

ANÁLISE E CARACTERIZAÇÃO DE SISTEMAS AUTÔNOMOS COMO REDES COMPLEXAS

Matheus Tavares Araujo

Universidade Federal de Alagoas

Av. Manoel Severino Barbosa - Bom Sucesso, Arapiraca - AL, 57309-005

matheus.araujo@arapiraca.ufal.br

Filipe Emanuel Silva Costa

Universidade Federal de Alagoas (UFAL)

57072-900 - Maceió-AL - Brasil

filipeemanuel10@hotmail.com

Raquel da Silva Cabral

Universidade Federal de Alagoas

Av. Manoel Severino Barbosa - Bom Sucesso, Arapiraca - AL, 57309-005

raquel.cabral@arapiraca.ufal.br

RESUMO

A teoria das redes complexas possui várias características, incluindo a interdisciplinaridade que permite a aplicação dessas redes em diferentes cenários. Em algumas redes, podemos caracterizar as estruturas como redes complexas, como a Internet, como rotas de aeroportos, relacionamentos entre pessoas nas redes sociais e mapeamento de tráfego nas cidades. Um cenário atraente para o uso de redes complexas é em sistemas autônomos (ASs). As redes de AS são sistemas com políticas de roteamento padrão para a Internet. Existem vários tipos de classificação para ASs, cada um com sua particularidade. Este trabalho tem como objetivo identificar as propriedades complexas da rede em alguns tipos de sistemas AS. Utilizamos um conjunto de dados do Centro de Análise Aplicada de Dados da Internet (CAIDA) e medidas de centralidade da teoria complexa das redes: caminhos mais curtos, centralidade de intermediação, coeficiente de agrupamento, distribuição de graus e proximidade. Os resultados mostram que podemos caracterizar as classes AS como redes complexas.

PALAVRAS CHAVE. Redes Complexas, Caracterização, Análise.

ABSTRACT

The theory of complex networks has several characteristics, including the interdisciplinarity that allows the application of these networks in different scenarios. In some networks, we can characterize the structures as complex networks, such as the Internet, such as airport routes, relationships between people on social networks, and traffic mapping in cities. An attractive scenario for the use of complex networks is in autonomous systems (ASs). The SAs are systems with standard routing policies for the Internet. There are several types of classification for ASs, each with its particularity. This work aims to identify the complex network properties in some types of ASs systems. We use a data set from the Center for Applied Internet Data Analysis(CAIDA) and centrality measures from complex network theory: Shortest Paths, Betweenness Centrality, Clustering Coefficient, Degree Distribution, and Closeness. The results show that we can characterize the AS classes as complex networks.

KEYWORDS. Complex Networks, Characterization, Analysis.

1. INTRODUÇÃO

O mundo está repleto de sistemas complexos, desde células compostas por milhares de moléculas até a sociedade, uma coleção de bilhões de indivíduos interagindo. Compreender, modelar e quantificar esse tipo de sistema é um grande desafio para a ciência afirma Barabasi [2007]. As redes podem ser formadas pelas relações entre vários indivíduos e sistemas, como: pessoas, redes sociais, redes veiculares, distribuição de energia, Wide World Web (WWW), Internet e diversas outras. Nesse contexto, grande parte dos pesquisadores utiliza a Teoria de Grafos para modelar e analisar a estrutura e o comportamento de diferentes redes. Para Barabási et al. [2000], as relações entre os componentes de um grafo, podem reproduzir tanto grafos totalmente aleatórios, como grafos que seguem uma estrutura bem regular. Modelar as redes em grafos pode colaborar na busca de características como a formação de comunidades, a densidade, a relevância dos elementos da rede, a aglomeração, a robustez, entre outras.

No início do século XX surgiram as redes sociais vistas em Gould [1993], baseadas em estudos feitos para compreender como determinados efeitos coletivos aconteciam entre pessoas e como eram formados os laços de amizades entre elas. Em meados de 1999, Watts e Strogatz [1998] e Barabási e Albert [1999] iniciaram os estudos a um novo campo da ciência, que além de estudar as redes sociais deram início ao estudo de outros tipos de rede, conhecidas hoje como Redes Complexas. [Barabasi, 2003] diz que as Redes Complexas são grafos que apresentam crescimento constante e permitem modelar estruturas e aspectos do mundo real por meio de elementos e conexões entre eles, ou seja, por meio de grafos mostra [Newman, 2010] em seu estudo. A Teoria de Redes Complexas é utilizada em diversos campos de estudo, como física, engenharia, computação, astronomia, entre outras, exemplifica Barabasi [2003], possibilitando assim que pesquisadores de áreas distintas estudem perspectivas diferentes e encontrem contribuições para o crescimento de diversos campos científicos. Essa teoria engloba conceitos de teoria dos grafos, mecânica, estatística, sistemas não lineares e sistemas complexos.

