. Um grafo orientado pode conter laços e múltiplas arestas orientadas, que iniciam e terminam nos mesmos vértices. Também é possível, que as arestas orientadas que conectem os vértices em ambos os sentidos. Quando um grafo orientado não tem laços nem arestas orientadas múltiplas, ele é chamado de grafo orientado simples. No grafo direcionado, temos os graus de entrada (in) e graus de saída (out), o grau de entrada refere-se ao número de arestas que chegam a um determinado vértice e o grau de saída se refere ao número de arestas que saem de um determinado vértice. Os grafos direcionados geralmente são utilizados no contexto de redes veiculares para representar as trajetórias na cidade. Neste trabalho, os grafos direcionados foram utilizados para representar a comunicação entre os veículos.

Definição 5: (Grafo Bipartido) Um grafo bipartido é o grafo cujos vértices podem ser divididos em dois subconjuntos, digamos A e B , de tal modo que não há arestas entre vértices de um mesmo subconjunto, ou (em outras palavras) de modo que dois vértices do mesmo conjunto não sejam adjacentes. Assim como apresentado na figura 7.

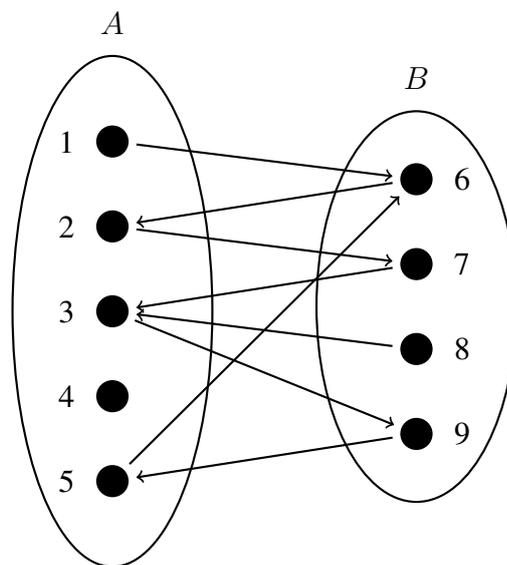


Figura 7 – Exemplo de Grafo Bipartido, **Fonte:** Autor

Na figura 7 temos duas partições, $A = 1, 2, 3, 4, 5$ e $B = 6, 7, 8, 9$, perceba que não há relação entre os vértices que estão em cada partição.

O conceito de grafo bipartido é utilizado no algoritmo de Hopcroft-Karp (emparelhamento máximo), que será apresentado no capítulo 4.

2.2.1 Grafo Agregado

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 $G_{0,t}^D = (V, E_{0,T})$, 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 $(u, v)_{i,j} \in E_{0,T}$ existe entre vértices u e v em um intervalo de tempo $[i, j]$, tal que $i \leq T$ e $j \geq 0$.

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 snapshot (ou janela de tempo), T/n , apresentado em alguma unidade de tempo, como segundos ou horas.

Segundo (KIM; ANDERSON, 2012), uma rede dinâmica pode ser representada como uma série de grafos estáticos G_1, G_2, \dots, G_N . A notação $G_t (1 \leq t \leq n)$ representa o grafo agregado que consiste de um conjunto de vértices V e um conjunto de arestas E_t onde uma aresta $(u, v) \in E_t$ existe somente se uma aresta temporal $(u, v)_{i,j} \in E_{0,T}$ 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 o t -ésimo snapshot¹ temporal de uma rede dinâmica $G_{0,t}^D$ durante a t -ésima janela de tempo.

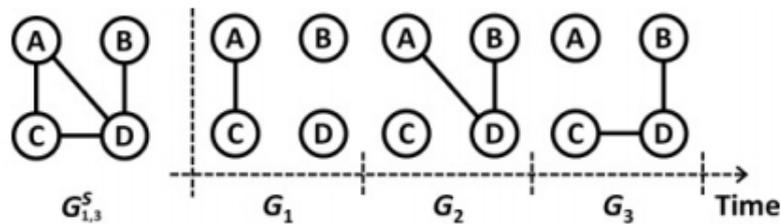


Figura 8 – Exemplo de grafo agregado. Autor: (KIM; ANDERSON, 2012)

A figura 8, exemplifica um grafo agregado, onde $G_{1,3}^S$ representa o grafo agregado e G_1 , G_2 e G_3 representam cada snapshot considerado ao longo de um determinado intervalo. Neste trabalho, a métrica de controlabilidade, também foi aplicada a grafos agregados com a finalidade de compreender seu comportamento de controle.

¹ O termo *snapshot*, representa os estados do sistema em pontos particulares no tempo (KIM; ANDERSON, 2012).

2.3 Distância Euclidiana

A medida da distância Euclidiana pode ser usada para obter a distância entre dois objetos. O cálculo da distância entre objetos é um dos métodos mais utilizados em várias áreas do conhecimento, inclusive para indicar a distância entre dois elementos e a partir desta, relacioná-los. A distância Euclidiana, é provavelmente a mais conhecida e usada medida de distância. Ela simplesmente é a distância geométrica no espaço multidimensional. Ela é calculada da seguinte forma:

$$d_{12} = \sqrt{(x_{11} - x_{21})^2 + (x_{12} - x_{22})^2} \quad (1)$$

A equação 1, representa o cálculo da distância entre dois objetos (1,2).

Neste trabalho, a distância Euclidiana foi utilizada para indicar se dois ou mais veículos estão próximos um do outro, de modo que estabeleçam conexão, respeitando uma distância pré-definida. Ou seja, os grafos foram formados a partir do raio de comunicação pré-estabelecido entre veículos.

2.4 Redes Complexas

O estudo de redes representadas como grafos teve início em 1735, quando Euler propôs uma solução para o problema das pontes de Königsberg, originando assim, a teoria dos grafos (METZ et al., 2007). O problema consistia em atravessar todas as pontes sem repetir nenhuma delas. Euler conseguiu provar que não existia nenhum caminho possível para isso, por meio de um raciocínio muito simples: transformou os caminhos em retas e suas intersecções em pontos (Grafo), criando, possivelmente, o primeiro grafo com 4 vértices e 7 arestas da história, assim como é possível visualizar na figura 9.

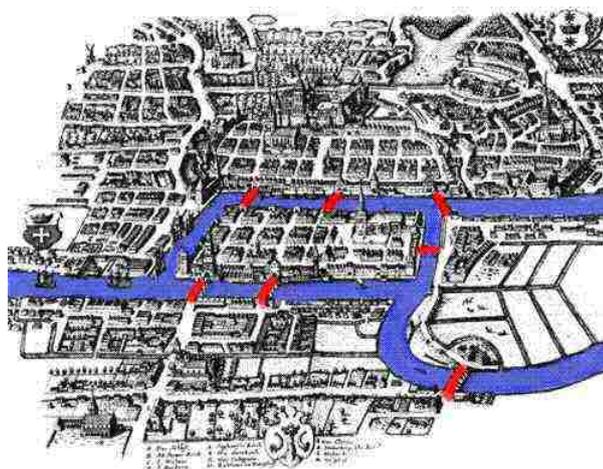
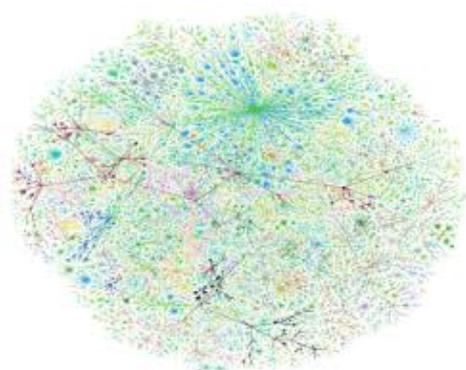
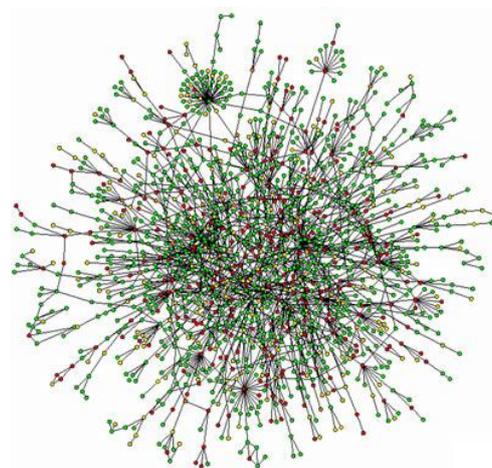


Figura 9 – Pontes de Königsberg, **Fonte:** (NEWMAN, 2003)

Segundo (BARABASI, 2003), o termo Redes Complexas refere-se a um grafo que apresenta uma estrutura topográfica não trivial, composto por um conjunto de vértices (nós) que são interligados por meio de arestas. As Redes Complexas utilizam-se do formalismo dos grafos, acrescentando métodos e medidas em sistemas reais (NEWMAN, 2003). As relações entre os componentes (vértices e arestas) do grafo não seguem nenhum padrão específico, podendo reproduzir tanto grafos totalmente aleatórios, como grafos que seguem uma estrutura bem regular (todos os nós com mesmo grau, por exemplo). A análise de apenas um componente não levaria a nenhuma conclusão sobre o todo, analisar um ser humano, por exemplo, não permite que se conheça toda a sociedade em que ele vive. A partir desse argumento vem a necessidade de se desenvolver modelos de redes para estudar as relações, graus e outras métricas do grafo, e não apenas de um indivíduo (COSTA et al., 2007).



(a) Representação da estrutura da Internet,
Fonte: (NEWMAN, 2003)



(b) Estrutura das interações entre proteínas,
Fonte: (BARABASI, 2003)

Figura 10 – Diferentes aplicações de Redes Complexas

Atualmente, a teoria das Redes Complexas é bem definida e possui diversos aspectos do mundo real. as redes são representadas a partir de analogias para a resolução de problemas específicos, é possível, por exemplo, modelar toda a estrutura topológica de uma grande rede de computadores tal como a Internet, representada pela figura 10a. Dessa forma, os computadores conectados à Internet referem-se aos vértices da rede, enquanto que os cabos e meios de transmissão representam as arestas do grafo. Outras analogias pode ser também utilizadas, tais como uma rede de citações, interações entre proteínas representadas pela figura 10b, relações sociais entre grupos de pessoas, redes de negócios entre companhias, redes neurais, redes de transporte urbano, cadeia alimentar, entre outras. Com a evolução tecnológica, mais especificamente no poder de processamento dos computadores, o estudo das redes tornou-se promissor, permitindo novas descobertas na área.

É necessário lembrar que nem todo grafo pode ser considerado uma rede complexa, pois essa classificação só é possível se o grafo apresentar algumas propriedades topográficas que não

estão presentes em grafos simples. A topologia e a evolução das redes do mundo real apresentam propriedades organizacionais bastante robustas e particulares. Essa é a principal razão pela qual as redes passaram a ser chamadas de redes complexas. De forma mais simples, pode-se dizer que as redes complexas são estruturas que não seguem um padrão regular. Porém, na literatura, não existe um entendimento que identifique exatamente o que é um padrão regular. As Redes Complexas apresentam características específicas que não estão presentes em redes regulares. Essas características revelam como as redes são formadas e como suas estruturas podem ser explorada na análise de um determinado problema.

A análise das Redes Complexas, é realizada a partir de métricas e ferramentas que foram desenvolvidas ao longo dos anos. Essas métricas nos permite conhecer a importância de certos elementos que constituem uma determinada rede. Conhecer o impacto que os valores das métricas fornecem sobre o desempenho de uma rede em funcionamento, é útil para o processo de análise de seu comportamento. Na próxima seção, são apresentados alguns exemplos de métricas utilizadas em redes complexas.

2.4.1 Métricas de Centralidade

As métricas de centralidade quantificam o quão um vértice é central ou importante dentro de uma rede (NEWMAN, 2010). Aqui, são apresentadas as principais métricas de centralidade.

