

Em Busca do Vizinho Perfeito: Um Modelo para Estratégias de Gerência de Vizinhança em Sistemas Descentralizados de Distribuição de Conteúdo

Matheus B. Lehmann, Rodolfo S. Antunes, Marinho P. Barcellos

¹Instituto de Informática - Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Av. Bento Gonçalves, 9500 - Porto Alegre, RS - Brasil

{mblehmann, rsantunes, marinho}@inf.ufrgs.br

Resumo. Estudos prévios e experiência adquirida com o funcionamento de sistemas de distribuição de conteúdo em larga escala permitiram o amadurecimento da pesquisa nessa área. Apesar dos algoritmos de troca de dados terem sido amplamente investigados, pouca atenção foi dedicada às características topológicas resultantes das conexões entre pares. Nesse contexto, existem três classes de algoritmos para o gerenciamento de conexões: inativa, preemptiva e pró-ativa. Até o momento não há estudos que apresentem uma comparação detalhada dessas classes de algoritmos em um cenário comum. O presente trabalho apresenta um modelo analítico baseado em grafos evolutivos que captura com maior precisão o impacto das estratégias de gerência de conexões na robustez e no desempenho de sistemas descentralizados de distribuição de conteúdo. Os resultados obtidos mostram que o uso de mecanismos preemptivos e pró-ativos beneficiam a topologia da rede tanto na robustez do sistema, devido à randomização das conexões entre os pares, quanto no potencial de desempenho, ao centralizar a fonte dos dados na topologia em relação aos demais pares.

Abstract. Previous work and the popularity of large scale content distribution systems helped evolve this research area to a mature state. Various studies investigate the algorithms used for data exchange, however little attention has been given to the topological characteristics of the overlay network resulting from connections among peers. Three classes of connection management algorithms are known: inactive, preemptive and pro-active. So far there is no study which presents a detailed comparison among these three strategies in a common scenario. This paper presents an analytical model based on evolving graphs, which captures with more precision the impact of connection management strategies in the robustness and performance of decentralized content dissemination systems. Results show that preemptive and pro-active mechanisms help, firstly, in the formation of a robust topology, due to the randomization of connections among peers, and secondly, in the performance improvement, due to greater centralization of the content source in the overlay.

1. Introdução

Atualmente a maior parte das soluções descentralizadas de larga escala para disseminação de conteúdo (i.e. compartilhamento de arquivos, *streaming* de vídeo) são sistemas cujo princípio fundamental para a eficiência é o *swarming*, tais como SopCast¹ e BitTorrent². Essas redes são caracterizadas por serem não-estruturadas, ou seja, não há regras de

¹<http://www.sopcast.org>

²<http://www.bittorrent.com>

formação da topologia [Zhang et al. 2007]. Além disso, tais redes agrupam pares interessados em um mesmo conteúdo, facilitando sua organização e gerência. Entretanto, como consequência dessas características, as topologias resultantes são em princípio arbitrárias.

Sabe-se que a topologia da rede formada pelas conexões entre pares influencia diretamente no desempenho geral de aplicações descentralizadas. Dessa forma, essas aplicações utilizam estratégias que visam organizar os pares em topologias com boas propriedades. Dentre todas propriedades, as mais desejadas são: robustez, para suportar uma grande população transiente sem particionar a rede, e desempenho, a fim de minimizar o tempo necessário para disseminação dos dados a todos pares.

A literatura descreve três classes de estratégias para gerência de conexões em redes descentralizadas baseadas em *swarming*: inativa, preemptiva e pró-ativa. A primeira estratégia, **inativa**, é a mais simples: uma conexão estabelecida com um vizinho é mantida até que um dos pares saia do sistema [Cohen 2003]. Na segunda, denominada **preemptiva**, os pares podem dar preferência a novas conexões requisitadas em detrimento de uma já estabelecida [Al-Hamra et al. 2009]. A terceira e última estratégia é o procedimento contrário, ou seja, **pró-ativamente** os pares desconectam algum vizinho periodicamente, possibilitando o estabelecimento de novas conexões [Lehmann et al. 2012a, Lehmann et al. 2012b].

Estudos da literatura avaliam cada uma das estratégias individualmente e focam principalmente em métricas de desempenho dos pares. Nenhum trabalho, além disso, apresenta uma comparação de todas as estratégias em cenários comuns. Por fim, poucos estudos apresentam uma análise detalhada de métricas relacionadas com as características topológicas da rede. O presente trabalho, portanto, visa apresentar uma comparação detalhada das três estratégias para gerenciamento de conexões, focando em sua influência nas características topológicas da rede. Para cumprir tal objetivo, foi desenvolvido um modelo de grafos evolutivos que permite representar o comportamento da topologia ao utilizar cada uma das estratégias. Em seguida, o modelo é avaliado através de simulações, permitindo o estudo de diferentes configurações de redes e a qualidade das topologias resultantes segundo métricas de robustez e desempenho.

As principais contribuições do trabalho são: (i) um estudo abrangente do impacto das estratégias de gerenciamento de conexões sobre as características topológicas de redes descentralizadas baseadas em *swarming*; (ii) o desenvolvimento de um modelo que captura com maior precisão a evolução das topologias, considerando aspectos como conectividade parcial dos pares e diferentes formas de gerência da vizinhança.

A Seção 2 do artigo discute as estratégias de gerência de vizinhança estudadas, assim como mecanismos que as implementam. A Seção 3 define os modelos que descrevem as topologias resultantes segundo as três estratégias de gerência de conexões. Na Seção 4, a metodologia de avaliação é descrita, explicitando cenários e métricas considerados. Os resultados da avaliação comparativa das estratégias são apresentados na Seção 5, juntamente com as principais conclusões obtidas. Por fim, a Seção 6 apresenta as considerações finais e direções para trabalhos futuros.

2. Contexto e Trabalhos Relacionados

Redes descentralizadas baseadas em *swarming* tem como característica principal agrupar usuários com interesses comuns. Isso é realizado geralmente através de algum tipo de ponto de encontro, como por exemplo *trackers* ou *Distribute Hash Tables* (DHT). Como

o tamanho dessas redes pode variar entre poucos pares até milhares deles, é computacionalmente inviável manter uma conexão com todos os pares presentes no sistema. Deste modo, o par seleciona um subconjunto (sua vizinhança) para se conectar e interagir.

