

Emprego de Resiliência na Gerência de Redes de Computadores

Marcelo F. Vasconcelos¹, Ronaldo M. Salles¹

¹Seção de Engenharia de Computação – Instituto Militar de Engenharia (IME)
Praça General Tibúrcio, 80 – 22.290-270 – Rio de Janeiro – RJ – Brasil

marcelo.vasconcelos@globocom.com, salles@ieee.org

Abstract. *The protection of the network infrastructure and its services are major concerns of network administrators today. This work investigates such issues through the study of resilience in computer networks. It is proposed a resilience factor that takes into account aspects of the network topology as well as traffic losses during stress conditions. The resilience factor is tested under real network scenarios presenting consistent results. The factor can be used to support network administrators decisions regarding updates and expansions, for instance: link additions, removals and rewirings. Hence, changes in topology can be previously assessed providing an increase in robustness and making the network less vulnerable to attacks and failures.*

Resumo. *A proteção da infraestrutura de redes e seus serviços são as maiores preocupações dos administradores de redes nos dias de hoje. Este trabalho investiga o assunto através do estudo da resiliência em redes de computadores. É proposto um fator de resiliência que leva em consideração aspectos da topologia e também da quantidade de tráfego perdido em condições de estresse. O fator proposto é testado em uma topologia real, apresentando bons resultados. O fator pode ser utilizado para o suporte às decisões dos administradores de redes em expansões na rede, adição e retirada de enlaces. Com o emprego da metodologia as alterações podem ser previamente avaliadas no sentido de proporcionar maior robustez à rede, tornando-a menos vulnerável a ataques e falhas.*

1. Introdução

Dentre as várias atribuições de um administrador de redes, os estudos voltados para o aumento da robustez em relação a falhas e ataques são um tema de grande importância. As decisões sobre onde investir de maneira eficiente a um custo justificado são tomadas de acordo com a experiência de cada administrador. Apesar de serem levadas em consideração algumas informações relativas a operação da rede, o processo é muito subjetivo e pode acarretar em decisões equivocadas.

O objetivo deste trabalho é propor uma métrica de resiliência de forma a melhor quantificar essa importante propriedade, disponibilizando assim uma metodologia para o emprego de resiliência na gerência de redes de computadores. A métrica pode ser considerada tanto na fase de projeto quanto no suporte a tomada de decisões por ocasião de expansões ou alterações na topologia da rede. É possível assim decidir entre uma ou

outra alteração na topologia usando como base o impacto causado por cada uma delas na resiliência da rede.

A metodologia proposta, consiste na utilização de um fator de resiliência (FR) para quantificar a robustez da topologia em relação às suas redundâncias. As redundâncias devem ser consideradas de maneira criteriosa de forma a se atingir a maior resiliência possível dentro do escopo de restrições. Através da atribuição de valores com o uso do FR, é possível identificar quais alterações são mais vantajosas e quais perdas de enlaces acarretam em maiores quedas de desempenho.

O fator de resiliência proposto leva em consideração as demandas de tráfego existentes na topologia, uma vez que a entrega do tráfego com a qualidade de serviço esperada é o objetivo principal das redes de computadores. Também são levados em consideração aspectos relacionados a topologia, como capacidade de enlaces e ligações entre nós.

No desenvolvimento deste trabalho, algumas características do funcionamento do método são verificadas, como o seu comportamento em relação a diversos tipos de distribuição de tráfego na rede, diversos perfis de carga nos enlaces e a sua relação com os protocolos de roteamento mais utilizados. Em relação aos protocolos de roteamento, será verificado qual apresenta maior eficiência frente ao método proposto. Também será verificado se a simples adição de uma redundância, sem critérios fundamentados, acarreta no aumento da resiliência da rede.

A metodologia proposta foi avaliada num cenário real utilizando informações de topologia, tráfego e gerência do provedor de acesso a Internet *Vialink*¹. Foram selecionadas alterações na topologia que envolveram adições e retiradas de enlaces. Para cada situação o fator de resiliência foi analisado e confrontado com a opinião do especialista, administrador da rede da *Vialink*. Os resultados obtidos se mostraram satisfatórios e indicaram a melhor adição de enlace e qual retirada seria mais prejudicial ao funcionamento da rede.