A centralidade de grau (Degree), consiste em quanto um vértice está conectado. A centralidade, para um único vértice, refere-se ao seu grau, que é obtido pelo número de relações que são incidentes sobre ele. Assim, obtém-se a centralidade de grau de um vértice por meio da equação:

$$D_v = \text{Grau}(v) \quad (2)$$

Closeness centrality ou centralidade de aproximação C_v , tem como base a soma das distâncias de um vértice em relação aos demais vértices de um grafo. Em outras palavras, mais importante que ter muitas ligações é não estar tão longe do restante dos elementos. Também pode ser representada pela equação:

$$C_v = \frac{1}{\sum_{u \in V} \text{dist}(v, u)} \quad (3)$$

Betweenness centrality ou centralidade de intermediação B_v . O betweenness baseia-se na ideia de que um vértice é mais central a medida que mais caminhos mínimos passam por ele. Nesse cálculo são considerados os caminhos mínimos entre todos os pares de vértices da rede. Seja $G(V, E)$ um grafo G composto de um conjunto de vértices V , um conjunto de arestas E , e ainda, i, j e u vértices distintos de G . Seja $|\sigma_{i,j}|$ o número de caminhos mínimos entre i e j , e

$|\sigma_{i,j}, u|$ o número desses caminhos que passam por u . A centralidade de intermediação para o vértice u é representada pela equação:

$$B_u = \sum_{i \in V} \sum_{j \in V \setminus i} \frac{\sigma_{ij,u}}{\sigma_{ij}} \quad (4)$$

2.5 Controlabilidade de Redes Complexas

Como visto na seção anterior, as Redes Complexas possuem diversas aplicações. A medida que os estudos dessas redes foram se aprofundando, pesquisadores começaram a questionar se era possível “controlar” o comportamento das redes, e uma vez que o fosse possível, como fazê-lo (LIU; SLOTINE; BARABASI, 2011a). Com base nisso, os autores (LIU; SLOTINE; BARABASI, 2011a) 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:

$$\frac{dx(t)}{dt} = Ax(t) + Bu(t) \quad (5)$$

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; SLOTINE; BARABASI, temos a seguinte definição:

Definição 6: (Controlabilidade) Um sistema é dito controlável se existe um sequência de entradas capaz de transferir o estado inicial $x(t_0)$ do sistema para qualquer outro estado $x(t_f)$ 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 5 é dito ser controlável, se existe um sequência de entradas capaz de transferir o estado inicial $x(t_0)$ do sistema, para qualquer outro estado $x(t_f)$ em um tempo finito. O que é possível, se e somente se, a matriz de controlabilidade, representada pela equação 6, obtiver *rank* completo.

$$C = (B, AB, A^2B, \dots, A^{N-1}B) \quad (6)$$

Ou seja, a condição de *rank* representada pela equação 7, deve ser satisfeita para que o sistema seja considerado controlável.

$$\text{rank}(C) = N \quad (7)$$

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 7 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.

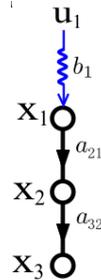


Figura 11 – Exemplo de controle em uma rede simples, **Fonte:** (LIU; SLOTINE; BARABASI, 2011a).

A figura 11 mostra três vértices 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.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \\ \dot{x}_3(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ a_{21} & 0 & 0 \\ 0 & a_{32} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

A equação 8, mostra a relação entre a matriz de adjacência da rede representada na figura 11 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.

$$C = [B, A \cdot B, A^2 \cdot B] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & a_{21} & 0 \\ 0 & 0 & a_{32}a_{21} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\text{rank}(C) = 3 = N \quad (10)$$

A equação 9, 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 11, obtemos três para *rank* (equação 10) (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.

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, o conjunto mínimo de nós de controle define a complexidade do 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). Desta forma, torna-se essencial o uso de uma técnica alternativa, surge como opção, o 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.

2.5.1 Emparelhamento em Grafos

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.

Definição 7: Dado um grafo $G = (V, A)$, um emparelhamento em G é definido como um conjunto independente de arestas, ou seja, duas arestas do emparelhamento não compartilham um mesmo vértice.

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, como apresentado na figura 12 (cada aresta cobre dois vértices distintos). Desta forma, todo grafo pode ser decomposto em emparelhamentos, sendo que um grafo G composto de A arestas pode claramente ter M emparelhamentos diferentes se cada um deles for formado por apenas uma aresta.

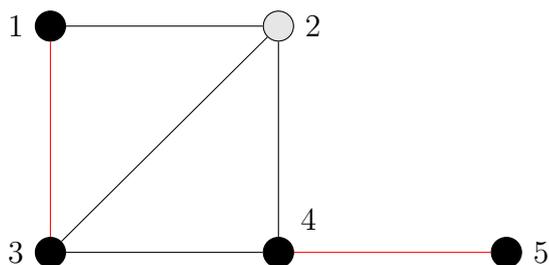


Figura 12 – Exemplo de Emparelhamento, **Fonte:** Autor.

A figura 12, representa um exemplo de emparelhamento no qual duas arestas do emparelhamento não compartilham um mesmo vértice. O vértice 2 (branco) é chamado de **livre**, pois as arestas do emparelhamento, não incidem sobre ele. Em outras palavras, um vértice v é livre, com relação a um emparelhamento t , se v não é extremo de nenhuma aresta de t . Já os demais vértices, são chamados de emparelhados, pois existem arestas do emparelhamento que incidem sobre estes. Para o referido exemplo, temos:

- Vértices livres: $\{2\}$;
- Vértices emparelhados: $\{1, 3, 4, 5\}$.

É importante mencionar a existência de tipos de emparelhamento. Neste trabalho o emparelhamento utilizado é chamado de máximo. Para que possamos compreender o conceito do emparelhamento máximo, é necessário conhecer as definições de caminho alternante e caminhos de aumento.

Definição 8: (Caminho alternante) Dado um grafo G e um emparelhamento M , definimos um caminho alternante como um caminho onde as arestas se alternam entre arestas que estão em M e as que não estão, isso equivale a dizer que dadas quaisquer duas arestas consecutivas de um caminho alternante, uma está em M e a outra não, como pode-se observar na figura 13.



Figura 13 – Exemplo de caminho alternante, **Fonte:** Autor.

Definição 9: (Caminho Aumentante) Um caminho de aumento ou aumentante é um caminho alternante que começa e termina com vértices livres, o que implica que eles comecem e terminem com arestas que estão fora do emparelhamento. Na figura 14, temos, vértices livres: 1,6,7 e os caminhos de aumento: $(6,5,4,7)$, $(1,2,3,4,5,6)$.

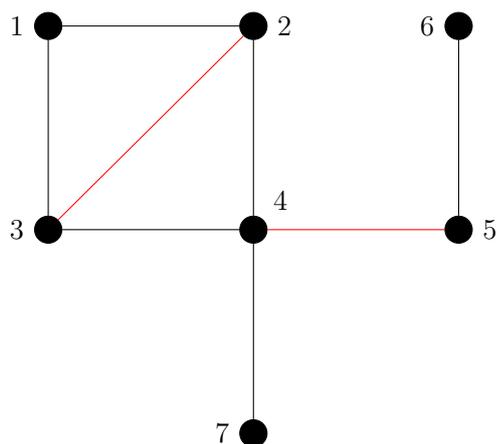


Figura 14 – Exemplo de caminho de aumento, **Fonte:** Autor.

Definição 10: (Emparelhamento Maximal) Um emparelhamento maximal (M_{mal}), é um emparelhamento que não pode ser aumentado, ou seja, é um emparelhamento que não se pode acrescentar nenhuma outra aresta de G que mantenha um emparelhamento. Como representado na figura 15.

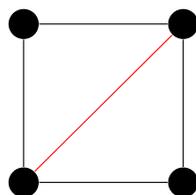


Figura 15 – Grafo com emparelhamento maximal, **Fonte:** Autor.

Definição 11: (Emparelhamento Máximo) Um emparelhamento máximo (M_{max}) é um emparelhamento que contém o maior número de arestas possível. Como na figura 16. Quando o vértice é tocado pelo emparelhamento, diz-se que o vértice é **saturado**, enquanto os vértices que não são tocados pelo emparelhamento são ditos **não saturados**.

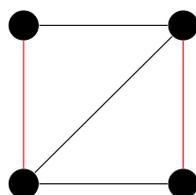


Figura 16 – Grafo com emparelhamento máximo, **Fonte:** Autor.

O número mínimo de nós de controle necessários para manter o controle total da rede, é determinado pelo emparelhamento máximo na rede. É possível obter o controle total da rede, se for possível controlar diretamente cada nó alterando seu estado. O algoritmo que permite identificar os nós de controle em uma rede arbitrária, é uma adaptação do algoritmo de emparelhamento Hopcroft-Karp (NEPUSZ; VICSEK, 2012a), que será estudado no capítulo 4.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção, é feita uma revisão bibliográfica dos principais trabalhos relacionados ao atual estado da arte no que se refere a controle de Redes Complexas e a estrutura de redes veiculares. As referências são apresentadas em ordem cronológica e o método de revisão bibliográfica podem ser encontrados no Apêndice A, além disso, ao final deste capítulo são apresentados os trabalhos relacionados na tabela 1.

3.1 Disseminação em Redes Complexas

Os autores (WATTS; STROGATZ, 1998) publicaram um artigo sobre a dinâmica das redes, com o objetivo de caracterizar as Redes Complexas. Abordam em seu trabalho os modelos simples de redes e os ajustes que podem sofrer com a finalidade de modificar o comportamento das redes em questão. Várias soluções de disseminação de informações surgiram a partir do estudo de transmissão de doenças, tal como, a pesquisa dos autores (WALLINGA; EDMUNDS; KRETZSCHMAR, 1999), que versa sobre a transmissão de doenças em escalas epidêmicas, o trabalho mostra como funciona uma aplicação das Redes Complexas, para solucionar epidemias e compreender como são transmitidas em grande escala.

O estudo da topologia de uma rede pode esclarecer questionamentos a respeito de sua tolerância a falhas, robustez e também suas vulnerabilidades, além de ser a base para a disseminação de informações (ALBERT; JEONG; BARABASI, 2000). A topologia das redes em evolução que crescem tanto localmente como universalmente (ALBERT; BARABASI, 2000). No estudo da controlabilidade, a topologia é um elemento significativo, pois considera a localização de cada um dos nós, para que seja possível capturar seus estados atuais (inicial e final). Em termos de topologia, é importante mencionar a existência da agregação de grafos, que é um processo da computação que considera um único grafo constituído a partir de vários grafos de entrada. ENDRISS; GRANDI, propuseram uma estrutura formal para agregação de grafos, com o objetivo de entender quais propriedades compartilhadas pelos grafos de entrada serão transferidas para o grafo de saída retornado por uma determinada regra de agregação. A maior parte das pesquisas relacionadas a Redes Complexas mostram uma preocupação a respeito do comportamento das redes, como, a avaliação da estabilidade de redes em relação a remoção aleatória de nós (COHEN et al., 2000). Os estudos em redes reais se tornaram cada vez mais comuns entre pesquisadores, as Redes Complexas possuem diversas aplicações em múltiplas áreas do conhecimento (STROGATZ, 2001), como nas áreas biológicas, sociais e tecnológicas. Diante da grande diversidade das redes, pesquisadores da área, começaram a questionar a possibilidade de controlar o comportamento das rede, e uma vez que o seja, como fazê-lo.

3.1.1 Identificação de Elementos Disseminadores

A disseminação de informações é um dos principais desafios encontrados no âmbito das redes. Os autores (LIU; SLOTINE; BARABASI, 2011a) discutem em seu artigo, que o fluxo de informações em uma rede é o que permite aos vértices renovarem seus estados. Conforme os estudos desenvolvidos por KALMAN, que se referem a teoria clássica do controle, um sistema pode ser dito controlável se com a escolha adequada das entradas, for possível obter qualquer estado final desejado em tempo finito. A teoria do controle foi desenvolvida por engenheiros, e possui aplicações em circuitos elétricos, controle de robôs entre outras, contudo o conceito foi modelado para o estudo da controlabilidade de Redes Complexas. A ideia principal seria entender quais os fatores influenciam no comportamento da rede, ou seja, como a informação é compartilhada, e como os vértices recebem esta informação e atualizam seus estados. Para compreendermos melhor o conceito podemos imaginar indivíduos (vértices), que mantêm uma relação (arestas) entre si, e em certo momento, um indivíduo lança uma informação que é propagada por toda rede com o objetivo de influenciar o maior número de indivíduos, desta forma podem ser quantificados os vértices que são influenciados e os vértices influenciadores.

Segundo (KITSACK et al., 2010) identificar os elementos mais influentes em uma rede, é uma questão importante para a disseminação de uma informação, visto que esses elementos são ótimos propagadores. Algumas medidas de centralidade são usadas para classificar a influência de um vértice em uma dinâmica de propagação. Uma delas é a centralidade de coreness, que é estimada a partir da centralidade dos vizinhos adjacentes a um elemento disseminador, é um indicador simples, mas notavelmente poderoso, com a finalidade de avaliar a capacidade de disseminação de informações através da rede. Os autores (NAMTIRTHA et al., 2018) também estudaram a centralidade coreness e a dinâmica de disseminação dos nós de uma Redes Complexas, entretanto, utilizaram uma abordagem diferente, consideraram um modelo epidêmico para entender o comportamento de disseminadores importantes em termos de sua localização topológica na rede.

Os autores (LIU et al., 2016b), também propuseram uma medida capaz de verificar a influência de vértices em redes reais a partir da centralidade de um nó e da centralidade de seus vizinhos. Os experimentos tiveram como base a simulação de processos de disseminação em seis redes do mundo real, descobrindo que a centralidade da vizinhança supera em muito a centralidade básica de um nó, desta forma a partir do grau e de um ranking de influência do nó, é possível identificar os propagadores mais importantes da rede. As técnicas mencionadas nesta seção, possuem um objetivo semelhante a controlabilidade, que é encontrar nós importantes na rede, contudo, cada medida ou métrica possui sua especificidade para buscar os referidos nós. Em comparação com a controlabilidade, as técnicas aqui elencadas, identificam os elementos propagadores a partir de sua centralidade ou a centralidade de sua vizinhança, já na controlabilidade, o que define os nós de controle são as entradas. Outro importante fato, é a dinâmica que os nós influentes possuem como característica, em certo momento, um nó considerado influente

pode simplesmente perder sua centralidade em termos de propagação, nesse caso essa dinâmica é comum para todas as técnicas aqui mencionadas.