A vizinhança é construindo escolhendo aleatoriamente pares com os quais conectar dentre uma lista de pares recebida do ponto de encontro. Adicionalmente, aceita-se qualquer solicitação de conexão de pares remotos. Esse procedimento é repetido até que o número máximo de conexões permitidas pela aplicação seja atingido. Uma vez estabelecida a vizinhança, o par utiliza mecanismos para gerenciar suas conexões com objetivos que variam desde melhorar seu desempenho até aumentar justiça no sistema. A seguir as três estratégias para gerência de vizinhança são apresentadas, assim como trabalhos relacionados a cada uma.

2.1. Estratégia Inativa

A gerência inativa de vizinhança é a estratégia mais simples dentre todas. Conexões estabelecidas com vizinhos são mantidas durante toda a sessão do par e não há qualquer tipo de avaliação em relação a sua qualidade ou tentativa de substituição dos vizinhos atuais. As únicas exceções são quando ocorre a desconexão de um vizinho (i.e. terminou a sessão e saiu da rede) ou quando existe alguma condição desfavorável aos pares. No caso do protocolo BitTorrent, se dois pares possuem a cópia completa do conteúdo, eles não são úteis um para o outro e, portanto, sua conexão é terminada. Já em aplicações de vídeo sob demanda, dois pares que estão em sessões diferentes (i.e. estão assistindo partes distintas do vídeo) não possuem interesses mútuos e, portanto, não há possibilidades para troca de dados úteis.

A intuição por trás dessa estratégia é que a escolha aleatória de vizinhos tende a gerar um grafo randômico [Cohen 2003]. Entretanto, o que se observa na realidade é uma potencial clusterização de pares de acordo com seu tempo de chegada, deteriorando a robustez da rede [Al-Hamra et al. 2009, Lehmann et al. 2012b]. Em um extremo negativo, a rede pode inclusive tornar-se particionada. Por esse motivo, estratégias alternativas para gerência da vizinhança foram propostas, as quais tem a finalidade de aumentar a robustez e desempenho da rede.

2.2. Estratégia Preemptiva

A estratégia preemptiva propõe uma modificação na forma como vizinhos são gerenciados em relação à inativa. A diferença entre as duas estratégias ocorre quando um par recebe um pedido de conexão e sua vizinhança já está completa. Ao invés de simplesmente rejeitar a conexão (estratégia inativa), na estratégia preemptiva, o par desconecta um vizinho aleatório com a finalidade de abrir uma vaga para a nova conexão requisitada.

Essa estratégia tem como principal motivação introduzir aleatoriedade nas conexões formadas entre pares [Al-Hamra et al. 2009], o que nem sempre é possível com a estratégia inativa. Essa aleatoriedade ajuda todos os pares a convergirem para seu tamanho máximo de vizinhança e a prevenir clusterizações prejudiciais. Enquanto a estratégia inativa tende a privilegiar conexões de pares cujos tempos de chegada são próximos, a estratégia preemptiva espalha uniformemente as conexões entre os pares, independentemente de seus tempos de chegada. Além de aumentar a robustez da topologia, essa estratégia tem o potencial de aumentar a diversidade de peças a que um par tem acesso, causando um efeito positivo no desempenho.

Outro mecanismo que apresenta uma estratégia preemptiva é o protocolo *Push-to-Pull* [Locher et al. 2007]. Esse protocolo leva em consideração a latência dos pares ao

decidir se solicitações de conexão serão aceitas. Essa técnica juntamente com o emprego de uma DHT para a organização da topologia garante eficiência e robustez na disseminação de *streams* de vídeo.

2.3. Estratégia Pró-ativa

A última estratégia utilizada para melhorar a gerência da vizinhança é a desconectar para conectar ou pró-ativa. A principal diferença dessa estratégia em relação à inativa é a adição de uma nova condição para desconexão de vizinhos. Periodicamente, o par avalia seus vizinhos e desconecta aqueles que forem classificados como pouco úteis de acordo com um conjunto de métricas pré-definidas. Dessa maneira, o par abre vagas na vizinhança, permitindo que novas conexões sejam estabelecidas.

Alguns mecanismos implementam essa estratégia, tais como *Optimistic Disconnect* (OD), *Lifetime-based Peer Selection* (LIPS) e *Deprived Peer* (DP). O OD, estudado inicialmente em [Dhungel et al. 2011], classifica a vizinhança do par segundo seu nível de colaboração [Lehmann et al. 2012a]. Essas informações são utilizadas para definir se os vizinhos são interessantes, esnobes, pares-carona ou possíveis corruptores de conteúdo. Ao identificar e desconectar vizinhos inúteis, novas conexões podem ser estabelecidas, possivelmente melhorando a qualidade da vizinhança.

O LIPS [Moraes and Duarte 2010] é um mecanismo que monitora a vizinhança baseada no tempo de chegada dos pares. Este assume que pares com tempo de chegada similares estão assistindo à mesma parte do vídeo (i.e. estão na mesma sessão) e, portanto, possuem mais dados em comum para trocar. Os resultados apontam que o LIPS seleciona os melhores vizinhos em relação à eficiência das conexões, garantindo alta continuidade de reprodução do vídeo.

O último mecanismo, DP [Picconi and Massoulié 2008], tem uma proposta de organização do ponto de vista global. A ideia é equilibrar a capacidade média de upload da vizinhança de todos os pares da rede. Com isso, permite-se organizar os pares em uma topologia de malha de forma que todos tenham taxas de *streaming* próximas à ótima e pequeno atraso de difusão. Esse mecanismo e suas variantes também foram analisados quanto às condições necessárias para atingir a estabilidade do sistema [Menasché et al. 2012]. O estudo conclui que a estratégia de selecionar os pares mais necessitados é a que apresenta maior ganho em relação à escalabilidade do sistema.

3. Modelo de Grafos Evolutivos

Essa seção descreve, primeiramente, os principais conceitos relacionados com grafos evolutivos [Ferreira 2002] e como estes são utilizados para modelar a gerência de conexões em sistemas distribuídos. Em seguida, é apresentado o modelo desenvolvido para capturar o comportamento das topologias ao utilizar cada uma das estratégias descritas.