Segundo Barabási e Albert [1999] e Guimerà e Nunes Amaral [2005], essas redes não possuem uma topologia única, ou seja, podem mudar a qualquer momento mediante a perturbações, como por exemplo a adição e a remoção de nós, que podem ser ocasionadas de forma intencional ou não. A título de exemplo, em seu trabalho, Cabral et al. [2014] demonstra o resultado do uso de medidas de centralidade para Redes Complexas após submetidas a perturbações em suas respectivas topologias, onde percebe-se a sensibilidade de redes livres de escala em relação as demais redes.

A partir dos conhecimentos obtidos da Teoria de Redes Complexas e da Teoria dos grafos, diversos sistemas complexos em formato de rede, podem ser estudados, visualizados e analisados, dentre eles os sistemas autônomos. Um sistema autônomo (AS) é um conjunto de prefixos IPs roteáveis da Internet pertencentes a uma rede ou a um conjunto de redes gerenciadas, controladas e supervisionadas por uma única entidade ou organização. Um AS utiliza uma política de roteamento comum controlada pela entidade e recebe um número de identificação, chamado de *ASN (Autonomous Number System)*, exclusivo de 16 dígitos que o torna globalmente reconhecido conforme mostrado em Mohit Lad and Ricardo Oliveira [2020]. Este trabalho propõe analisar e caracterizar as diferentes classificações de um conjunto de dados de Sistemas Autônomos (ASs) após o uso de medidas de centralidade utilizadas em Redes Complexas.

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

2. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

Seja uma rede de sistemas autônomos (ASs) constituída dos conjuntos de sistemas autônomos com seus respectivos números (V) e ligações (L) entre os mesmos. O conjunto de ASs pode ser representado por $V = \{v_1, v_2, v_3, \dots, v_n\}$. As relações entre esses sistemas podem ser representadas por $L = \{l_1, l_2, l_3, \dots, l_n\}$, sendo essas relações definidas por uma ligação entre um AS A e B , nesse estudo em questão essas ligações tem valor, dependendo do tipo de ligação de AB . Se A é provedor de B a ligação recebe o valor 1, se B é provedor de A a ligação recebe -1 e se AB for uma ligação ponto-a-ponto a ligação tem valor 0. A figura 2 demonstra a representação de um modelo de sistema autônomo descrito anteriormente.

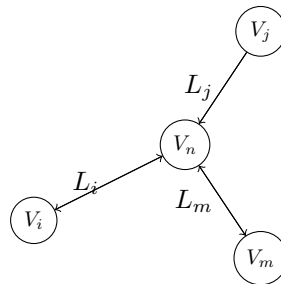


Figura 1: Estabelecimento de ligações entre Sistemas Autônomos. Fonte: Autor.

Para esse feito, foi estudado um conjunto de dados contendo as informações relacionadas aos diferentes tipos de ASs, como por exemplo a descrição da organização no qual o AS foi classificado e o número do AS. Além disso, neste conjunto de dados, estão presentes as relações entre os ASs, possibilitando modelar os dados dos sistemas como grafos e consequentemente propiciando a avaliação com medidas de centralidade de Redes Complexas.

Desta forma, neste trabalho, temos o seguinte questionamento:

Todas as classes de ASs podem ser caracterizadas como Redes Complexas?

A problemática deste trabalho está relacionada com a análise de redes de ASs, para avaliar se tais redes podem ser consideradas Redes Complexas.

À vista disso, foi levantada a seguinte hipótese:

H1: As classes de Sistemas Autônomos podem ser caracterizadas como Redes Complexas a partir dos resultados das medidas de centralidade.

Para responder a questão de pesquisa, aplicamos as medidas de centralidade (Shortest Paths, Betweenness Centrality, Clustering Coefficient, Degree Distribution, e Closeness) nos grafos modelados a partir das classes de ASs determinando se a referida rede pode ser caracterizada como Rede Complexa.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Esta Seção apresenta os conceitos necessários para o entendimento do trabalho: Redes Complexas, Grafos e Sistemas Autônomos.