3.2 Disseminação de Dados em VANETs

Os avanços tecnológicos na indústria automobilística proporcionaram integrar novas tecnologias aos veículos, provendo aos usuários acesso a novos serviços, como informações sobre o ambiente, condições do trânsito, alertas de perigos nas vias e conexão com a Internet (MACEDO et al., 2013). A disseminação de dados em VANETs pode ser classificada em disseminação de dados V2I, que exige alguma infraestrutura alocada ao longo da estrada para que a propagação das informações seja viável, podendo ser uma abordagem push ou pull. Na abordagem push, a infraestrutura transmite dados para todos os veículos dentro de seu raio de comunicação. Por outro lado, na abordagem pull, os veículos solicitam informações sobre dados específicos. Na outra classe temos distribuição de dados V2V, onde os veículos se comunicam entre si utilizando apenas a tecnologia ad-hoc (CHAQFEH; LAKAS; JAWHAR, 2014).

As redes veiculares utilizam protocolos para realizar as comunicações entre os veículos e infraestruturas. Um protocolo é uma convenção que controla e possibilita uma conexão, comunicação, transferência de dados entre dois sistemas computacionais (COSTA et al., 2016). Nesta seção são abordados protocolos que foram desenvolvidos exclusivamente a partir de métricas e medidas de Redes Complexas.

3.2.1 Protocolos de Comunicação Baseados em métricas de Redes Complexas

Atualmente existem diversos protocolos para comunicação entre veículos, muitos deles foram baseados em métricas ou medidas de centralidade, que foram estabelecidas na teoria das Redes Complexas, nesta seção são apresentados protocolos para redes veiculares, com a finalidade de observar as técnicas de disseminação que foram utilizadas.

Os autores (COSTA et al., 2016) desenvolveram em seu trabalho, um protocolo de disseminação de dados baseado em métricas de centralidade utilizadas no contexto de Redes Complexas e compararam a eficiência de seu protocolo com outros protocolos baseados em métricas/medidas de Redes Complexas. Os resultados mostraram que seu protocolo oferece alta eficiência em termos de cobertura, número de transmissões, atraso e colisões de pacotes em comparação aos protocolos amplamente conhecidos de disseminação de dados e ainda oferece melhorias significativas a um sistema de gerenciamento de trânsito distribuído que necessita das informações de trânsito disseminadas de forma eficiente, possibilitando que os veículos fiquem menos tempo em congestionamentos, atinjam maiores velocidades médias e tenham menor tempo de viagem. Já os autores (ALLANI et al., 2016), desenvolveram um novo protocolo Geocast sem infra-estrutura que envia mensagens apenas para veículos presentes em uma determinada zona com um custo indireto mínimo. Os resultados mostraram que o protocolo desenvolvido alcançou

uma alta taxa de entrega, bem como uma alta precisão Geocast, apenas enviando mensagens para veículos em uma determinada zona com um custo mínimo.

Os autores (VIRIYASITAVAT; TONGUZ, 2011) propuseram um protocolo conhecido como Urban Vehicular broadCAST (UV-CAST), que tem como finalidade a disseminação de dados em VANETs tanto em cenários densos quanto esparsos. Os autores (KAUR; KAD, 2016) realizaram esclarecimentos a respeito do coeficiente de agrupamento no contexto de disseminação de dados, enfatizando quais são os problemas em clustering que leva a melhoria do processo de clusterização em VANETS. Assim como o protocolo Clustering Coefficient (coeficiente de agrupamento) and node Degree (grau do nó) (CC-DEGREE) que utiliza o coeficiente de agrupamento para disseminar dados em VANETs. O coeficiente de agrupamento de um vértice é a razão entre as arestas existentes e as arestas possíveis entre vizinhos de um dado vértice.

Os autores (FAN et al., 2018) estudaram e formularam em seu trabalho o problema de maximização do rendimento de disseminação de dados em VANETs assistidas por veículos aéreos não tripulados (UAV), que visam alcançar alto rendimento e garantir a restrição de atrasos dos fluxos de dados para os veículos na área. Para maximizar o rendimento da rede, o problema de maximização tenta encontrar uma estratégia de entrega ideal para a disseminação de dados, otimizando a taxa de transmissão. Existem diversos trabalhos que tratam da detecção de congestionamento de tráfego em VANETs. Como por exemplo o trabalho de (WANG; TSAI, 2013) que utiliza apenas comunicação veicular (V2V) para detectar o congestionamento. Diferentemente dos autores (YOUNES; BOUKERCHE, 2013) que utilizam a forma híbrida, na qual existe comunicação entre os veículos e com a infraestrutura. Outros métodos utilizam apenas infraestrutura e análise de topologia para a detecção do congestionamento. Em termos de disseminação, os protocolos aqui mencionados trazem distintas métricas de Redes Complexas, que possuem o objetivo disseminar dados de forma eficiente.

O método utilizado neste trabalho visa identificar identificar nós de controle em redes veiculares, ou seja, encontrar vértices importantes que influenciam na disseminação de informações. O diferencial deste trabalho em relação aos demais apresentados nesta seção, é a capacidade de influenciar totalmente uma rede a partir dos seus nós de controle. Os estudos relacionados a controlabilidade estrutural de Redes Complexas, mostraram a capacidade de controlar diversas redes reais e simuladas, aqui realizamos uma análise de controlabilidade em VANETs considerando suas particularidades.

Tabela 1 – Trabalhos Relacionados à Disseminação de Dados

Trabalho	Autor	Especificação
Protocolo para Disseminação ao de dados em VANETs baseado em Métricas de Redes Complexas: Um Estudo de Caso com Sistema de Gerenciamento de Trânsito.	(COSTA et al., 2016)	O trabalho visa disseminação de dados em VANETs utilizando métricas de centralidade de Redes Complexas no desenvolvimento de um novo protocolo.
Identification of Influential Spreaders in Complex Networks	(KITSAK et al., 2010)	O trabalho busca identificar elementos disseminadores em Redes Complexas através da métrica Coreness.
Identifying Influential Spreaders in Complex Networks Based on kshell Hybrid Method	(NAMTIRTHA et al., 2018)	O trabalho objetivou identificar os principais elementos disseminadores em Redes Complexas utilizando o método K-shell Híbrido.
Controllability of Complex Networks	(LIU; SLOTINE; BARABASI, 2011a)	O trabalho busca identificar elementos de controle em Redes Complexas com a finalidade de controlar o maior número de elementos presentes na rede atualizando seus estados.
A Novel VANET Data Dissemination Approach Based on Geospatial Data	(ALLANI et al., 2016)	O trabalho teve como finalidade o desenvolvimento de um novo protocolo para disseminação de dados Geocast enviando mensagens para veículos na Zona de Relevância (ZOR).
UV-CAST : An Urban Vehicular Broadcast Protocol	(VIRIYASITAVAT; TONGUZ, 2011)	O trabalho propôs um novo protocolo de disseminação de dados para VANETs baseado na comunicação broadcast.
Clustering Coefficient and node DEGREE (CC-DEGREE)	(DOMINGOS et al., 2015)	O trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de um protocolo baseado em coeficiente de agrupamento medida utilizada em Redes Complexas.
Data Dissemination In VANETS- A Review	(KAUR; KAD, 2016)	O trabalho realizou esclarecimentos a respeito do coeficiente de agrupamento melhorando o processo de clusterização em VANETS.
UAV-Assisted Data Dissemination in Delay-Constrained VANETs	(FAN et al., 2018)	O trabalho estuda e formula o problema de maximização do throughput em VANETs assistidas por UAV (veículos aéreos não tripulados).

4 CONTROLABILIDADE ESTRUTURAL

A principal contribuição de LIU; SLOTINE; BARABASI foi desenvolver uma ferramenta analítica que a partir da arquitetura de uma rede, consegue determinar quantos nós são necessários para controlar todo o sistema. Um dos resultados mostrou, por exemplo, que redes de genes necessitam de cerca de 80% dos nós para atingir o controle global, enquanto redes sociais não necessitam de mais que 20% (em média) para atingir este controle. O conceito de controlabilidade de redes ainda terá avanços, podendo melhorar o entendimento sobre a dinâmica das redes e permitir determinar a robustez ou a vulnerabilidade, além de proporcionar uma melhor compreensão sobre o comportamento da disseminação de dados nas redes.

Como descrito na seção 2.5, a controlabilidade de um sistema é obtida caso exista uma sequência de entradas capaz de transferir o estado inicial do sistema para outro estado em um tempo finito. A operação para controlabilidade é descrita pela equação de espaço de estado, permitindo desta forma capturar os estados atuais, e depois, investigar se houve alteração nos estados. Para melhor compreensão, esta seção apresentará detalhes sobre a representação e as operações utilizadas na controlabilidade.

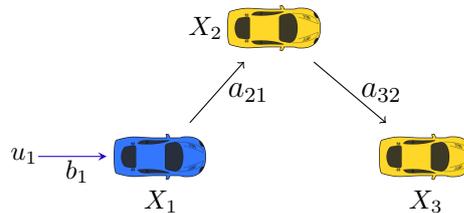


Figura 17 – Sistema Controlável - Adaptado de Liu et al. (LIU; SLOTINE; BARABASI, 2011a)

A figura 17, demonstra como uma informação pode ser disseminada na rede veicular e influenciar os demais veículos da rede modificando os seus estados atuais. Neste cenário, temos três veículos que estão dentro do mesmo raio de comunicação, ou seja, estão próximos o bastante para conseguirem estabelecer uma conexão e assim se comunicarem. O veículo X_1 recebe uma informação b_1 , esta informação é transmitida ao próximo veículo respeitando o raio de comunicação entre os mesmos e desta forma, se todos os veículos que receberem a informação alterarem seus estados, dizemos que o sistema é controlável.

A operação de controlabilidade para este cenário, é descrita pela equação 11.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \\ \dot{x}_3(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ a_{21} & 0 & 0 \\ 0 & a_{32} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

Temos:

1. A matriz que captura o estado de cada nó participante do sistema: $\begin{bmatrix} \dot{x}1(t) \\ \dot{x}2(t) \\ \dot{x}3(t) \end{bmatrix}$;
2. Matriz de adjacência, que representa a estrutura da rede: $\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ a_{21} & 0 & 0 \\ 0 & a_{32} & 0 \end{bmatrix}$;
3. Matriz do estado atual dos vértices da rede: $\begin{bmatrix} x1(t) \\ x2(t) \\ x3(t) \end{bmatrix}$;
4. Matriz de entrada de informações no sistema: $\begin{bmatrix} b1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$.

Como se trata de uma rede não ponderada, utilizaremos o valor da informação sendo igual a um, e o valor dos estados atuais sendo iguais a zero.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}1(t) \\ \dot{x}2(t) \\ \dot{x}3(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ a_{21} & 0 & 0 \\ 0 & a_{32} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

Após a realização das operações entre as matrizes, surge a matriz de controlabilidade (13) que tem como objetivo apontar a estrutura de controle da rede, assim como indicar quais elementos receberam a informação e modificaram seus estados. A partir da matriz de controlabilidade é possível indicar se o sistema é controlável e se a controlabilidade é fraca ou forte.

$$C = [B, A \cdot B, A^2 \cdot B] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & a_{21} & 0 \\ 0 & 0 & a_{32}a_{21} \end{bmatrix} \quad (13)$$

Depois da formação da matriz de controlabilidade, é utilizado o posto (*rank*), também chamado de condição de classificação de controle, como visto no capítulo 2. A condição de classificação de controle, visitará cada um dos elementos participante do sistema e verificará se todos os elementos modificaram seus estados. Neste caso, todos os elementos recebem a informação, através do nó de controle X_1 , desta forma, a condição de *rank* é satisfeita. Neste caso particular, o sistema é sempre controlável, pois todos renovam seus estados a partir de uma entrada, sendo assim, temos um exemplo de controlabilidade estrutural forte.

$$rank(C) = N = 3 \quad (14)$$

4.0.1 Controlabilidade por Emparelhamento Máximo

Nesta seção são apresentados o algoritmo de Hopcroft-Karp e exemplos do uso de emparelhamento máximo, método utilizado neste trabalho, para identificar nós controláveis e o percentual de controlabilidade de redes.

O algoritmo Hopcroft-Karp, 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; KARP, 1971). O algoritmo trabalha exatamente em casos em que o caminho de aumento ocorre sobre um caminho mais curto. Sua principal ideia é dividir o grafo em camadas que alternam entre arestas que estão no emparelhamento e as que não estão. É importante ressaltar que o algoritmo de Hopcroft-Karp, é utilizado para encontrar emparelhamentos máximos em grafos bipartidos, assim consideramos os conceitos que foram abordados no capítulo 2.