Um modelo de grafos evolutivos segue uma abordagem de grafos dinâmicos que, oposta aos grafos estáticos, permite capturar variações da topologia ao longo do tempo, tais como adição ou remoção de vértices ou arestas. Seja $G = \langle V, A \rangle$ um grafo não-direcionado, em que V é seu conjunto de vértices e A , o conjunto de arestas. Na representação de um modelo evolutivo, a topologia da rede evolui em intervalos discretos de tempo $t = 1, 2, \dots, n$. A cada instante t , o estado atual é representado por $G_t = \langle V_t, A_t \rangle$. Duas funções são necessárias para descrever a evolução da topologia a cada instante de tempo t : uma para o crescimento de vértices (f_v) e outra para o de arestas (f_a). Dessa forma, o modelo de grafo evolutivo pode ser completamente descrito por $\langle f_v, f_a \rangle$.

A criação e evolução da topologia de uma rede descentralizada para distribuição de conteúdo pode ser modelada pelos seguintes eventos. Cada par (representado por um vértice) ingressa na rede em um tempo t_v , sendo adicionado ao conjunto de vértices V_t . Periodicamente, a partir da entrada, cada par estabelece conexões (arestas) com outros pares já presentes na rede. Estes dois eventos são descritos, respectivamente, pelas funções de crescimento f_v para os pares e f_a para as conexões.

A função f_v especifica a evolução do conjunto de pares ativos na rede ao longo do tempo, definindo a cada instante t quantos pares entram no sistema. Deste modo, $|V_{t+1}| = |V_t| + f_v(t)$. Já a função f_a descreve quais conexões são estabelecidas pelos pares durante a evolução da topologia. Essa função seleciona um conjunto de arestas que são adicionadas ao grafo G a cada instante t . Desta forma, $A_{t+1} = A_t \cup f_a(G_t, V_t, t)$. Note que o objetivo do modelo é descrever como a topologia está organizada após a entrada de todos os pares na rede, não contemplando, a princípio, possíveis saídas ou desconexões de pares.

Além dessas duas funções, duas definições extras são necessárias para descrever um modelo mais preciso. Primeiro, os pares do sistema possuem uma visão limitada da rede, que é definida por: $N(v)$, o número de vizinhos (ou o grau do vértice) atual do vértice v ; e o número máximo de vizinhos permitidos na rede, ou seja, o grau máximo dos pares, representado por m . Segundo, alguns pares na Internet são incapazes de receber conexões (por exemplo, se estiverem atrás de NAT). Para representar tal comportamento, define-se a função $C(v)$, a qual especifica se v pode receber uma conexão iniciada por um par remoto ou não.

3.1. Estratégia Inativa

Para modelar a aleatoriedade inerente ao estabelecimento de conexões, a cada instante t é definido um conjunto de possíveis arestas criado a partir de algumas condições. Uma vez gerado esse conjunto, k conexões são escolhidas e adicionadas ao grafo G . Três condições definem as possíveis conexões: as vizinhanças dos pares não podem estar completas, os pares devem estar presentes na rede, e o par que receberá a conexão deve ser conectável. Portanto, seja P o conjunto de possíveis arestas a serem adicionadas, inicialmente $P = \emptyset$. Após a entrada de cada novo vértice v na rede, P é atualizado para $P = P \cup \{(v, u) \mid u \in V_t \wedge N(u) < m \wedge C(u) = 1\}$.

Após a entrada do par na rede, periodicamente a cada r intervalos de tempo, o par obtém uma nova visão dos pares presentes no sistema, expandindo o conjunto de conexões possíveis. Quando esse evento ocorre ao vértice w , se $N(w) < m$, então são adicionadas novas arestas ao conjunto de conexões possíveis seguindo as condições previamente descritas. Portanto, $P = P \cup \{(v, u) \mid u \in V_t \wedge N(u) < m \wedge C(u) = 1 \wedge (v, u) \notin A_t\}$.

Após adicionar uma nova aresta (v, w) ao grafo G , o modelo verifica se algum vértice atingiu o tamanho máximo da sua vizinhança. Caso sim, por exemplo $N(v) = m$, todas suas entradas no conjunto de conexões possíveis são removidas. Tem-se, portanto, que $P = P \setminus (\{(v, u) \mid u \in V_t\} \cup \{(u, v) \mid u \in V_t\})$. O mesmo é feito, em seguida, para o vértice u se $N(u) = m$.

3.2. Estratégia Preemptiva

A intuição por trás da estratégia preemptiva é que novas conexões são melhores que antigas do ponto de vista global da rede. Dessa forma, quando um par recebe uma nova

conexão, ele a aceita mesmo que sua vizinhança esteja completa. Entretanto, para satisfazer a restrição do tamanho da vizinhança, uma conexão atual é terminada.

A estratégia preemptiva modifica o modelo, relaxando a restrição da vizinhança máxima dos pares na construção do conjunto de possíveis conexões P . Além disso, é necessário criar uma nova função para manter a condição de número máximo de vizinhos. Portanto, ao adicionar um novo vértice v , o conjunto de possíveis conexões é agora atualizado como $P = P \cup \{(v, u) \mid u \in V_t \wedge C(u) = 1\}$.

Após o evento de adição de arestas, verifica-se o tamanho da vizinhança dos pares e conexões são removidas até que $\forall v \in V_t \mid N(v) \leq m$. Nessa etapa, $\forall v \in V_t \mid N(v) > m$, são escolhidos $n = N(v) - m$ pares aleatórios para serem desconectados. A única restrição na desconexão é não remover um vizinho conectado no instante t atual.

3.3. Estratégia Pró-ativa

A ideia por trás da estratégia pró-ativa é substituir uma conexão existente por uma nova a ser estabelecida. Diferentemente da estratégia anterior, cabe ao próprio par a decisão de quando e quais conexões a serem removidas. Portanto, cria-se uma nova função $Q(t)$, que periodicamente remove arestas de pares cuja vizinhança está completa, permitindo que estes criem novas conexões.