Este artigo está organizado da seguinte forma. A seção 2 faz uma revisão dos trabalhos relacionados. A seção 3 apresenta o algoritmo e a metodologia propostos. Os testes realizados são detalhados na seção 4. A seção 5 discute os resultados obtidos. O trabalho é concluído na seção 6 onde são abordadas sugestões para trabalhos futuros.

2. Trabalhos Relacionados

Resiliência em redes de computadores é um tema bastante relevante, sendo alvo de constantes estudos pela comunidade acadêmica. Considerando resiliência como a habilidade de uma entidade de tolerar, resistir e automaticamente se recuperar de desafios nas condições da rede, ataques coordenados e anomalias no tráfego [Aggelou 2008], pode-se verificar que a definição é bastante genérica, o que permite o estudo e aplicação da resiliência por meio de diversas técnicas distintas.

2.1. Tipos, Frequência e Duração de Falhas em Redes

As interrupções no funcionamento de redes de computadores podem ser divididas em dois tipos: programadas e não programadas.

¹<http://www.vialink.com.br>

As interrupções programadas são realizadas de maneira organizada, visando implementar algum tipo de manutenção corretiva ou preventiva na rede [Lloyd 2007], essas interrupções estão previstas nos contratos de acordo de nível de serviço e não são consideradas como falhas no funcionamento. Os administradores de redes são avisados com a antecedência necessária para que medidas de contorno possam ser adotadas para minimizar o impacto dessas interrupções [Vasseur and Demeester 2004].

As interrupções não programadas constituem a principal preocupação dos administradores tendo um papel importante neste trabalho, pois ocorrem de forma aleatória e podem ser causadas por fatores internos ou externos. Essas interrupções são ocasionadas por componentes de hardware, software, humanos ou da natureza [Trivedi et al. 2009].

Em [Vasseur and Demeester 2004] são apresentados os tipos mais comuns de interrupções em redes de computadores, sendo a principal delas problemas em cabos ópticos. Os cabos ópticos são responsáveis por grande parte do tráfego de dados em redes privadas e na Internet. As estatísticas de falhas são contabilizadas por quilometro de fibra óptica e dependem do local de sua instalação (ambientes urbanos, rurais, submarinos etc). Outra grande fonte de falhas são os diversos equipamentos que compõem a infraestrutura das redes.

Uma análise quantitativa e estatística de frequência e duração de falhas é realizada em [Iannaccone et al. 2002], [Nucci et al. 2003] e [Markopoulou et al. 2004], onde os resultados apresentados são equivalentes e foram obtidos em topologias reais distintas. Esses trabalhos mostram que as falhas são parte da operação das redes e que a maior parte delas possui duração menor que 10 minutos. As interrupções programadas correspondem a 20% das interrupções e as não programadas correspondem a 80%. Dentre os 80% de interrupções não programadas, 70% correspondem a falhas de um único enlace e 30% correspondem a falhas múltiplas atribuídas a equipamentos de redes e fibras ópticas. Estas informações constituem um ponto importante no desenvolvimento do método proposto.

2.2. Medidas de Resiliência em Redes

Uma primeira idéia que pode ser vinculada à resiliência de uma rede é a quantidade de redundâncias que a mesma possui. De maneira intuitiva, uma topologia completamente conectada é mais resiliente do que uma rede que não possui redundância. Quando comparamos esses dois tipos de topologia é fácil perceber a diferença em termos de resiliência, mas o que existe na prática são situações intermediárias difíceis de atribuir uma classificação de acordo com a sua resiliência.

Além da quantidade, as capacidades das redundâncias são fundamentais. Em [Menth et al. 2006] é feito um estudo para avaliar as capacidades das redundâncias, aliado a métodos de roteamento eficazes, com o objetivo de garantir a entrega de todo o tráfego demandado, mesmo em cenários de falhas.

Um dos primeiros trabalhos na área, o artigo [Najjar and Gaudiot 1990] apresenta um método para medir a tolerância a falhas de uma topologia, nele é definido como medida de tolerância da rede a quantidade de falhas que a mesma pode sofrer antes de ficar desconexa. É utilizado como métrica uma aproximação analítica da probabilidade da rede ficar desconexa. Os testes foram realizados considerando apenas topologias sintéticas onde todos os nós apresentavam o mesmo grau.