Em seu trabalho Cabral et al. [2014] mostra que Redes Complexas, redes de conexão ou simplesmente redes, é uma área disciplinar recente que envolve a formalidade da Teoria de grafos e uma análise baseada em ferramentas de Estatística. Uma rede pode ser considerada como um conjunto de elementos que são associados a nós ou vértices que tem uma ligação por meio de uma aresta. Pode-se considerar utilizar grafos gerados por meio de uma matriz de adjacência $M[i, j]$ para

trabalhar a rede de forma intuitiva, onde os índices i e j representam os nós e os elementos da matriz M_{ij} representam as arestas, no caso, as ligações entre os nós. A motivação de estudar as Redes Complexas parte da vontade de entender os diversos tipos de sistemas reais que vão desde redes de comunicação até sistemas de cadeias ecológicas. De uma maneira geral, as Redes Complexas podem ser classificadas em quatro tipos diferentes: as redes sociais, as redes biológicas, as redes tecnológicas e as redes de informação.

Uma rede social é a caracterização de um grupo de uma ou mais pessoas especificamente, um grupo de pessoas com padrão de contato ou relacionamentos, como pode ser visto em Scott [2000], Wasserman e Faust [1994], Moreno e Jennings [1934], Connor e Barre [1999], e Rapoport e Horvath [1961]. As redes biológicas são outro tipo de rede classificadas como Redes Complexas. Por possuírem uma grande dificuldade na análise e obtenção de dados, essas redes se utilizam também das teorias e modelos desenvolvidos para outros tipos de redes. Essas redes foram bem estudadas por Stelling [2002] e Wagner e Fell [2001]. Vê-se em Amaral et al. [2000] que redes tecnológicas são aquelas que tiveram a ação direta do homem, como por exemplo rotas de transporte, redes de distribuição de eletricidade e a mais conhecida e estudada, a Internet. Um exemplo de redes de informação, ou rede de conhecimento, é a rede de citações entre artigos acadêmicos. Onde tem-se uma rede unidirecional entre artigo A e artigo B, onde B cita A em seu conteúdo. O artigo B sempre vai citar um artigo já existente, o que demonstra que essa rede aponta relacionamentos passados. Lotka [1926] em sua pesquisa mostra um pouco sobre este assunto.

Já a teoria dos grafos é um apoio natural para o estudo matemático de redes. As formalizações matemáticas utilizadas como medidas em Redes Complexas são obtidas a partir de um grafo. Para isso, faz-se necessário entender alguns conceitos relacionados a esta teoria. Estes conceitos serão apresentados aqui e utilizados para melhor interpretar o trabalho. Um grafo pode ser considerado um desenho no qual tem-se alguns pontos e linhas ligando pares de pontos, os pontos podem estar todos ligados ou possuírem alguns sem ligação, ou ainda um ponto pode estar ligado a ele mesmo. Em termos matemáticos um grafo é representado pela notação $G = \{P, E\}$, onde P é um conjunto de N nós ou vértices e E , um conjunto de arestas ou ligações entre dois elementos de P . O grafo da figura 3 mostra um grafo com o conjunto de vértices $V = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ e um conjunto de arestas $E = \{\{1, 2\}, \{1, 5\}, \{2, 3\}, \{2, 5\}, \{3, 4\}, \{3, 5\}, \{4, 5\}, \{4, 6\}\}$.

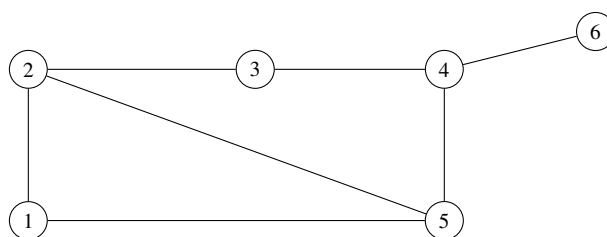


Figura 2: Grafo Simples. Fonte: Autor.

A Internet pode ser decomposta em sub-redes conectadas que estão sob a administração de autoridades administrativas separadas. Como mostra na figura 3. Faloutsos et al. [1999] define essas sub-redes são chamadas como Sistemas Autônomos (ASs). Tendo em vista isso, pode-se dizer que um Sistema Autônomo é um conjunto de endereços IPs que são gerenciados por um ou mais operadores de rede que tem sua política de roteamento clara e definida. Erroneamente a expressão Sistema Autônomo é utilizada, como sendo apenas uma maneira de agrupar as redes que estão sob o mesmo gerenciamento, porém se há mais de uma política de roteamento em um grupo, mais de

um AS é necessário. A definição de Sistema Autônomo pode variar de literatura para literatura, mas coincidem em um mesmo domínio afirma Govindan e Reddy [1997]. Cada AS tem seu número de registro que o identifica na rede, número esse que é denominado de ASN. O ASN é o responsável pela troca de informação das rotas entre os ASs. Para que a complexidade da tabela mundial de roteamento não aumente, um novo ASN só pode ser designado se uma nova política de roteamento se fizer necessária.