A função $Q(t)$ especifica quais conexões são encerradas no instante t . $Q(t)$ é definida como $\sum_{v \in V_t} B_{v,t}$, onde $B_{v,t}$ é um conjunto (possivelmente vazio) para cada vértice v na rede, contendo as conexões encerradas por v no instante t . O número de conexões contidas em $B_{v,t}$ e o critério utilizado para sua seleção são arbitrários e dependem da implementação da estratégia pró-ativa. Por exemplo, no caso mais simples, $B_{v,t}$ possui cardinalidade 1 e a conexão terminada é escolhida aleatoriamente. Por fim, a nova função $Q(t)$ altera o conjunto de conexões A_t , o qual é atualizado como $A_t = (A_t \setminus Q(t)) \cup f_a(G_t, V_t, t)$.

Após a remoção das arestas do grafo G , a estratégia pró-ativa deve estabelecer novas conexões para aqueles pares que desconectaram vizinhos. A etapa de reestabelecimento das conexões é realizada sem qualquer modificação através da função de adicionar arestas f_a .

4. Metodologia

Esta seção apresenta a metodologia utilizada na avaliação das estratégias de gerência de conexões. O foco é quantificar a qualidade da topologia resultante quando cada uma das estratégias é utilizada. Para isso, duas questões principais devem ser respondidas:

- Q1. Qual a resiliência e robustez da topologia em relação a possíveis distúrbios?
- Q2. Qual o potencial de eficiência e desempenho causado pela topologia?

A primeira questão objetiva analisar a capacidade do sistema de organizar sua topologia, mantendo sua robustez. Em outras palavras, se a rede evolui ao longo do tempo sem particionar-se e minimizando o impacto de distúrbios como *churn*.

A segunda questão, por sua vez, é um indicativo da qualidade da disseminação do conteúdo na rede. Como o modelo desconsidera questões práticas como a capacidade dos pares, o foco é avaliar se a estrutura da topologia é adequada para a distribuição eficiente de dados. Por exemplo, uma possibilidade é a rede ter uma topologia com distância mínima dos pares do sistema à fonte do conteúdo.

Para realizar a avaliação foi desenvolvido um simulador baseado em eventos³, o qual implementa o modelo descrito na seção anterior. As questões apresentadas são usadas para definir: (i) os cenários a serem considerados para uma avaliação relevante (Seção 4.1); (ii) o conjunto de métricas usado para respondê-las (Seção 4.2).

4.1. Cenários

A avaliação tem como objetivo estudar o comportamento de cada estratégia sob diferentes condições do sistema. Para isso, são definidos dois conjuntos de cenários, que variam dois dos parâmetros com maior impacto na organização topológica: a taxa de entrada dos pares e a porcentagem de pares que são capazes de aceitar conexões. Em todos cenários avaliados considera-se uma rede composta por 400 pares, os quais cada um possui no máximo 80 vizinhos.

O primeiro conjunto de cenários avalia como diferentes padrões de chegada dos pares à rede impactam na sua formação topológica. Para isso, foram consideradas três taxas de chegada dos pares à rede: (i) exponencial decrescente (*flash crowd*), quando há alta demanda de recursos e baixa oferta destes; (ii) constante, representando um cenário em que não existe sobrecarga na rede; e (iii) exponencial crescente, onde a taxa de entrada dos pares é inicialmente pequena e cresce ao longo do tempo. Em todos os casos avaliados, a alcançabilidade da rede é completa.

O segundo conjunto de cenários visa analisar o efeito da restrição de alcançabilidade dos pares na topologia resultante da rede. Na Internet muitos pares não podem receber conexões, por exemplo devido a NAT. Dessa forma, para avaliar cenários mais realistas, avalia-se o comportamento dos pares quando a alcançabilidade da rede varia desde 30% até 100%. Nesta avaliação, considera-se a entrada de pares em *flash crowd*.

4.2. Métricas

Tomando como base as perguntas propostas, as seguintes métricas foram definidas para respondê-las. Em relação à robustez da rede (Q1), as métricas utilizadas são: conectividade de vértice média à fonte e coeficiente de clusterização. Já para quantificar o potencial de desempenho do sistema (Q2), a topologia é avaliada quanto ao grau médio dos vértices e a proximidade (em inglês, *closeness*) da fonte do conteúdo. A seguir, cada uma das métricas é detalhada:

Conectividade de vértice média à fonte (κ): o número médio de vértices que devem ser removidos para que pelo menos um par não possua um caminho ligando-o à fonte. Na prática, representa a resiliência da topologia em situações de *churn*.

Coefficiente de Clusterização (C): representa a probabilidade de dois vértices conectados a um terceiro vértice em comum estarem conectados entre si. Valores próximos a 1 indicam que os vértices estão altamente conectados entre si, enquanto valores próximos a 0 indicam que os vértices possuem poucos vizinhos em comum. Esta métrica exprime a robustez do sistema, indicando o número de vizinhos em comum ou redundantes, assim como sua variabilidade.

Grau médio dos vértices (d): o número médio de vizinhos dos pares da rede. Quanto maior esse valor, maior o número de conexões na rede e, portanto, as possibilidades de interação entre pares do sistema. Essa métrica influencia diretamente no potencial de desempenho da rede.

³Disponível em <http://www.inf.ufrgs.br/~mblehmann/sbrc2013>

Proximidade da fonte (P): uma métrica de centralidade de vértices. Ela indica a distância média de um vértice para todos os outros do grafo. No caso de disseminação de conteúdo, essa métrica pode ser vista como uma medida do tempo médio para o conteúdo ser disseminado da fonte para toda a rede.

5. Resultados

Esta seção apresenta os resultados dos cenários definidos na Seção 4.1. Foram realizadas 30 execuções de cada configuração com o objetivo de obter validade estatística dos resultados. Os dados de entrada e saída usados na geração dos resultados estão disponíveis publicamente⁴, permitindo a outros pesquisadores refazer os experimentos.

5.1. Taxa de Entrada dos pares

Esta seção apresenta o impacto das três estratégias de gerência de conexões sob diferentes taxas de entrada dos pares. A análise é iniciada com o cenário de taxa de entrada exponencial decrescente (*flash crowd*) dos pares, por causar sobrecarga ao sistema, o que pode impactar a organização dos pares. Em seguida é avaliado os cenários no qual os pares entram em uma taxa constante, evitando a situação de alta demanda por recursos. Por fim, o último cenário é com taxa de entrada exponencial crescente de pares, que pode ser vista como um sistema no qual a demanda inicial é pequena, mas sofre um aumento repentino devido a popularização do conteúdo.