Para melhor compreensão do algoritmo Hopcroft-Karp, podemos dividir cada iteração do mesmo em 3 partes:

1. Na primeira parte, é realizada uma busca em largura, começando pelos vértices livres, para encontrar os caminhos de aumento de comprimento mínimo.
2. Em seguida, é executada uma busca em profundidade, para encontrar um conjunto maximal de caminhos de aumento, a partir dos já encontrados na primeira parte.
3. Por fim, com o resultado do item 2, aumenta-se o emparelhamento parcial.

Para a primeira parte, é criada uma função com o objetivo de encontrar os caminhos de aumento (`encontraCaminhoAumentado`), que recebe o grafo G e os vetores mA e mB representando o emparelhamento onde $(u, mA[u])$ e $(v, mB[v])$ são arestas emparelhadas para todo $u \in A$ e $v \in B$, se um vértice não estiver emparelhado representaremos $mA[u] = u$ para todo u livre. A função retorna *true* caso um caminho de aumento seja encontrado e *false* caso contrário. No caso de um caminho de aumento ser encontrado a função altera um vetor global d de distâncias.

Algoritmo 1: FUNÇÃO: ENCONTRACAMINHOAUMENTADO

```

1 Função: ENCONTRACAMINHOAUMENTADO( $G, mA, mB$ )
2 início
3    $queue \leftarrow \emptyset$ 
4    $k \leftarrow \infty$ 
5   para  $u \in A$  faça
6     se  $mA[u] == u$  então
7        $d[u] \leftarrow 0$ 
8        $Enqueue(queue, u)$ 
9     senão
10       $d[u] \leftarrow \infty$ 
11    fim
12  fim
13 fim
14 enquanto  $Empty(queue) == false$  faça
15    $u \leftarrow Dequeue(queue)$ 
16   se  $d[u] < k$  então
17     para  $v \in adj[u]$  faça
18       se  $v == mB[v]$  e  $k == \infty$  então
19          $k \leftarrow d[u] + 1$ 
20       fim
21     senão
22       se  $d[mB[v]] == \infty$  então
23          $d[mB[v]] \leftarrow d[u] + 1$ 
24          $Enqueue(queue, mB[v])$ 
25       fim
26     fim
27   fim
28 fim
29 fim
30 retorna  $k \neq \infty$ 
31 fim

```

Pode-se perceber a condição da linha 16 assegura que não serão encontrados caminhos de aumento de tamanho maior que o mínimo encontrado. O restante da função é basicamente uma busca em largura comum. Desta forma, com os caminhos de aumento encontrados e com as árvores representadas através do vetor d , podemos a partir de um vértice livre qualquer de G aumentar o emparelhamento através da função `aumentarEmparelhamento` que recebe um grafo G , os vetores mA e mB que representam o emparelhamento e um vértice v de A e aumenta o emparelhamento caso exista um caminho de aumento que comece em v e que seja disjunto aos demais caminhos de aumento que já foram encontrados.

Algoritmo 2: FUNÇÃO: AUMENTAREMPARELHAMENTO

```

1 Função: AUMENTAREMPARELHAMENTO( $G, mA, mB$ )
2 início
3   para  $u \in adj[v]$  faça
4     se  $mB[u] == u$  então
5        $mA[v] \leftarrow u$ 
6        $mB[u] \leftarrow v$ 
7       retorna true
8     fim
9     se  $d[mB[u]] == d[v] + 1$  então
10      se umentaEmparelhamento( $G, mA, mB, mB[u]$ )  $== true$  então
11         $mA[v] \leftarrow u$ 
12         $mB[u] \leftarrow v$ 
13        retorna true
14      fim
15    fim
16  fim
17   $d[v] \leftarrow \infty$ 
18  retorna false
19 fim

```

Nessa etapa do algoritmo, foram utilizados os caminhos de aumento já encontrados para aumentar o emparelhamento parcial. Note que a condição da linha 9, assegura que nenhum caminho de comprimento maior que o mínimo k será encontrado, pois sabe-se que os valores do vetor d são todos menores ou igual a k ou ∞ , sendo assim, dado um vértice v tal que $d[v] = k$ não existe vértice u tal que $d[u] == d[v] + 1$, em vista disso, o algoritmo sempre para quando atinge comprimento k . É importante observar que nenhum vértice é explorado mais que uma vez, para isso é necessário analisar dois casos, o primeiro, quando não for encontrado nenhum caminho de aumento a partir do vértice v e o segundo que for encontrado.

No primeiro caso, sendo um vértice $v \in A$ para o qual não foi encontrado um caminho de aumento a partir dele, a linha 17 seta $d[v]$ para ∞ e portanto a condição da linha 9 se torna falsa para futuras chamadas. No segundo caso, sendo um vértice $v \in A$ pelo qual foi encontrado um caminho de aumento então existe $u \in B$ tal que $d[mB[u]] = d[v] + 1$ antes da aplicação da diferença simétrica, isso mostra que v está um nível acima de u , com a aplicação da diferença simétrica sabemos que $mB[u]$ passa a ser v , portanto qualquer outro vértice w que seja adjacente a u está no mesmo nível que v ou seja, no mesmo nível que $mB[u]$ e portanto a condição da linha 9 nunca é verdadeira.

Com a função *encontraCaminhoAumentado* e *umentaEmparelhamento* já explicadas, finalizar o algoritmo de Hopcroft-Karp é bastante simples, enquanto *encontraCaminhoAumentado* retornar *true* usamos *umentaEmparelhamento* para aumentar nosso emparelhamento. O algoritmo HopcroftKarp é descrito com mais detalhes logo abaixo.

Algoritmo 3: HOPCROFT-KARP

```

1 Função: HOPCROFT-KARP( $G$ )
2 início
3   para  $v \in A$  faça
4      $mA[v] \leftarrow v$ 
5   fim
6   para  $u \in B$  faça
7      $mB[u] \leftarrow u$ 
8      $matching \leftarrow 0$ 
9   fim
10  enquanto ENCONTRACAMINHOAUMENTADO( $G, mA, mB$ ) == true faça
11    para  $v \in A$  faça
12      se  $mA[v] == v$  então
13        se AUMENTAEMPARELHAMENTO( $G, mA, mB, v$ ) == true então
14           $matching \leftarrow matching + 1$ 
15        fim
16      fim
17    fim
18  fim
19  retorna  $matching$ 
20 fim

```

A função retorna o tamanho do emparelhamento máximo e altera os vetores mA e mB de forma a representar o emparelhamento máximo encontrado. É importante destacar que para realizar a adaptação do emparelhamento para solução proposta por LIU; SLOITINE; BARABASI, faz-se necessário uma pequena alteração no conceito, quando uma aresta é selecionada no emparelhamento apenas o nó incidente (nó final da aresta) é marcado como emparelhado. Na definição formal os dois nós seriam marcados. Destaca-se a existência de nós inacessíveis, esses, não recebem informações pois possivelmente estão isolados e não possuem relações com os demais vértices da rede.

No emparelhamento máximo, são utilizados dois conjuntos, o conjunto dos vértices emparelhados e o conjunto de vértices que não possuem emparelhamento com outro. Como mencionado anteriormente, o método de Hopcroft-Karp, identifica o emparelhamento máximo em grafos bipartidos, porém, sofreu uma alteração (LIU; SLOITINE; BARABASI, 2011a) para ser utilizado em redes arbitrárias. O conjunto mínimo de nós de controle é representado pelo conjunto de nós que não fazem parte do emparelhamento, ou seja, os vértices controláveis são aqueles que não fazem parte de nenhum emparelhamento. Para melhor compreensão, os próximos exemplos trarão clareza ao modelo aqui utilizado. No sentido de demonstrar como identificar nós controláveis, utilizaremos a rede veicular representada pela figura 18.

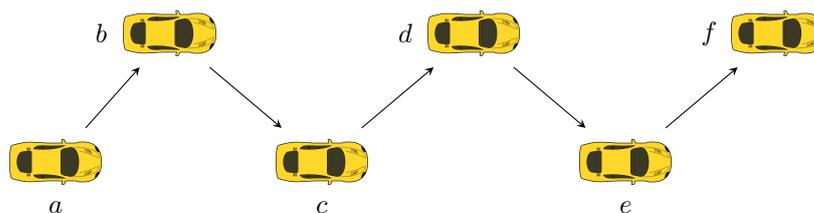


Figura 18 – Exemplo 1 - Identificação de nós de controle, **Fonte:** Autor

A rede representada pela figura 18, apresenta uma topologia em que os veículos estão se comunicando considerando o raio de comunicação de cada um deles, perceba que todos os links são críticos, isto é, sua remoção elimina nossa capacidade de controlar rede. Como visto anteriormente, são necessários três passos para definir o emparelhamento máximo de um determinado grafo, primeiro definimos o caminho aumentante, depois aumentamos o emparelhamento e por fim definimos o emparelhamento máximo identificando os elementos que fazem parte do *matching*.

Considere o seguinte caminho de aumento:

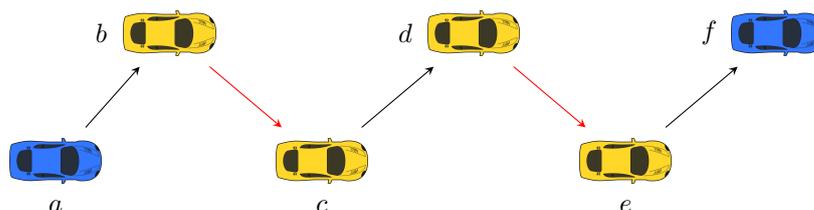


Figura 19 – Passo 1 - Definição do emparelhamento e do caminho de aumento, **Fonte:** Autor

Quando encontramos um caminho de aumento o definimos como um caminho alternante que inicia e termina com vértices livres, neste exemplo representado na figura 19, os vértices livres são a e f em azul e as arestas em vermelho fazem parte do emparelhamento. Perceba que os nós que estão em contato com as arestas em vermelho (veículos amarelos), fazem parte do emparelhamento e os nós azuis são livres. No contexto de controlabilidade as informações inseridas em uma rede, geralmente são inseridas a partir de um vértice livre, o vértice que recebe inicialmente a informação pode ser chamado de nó de controle, ou seja, os nós que estão fora do emparelhamento podem ser chamados de nós de controle.

Com esse caminho de aumento, se removermos as arestas vermelhas e adicionarmos as pretas ao nosso emparelhamento, obtemos:

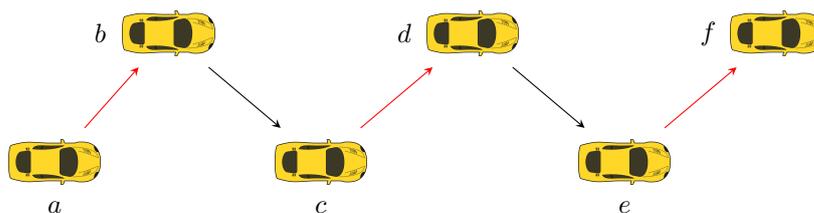


Figura 20 – Passo 2 - Aumento do emparelhamento, **Fonte:** Autor

Veja que removemos duas arestas vermelhas, porém, adicionamos 3, ou seja, acabamos de descrever uma operação que dado um caminho de aumento conseguimos aumentar a cardinalidade do emparelhamento. Os caminhos de aumento recebem esse nome pois possibilitam aumentar o número de arestas de um emparelhamento, em outras palavras, obter um emparelhamento M' que possui mais arestas que M . Neste exemplo, quando tentamos aumentar o emparelhamento, os nós que eram livres deixam de ser livres para fazerem parte do emparelhamento, isso significa que não temos mais nós de controle, nesse sentido não é interessante aumentar o emparelhamento e sim manter o emparelhamento inicial. A modificação do algoritmo de emparelhamento para o contexto de controle definido por LIU; SLOTINE; BARABASI considera apenas como nó de controle, aquele que inicialmente recebe uma informação e a repassa para o seguinte, como podemos observar na figura 21. Desta forma, como temos uma rede unidirecional apenas um dos nós azuis, seria considerado de controle. Assim, dizemos que o nó (a) é o nó de controle, pois é a partir dele que todos os outros receberão a informação e alterarão os seus estados. Normalmente as redes veiculares utilizam comunicação bidirecional, considerando este fato, pode-se dizer que para o referido exemplo, caso a rede fosse bidirecional, tanto o nó (a) como o nó (f) poderiam receber a informação e serem caracterizados como nós de controle, pois ambos são considerados livres no emparelhamento.