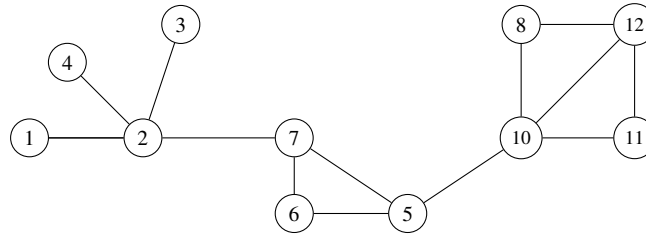


Figura 3: A estrutura da Internet sob a visão de Sistemas Autônomos. Fonte: Autor.

4. MEDIDAS DE CENTRALIDADE

Quando analisamos uma rede, é importante determinar quais são os elementos mais significativos (ou centrais). As medidas de centralidade permitem quantificar essa importância. Nesta seção, apresentaremos mais precisamente as medidas de centralidade.

4.1. Degree Distribution

A distribuição dos graus $p(K)$ pode ser definida como a probabilidade de um vértice $v_i \in V$, selecionado aleatoriamente, ter grau K , i.e., qual a fração de nós no grafo tem grau K . A distribuição dos graus é uma propriedade indispensável para qualquer rede e se for aplicada em conjunto com outras medidas pode determinar a classe a que uma rede pertence.

4.2. Shortest Paths

Shortest Paths ou comprimento médio dos caminhos mínimos, é uma medida relacionada a distância. Calculada como a média dos caminhos mínimos entre todos os pares de vértices de G , onde G é o grafo. O algoritmo pode ser calculado de duas formas, que são: Fonte única, onde dado um grafo G , com vértices V , com arestas E e com função de peso $w(u, v) = w_u, v$, e um único vértice fonte s , retorna o caminho mínimo de s para todos os outros vértices em V . E de todos os pares, onde dado um grafo G , com vértices V , com arestas E e com função de peso $w(u, v) = w_u, v$, retorna o caminho mínimo de u para v para todo (u, v) em V .

4.3. Betweenness Centrality

O *betweenness centrality*, ou centralidade de intermediação, é a medida que quantifica a centralidade de um vértice na rede. As medidas de centralidade são utilizadas para classificar, sob algum aspecto, os elementos (vértices ou arestas) mais importantes da rede afirma Almiron [2010].

O *betweenness* é definido em função do número de caminhos mínimos que passam por um vértice v_u :

$$B_u = \sum_{i,j \in V} \frac{\sigma(i, u, j)}{\sigma(i, j)} \quad (1)$$

em que $\sigma(i, u, j)$ é o número de caminhos mínimos entre v_i e v_j que passam por v_u e $\sigma(i, j)$ é o número total de caminhos mínimos entre v_i e v_j .

4.4. Closeness

O *Closeness* ou centralidade de proximidade, é uma medida de centralidade baseada em caminhos, sendo calculada como o inverso da soma das distâncias Geodésicas entre um vértice e todos os outros vértices da rede, matematicamente definido por:

$$c(v_i) = \frac{1}{\sum_j d(v_i, v_j)} \quad (2)$$

4.5. Clustering Coefficient

Em Redes Complexas, o conceito de agrupamento foi introduzido como uma forma de quantificar a transitividade das conexões, i.e., a presença de triângulos conectados na rede. Conceito esse introduzido por Newman e Watts [1999].

O coeficiente de agrupamento pode ser uma medida local, se definido para cada vértice do grafo, ou global, quando refere-se ao grafo. O coeficiente de agrupamento local C_i é definido como o número de arestas ne_i que conectam os vizinhos (vértices adjacentes) do vértice v_i em G . Matematicamente:

$$C_i = \frac{2ne_i}{K_i(K_i - 1)} \quad (3)$$

em que $K_i(K_i - 1)$ é o número máximo possível de arestas no subgrafo de vizinhos de v_i e, por definição, $0 \leq C_i \leq 1$.

O coeficiente de agrupamento global é definido como a média de todos os valores de C_i em G , matematicamente tem-se:

$$C = \frac{1}{N} \sum_{i \in V} C_i \quad (4)$$

em que, $0 \leq C \leq 1$.