5.1.1. Taxa de Entrada Exponencial Decrescente (*Flash Crowd*)

A Figura 1 apresenta um conjunto de matrizes de conexões, uma para cada estratégias utilizadas. A matriz de conexão é uma fotografia das conexões da rede em um determinado momento. Cada ponto (x, y) na matriz representa uma conexão entre os pares x e y . Por fim, os pares estão ordenados pelo seu tempo de chegada, sendo que a fonte original do conteúdo é o par $x = y = 0$.

A análise das matrizes de conexão mostra que a estratégia inativa (Figura 1(a)) tende a agrupar pares que tenham tempos de chegada próximos. Tal tendência se torna mais acentuada nos últimos pares que entram no sistema, pois estes possuem poucas oportunidades de conexão. No cenário de *flash crowd* o efeito do agrupamento é amenizado se comparado aos demais padrões de entrada de pares, pois a entrada massiva inicial de pares garante uma boa distribuição das conexões. No caso das estratégias preemptiva (Figura 1(b)) e pró-ativa (Figura 1(c)), observa-se uma redução considerável na intensidade do agrupamento dos pares, sendo a primeira a que mais se aproxima visualmente de uma distribuição uniforme.

Essa análise preliminar ajuda na compreensão do impacto de cada estratégia na topologia da rede. Mas para possuir um entendimento completo sobre elas, é necessário avaliar objetivamente a qualidade das topologias. A Tabela 1 apresenta os intervalos de confiança (para um grau de 95%) dos resultados obtidos para as métricas elencadas na Seção 4.2. Para fins de comparação, apresenta-se também os valores das métricas para um grafo randômico com a mesma configuração.

Os resultados mostram que a estratégia inativa gera uma topologia altamente clusterizada, como é observado através do valor do grau de clusterização duas vezes maior

⁴Endereço para acesso: <http://www.inf.ufrgs.br/~mblehmann/sbrc2013>

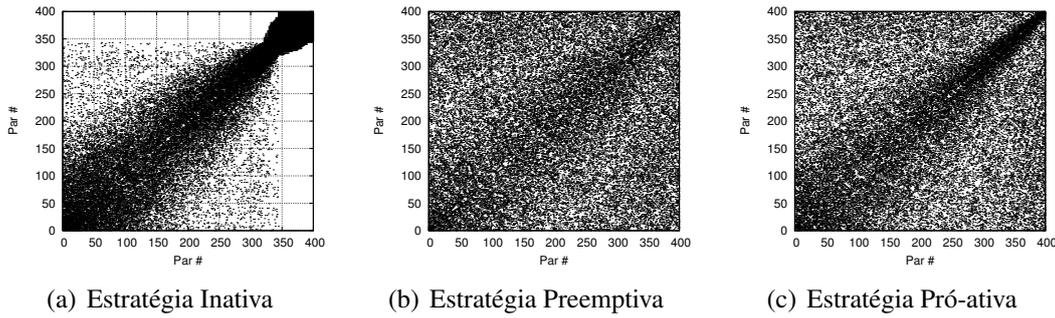


Figura 1. Matrizes de conexões das topologias no cenário de taxa de entrada exponencial decrescente dos pares

Métrica	Inativa	Preemptiva	Pró-Ativa	Randômico
κ	(64,16; 64,22)	(76,37; 76,58)	(76,65; 76,86)	(80,0; 80,0)
C	(0,3859; 0,3867)	(0,1915; 0,1916)	(0,1987; 0,1988)	(0,1963; 0,1964)
d	(78,07; 78,08)	(79,42; 79,43)	(78,92; 78,93)	(80,0; 80,0)
P	(1,915; 1,925)	(1,801; 1,802)	(1,801; 1,802)	(1,796; 1,796)

Tabela 1. Métricas das topologias no cenário de taxa de entrada exponencial decrescente dos pares (intervalo de confiança de 95%)

que o de um grafo randômico, indicando pouca robustez. Entretanto, a resiliência da rede ao *churn* não é comprometida: é necessário que, em média, 64 pares sejam desconectados para que a rede seja particionada. As estratégias preemptiva e pró-ativa, por sua vez, causam maior dispersão das conexões entre pares, reduzindo o coeficiente de clusterização para valores próximos àqueles obtidos pelo modelo randômico. Tal redução se reflete na conectividade dos pares à fonte, a qual tem um ganho de 18,75% em comparação com a estratégia inativa.

Respondendo a Q1, os resultados mostram que uma topologia gerada pela estratégia inativa é suficientemente robusta em um cenário de *flash crowd*. O agrupamento de pares observado não é um problema pois afeta apenas uma pequena porção dos pares (os últimos a entrarem na rede). As estratégias preemptiva e pró-ativa, por sua vez, geram topologias mais robustas que a inativa em situações de *flash crowd*.

Em relação ao potencial de desempenho da rede, observa-se que todas as três estratégias são capazes de saturar a vizinhança dos pares. Ou seja, nenhum par é prejudicado por possuir menos possibilidades de interações. Considerando a localização da fonte em relação aos demais pares, verifica-se que, em média, a fonte está a 1,92 vizinhos de distância do restante da rede ao adotar a estratégia inativa, apenas 7% pior em relação às demais estratégias. Logo, as estratégias preemptiva e pró-ativa centralizam melhor a fonte, melhorando a disseminação de dados na rede.

Respondendo a Q2, as estratégias preemptiva e pró-ativa apresentam o melhor potencial de desempenho sob *flash crowd*. Tal fato se justifica pela diversificação da vizinhança dos pares, permitindo que a fonte esteja em uma posição mais central na rede. A estratégia inativa não reorganiza a topologia, fazendo com que os pares que chegam por último fiquem mais distantes da fonte em comparação aos primeiros. Do ponto de vista global da rede, entretanto, isso representa um resultado apenas 7% pior em relação às outras estratégias.