O artigo [Beygelzimer et al. 2004] considera três importantes métricas para avaliar a robustez de uma rede diante de falhas e ataques: maior componente conectado (LCC - *Largest Connected Component*), que indica o maior subgrafo resultante da desconexão da topologia, no caso de um ataque ou falha; tamanho médio do menor caminho (ASPL - *Average Shortest Path Length*), que varia de acordo com a alteração da topologia; diâmetro, que corresponde ao maior dentre todos os menores caminhos da rede. O trabalho utilizou topologias de redes dinâmicas, como a Gnutella e outras obtidas de geradores de topologia, e as avaliou com o LCC, o ASPL e o diâmetro, apesar dessas métricas não refletirem totalmente as diferenças de robustez decorrentes de alterações na topologia.

O método proposto por [Salles and Marino 2011] tem como base o conceito de k -conectividade de um grafo. Um grafo é k -conexo se para qualquer par de vértices, A e B, existem pelo menos k caminhos vértice-disjuntos entre A e B [Skiena 2008]. Os autores especializam esse conceito e utilizam a k -conectividade parcial para compor a métrica proposta para a resiliência de rede.

Apesar de muitos trabalhos considerarem apenas a questão topológica das redes, é importante também levar em conta o tráfego entregue (e as respectivas perdas em casos de falhas) para a obtenção de uma medida mais completa para a resiliência.

O parâmetro ELT (*Expected Loss Traffic*) é utilizado como medida de performance com o objetivo de quantificar a perda da capacidade de encaminhamento de tráfego durante falhas. Para reduzir o ELT é necessário manter uma capacidade de backup satisfatória na topologia [Durvy et al. 1979].

A perda de tráfego deve ser evitada a todo custo, para isso técnicas de melhor ocupação da rede e diminuição de gargalos devem ser uma preocupação dos administradores. Em [Beygelzimer et al. 2007] é apresentada uma técnica de localização de gargalos através de otimizações de funções lineares.

O trabalho apresentado em [Schupke and Prinz 2004] foi desenvolvido em redes ópticas, partindo do princípio que todas as falhas simples são suportadas sem perda de desempenho, devido as topologias em anel. O objetivo primário é garantir o melhor desempenho da topologia frente a falhas duplas e o secundário é otimizar a capacidade de encaminhamento de tráfego da rede. Uma das conclusões obtidas foi à necessidade de manter enlaces de reserva com grandes capacidades para suportar o encaminhamento de tráfego no caso de falhas duplas.

Em [Omer et al. 2009b] e [Omer et al. 2009a] é feita uma análise do funcionamento da Internet relacionada com as demandas de tráfego entre as diversas partes do mundo. São consideradas perdas de capacidade entre as ligações da Internet e avaliados os resultados dessas reduções através de um valor definido como resiliência.

3. Método Proposto

Após uma análise criteriosa dos trabalhos apresentados na seção anterior, podemos perceber a grande diversificação de abordagens para o tema resiliência.

Para obtermos uma abordagem mais completa da resiliência, é importante considerar não apenas aspectos relativos à conectividade das topologias, como em

[Salles and Marino 2011], mas também calcular o impacto no tráfego devido a mudanças na rede, como em [Omer et al. 2009b] e [Omer et al. 2009a].

O objetivo deste trabalho é apresentar um método para quantificar a resiliência de uma rede através de um Fator de Resiliência (FR). O FR proposto leva em consideração diversos aspectos apresentados na seção anterior, e utiliza uma composição de métricas das topologias e comportamento de tráfego no seu desenvolvimento.

A abordagem utilizada no FR tem como principal aspecto o comportamento das topologias em relação as suas redundâncias e como as suas desconexões afetam o tráfego a ser entregue. O uso de redundâncias de enlaces em uma topologia é a forma mais comum de garantir resiliência a uma rede. Uma topologia que não possui redundâncias é pouco resiliente. A perda de qualquer enlace comprometerá o seu funcionamento, deixando um ou mais nós sem a possibilidade de encaminhar o tráfego originado ou destinado a determinados nós.