5. MÉTODO

Esta seção tem por objetivo apresentar a metodologia abordada na elaboração deste trabalho, assim como o conjunto de dados e as medidas analisadas.

Estudamos neste projeto um conjunto de dados de Sistemas Autônomos (ASs) disponibilizado por Dimitropoulos et al. [2020]. O referido conjunto de dados, permite observar a taxonomia de uma rede composta por ASs, classificada por um algoritmo. Para a manipulação de dados foi utilizada a linguagem de programação *R*, disponível em R Core Team [2020] junto com o pacote *igraph* disponível em Csardi e Nepusz [2020] para os cálculos das medidas e plotagem de gráficos, respectivamente.

São encontrados dois arquivos neste conjunto de dados. O primeiro referente ao conjunto de atributos dos ASs extraídos e registro de dados de roteamento da Internet que contém os campos: Número do AS, registros de descrição da organização, número de servidores inferidos, número de pares inferidos, número de clientes inferidos, número equivalente de /24 prefixos cobrindo todo o espaço IP anunciado, número de prefixos de IP anunciados, e classe de AS inferido. As classes dos ASs foram definidas nas seguintes organizações: Abstained para os ASs no qual o algoritmo não conseguiu efetuar uma previsão, COMP para clientes, EDU para Universidades, IX para IXPs (Pontos de troca de tráfego), NIC (Placas de rede), T1 para pequenos ISPs (Serviços provedor de internet) e T1 para grandes ISPs.

O segundo arquivo apresenta relacionamentos entre os ASs classificados. Cada linha desse arquivo é composta por uma tripla $A B C$, que faz menção a ligação entre os ASs, podendo

estas serem: Cliente-Servidor, Servidor-Cliente ou Peer-to-Peer. O estudo realizado neste trabalho baseou-se especialmente no segundo arquivo do conjunto de dados, que nos possibilitou gerar um grafo para análise.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na primeira fase do estudo, foi verificado que Sistemas Autônomos (ASs) podem ser caracterizados como Redes Complexas, por serem redes tipo malha e por possuírem características de redes livres de escala conforme mostra a figura 4, algumas medidas de centralidade que podem ser analisadas em ASs e que compõem este estudo são: O Coeficiente de Agrupamento (*Clustering Coefficient*), a Distribuição de Graus (*Degree Distribution*), a Centralidade de Nós (*Betweenness Centrality*) na rede e a medida de Proximidade (*Closeness*).

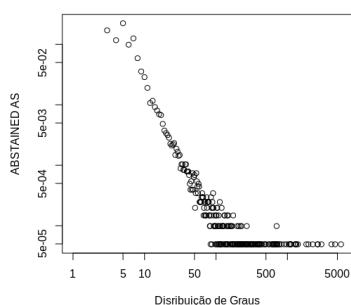
Inicialmente foi realizado o estudo comparativo dos diferentes tipos de ASs. Foram verificadas as medidas de centralidade globais do conjunto de dados escolhido. Como segue na tabela 1.

Tabela 1: Medidas de Centralidade Globais. Fonte: Autor.

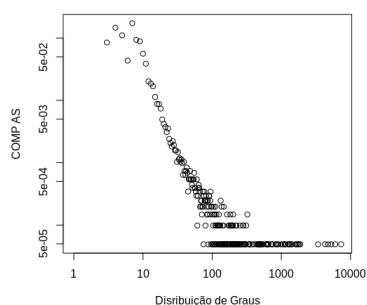
AS	Average Degree	Betweenness	Clustering Coefficient	Shoterst Path
ABSTAINED	0.1375179	0.1550170	0.009313696	3.779442
COMP	0.1797018	0.1554025	0.009313696	3.779442
EDU	0.2319411	0.1759133	0.009313696	3.779442
IX	0.1179527	0.1603974	0.009313696	3.779442
NIC	0.1204318	0.1602988	0.009313696	3.779442
T1	0.1779895	0.1632765	0.009313696	3.779442
T2	0.1449766	0.1563867	0.009313696	3.779442

A segunda parte do trabalho foi analisar a distribuição dos graus das redes de ASs. Como mostra a figura 4, os ASs tem comportamento de redes livres de escala. Independente da classificação dos ASs estudados neste trabalho, todos se comportaram de forma semelhante.