5.1.2. Taxa de Entrada Constante

As matrizes de conexões para o cenário em que a entrada de pares é constante (Figura 2) mostram uma mudança drástica na organização da topologia. A estratégia inativa apresenta maior tendência de clusterização: são observados vários grupos formados de acordo com o período em que os pares entraram no sistema. Esta formação topológica decorre da menor taxa de entrada de pares, a qual resulta em menos opções para construir a vizinhança. As estratégias preemptiva e pró-ativa, por sua vez, mantêm a tendência de desfazer os padrões de clusterização da topologia, distribuindo melhor as conexões entre os pares. Para comparar as topologias de forma objetiva, suas métricas foram avaliadas, sendo resumidas na Tabela 2.

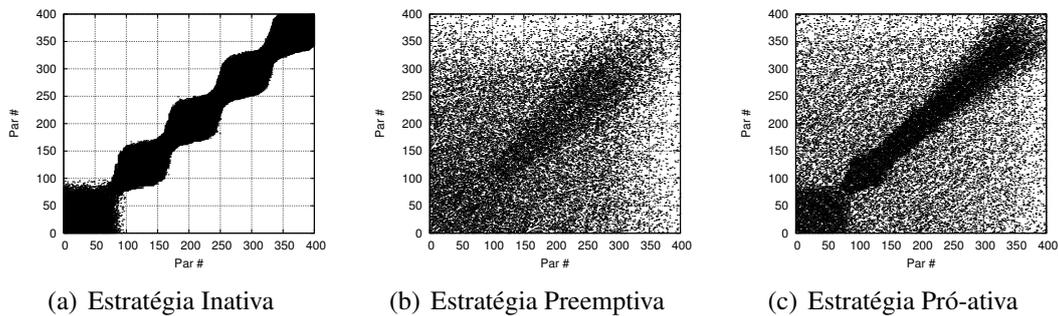


Figura 2. Matrizes de conexões das topologias no cenário de taxa de entrada constante dos pares

Métrica	Inativa	Preemptiva	Pró-Ativa	Randômico
κ	(21,88; 22,08)	(63,47; 63,56)	(71,36; 71,50)	(80,0; 80,0)
C	(0,8250; 0,8254)	(0,2049; 0,2050)	(0,2388; 0,2390)	(0,1963; 0,1964)
d	(78,48; 78,49)	(67,35; 67,38)	(73,67; 73,69)	(80,0; 80,0)
P	(4,135; 4,173)	(1,804; 1,805)	(1,800; 1,801)	(1,796; 1,796)

Tabela 2. Métricas no cenário de taxa de entrada constante dos pares (intervalo de confiança de 95%)

O coeficiente de clusterização da estratégia inativa apresenta valores quatro vezes maiores que os do grafo randômico, resultado que indica agrupamento excessivo dos pares. Tal clusterização é prejudicial, pois dificulta ou mesmo impede o acesso de novos pares à fonte (ou uma cópia do conteúdo). Também observa-se que a robustez da topologia é prejudicada pela estratégia inativa: a saída de apenas 5,5% dos pares do sistema pode resultar em um particionamento da rede. As estratégias preemptiva e pró-ativa, por sua vez, reduzem significativamente o grau de clusterização da rede. Essa diversificação das conexões novamente reflete no aumento da robustez da topologia, a qual atinge ganho de aproximadamente 188% e 224%, respectivamente, ao usar as estratégias preemptiva e pró-ativa.

A melhor organização topológica dos pares também se reflete no desempenho da rede. Mesmo embora a estratégia inativa sature a vizinhança de seus pares, estes ficam localizados em média a mais de quatro vizinhos de distância da fonte, prejudicando a disseminação do conteúdo. As estratégias preemptiva e pró-ativa apresentam uma pequena redução na vizinhança média dos pares. Entretanto, elas centralizam a fonte na topologia, aumentando o potencial de disseminação dos dados quando estas estratégias são usadas.

5.1.3. Taxa de Entrada Exponencial Crescente

O último cenário que avalia o impacto da entrada de pares na topologia considera uma taxa de entrada exponencial crescente. A Figura 3(a) ilustra a matriz de conexões da estratégia inativa para este cenário. Observa-se que a baixa taxa de entrada no começo da disseminação faz com que os pares se agrupem em torno da fonte. Como resultado, um clique se forma na topologia, isolando a fonte do restante da rede. Os pares que entram em seguida não conseguem estabelecer conexões com nenhum par pertencente ao clique, criando um segundo componente do grafo. Ambas estratégias preemptiva (Figura 3(b)) e pró-ativa (Figura 3(c)) são capazes de evitar o particionamento da rede, permitindo que todos os pares possuam um caminho à fonte do conteúdo.

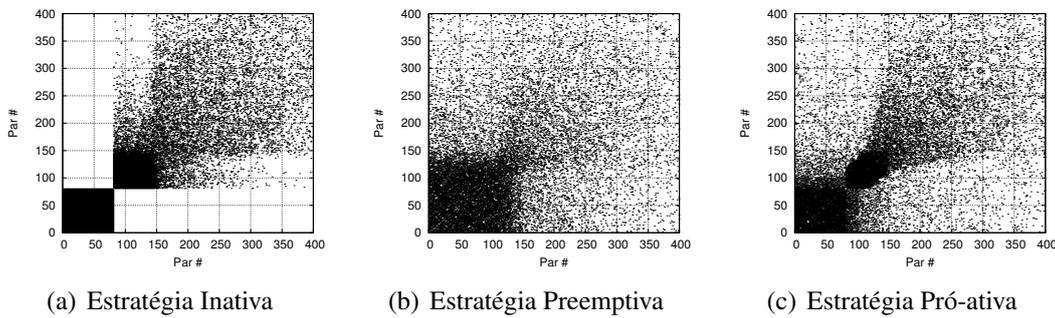


Figura 3. Matrizes de conexões das topologias no cenário de taxa de entrada exponencial crescente dos pares

Os valores médios das métricas das topologias, apresentados na Tabela 3, confirmam os resultados observados na Figura 3. A estratégia inativa apresenta o maior grau de clusterização em função do clique gerado pelos primeiros pares que entram no sistema. Este coeficiente de clusterização não é ainda maior devido à posterior entrada massiva de pares, a qual distribui as conexões de modo similar a uma situação de *flash crowd*. Além disso, observa-se que a conectividade de vértice à fonte é 0, ou seja, a rede está particionada, de modo que um subconjunto dos pares não tem acesso aos dados/*stream*. As estratégias preemptiva e pró-ativa, por sua vez, apresentam bons resultados em relação à robustez, sendo o principal evitar o particionamento da rede. Além disso, essas estratégias acrescentam um nível de resiliência ao *churn*, sendo necessário que pelo menos 34 pares abandonem o sistema para que um particionamento possa ocorrer.