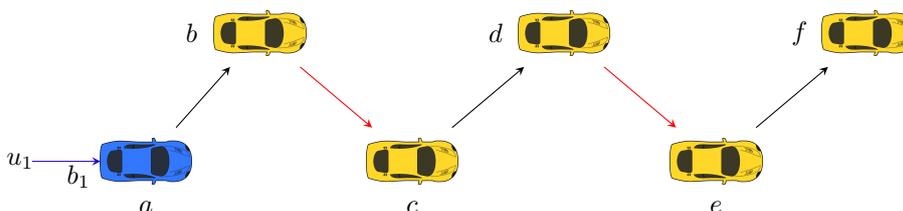


Figura 21 – Passo 3 - Identificação do nó de controle, **Fonte:** Autor

5 MÉTODO

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

5.0.1 Cenários

Nesse trabalho, foram utilizados cinco cenários reais de redes veiculares. Foram utilizadas as comunicações V2V e V2I, onde os vértices são considerados veículos e dois veículos se relacionam se estiverem dentro de um raio de cobertura. 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. 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, como pode ser observado na figura 22. 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. As bases podem ser encontradas no projeto Microscopic Vehicular Mobility Trace of Europarc Roundabout, Creteil, France que foi idealizado por (LEBRE; MOUEL, 2017).

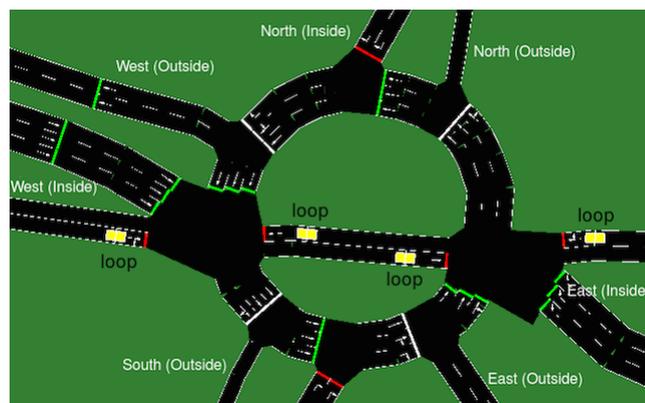


Figura 22 – Creteil, France **Fonte:** (LEBRE; MOUEL, 2017)

Os cenários **A6** e **M40** são bases de dados que foram encontradas no projeto Madrid Traces idealizado por (GRAMAGLIA et al., 2017). Os Cenários foram obtidos a partir das mobilidades veiculares de duas rodovias próximas a Madri, Espanha. A trace **A6** possui mobilidade com 1.507 veículos enquanto que a trace **M40** possui 2.012 veículos. A figura 23, mostra a localização geográfica das rodovias aqui A6 e M40.

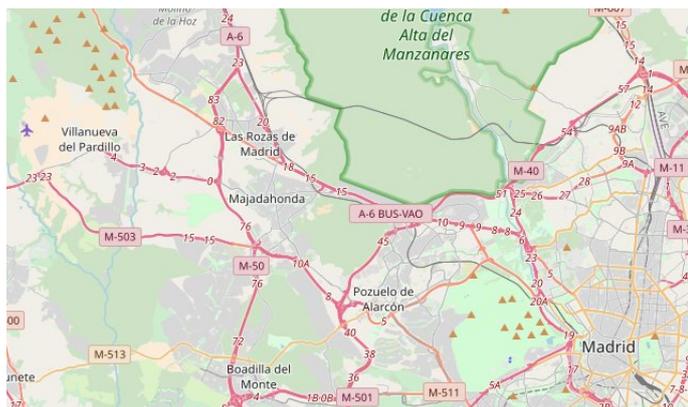


Figura 23 – Rodovias A6 e M40, **Fonte:** (OpenStreetMap contributors, 2018)

O cenário Colônia foi encontrado no projeto *Vehicular Mobility Trace of the City of Cologne, Germany* (TAPASCologne) idealizado por (UPPOOR DIALA NABOULSI, 2016). Trata-se de uma iniciativa do Instituto de Sistemas de Transporte do Centro Aeroespacial Alemão (ITS-DLR), com o objetivo de reproduzir, com o maior nível de realismo possível, o tráfego de carros na grande área urbana da cidade de Colônia, na Alemanha. 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 em um dia útil típico, e compreende mais de 700.000 viagens de carro individuais. Neste trabalho foram utilizados os dados referentes a duas horas: 06:00 às 08:00. A figura 24, apresenta a estrutura rodoviária do cenário colônia.

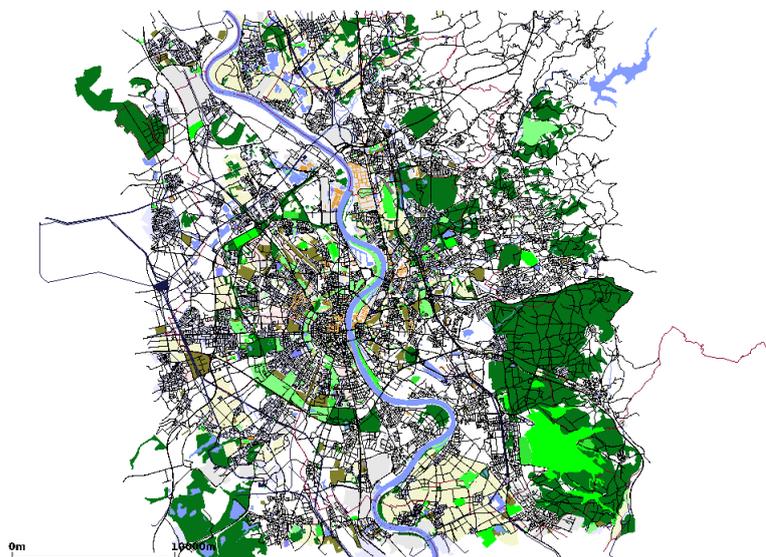


Figura 24 – Colônia, Alemanha **Fonte:** (UPPOOR DIALA NABOULSI, 2016)

Todas 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.

5.0.2 Abordagem Experimental

Esta seção apresenta as etapas para a realização dos experimentos. 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 25.

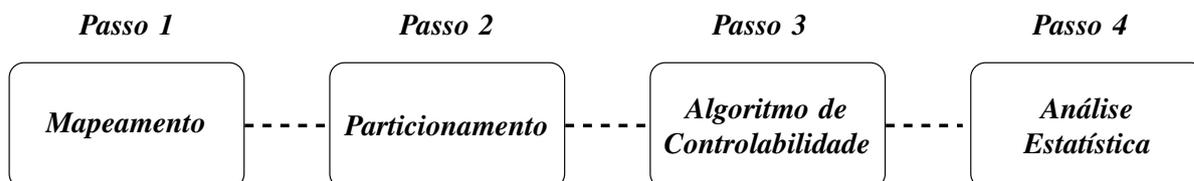


Figura 25 – Fluxograma de passos realizados, **Fonte:** Autor.

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; LEE, 2002) para abordagens experimentais. O algoritmo de mapeamento B.1 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 comunicação definido, o algoritmo define uma relação entre os mesmos, como é mostrado na figura 26. 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.

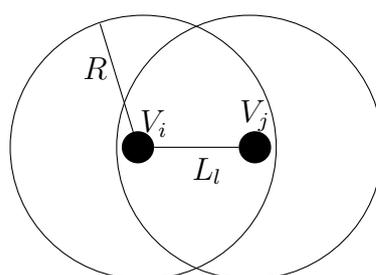


Figura 26 – Estabelecimento de uma conexão L_l entre os veículos V_i e V_j em uma rede veicular com raio de comunicação R , **Fonte:** Autor.

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, ou seja, esta etapa teve como objetivo segmentar o grafo em diferentes partes considerando a linha do tempo em que os vértices do grafo constituíram relações. O algoritmo de particionamento B.2 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.

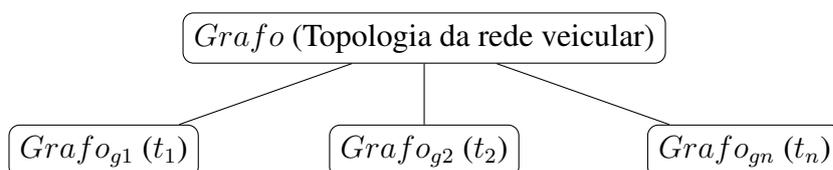


Figura 27 – Diagrama de particionamento, **Fonte:** Autor.

O **passo 3** consistiu em executar o algoritmo de controlabilidade de LIU; SLOTINE; BARABASI para cada parte resultante da etapa anterior, nesta fase foi utilizada a aplicação **Netctrl** de (NEPUSZ; VICSEK, 2012a) que compreende os modelos controlabilidade estrutural de LIU; SLOTINE; BARABASI e NEPUSZ; VICSEK. Também foi possível automatizar a execução do algoritmo de controlabilidade utilizando a aplicação B.3.1. A fase de particionamento, me permitiu avaliar a controlabilidade em cada *snapshot* diferente, 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, e ainda foi possível comparar o controle dentre as redes já estudadas por LIU; SLOTINE; BARABASI.

5.0.3 Informações Adicionais

Para a realização dos experimentos foi utilizada uma máquina Intel(R) Core(TM) i5-3320M CPU @ 2.60GHz, 8GB de RAM. Os softwares utilizados para realizar o trabalho foram: Linux Ubuntu 16.04.3 64bits, Python 2.7, RStudio, Igraph, Simulador de Mobilidade SUMO versão 0.32.0 e Netctrl ¹ (NEPUSZ; VICSEK, 2012a) pré-compilado para Linux 64 bits (compreende os modelos de controlabilidade de (LIU; SLOTINE; BARABASI, 2011a) e (NEPUSZ; VICSEK, 2012a)).

Os experimentos seguiram a abordagem proposta por LIU; SLOTINE; BARABASI, para tal, foi realizada a reprodução de seu trabalho utilizando o algoritmo de controlabilidade presente na aplicação NetCtrl e as bases de dados disponibilizadas pelos autores. Os resultados da reprodução coincidiram com os resultados expressos pelos autores. No próximo capítulo, são apresentados os resultados originados a partir dos experimentos descritos anteriormente.

¹ A implementação do algoritmo de controlabilidade pode ser encontrada no repositório: <http://ntamas.github.io/netctrl/>

6 RESULTADOS

Na tabela 2 são apresentadas a identificação dos cenários (V2V), a quantidade de veículos presentes em cada cenário, os nós de controle (N_D), o percentual médio de controlabilidade ($N_D Med$), o percentual mínimo de controlabilidade ($N_D Min$), o percentual máximo de controlabilidade ($N_D Max$) e o intervalo de confiança. O percentual de controlabilidade é calculado pela razão entre número de nós de controle e número total de nós da rede.

Tabela 2 – Controlabilidade de Redes Veiculares

Cenário	Veículos	N_D	$N_D Med$	$N_D Min$	$N_D Max$	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 extremamente semelhantes desde o tempo inicial até o final. Isso pode ser explicado pelo fato de utilizar o mesmo trajeto rodoviário, porém avaliados em momentos distintos. A quantidade de veículos desses cenários também é aproximada. Outro ponto importante é que a rodovia na qual a rede foi desenvolvida possui rápida variação em sua topologia pois trata-se 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 (vários veículos no meio raio de comunicação). 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; SLOTINE; BARABASI, 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, aumentando consideravelmente o percentual de controlabilidade das redes. 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 2, 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, pois a quantidade de nós que devem ser alcançados para controlar a rede em sua totalidade é inferior. A rede **M40**, possui um percentual de controle aproximado ao da rede **A6** como pode ser visto na tabela 2, 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 3 – 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 3 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 que se deve existir para alcançar o controle total da rede 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.

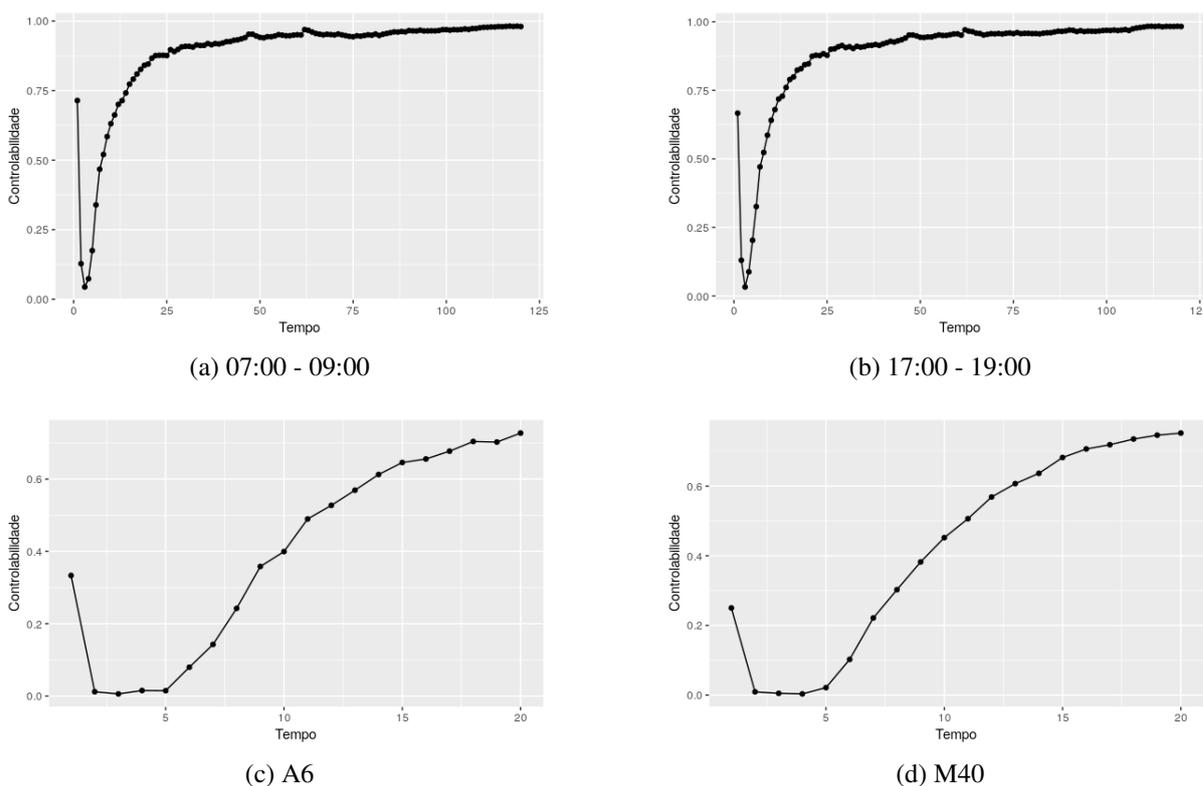


Figura 28 – Percentual de Controlabilidade para cada intervalo de tempo, **Fonte:** Autor.