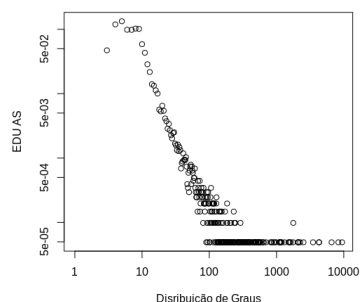
Os resultados das redes analisadas nesse estudo, visualizados na figura 4 mostram o comportamento das distribuições dos graus conforme os nós vão aumentando seguindo as leis de potência. Esse evento demonstra a diminuição dos agrupamentos, característica importante das redes livres de escala. As redes livres de escala são descritas em Barabási et al. [2000] por um grafo conexo, com $|V| > 1$ inicial que cresce com continuidade ao longo do tempo quando um novo vértice é ligado aleatoriamente por uma probabilidade $P(k)$ que depende da quantidade de ligações de cada vértice. Ou seja, os vértices com maior ligações tendem a se tornarem adjacentes aos novos vértices, claro que o oposto também ocorre. Percebe-se que em todas as classes de ASs mostradas em 4, quando a distribuição dos graus aumenta os agrupamentos diminuem, novos nós são inseridos e nós que anteriormente eram fortes começam a ficar mais densos devido a lei de potência. As redes livres de escala (*Scale-Free Networks*) são redes que possuem uma topologia bem específica, uma vez que possui poucos nós fortemente conectados e muitos nós com pouquíssimas ligações. Essas redes apresentam forte capacidade de resistência quando perturbadas, por possuírem muitos nós com baixo grau, fazendo com que perturbações aleatórias tenham baixo impacto na geração de falhas de conexão. No entanto, essas conexões podem apresentar falhas significativas quando um nó fortemente conectado é removido segundo Callaway et al. [2001]. Uma vez que sabe-se como são definidas as redes livre de escala e verificamos os resultados obtidos nesse estudo, podemos então dizer que as redes de ASs estudadas apresentam comportamento semelhante a redes livre de escala.



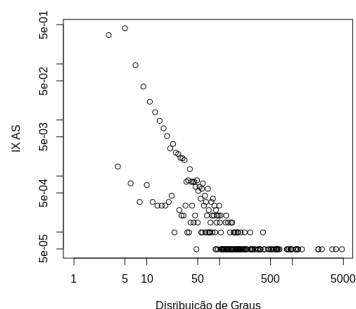
(a) Distribuição de Graus da Classe ABSTAINED



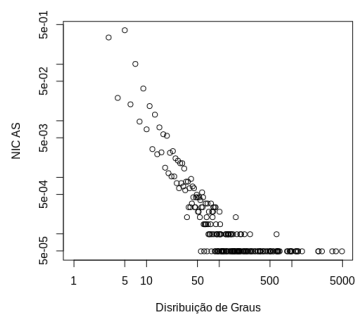
(b) Distribuição de Graus da Classe COMP



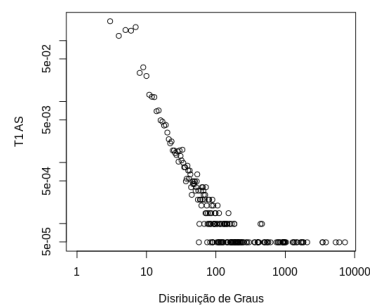
(c) Distribuição de Graus da Classe EDU



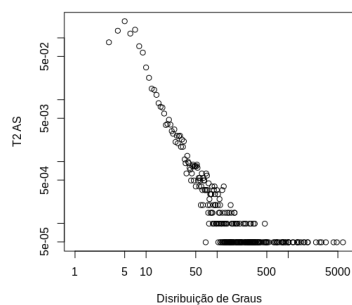
(d) Distribuição de Graus da Classe IX



(e) Distribuição de Graus da Classe NIC



(f) Distribuição de Graus da Classe T1

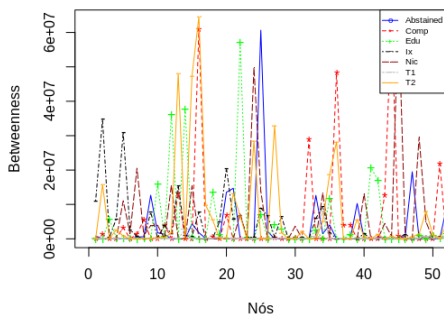


(g) Distribuição de Graus da Classe T2

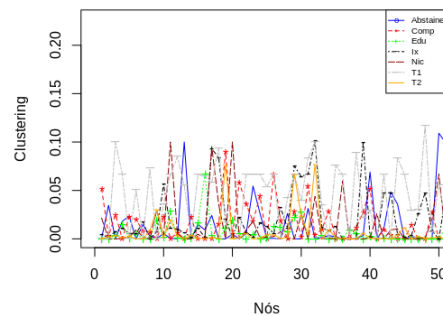
Figura 4: Distribuição de Graus. Fonte: Autor

Ademais, foram calculadas as medidas locais dos diferentes tipos de ASs. Percebe-se que os ASs, mesmo fazendo parte de grupos diferentes, apresentam as mesmas características, como mostrado na figura 5. Isso se dá pelo fato de que são redes que possuem características de redes livres de escala.