As redundâncias devem garantir o funcionamento de uma rede no caso de falhas. Este funcionamento pode ser com ou sem perda de qualidade, de acordo com a capacidade ociosa da rede e o tráfego demandado [Menth et al. 2006].

Para desenvolver um método que visa quantificar o comportamento de uma rede em relação as suas redundâncias, será levado em consideração apenas falhas em enlaces. As falhas em um único enlace representam 70% das falhas em redes [Iannaccone et al. 2002] e mesmo as falhas de múltiplos enlaces tem pouca probabilidade de desconexão de nós [Menth et al. 2009].

Com a utilização do fator proposto, será possível a adoção de medidas proativas na gerência da rede, como a determinação de enlaces mais importantes e quais redundâncias são mais indicadas. O FR atribuirá um valor a uma topologia que reflete qual será o impacto no desempenho em caso de perdas (falhas, desconexões) de enlaces. Serão consideradas combinações possíveis de perdas de enlaces e, considerando o pior caso, a escolha dos enlaces subtraídos da topologia ocorrerão de acordo com as suas ocupações, retirando sempre os que estiverem mais ocupados.

3.1. Fator de Resiliência Proposto

O Fator de Resiliência proposto consiste de uma combinação de métricas das topologias e comportamento de tráfego conforme a equação (1).

$$FR = (MVE, R) \quad (1)$$

Onde MVE representa a média de valor entregue e R representa o número de redundâncias existentes na topologia. Neste trabalho, o parâmetro R define a *ordem* da topologia.

3.1.1. Ordem

O primeiro aspecto a ser abordado na apresentação do FR proposto será a *ordem*. Partindo da definição de redundância e dos diversos trabalhos apresentados na seção anterior, é possível verificar que a resiliência está associada a quantidade de redundâncias

disponíveis em uma topologia. Uma topologia apresenta uma alta resiliência se existe um grande número de redundâncias capaz de garantir a entrega de tráfego, mesmo em caso de falhas e ataques. A forma de quantificar este aspecto da resiliência é através da ordem.

A ordem é o número de enlaces redundantes que uma topologia possui. Em outras palavras, a ordem R representa o número máximo de enlaces que se retirados ainda mantém a rede conexa – a topologia resultante se torna uma *spanning tree* (ST).

Em uma topologia conectada apenas pela *spanning tree* em caso de qualquer falha de enlaces, nós serão desconectados e haverá perda de tráfego. Para uma topologia ST a ordem é igual a zero, ou $R = 0$ (sem redundâncias).

Por outro lado, uma topologia do tipo *full mesh* possui $\frac{n(n-1)}{2}$ enlaces, onde n é o número de nós da topologia. Para essa topologia, o número mínimo de enlaces para garantir a ST é $n - 1$, e assim pode-se dizer que a topologia possui $\frac{n(n-1)}{2} - (n - 1)$ ou $\frac{(n-2)(n-1)}{2}$ redundâncias.

Dessa forma, em uma topologia com n nós, a *ordem* fica na prática limitada por,

$$0 \leq R \leq \frac{(n-2)(n-1)}{2} \quad (2)$$

3.1.2. Média do Valor Entregue - MVE

A média do valor entregue consiste na principal contribuição do método proposto, nela são considerados aspectos como carga nos enlaces, roteamento e tráfego. A *MVE* foi motivada pelas abordagens em [Salles and Marino 2011], [Omer et al. 2009b] e [Omer et al. 2009a].

Para o cálculo da *MVE* é necessário avaliar o impacto sofrido pela rede em decorrência da perda (falhas, desconexões) de enlaces. A idéia é verificar de que forma o número de redundâncias que a rede dispõe (dado por R) contribui para a sua resiliência. Se uma topologia apresenta ordem R , então existem 2^R situações de falhas que embora causem desconexões, ainda preservam a rede conectada. A garantia de conectividade é devido ao número de enlaces extra (redundâncias) que a rede disponha. O método avalia então o comportamento da rede para todas as 2^R situações de perdas de enlaces.