A figura 28 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 controlabilidade é baixo e a medida em que o tempo evolui, o percentual de controlabilidade cresce, isso se dá pelo aumento dos nós das redes assim como o seu grau. O percentual de controlabilidade mostra que quanto menor o percentual maior o controle. Em **A6**, (figura 28(c)), no instante 10, a taxa de crescimento do percentual de controle sofre uma pequena diminuição, isso significa que neste momento a quantidade de veículos necessários para o controle global da rede é menor que nos nos instantes, considerando a quantidade de veículos em cada instante. Desta forma o referido momento torna-se o melhor instante para disseminar dados pois o alcance será maior. Em **M40**, por exemplo, seria necessário alcançar cerca de 75% dos nós da rede para que todo o sistema fosse controlado, como indicado na tabela 2 (N_{DMax}), isso significa que há uma alta complexidade para se controlar a rede em questão.

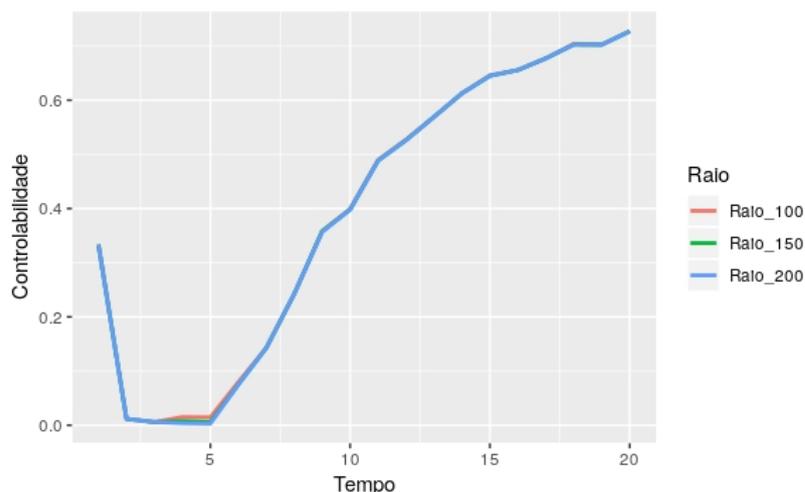


Figura 29 – Percentual de Controlabilidade considerando diferentes raios de comunicação sugeridos por BASAGNI; LEE

A figura 29 representa o percentual de controle considerando diferentes raios de comunicação. Segundo a recomendação de (BASAGNI; LEE, 2002), os raios de comunicação em abordagens experimentais podem variar de 100 a 200 metros. Foram considerados os 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 29, 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 comunicação maior, proporciona melhores percentuais de controle estrutural. Como podemos perceber no gráfico representado na figura 29, 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 da controlabilidade quando o raio de comunicação é alterado.

Para isso, utilizamos a mesma rede (A6), considerando raios de comunicação menores em relação ao sugerido por BASAGNI; LEE, para que se possa verificar se com mudanças significativas na medida do raio de comunicação 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 utilizados nesta nova análise para avaliar o quanto o raio de comunicação pode interferir na topologia e no controle da rede. 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.

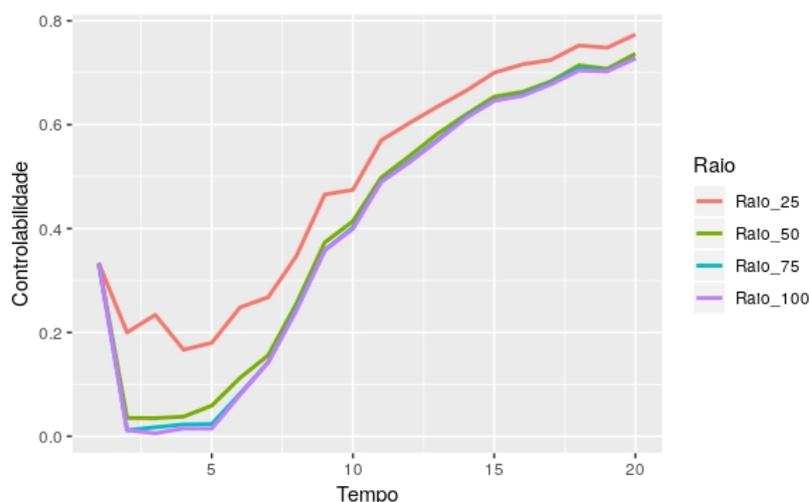


Figura 30 – Percentual de Controlabilidade considerando diferentes raios de comunicação.

Como podemos observar na figura 30, com a modificação do raio para valores inferiores aos sugeridos por BASAGNI; LEE, pode-se perceber que a topologia da rede sofreu modificações significativas a medida em que diminuimos o raio de comunicação, sendo desta forma prejudicial ao controle estrutural da rede, destaca-se que o raio sugerido por BASAGNI; LEE, retornou resultados mais significativos em termos de controlabilidade do que os demais que foram definidos.

Após os resultados obtidos para redes veiculares (V2V), foi possível comparar o controle desse tipo de rede com as demais redes utilizadas no experimento de LIU; SLOTINE; BARABASI. A tabela 4, apresenta as características e a controlabilidade (N_D) de 14 tipos de redes reais. Sabe-se que tratam-se de redes completamente distintas e com diferentes finalidades, contudo, pode-se apontar semelhanças e até mesmo predizer, quais as redes são mais complexas de se controlar ou menos complexas de se controlar, assim como LIU; SLOTINE; BARABASI procedeu em seu trabalho. Como se pode observar, a controlabilidade das redes veiculares possuem quantidades semelhantes de nós de controle em relação as redes de proteínas enquanto que as redes veiculares agregadas possuem semelhanças com as redes organizacionais, sendo as redes agregadas as redes que possuem o melhor percentual de controle estrutural.

Tabela 4 – Características e controlabilidade de redes reais, **Fonte:** Autor

Tipo	Nome	N	N_D
Regulatory	TRN-Yeast-1	4,441	0.965
	TRN-Yeast-2	688	0.821
	TRN-EC-1	1,550	0.891
	TRN-EC-2	418	0.751
	Ownership-USCorp	7,253	0.820
Trust	College student	32	0.188
	Prison inmate	67	0.134
	Slashdot	82,168	0.045
	WikiVote	7,115	0.666
	Epinions	75,888	0.549
Food web	Ythan	135	0.511
	Little Rock	183	0.541
	Grassland	88	0.523
	Seagrass	49	0.265
Power grid	Texas	4,889	0.325
Metabolic	Escherichia coli	2,275	0.382
	Saccharomyces cerevisiae	1,511	0.329
	Caenorhabditis elegans	1,173	0.302
Electronic circuits	s838	512	0.232
	s420	252	0.234
	s208	122	0.238
Neuronal	Caenorhabditis elegans	297	0.165
Citation	ArXiv-HepTh	27,770	0.216
	ArXiv-HepPh	34,546	0.232
World Wide Web	nd.edu	325,729	0.677
	stanford.edu	281,903	0.317
	Political blogs	1,224	0.356
Internet	p2p-1	10,876	0.552
	p2p-2	8,846	0.578
	p2p-3	8,717	0.577
Social communication	UCIonline	1,899	0.323
	Email-epoch	3,188	0.426
	Cellphone	36,595	0.204
Intra-organizational	Freemans-2	34	0.029
	Freemans-1	34	0.029
	Manufacturing	77	0.013
	Consulting	46	0.043
Vehicular Network	A6	1,507	0.7272
	M40	2,012	0.7524
	Trace 07h-09h	3,129	0.9837
	Trace 17h-19h	2,968	0.9857
	Cologne (V2I)	134,923	0.950
Aggregated Vehicular Network	A6	1,507	0.0565
	M40	2,012	0.0460
	Trace 07h-09h	3,129	0.0135
	Trace 17h-19h	2,968	0.0114

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. Este cenário é bastante utilizado em abordagens experimentais (UPPOOR DIALA NABOULSI, 2016). 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 31.

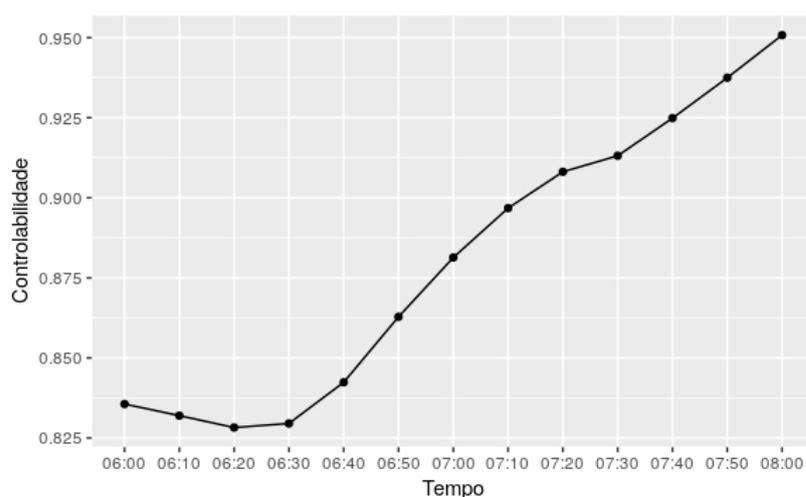


Figura 31 – Percentual de Controlabilidade para o cenário Colônia V2I, **Fonte:** Autor

A figura 31 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 inseridas ao 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 5 – 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 5 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 rede 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. 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 obtidos podemos aceitar a hipótese introduzida neste trabalho.

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

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, a controlabilidade obteve percentuais mais satisfatórios. Desta forma podemos aceitar a hipótese **H1**.

7 CONCLUSÃO

As VANETs possuem diversas aplicações e têm necessidade que os dados sejam disseminados na rede para que suas tarefas sejam executadas de forma desejada, para essas redes a disseminação se torna um desafio ainda maior devido a suas características de mobilidade dinâmica e tempo curto de comunicação entre veículos originando assim uma rede com uma topologia altamente dinâmica. Assim sendo, foi apresentado um método para avaliação da disseminação de dados em VANETs utilizando a controlabilidade estrutural (métrica utilizada no contexto de Redes Complexas) que consistiu em mapear a topologia de VANETs como Redes Complexas e realizar uma análise de sua estrutura.

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 também conhecidos como nós de controle, essa informação pode ser útil para a disseminação de publicidade, alertas e auxiliar no projeto das redes veiculares. 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 controlabilidade utilizando o modelo agregado mostrou o controle considerando um único grafo, utilizando essa abordagem, foi possível encontrar o melhor percentual de controle. O experimento realizado a partir do mapeamento utilizando raios de comunicação distintos, mostrou que o raio de comunicação sugerido por BASAGNI; LEE, é também ideal para gerar uma topologia de redes que possui uma estrutura satisfatoriamente controlável. Para a rede infraestruturada 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 que fosse possível controlar a rede por completo. O uso de controlabilidade foi mais aceitável em redes V2V, pois o percentual de controle obtido foi mais satisfatório. Vale a pena salientar que a inacessibilidade entre os veículos de um determinado cenário são prejudiciais para o controle da rede, pois provavelmente os veículos estão isolados da rede. Existe uma série de fatores que podem ser considerados para o problema da inacessibilidade (físicos, infraestrutura e lógicos). As métricas utilizadas em Redes Complexas têm contribuído de forma positiva no contexto de redes veiculares originando novas ferramentas de apoio.

Como trabalhos a serem desenvolvidos a partir deste, temos: o uso da controlabilidade para definir novos protocolos de disseminação de dados para redes veiculares, a comparação entre os modelos de controlabilidade derivados do modelo proposto por LIU; SLOTINE; BARABASI, e realizar análise de controlabilidade em grafos temporais.