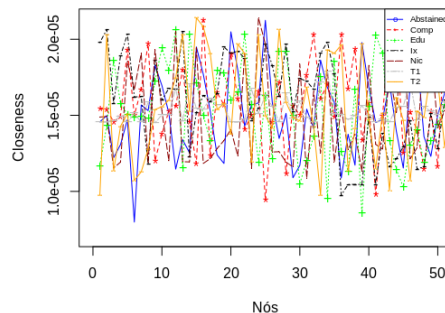
Na figura 5 (a) vemos que as redes COMP, EDU e NIC, possuem nós com picos elevados de centralidade, o que significa que muitos dos nós são fortemente conectados e que quando um novo nó é inserido aleatoriamente, seguindo a lei de potência, ele é conectado aleatoriamente a um nó que seja forte. As redes COMP, EDU e NICs costumam receber mais conexões pois no cenário real elas são responsáveis pelos clientes, redes de universidades e placas de rede, respectivamente. A figura 5(b) demonstra os resultados obtidos utilizando a medida relacionada ao agrupamento dos nós que para quantificar a transitividade de conexões, ou seja, a presença de triângulos na rede. Verificamos que as redes COMP, NIC e T1 apresentam fortes picos para esta medida. A figura 5(c) verificamos que os padrões para todas as redes são similares, uma vez que trata da proximidade dos nós nas redes. Como as redes analisadas e apresentadas no gráfico seguem os padrões de redes livres de escala, tendem a ter poucos nós fortemente conectados e muitos nós com conexões fracas, logo a proximidade dos nós tende a ter altos e baixos.



(a) Betweenness Local



(b) Clustering Local



(c) Closeness Local

Figura 5: Medidas de Centralidade Locais. Fonte: Autor

7. CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo analisar e caracterizar uma rede real aplicando medidas de Redes Complexas. O estudo foi feito em um conjunto de Sistemas Autônomos (ASs) que foi subdividido em classes. Para realizar esse estudo foram utilizadas as medidas *Betweenness Centrality* (BC), *Closeness*, *Clustering* e *Degree Distribution*, que possibilitaram uma análise minuciosa dos resultados obtidos.

Neste trabalho foi feito um estudo comparativo entre as diferentes classes de ASs. Para isso foram gerados gráficos comparativos com as medidas de centralidade em questão e também analisado o comportamento dos ASs com relação as mesmas. Fez-se o uso dos histogramas de cada medida em questão para a geração dos gráficos *scatter-plots* em escala *dilog*.

Foi confirmada a hipótese levantada no início deste trabalho, que as classes de Sistemas Autônomos podem ser classificadas como Redes Complexas a partir dos resultados das medidas de centralidade, uma vez que todas as classes estudadas apresentaram comportamento de redes livres de escala.

Para trabalhos futuros, perturbações na rede podem ser feitas para verificar o comportamento das redes observadas nesse estudo. As perturbações tem por objetivo analisar até quando uma rede pode sofrer alterações sem perder suas características.

O resultado obtido nesse trabalho é um estudo comparativo entre as classes de ASs tendo como base medidas de centralidade utilizadas em Redes Complexas, esse estudo comparativo mostra que Sistemas Autônomos podem ser caracterizados como Redes Complexas. Com isso, temos que a metodologia proposta cumpriu com os objetivos da pesquisa, assim como aceitar a hipótese H1.

8. Agradecimentos

Os autores agradecem ao Curso de Graduação em Ciência da Computação da Universidade Federal de Alagoas - Campus Arapiraca.