Para facilitar o entendimento do método, considere o exemplo apresentado na figura 1. A topologia possui 5 nós, 7 enlaces e 3 redundâncias. Na figura 1a, está representada a topologia original e as três redundâncias escolhidas em vermelho. Em 1b estão representadas as combinações de retiradas de uma redundância, em 1c as combinações de retiradas de duas redundâncias e em 1d, a combinação de retirada de três redundâncias.

A avaliação de situações de desconexão, tais quais apresentadas na Fig. 1, foi motivada pela proposta em [Salles and Marino 2011], no entanto naquele trabalho são avaliadas todas as possíveis combinações de desconexões, enquanto que neste trabalho a avaliação se limita às combinações relativas ao número de redundâncias que a rede possui. Desta forma o custo computacional do método aqui proposto é menor e a análise de resiliência fica direcionada à capacidade redundante da rede.

É importante ressaltar que R informa apenas a quantidade de enlaces redundantes

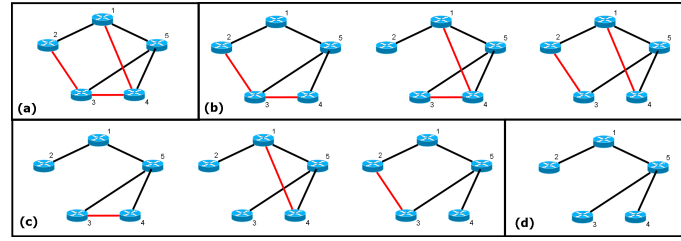


Figure 1. Abordagem de perda de enlaces considerada

na rede e não quais enlaces devem ser testados em situações de desconexão. Para fins de análise de pior caso, os enlaces selecionados nas combinações de desconexão (Fig. 1) são aqueles que possuem as maiores ocupações, ou seja, aqueles sujeitos a maiores demandas de tráfego. Assim, o impacto para a rede se recuperar dessas perdas seria maior.

Em relação aos trabalhos em [Omer et al. 2009b] e [Omer et al. 2009a], o conceito utilizado é o de *valor entregue*, VE, dado pela diferença entre o *valor demandado*, VD e as perdas de tráfego devido a problemas na rede. Assim, $VE = \frac{VD - PERDAS}{VD}$. Nos trabalhos de referência, VE é desenvolvido frente a uma redução percentual da capacidade dos enlaces (topologia de cabos submarinos que compõem a Internet). Além disso, não é considerado o roteamento, uma vez que a topologia considerada é bastante simples.

No FR proposto utilizamos o conceito de valor entregue para cada uma das 2^R situações de desconexão, de forma que o parâmetro MVE (Eq. 3) represente a média ponderada dos VE obtidos para cada caso. O FR contempla assim características da topologia e redundâncias da rede, bem como, do tráfego perdido por ocasião de falhas.

$$MVE = \sum_{i=1}^{2^R} \frac{\alpha_i VE(i)}{\beta} \quad \beta = \sum_{i=1}^{2^R} \alpha_i \quad (3)$$

Os valores de α_i representam a probabilidade de ocorrência de cada um dos 2^R cenários de desconexão. Desta forma, falhas simples terão um maior impacto na MVE do que falhas múltiplas. Esses valores podem ser obtidos através das probabilidades de ocorrências de falhas de cada enlace da topologia ou através de informações de acordos de nível de serviço dos contratos de cada enlace da topologia. Para simplificar a realização dos testes e levando em consideração a provável dificuldade de obtenção desse tipo de informação, serão considerados neste trabalho $\alpha_i = 1/\beta, \forall i$. Assim,

$$MVE = 2^{-R} \sum_{i=1}^{2^R} VE(i) \quad (4)$$

Considere o exemplo da Fig. 2, onde a rede apresenta uma topologia de 4 nós e 5 enlaces. Os valores em Mbps representam as capacidades e os valores percentuais as cargas (ocupação) de cada enlace, respectivamente. Para este caso $R = 2$, e assim pelo método proposto, existem $2^R = 4$ situações a verificar (Figs.2b–2e): topologia completa (operação normal da rede), topologia sem uma de suas redundâncias (2 casos) e topologia sem as duas redundâncias (situação limite para a rede se manter conectada).