A APÊNDICE: MÉTODOS DE REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A.1 Metodologia da Revisão Bibliográfica

A revisão bibliográfica teve início no dia 30 de Janeiro de 2017, sendo realizada até a data de entrega desta dissertação. O objetivo da revisão bibliográfica foi encontrar métricas e ferramentas para a análise de vulnerabilidades em redes complexas.

Em seguida são apresentados os métodos utilizados para encontrar artigos relacionados a este trabalho.

Passo 1: Buscar dentre os artigos que citam o artigo base e que foram citados por ele utilizando o (WEB. . . , 2017), aqueles do meu interesse e realizar iterações desse tipo de busca. Os artigos encontrados tornam-se novos artigos base;

Passo 2: Realizar buscas no (WEB. . . , 2017) usando como parâmetro as palavras chave encontradas nos artigos resultantes do passo A.1;

Passo 3: Gerar palavras chave a partir do Wordle¹ e realizar pesquisa no (WEB. . . , 2017).

O ponto de partida foi o artigo de (STROGATZ, 2001) que descreve vários conceitos e aplicações sobre as redes complexas incluindo o estudo do comportamento das redes. O artigo de STROGATZ possui 3.622 citações e citou 97 trabalhos. Devido ao elevado número de citações, a busca foi feita considerando os artigos mais atuais e elenquei dez trabalhos que estão presentes nas citações e dez trabalhos que foram citados pelo artigo base. O critério utilizado para a seleção dos artigos foi a leitura dos títulos, resumos e conclusões dos trabalhos.

A partir dos resultados encontrados, foi realizada uma nova iteração utilizando o trabalho do autor GAO; WANG; LAI para a nova busca. O trabalho de GAO; WANG; LAI possui apenas nove citações, mas citou no total 63 trabalhos como referência. Dentre os 63 trabalhos citados, apenas dez foram escolhidos para fazer parte desta revisão, pois vários já foram encontrados anteriormente e outros não foram escolhidos por não se relacionarem ao tema deste trabalho. O critério utilizado para a seleção dos artigos foi o mesmo utilizado no ponto de partida.

Logo em seguida o passo A.1 foi executado buscando por: "graph structure and diameter and Web measurement" no WEB. . . , foram retornados três artigos no qual um já está presente nesta revisão bibliográfica e o restante apresentam temas não pertinentes a este trabalho. Os demais artigos não possuem palavras-chave, definidas no seu escopo, o que nos leva a utilização do passo A.1.

¹ Wordle é um gerador de "nuvens palavra" do texto que você fornecer. As nuvens dão maior destaque às palavras que aparecem mais frequentemente no texto fonte. Você pode ajustar suas nuvens com diferentes fontes, layouts e esquemas de cores. As imagens que você cria com o Wordle são suas para usar como quiser. Você pode imprimi-los para fora, ou conservá-los a seu próprio desktop para usar-se como você desejar.

Tabela 6 – Método 1 ; Passo 1

Nº	Artigo	Autor	Ano
1	Collective dynamics of 'small-world' networks	WATTS; STROGATZ	1998
2	Emergence of scaling in random networks	BARABASI; ALBERT	1999
3	Small-world networks: Evidence for a crossover picture	BARTHELEMY; AMARAL	1999
4	Perspective: human contact patterns	WALLINGA; EDMUNDS; KRETZSCHMAR	1999
5	Resilience of the Internet to random breakdowns	COHEN et al.	2000
6	Error and attack tolerance of complex networks	ALBERT; JEONG; BARABASI	2000
7	Graph structure in the Web	BRODER et al.	2000
8	Topology of evolving networks: Local events	ALBERT; BARABASI	2000
9	Mean-field solution of the small-world network model	NEWMAN; MOORE; WATTS	2000
10	Models of the small world	NEWMAN	2000
11	Statistical mechanics of complex networks	ALBERT; BARABASI	2002
12	Controllability analysis of networks	LOMBARDI; HORNQUIST	2007
13	Controllability of complex networks	LIU; SLOTINE; BARABASI	2011b
14	Node Vulnerability under Finite Perturbations	GUTIERREZ; DEL-POZO; BOCCALETTI	2011
15	Controlling Complex Networks	YAN et al.	2012
16	Controlling edge dynamics in complex networks	NEPUSZ; VICSEK	2012b
17	Heterogeneous networks are not difficult to control	NACHER; AKUTSU	2012
18	Control and Hierarchical Structure in Complex Networks	LIU; SLOTINE; BARABASI	2012
19	Determine the Structural Controllability of C. Networks	COWAN et al.	2012
20	Exact controllability of complex networks	YUAN et al.	2013
21	Control Profiles of Complex Networks	RUTHS; RUTHS	2014
22	Variability analysis of complex networks	CABRAL; FRERY; RAMIREZ	2014
23	Fuzzy Evaluation of Network Vulnerability	ZHANG et al.	2016
24	Topological Small-World Organization of the Fibroblastic	NOVKOVIC et al.	2016
25	A Landscape Approach to Invasive Species Management	LURGI et al.	2016
26	Scale-free networks of the earth's surface	LIU et al.	2016a
27	Network structure effects on incumbency advantage	LEE; SONG; YANG	2016
28	Distributed control of cluster synchronisation in networks	HU et al.	2016
29	Control efficacy of complex networks	GAO; WANG; LAI	2016
30	Emergence of complexity in controlling regular networks	GAO; SHEN; WANG	2016
31	Role of dimensionality in complex networks	BRITO; SILVA; TSALLIS	2016
32	Complex Dynamics in Networks, Multilayered Structures	BOCCALETTI et al.	2016

B APÊNDICE: ALGORITMOS E FERRAMENTAS UTILIZADAS

B.1 Algoritmo de Mapeamento

```

#Arquivo Original: time, id, x, y, speed
#2 horas: 7200 segundos
#8 horas: 28800 segundos

from math import sqrt

dadosIn = open("A6-d10-h11.log", 'r')
dic = {}
time = 1
timeFinish = 1800
nextTime = 90
dadosOut = open("A6200.txt", 'w')
t = 1

while True:
    eof = dadosIn.readline()
    valor = eof.rstrip().split()
    if(not eof or int(valor[0]) > int(time) ):
        for i in dic:
            for j in dic:
                if(i != j):
                    dist = sqrt( (dic[i][0]-dic[j][0])**2 +
                                (dic[i][1]-dic[j][1])**2 )
                    if(dist <= 200):
                        dadosOut.write(i + " " + j +
                                       " " + str(t) + " "
                                       +str(t)+ "\n")

            if(not eof or int(valor[0]) > int(timeFinish)):
                print "[=>] Leitura terminada"
                break
        dic = {}
        time = time + nextTime
        t += 1

    if (int(valor[0]) == int(time)) :
        vall = valor[1]
        dic[vall] = (float(valor[2]),float(valor[3]))

dadosIn.close()
dadosOut.close()

```

B.2 Algoritmo de Particionamento

```

library(igraph)

ex01 <- read.table("coloniati.txt")
a <- data.frame(ex01)

subset(a, V3 == 2)

for(i in c(1:13)){
  write.table(subset(a, V3 == i, select= c(V1, V2)),
    paste0("Time", i, ".txt"), row.names=F, col.names =F)
}

```

B.3 Ferramenta Analítica de Controlabilidade

Para a realização dos teste foi utilizado o algoritmo Netctrl (NEPUSZ; VICSEK, 2012a). Este algoritmo implementa tanto o modelo de controlabilidade de LIU; SLOTINE; BARABASI, como o método de controle desenvolvido por NEPUSZ; VICSEK. Neste trabalho foi utilizada uma versão pré-compilada compatível com Linux 64-bits.

Antes do início dos experimentos, o algoritmo pré-compilado foi testado a partir da reprodução do trabalho de (LIU; SLOTINE; BARABASI, 2011a). Os testes foram realizados em todas as bases de dados disponíveis e que estão presentes no artigo. Todos os resultados obtidos foram idênticos aos que foram apresentados em seu trabalho.

As implementações dos cálculos de controlabilidade para redes arbitrárias são de código aberto, e são fornecido em <http://github.com/ntamas/netctrl>, além disso neste repositório estão todas as informações necessárias para a utilização da ferramenta.

B.3.1 Ferramenta de Otimização

```

#!/bin/bash
clear

for ((i=1; i<=13; i++)); do
  ./netctrl "Time$i.txt" -M statistics -m liu >> Parcial2.txt
done

cat -n Parcial2.txt | sed -n '2~2p' >> Resultado_Liu

```

REFERÊNCIAS

- ACER, U. et al. Timely data delivery in a realistic bus network. In: *2011 Proceedings IEEE INFOCOM*. [S.l.: s.n.], 2011. p. 446–450. ISSN 0743-166X. Citado na página 19.
- ALBERT, R.; BARABASI, A. L. Topology of evolving networks: Local events and universality. *Physical Review Letters*, American Physical Soc, One Physics Ellipse, College Pk, MD 20740-3844 USA, v. 85, n. 24, p. 5234–5237, 2000. ISSN 0031-9007. Citado 2 vezes nas páginas 32 e 60.
- ALBERT, R.; BARABASI, A. L. Statistical mechanics of complex networks. *Reviews Of Modern Physics*, v. 74, n. 1, p. 47–97, jan 2002. ISSN 0034-6861. Citado na página 60.
- ALBERT, R.; JEONG, H.; BARABASI, A. L. Error and attack tolerance of complex networks. *Nature*, v. 406, n. 6794, p. 378–382, jul 2000. ISSN 0028-0836. Citado 2 vezes nas páginas 32 e 60.
- ALLANI, S. et al. A Novel VANET Data Dissemination Approach Based on Geospatial Data. v. 98, p. 572–577, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 34 e 36.
- ALVES, R. S.; CAMPBELL, I. V. *Redes veiculares: Princípios, aplicações e desafios*. 2009. Accessed = 2019-03-27. Disponível em: <www.lbd.dcc.ufmg.br/colecoes/sbrc/2009/084.pdf>. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 18.
- BARABASI, A. L. Linked: How everything is connected to everything else and what it means for business, science and everyday life. *Plume*, 2003. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 25.
- BARABASI, A. L.; ALBERT, R. Emergence of scaling in random networks. *Science*, v. 286, n. 5439, p. 509–512, 1999. ISSN 0036-8075. Citado na página 60.
- BARTHELEMY, M.; AMARAL, L. A. N. Small-world networks: Evidence for a crossover picture. *Physical Review Letters*, American Physical Soc, v. 82, n. 15, p. 3180–3183, 1999. ISSN 0031-9007. Citado na página 60.
- BASAGNI, S.; LEE, S. Special issue: Mobile ad hoc networking - research, trends and applications. *Wireless Communications and Mobile Computing*, v. 2, n. 5, p. 439–440, 2002. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/wcm.68>>. Citado 5 vezes nas páginas 9, 47, 52, 53 e 57.
- BAUZA, R.; GOZALVEZ, J. Journal of Network and Computer Applications Traffic congestion detection in large-scale scenarios using vehicle-to-vehicle communications. *Journal of Network and Computer Applications*, Elsevier, p. 1–13, 2012. ISSN 1084-8045. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jnca.2012.02.007>>. Citado na página 19.
- BAUZA, R.; GOZALVEZ, J. Traffic congestion detection in large-scale scenarios using vehicle-to-vehicle communications. *Journal of Network and Computer Applications*, v. 36, n. 5, p. 1295 – 1307, 2013. ISSN 1084-8045. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1084804512000628>>. Citado na página 19.
- BOCCALETTI, S. et al. Introduction to Focus Issue: Complex Dynamics in Networks, Multilayered Structures and Systems. *Chaos*, v. 26, n. 6, jun 2016. ISSN 1054-1500. Citado 2 vezes nas páginas 59 e 60.

BRENNAND, C. A. R. L. et al. An intelligent transportation system for detection and control of congested roads in urban centers. In: *2015 IEEE Symposium on Computers and Communication (ISCC)*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 663–668. Citado na página 19.

BRITO, S.; SILVA, L. R. da; TSALLIS, C. Role of dimensionality in complex networks. *Scientific Reports*, v. 6, jun 2016. ISSN 2045-2322. Citado na página 60.

BRODER, A. et al. Graph structure in the Web. *Computer Networks-The International Journal Of Computer And Telecommunications Networking*, Elsevier Science Bv, v. 33, n. 1-6, p. 309–320, jun 2000. ISSN 1389-1286. Citado na página 60.

CABRAL, R. S.; FRERY, A. C.; RAMIREZ, J. A. Variability analysis of complex networks measures based on stochastic distances. *Physica A- Statistical Mechanics and Applications*, v. 415, p. 73–86, 2014. ISSN 0378-4371. Citado na página 60.

CHAQFEH, M.; LAKAS, A.; JAWHAR, I. A survey on data dissemination in vehicular ad hoc networks. *Vehicular Communications*, Elsevier Inc., v. 1, p. 1–12, 2014. ISSN 2214-2096. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.vehcom.2014.09.001>>. Citado na página 34.