Referências

- Almiron, H. S. O. E. M. R. d. M. J. G. M. G. D. L. S. P. O. d. C. F. D. d. A. A. L. L. M. R. A. F. F. A. C. . L. A. A. F., M. G.; Ramos (2010). Redes complexas na modelagem de redes de computadores. *Em XVIII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos*, pp. 1–49. Sociedade Brasileira de Computação.
- Amaral, L. A. N., Scala, A., Barthélémy, M., e Stanley, H. E. (2000). Classes of small-world networks. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 97(21):11149–11152. ISSN 0027-8424. URL <https://www.pnas.org/content/97/21/11149>.
- Barabasi, A. (2007). The architecture of complexity. *IEEE Control Systems Magazine*, 27(4):33–42.
- Barabasi, A.-L. (2003). *Linked: How Everything Is Connected to Everything Else and What It Means for Business, Science, and Everyday Life*. Basic Books. ISBN 978-0-452-28439-5.
- Barabási, A.-L. e Albert, R. (1999). Emergence of scaling in random networks. *Science*, 286(5439): 509–512. ISSN 0036-8075. URL <https://science.sciencemag.org/content/286/5439/509>.
- Barabási, A.-L., Albert, R., e Jeong, H. (2000). Scale-free characteristics of random networks: the topology of the world-wide web. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 281(1):69 – 77. ISSN 0378-4371. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378437100000182>.

- Cabral, R. S., Frery, A. C., e Ramírez, J. A. (2014). Variability analysis of complex networks measures based on stochastic distances. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 415:73 – 86. ISSN 0378-4371. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378437114006657>.
- Callaway, D., Newman, M., Strogatz, S., e Watts, D. (2001). Network robustness and fragility: Percolation on random graphs. *Physical review letters*, 85:5468–71.
- Connor, H. M., R. e Barre, L. (1999). Superalliance of bottlenose dolphins. *Nature*, 397:571–572.
- Csardi, G. e Nepusz, T. (2020). igraph - network analysis. <https://igraph.org/>. Accessed: 2020-03-09.
- Dimitropoulos, X., Krioukov, D., Riley, G., e claffy, k. (2020). Center for applied internet data analysis. <https://www.caida.org/publications/papers/2006/revealingas/>. Accessed: 2020-03-09.
- Faloutsos, M., Faloutsos, P., e Faloutsos, C. (1999). On power-law relationships of the internet topology. *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, 29(4):251–262. ISSN 0146-4833. URL <https://doi.org/10.1145/316194.316229>.
- Gould, R. V. V. (1993). Collective action and network structure. *American sociological review.*, 58 (2). ISSN 0003-1224.
- Govindan, R. e Reddy, A. (1997). An analysis of internet inter-domain topology and route stability. In *Proceedings of INFOCOM '97*, volume 2, p. 850–857 vol.2.
- Guimerà, R. e Nunes Amaral, L. A. (2005). Functional cartography of complex metabolic networks. *Nature*, 433(7028):895—900. ISSN 0028-0836. URL <https://europepmc.org/articles/PMC2175124>.
- Lotka, A. J. (1926). The frequency distribution of scientific productivity. *Journal of the Washington Academy of Sciences*, 16(12):317–323. ISSN 00430439. URL <http://www.jstor.org/stable/24529203>.
- Mohit Lad and Ricardo Oliveira (2020). What are autonomous system numbers (asn)? <https://www.thousandeyes.com/learning/glossary/as-autonomous-system>. Accessed: 2020-04-01.
- Moreno, J. e Jennings, H. (1934). *Who Shall Survive?: A New Approach to the Problem of Human Interrelations*. Nervous and mental disease monograph series. Nervous and mental disease publishing Company. URL <https://books.google.com.br/books?id=39QhAAAAAAAJ>.
- Newman, M. E. J. e Watts, D. J. (1999). Scaling and percolation in the small-world network model. *Physical Review E*, 60(6):7332–7342. ISSN 1095-3787. URL <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevE.60.7332>.
- Newman, M. (2010). *Networks: An Introduction*. Oxford University Press, Inc., USA. ISBN 0199206651.

- R Core Team (2020). R: The r project for statistical computing. <https://www.r-project.org/>. Accessed: 2020-03-09.
- Rapoport, A. e Horvath, W. J. (1961). A study of a large sociogram. *Behavioral Science*, 6 (4):279–291. URL <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/bs.3830060402>.
- Scott, J. (2000). *Social Network Analysis: A Handbook*. Sage Publications, London, 2nd edition.
- Stelling, K. S. B. K. e a., J. (2002). Metabolic network structure determines key aspects of functionality and regulation. *Nature*, 420:190–193.
- Wagner, A. e Fell, D. A. (2001). The small world inside large metabolic networks. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, 268(1478):1803–1810. URL <https://royalsocietypublishing.org/doi/abs/10.1098/rspb.2001.1711>.
- Wasserman, S. e Faust, K. (1994). *Social Network Analysis: Methods and Applications*. Structural Analysis in the Social Sciences. Cambridge University Press.
- Watts, D. J. e Strogatz, H. H. (1998). Collective dynamics of ‘small-world’ networks. *Nature*, 393: 440–442.