Inicialmente a rede encontra-se operando sem falhas, a carga máxima observada nos enlaces = 37%, ou seja, não há perdas de tráfego e assim $VE(1) = 1$. Para começar a

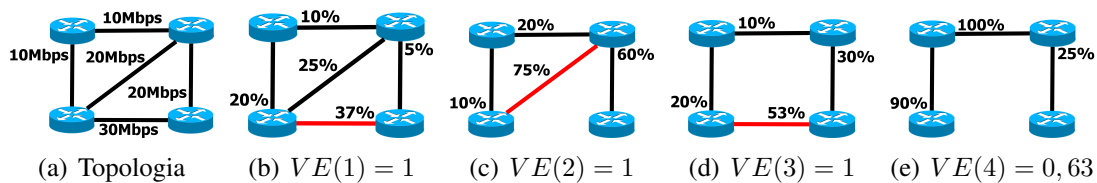


Figure 2. Exemplo: obtenção da *MVE*

avaliar as situações de estresse é preciso selecionar qual enlace será desconectado (falha). O pior caso seria uma falha no enlace que possui 37% de carga, isso nos leva a situação da Fig.2(c) onde o tráfego deste enlace é redistribuído pelos enlaces restantes. Porém, não houve perda de tráfego visto que agora o enlace mais sobrecarregado apresenta uma ocupação de 75%, ou seja, a rede foi capaz de entregar todo o tráfego mesmo com uma falha, resultando em um valor entregue para esse caso também de 100%, $VE(2) = 1$.

A próxima etapa é avaliar o comportamento da rede em função da perda de um outro enlace redundante. O enlace da diagonal é o que causaria um maior impacto na rede, fazendo a retirada deste enlace o seu tráfego é redistribuído pelos demais resultando na situação da Fig.2(d). Nesta outra situação também não houve perdas e a rede consegue acomodar todo o tráfego demandado, a maior carga é agora 53% e $VE(3) = 1$. Para finalizar os testes, são retiradas as duas redundâncias que mais comprometem a rede e pela Fig.2(e) um enlace atinge 100% de sua capacidade, na realidade o tráfego demandado neste enlace supera a sua capacidade acarretando em perdas. Assim, o valor entregue nessa situação de estresse corresponde a 63% do tráfego demandado, $VE(4) = 0,63$.

O parâmetro *MVE* é então obtido da seguinte forma:

$$MVE = \frac{VE(1) + VE(2) + VE(3) + VE(4)}{4} = 0,9075 \quad (5)$$

e o valor correspondente para o fator de resiliência do exemplo em questão: $FR = (0.9075, 2)$. A interpretação é de que a rede possui duas redundâncias e consegue entregar quase todo o tráfego demandado, mesmo em diversas situações de desconexão.

4. Testes realizados

O objetivo da seção é mostrar o funcionamento do *FR*, apresentando como o fator pode ser útil aos administradores de redes em suas tomadas de decisão. Será apresentado nesta seção a topologia utilizada, o teste de adição e retirada de enlaces e a utilização do método.

Para verificação do método proposto foi utilizada a rede Vialink [Vialink 2011] devido a possibilidade de obtenção de informações sobre a topologia, demandas de tráfego e capacidades dos enlaces, bem como, do contato direto com o administrador da rede.

A Vialink é um provedor de Internet da cidade do Rio de Janeiro, com 28 nós, 32 enlaces e 5 redundâncias. A Vialink possui 25 clientes corporativos com necessidades específicas de rede e condições de Acordos de Nível de Serviço muito bem definidos e que precisam ser atendidos. Esta rede possui características bem específicas, pois os clientes não demandam acesso uns aos outros e sim geram uma demanda de upload e download voltada para o ponto de conexão com a Internet, através do nó 1, conforme a figura 3.