COHEN, R. et al. Resilience of the Internet to random breakdowns. *Physical Review Letters*, v. 85, n. 21, p. 4626–4628, nov 2000. ISSN 0031-9007. Citado 2 vezes nas páginas 32 e 60.

COSTA, J. et al. Disseminação de Dados em VANETs baseado Protocolo para Disseminação em Métricas de Redes Complexas : Um Estudo de Caso com Sistema de Gerenciamento de Trânsito. 2016. Citado 2 vezes nas páginas 34 e 36.

COSTA, L. F. et al. Advances in Physics Characterization of complex networks : A survey of measurements. *Advances in Physics*, v. 8732, 2007. Disponível em: <<http://leonidzhukov.net/hse/2014/socialnetworks/papers/CharacterizationComplexNetworks.pdf>>. Citado na página 25.

COSTA, R. da S. C. F. E. S. Análise de controlabilidade em redes veiculares. In: *L SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, 2018, Rio de Janeiro. Anais eletrônicos Campinas, GALOÁ, 2018*. [S.l.: s.n.], 2018. Citado na página 16.

COWAN, N. J. et al. Nodal Dynamics, Not Degree Distributions, Determine the Structural Controllability of Complex Networks. *Plos One*, v. 7, n. 6, jun 2012. ISSN 1932-6203. Citado na página 60.

DOMINGOS, F. et al. Socially Inspired Data Dissemination for Vehicular Ad Hoc Networks To cite this version : HAL Id : hal-01082984 Socially Inspired Data Dissemination for Vehicular Ad Hoc Networks. 2015. Citado na página 36.

ENDRISS, U.; GRANDI, U. Graph aggregation. *Artificial Intelligence*, v. 245, p. 86 – 114, 2017. ISSN 0004-3702. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0004370217300024>>. Citado na página 32.

FAN, X. et al. UAV-Assisted Data Dissemination in Delay-Constrained VANETs. v. 2018, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 35 e 36.

GAO, X.-D.; SHEN, Z.; WANG, W.-X. Emergence of complexity in controlling simple regular networks. *Epl*, v. 114, n. 6, jun 2016. ISSN 0295-5075. Citado na página 60.

- GAO, X.-D.; WANG, W.-X.; LAI, Y.-C. Control efficacy of complex networks. *Scientific Reports*, v. 6, jun 2016. ISSN 2045-2322. Citado 2 vezes nas páginas 58 e 60.
- GRAMAGLIA, M. et al. *Madrid Traces*. 2017. <<http://www.it.uc3m.es/madrid-traces/>>. Online; acessado 10 Outubro 2017. Citado na página 45.
- GUTIERREZ, R.; DEL-POZO, F.; BOCCALETTI, S. Node Vulnerability under Finite Perturbations in Complex Networks. *Plos One*, v. 6, n. 6, jun 2011. ISSN 1932-6203. Citado na página 60.
- HOPCROFT, J. E.; KARP, R. M. A $n^{5/2}$ algorithm for maximum matchings in bipartite. In: *12th Annual Symposium on Switching and Automata Theory (swat 1971)*. [S.l.: s.n.], 1971. p. 122–125. ISSN 0272-4847. Citado na página 39.
- HU, A. et al. Distributed control of cluster synchronisation in networks with randomly occurring non-linearities. *International Journal Of Systems Science*, v. 47, n. 11, p. 2588–2597, 2016. ISSN 0020-7721. Citado na página 60.
- KALMAN, R. E. Mathematical Description of Linear Dynamical Systems. *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics Series A Control*, v. 1, n. 2, p. 152–192, 1963. ISSN 0887-4603. Disponível em: <<http://epubs.siam.org/doi/10.1137/0301010>>. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 33.
- KAUR, N.; KAD, E. S. Data Dissemination In VANETS- A Review. v. 0869, n. 4, p. 10–13, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 35 e 36.
- KIM, H.; ANDERSON, R. Temporal node centrality in complex networks. v. 026107, n. February, p. 1–8, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 23.
- KITSAK, M. et al. Identification of influential spreaders in complex networks. *Letters*, v. 6, n. November, p. 6–11, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 33 e 36.
- LEBRE, M.-A.; MOUEL, F. L. *Microscopic vehicular mobility trace of Europarc roundabout, Creteil, France*. 2017. <<http://vehicular-mobility-trace.github.io/index.html#dataset>>. Online; acessado 21 Setembro 2017. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 45.
- LEE, J.; SONG, J.; YANG, J.-S. Network structure effects on incumbency advantage. *Strategic Management Journal*, v. 37, n. 8, p. 1632–1648, 2016. ISSN 0143-2095. Citado na página 60.
- LI, F.; WANG, Y.; CAROLINA, N. Routing in Vehicular Ad Hoc Networks : A Survey. *Ieee Vehicular Technology Magazine*, 2007. Citado na página 17.
- LIN, C.-T. Structural controllability. *IEEE Transactions on Automatic Control*, v. 19, n. 3, p. 201–208, June 1974. ISSN 0018-9286. Citado na página 27.
- LIU, G. et al. Scale-free networks of the earth's surface. *International Journal Of Modern Physics B*, v. 30, n. 21, 2016. ISSN 0217-9792. Citado na página 60.
- LIU, Y. et al. Identify influential spreaders in complex networks, the role of neighborhood. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, v. 452, p. 289 – 298, 2016. ISSN 0378-4371. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378437116001941>>. Citado na página 33.

LIU, Y.-Y.; SLOTINE, J.-J.; BARABASI, A.-L. Controllability of complex networks. *Nature*, 2011. Citado 16 vezes nas páginas 9, 13, 14, 15, 27, 28, 33, 36, 37, 42, 44, 48, 49, 53, 57 e 62.

LIU, Y.-Y.; SLOTINE, J.-J.; BARABASI, A.-L. Controllability of complex networks. *Nature*, v. 473, n. 7346, p. 167–173, 2011. ISSN 0028-0836. Citado na página 60.

LIU, Y.-Y.; SLOTINE, J.-J.; BARABASI, A.-L. Control Centrality and Hierarchical Structure in Complex Networks. *Plos One*, v. 7, n. 9, 2012. ISSN 1932-6203. Citado na página 60.

LOMBARDI, A.; HORNQUIST, M. Controllability analysis of networks. *Physical Review E*, v. 75, n. 5, 2, 2007. ISSN 1539-3755. Citado na página 60.

LURGI, M. et al. A Landscape Approach to Invasive Species Management. *Plos One*, v. 11, n. 7, jul 2016. ISSN 1932-6203. Citado na página 60.

MACEDO, R. et al. Uma Avaliação Experimental de Desempenho do Roteamento Multicaminhos em Redes Veiculares. *Sbrc2013.Unb.Br*, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 13 e 34.

METZ, J. et al. Redes Complexas: Conceitos e Aplicações. *Relatórios Técnicos do ICMC*, 2007. Disponível em: <http://www.icmc.usp.br/CMS/Arquivos/arquivos{_}enviados/BIBLIOTECA{_}113{_}R>. Citado 3 vezes nas páginas 9, 20 e 24.

NACHER, J. C.; AKUTSU, T. Dominating scale-free networks with variable scaling exponent: heterogeneous networks are not difficult to control. *New Journal of Physics*, v. 14, jul 2012. ISSN 1367-2630. Citado na página 60.

NAMTIRTHA, A. et al. Identifying influential spreaders in complex networks based on kshell hybrid method. *Physica A*, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 33 e 36.

NEPUSZ, T.; VICSEK, T. Controlling edge dynamics in complex networks. *Nature Physics*, v. 8, 2012. Citado 3 vezes nas páginas 31, 48 e 62.

NEPUSZ, T.; VICSEK, T. Controlling edge dynamics in complex networks. *Nature Physics*, v. 8, n. 7, p. 568–573, jul 2012. ISSN 1745-2473. Citado na página 60.

NEWMAN, M. E. J. Models of the small world. *Journal Of Statistical Physics*, v. 101, n. 3-4, p. 819–841, nov 2000. ISSN 0022-4715. Citado na página 60.

NEWMAN, M. E. J. The Structure and Function of Complex Networks. *Siam Review*, v. 45, 2003. Disponível em: <<http://arxiv.org/abs/cond-mat/0303516>>. Citado 4 vezes nas páginas 9, 13, 24 e 25.

NEWMAN, M. E. J. *Networks: an introduction*. Oxford; New York: Oxford University Press, 2010. ISBN 9780199206650 0199206651. Disponível em: <http://www.amazon.com/Networks-An-Introduction-Mark-Newman/dp/0199206651/ref=sr_1_5?ie=UTF8&qid=1352896678&sr=8-5&keywords=complex+networks>. Citado na página 26.

NEWMAN, M. E. J.; MOORE, C.; WATTS, D. J. Mean-field solution of the small-world network model. *Physical Review Letters*, v. 84, n. 14, p. 3201–3204, 2000. ISSN 0031-9007. Citado na página 60.

NOVKOVIC, M. et al. Topological Small-World Organization of the Fibroblastic Reticular Cell Network Determines Lymph Node Functionality. *Plos Biology*, v. 14, n. 7, jul 2016. ISSN 1545-7885. Citado na página 60.

OMS. *Dados de acidentes de trânsito*. 2017. Accessed = 2018-07-30. Disponível em: <<http://www.who.int/eportuguese/countries/bra/pt/>>. Citado na página 19.

OpenStreetMap contributors. *Planet dump retrieved from <https://planet.osm.org>*. 2018. <<https://www.openstreetmap.org/>>. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 46.

RUTHS, J.; RUTHS, D. Control Profiles of Complex Networks. *Science*, v. 343, n. 6177, p. 1373–1376, mar 2014. ISSN 0036-8075. Citado na página 60.

STROGATZ, S. H. Exploring complex networks. *Nature*, v. 410, n. 6825, p. 268–276, 2001. ISSN 0028-0836. Disponível em: <<http://www.nature.com/doi/10.1038/35065725>>. Citado 2 vezes nas páginas 32 e 58.

UPPOOR DIALA NABOULSI, M. F. S. *Vehicular mobility trace of the city of Cologne, Germany*. 2016. <<http://kolntrace.project.citi-lab.fr/#>>. Online; acessado 10 de dezembro 2018. Citado 3 vezes nas páginas 9, 46 e 55.

VIRIYASITAVAT, W.; TONGUZ, O. K. UV-CAST : An Urban Vehicular Broadcast Protocol. n. November, p. 116–124, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 35 e 36.

WALLINGA, J.; EDMUNDS, W. J.; KRETZSCHMAR, M. Perspective: human contact patterns and the spread of airborne infectious diseases. *Trends In Microbiology*, v. 7, n. 9, p. 372–377, 1999. ISSN 0966-842X. Citado 2 vezes nas páginas 32 e 60.

WANG, C.; TSAI, H. Detecting urban traffic congestion with single vehicle. In: *2013 International Conference on Connected Vehicles and Expo (ICCVE)*. [S.l.: s.n.], 2013. p. 233–240. ISSN 2378-1289. Citado 5 vezes nas páginas 13, 14, 18, 19 e 35.

WATTS, D. J.; STROGATZ, S. H. Collective dynamics of ‘small-world’ networks. *Nature*, v. 393, n. 6684, p. 440–442, jun 1998. ISSN 0028-0836. Citado 3 vezes nas páginas 32, 59 e 60.

WEB Of Science. 2017. <http://apps-webofknowledge.ez9.periodicos.capes.gov.br/WOS_GeneralSearch_input.do?product=WOS&search_mode=GeneralSearch&SID=2BQJWT5KPkJcY6g5eE9&preferencesSaved=>>. Accessed: 2017-01-30. Citado na página 58.

Wordle. 2017. <<http://www.wordle.net/>>. Accessed: 2017-02-05. Citado 2 vezes nas páginas 58 e 59.

WU, H. et al. *MDDV: A Mobility-Centric Data Dissemination Algorithm*. 2004. Citado na página 13.

YAN, G. et al. Controlling Complex Networks: How Much Energy Is Needed? *Physical Review Letters*, v. 108, n. 21, 2012. ISSN 0031-9007. Citado na página 60.

YOUNES, M. B.; BOUKERCHE, A. Efficient traffic congestion detection protocol for next generation vanets. In: *2013 IEEE International Conference on Communications (ICC)*. [S.l.: s.n.], 2013. p. 3764–3768. ISSN 1550-3607. Citado na página 35.

YOUSEFI, S.; MOUSAVI, M. S.; FATHY, M. Vehicular Ad Hoc Networks (VANETs): Challenges and Perspectives. n. July 2015, 2006. Citado na página 20.

YUAN, Z. et al. Exact controllability of complex networks. *Nature Communications*, v. 4, 2013. ISSN 2041-1723. Citado na página 60.

ZHANG, R. et al. Fuzzy Evaluation of Network Vulnerability. *Quality And Reliability Engineering International*, v. 32, n. 5, p. 1715–1730, jul 2016. ISSN 0748-8017. Citado na página 60.