Métrica	Inativa	Preemptiva	Pró-Ativa	Randômico
κ	(0,0; 0,0)	(34,13; 34,22)	(38,51; 38,56)	(80,0; 80,0)
C	(0,6750; 0,6754)	(0,2986; 0,2991)	(0,3722; 0,3727)	(0,1963; 0,1964)
d	(48,00; 48,01)	(41,70; 41,72)	(45,88; 45,89)	(80,0; 80,0)
P	(242,42; 242,42)	(1,836; 1,839)	(1,863; 1,865)	(1,796; 1,796)

Tabela 3. Resultados das métricas da topologia no cenário de taxa de entrada exponencial crescente dos pares (intervalo de confiança de 95%)

A estratégia inativa apresenta a maior vizinhança média dos pares. Entretanto, apenas 19,75% da rede possui acesso aos dados. Dessa forma, o desempenho do sistema pode ser considerado péssimo, pois o conteúdo não é devidamente disseminado aos interessados, mesmo que a rede possua a capacidade de upload necessária. As estratégias preemptiva e pró-ativa apresentam pequena redução na vizinhança média dos pares, o

que pode comprometer as possibilidades de interação, mas não prejudicam a organização da rede. Os resultados mostram que essas estratégias centralizam a fonte mesmo sob condições adversas.

5.2. Alcanceabilidade dos Pares

Um fator que afeta a robustez e organização das topologias é a restrição da alcanceabilidade dos pares, fato comum na Internet. Nesse conjunto de cenários avaliados, um subconjunto dos pares não é capaz de receber conexões. Como resultado, as possibilidades de estabelecimento de conexões entre pares são reduzidas. A título de exemplo, a Figura 4 apresenta as matrizes de conexões no cenário de alcanceabilidade 50%.

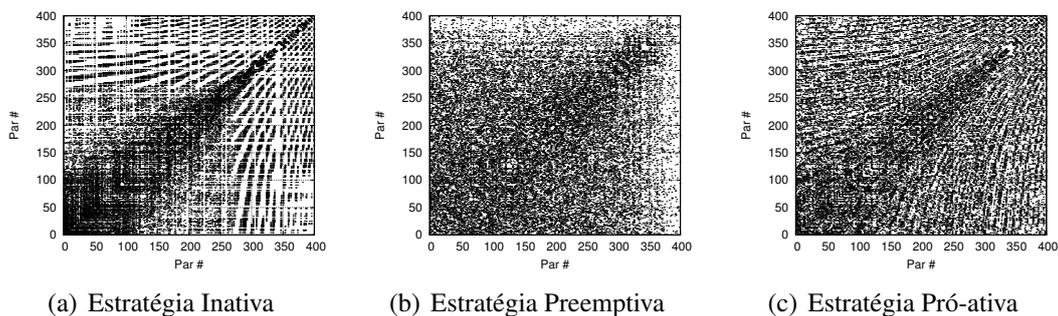


Figura 4. Matriz de conexões das topologias no cenário de 50% de alcanceabilidade da rede

Conforme esperado, a densidade das matrizes é menor independentemente da estratégia utilizada. Nesse cenário, a estratégia inativa distribui melhor as conexões entre os pares em comparação com o cenário de alcanceabilidade total. Tal fato ocorre porque os primeiros pares não saturam suas vizinhanças, pois não há possibilidades de conexões suficientes. Seguindo a tendência apresentada nos cenários anteriores, as estratégias preemptiva e pró-ativa desfazem qualquer padrão de conexões, distribuindo uniformemente as conexões da rede.

Ao analisar a robustez da rede nesse cenário, ilustrada pela Figura 5, a estratégia pró-ativa apresenta o melhor resultado. A conectividade da topologia usando essa estratégia é a maior considerando todas condições de alcanceabilidade, obtendo, em média, 5% a mais de resiliência ao *churn*. Isso é explicado pela forma como estratégia pró-ativa organiza seus pares, distribuindo melhor as conexões e apresentando o comportamento mais próximo a um grafo randômico.

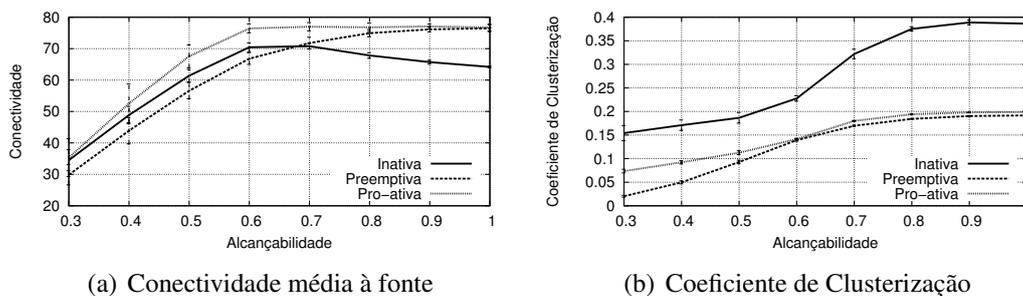


Figura 5. Resultados das métricas de robustez nos cenários de alcanceabilidade da rede

A estratégia preemptiva apresenta a clusterização dos pares semelhante à pró-ativa em alguns cenários. Especialmente, com alcançabilidade de 70% ou mais, essa estratégia apresenta resistência à saída de pares equiparável à pró-ativa. Entretanto, com 50% ou menos de pares que aceitam conexões, a rede torna-se muito dispersa, causando um efeito negativo na robustez, visto pelos piores resultados obtidos nesses cenários. Por fim, nos casos em que menos de 60% dos pares são alcançáveis, a estratégia inativa apresenta boa robustez em comparação à estratégia pró-ativa. Isso é consequência do agrupamento natural dos usuários, que fica em torno de 0,20, valor esperado em um grafo randômico. A medida que mais pares da rede podem aceitar conexões, há um fenômeno maior de clusterização, afetando negativamente a resiliência da rede.

A Figura 6 apresenta as métricas relativas ao potencial de desempenho da rede. Novamente a estratégia pró-ativa tem os melhores resultados, apresentando as maiores vizinhanças médias entre todas estratégias. Esta mesma estratégia também possui a menor proximidade da fonte à rede. A estratégia que destoa das demais é a inativa, que apresenta, em média, proximidade da fonte 8,5% pior em relação à pró-ativa. Isso evidencia a incapacidade da rede de se reorganizar frente à alterações na topologia quando a estratégia inativa é utilizada.

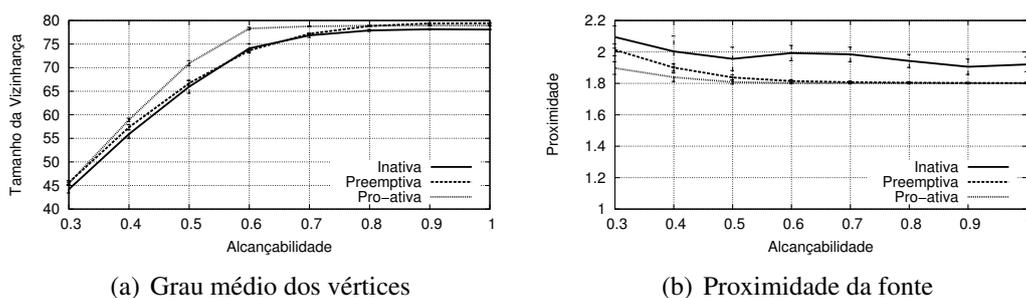


Figura 6. Resultados das métricas de potencial de desempenho nos cenários de alcançabilidade da rede

6. Conclusão

Redes descentralizadas de larga escala baseadas em *swarming* tem seu desempenho influenciado pela forma como os pares se conectam. Além disso, uma boa topologia garante que a rede seja robusta para suportar populações transientes de forma que todos os pares tenham acesso ao conteúdo. Para atingir tal objetivo, os pares utilizam algoritmos de gerência de conexões para manter sua vizinhança. Foram identificadas três estratégias principais para gerência dos vizinhos: inativa, preemptiva e pró-ativa. O presente trabalho foi o primeiro a comparar todas estratégias em cenários comuns, além de avaliá-las detalhadamente considerando métricas de robustez e desempenho.

Os resultados obtidos a partir de um conjunto de cenários apresentam diferentes conclusões. Considerando a taxa de entrada dos pares, o cenário *flash crowd* não mostrou-se estressante para a rede considerando sua organização topológica. Nesse cenário, todas estratégias obtiveram bons resultados. Ao analisar diferentes taxas de entrada, verificou-se um padrão de agrupamento excessivo dos pares, prejudicial à robustez da rede e ao seu potencial de desempenho. Enquanto a estratégia inativa é incapaz de organizar a topologia de modo satisfatório nessas configurações, as estratégias preemptiva e pró-ativa conseguem melhorar sua robustez e potencial de desempenho.

Já em relação à alcançabilidade da rede, conforme esperado, a topologia se torna menos robusta quando menos pares podem receber conexões. Tal ocorre devido ao fato de que, nesse cenário mais adverso, menos conexões são possíveis, limitando a interação entre os pares. Neste cenário, a estratégia pró-ativa obteve novamente os melhores resultados, organizando boas topologias mesmo em condições muito restritivas. A estratégia preemptiva, por sua vez, apresentou bom potencial de desempenho, mas pouca resiliência à saída de pares do sistema quando a alcançabilidade da rede é baixa. Finalmente, a estratégia inativa apresenta queda da robustez quando a porcentagem de pares alcançáveis é alta, devido à alta clusterização dos pares.

Para obter entendimento maior do impacto das estratégias na topologia resultante, pretende-se implantar essas estratégias em aplicações reais tanto de distribuição de dados quanto de *streaming*. Isso permitiria que as estratégias fossem estudadas em condições reais de execução, aumentando a confiabilidade dos resultados obtidos.

Referências

- Al-Hamra, A., Liogkas, N., Legout, A., and Barakat, C. (2009). Swarming overlay construction strategies. In *Computer Communications and Networks, 2009. ICCCN 2009. Proceedings of 18th International Conference on*, pages 1–6.
- Cohen, B. (2003). Incentives build robustness in BitTorrent.
- Dhungel, P., Hei, X., Wu, D., and Ross, K. (2011). A measurement study of attacks on bittorrent seeds. In *2011 IEEE International Conference on Communications (ICC)*.
- Ferreira, A. (2002). On models and algorithms for dynamic communication networks: The case for evolving graphs. In *4e rencontres francophones sur les Aspects Algorithmiques des Télécommunications (ALGOTEL'2002)*, pages 155–161. INRIA Press.
- Lehmann, M., Müller, L., Antunes, R. S., and Barcellos, M. P. (2012a). Desvendando o impacto da desconexão otimista no bittorrent. In *XXX Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC)*.
- Lehmann, M. B., Muller, L. F., Antunes, R. S., and Barcellos, M. P. (2012b). Disconnecting to connect: Understanding optimistic disconnection in bittorrent. In *2012 IEEE 12th International Conference on Peer-to-Peer Computing (P2P)*, pages 138–148.
- Locher, T., Meier, R., Schmid, S., and Wattenhofer, R. (2007). Push-to-pull peer-to-peer live streaming.
- Menasché, D. S., Rocha, A. A., de Souza e Silva, E., Leão, R. M. M., and Towsley, D. (2012). Stability of peer-to-peer swarming systems. In *XXX Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC)*.
- Moraes, I. M. and Duarte, O. C. M. B. (2010). Seleção de parceiros em sistemas par-a-par de vídeo sob demanda. In *XXVIII Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC)*.
- Picconi, F. and Massoulié, L. (2008). Is there a future for mesh-based live video streaming? In *2008 Eighth International Conference on Peer-to-Peer Computing*.
- Zhang, H., Neglia, G., Towsley, D., and Lo Presti, G. (2007). On unstructured file sharing networks. In *26th IEEE International Conference on Computer Communications (INFOCOM)*, pages 2189–2197.