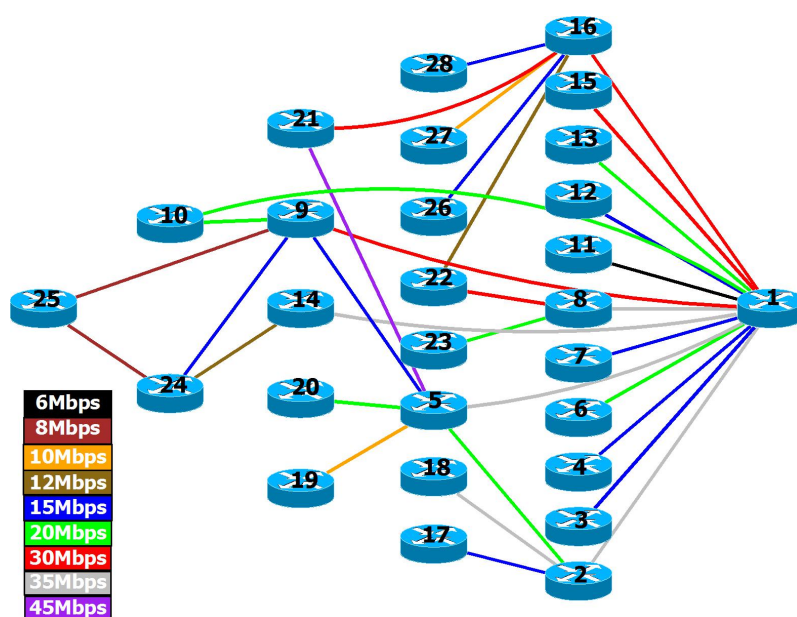


Figure 3. Topologia Vialink

Com a utilização do fator proposto é possível verificar o efeito da adição e retirada de enlaces ligando dois nós. Será empregado um método de verificação completo através de dois testes, um para adição e outro para retirada de enlaces.

O primeiro teste levará em consideração todas as inserções possíveis na rede, com enlaces de capacidade igual a maior capacidade existente na topologia. Com este teste, será possível determinar qual adição de enlace implicará em um maior valor do FR.

O segundo teste será feito verificando o efeito de todas as possíveis retiradas de um enlace da rede que não provoquem a desconexão completa de algum nó. Essas retiradas indicarão quais redundâncias são mais importantes no funcionamento da rede.

Os testes ordenarão todas as alterações de forma crescente, indicando quais alterações têm mais efeito no aumento da resiliência da rede.

O método é utilizado de forma comparativa entre diversas situações de alteração da topologia, comparando o funcionamento da rede nas condições de tráfego e roteamento propostos.

Em relação ao roteamento, serão considerados os dois protocolos intra-domínio mais utilizados: o OSPF (*Open Shortest Path First*) [Moy 2000] e o RIP (*Routing Information Protocol*) [Malkin 1998]. Assim, as rotas são determinadas de acordo com a capacidade dos enlaces ou com o número de saltos.

Para a distribuição do tráfego na rede são considerados os valores reais fornecidos pela Vialink, como também alocações baseadas nos critérios *maxmin fair* e *proportional fair* [Kelly et al. 1998], obtidas considerando as seguintes taxas de ocupação dos enlaces: 100%, 95%, 90%, 50% e 30%.

Foram realizados testes de adição e retiradas na topologia. A adição de enlace está representada pelo sinal de “+” e a retirada pelo sinal de “-”. O enlace ligando os nós A e B é representado por (A,B). No caso de adições, o valor do novo enlace será apresentado.

5. Resultados Obtidos

O diagrama na figura 3 possui 28 nós conectados e 6 redundâncias e uma demanda de tráfego capaz de ser encaminhada sem perdas através da rede. As redundâncias foram colocadas para atender os clientes de maior importância e garantir os acordos de nível de serviço que possuem as maiores multas, além de garantir maior resiliência à rede como um todo em caso de queda de algum enlace.

Antes de analisar os resultados obtidos, é importante verificar qualitativamente os efeitos das alterações através da percepção do administrador da rede em busca de um aumento na robustez da rede.

O enlace de menor capacidade na topologia é o enlace (1,11) de 6Mbps. Como praticamente todo o tráfego desta topologia tem origem e destino no nó 1, a ligação do nó 11 a outro nó da topologia pode ser prejudicial para o nível de serviço exigido pelo nó 11, uma vez que o enlace (1,11) será compartilhado por outros nós em caso de desconexões e a capacidade reduzida desta ligação implicará em congestionamento e perda de tráfego. No entanto, um caminho alternativo entre os nós 11 e 1 é interessante sob o ponto de vista do nó 11, pois serve como redundância ao enlace (1,11). Desta forma, deve-se fazer uma análise criteriosa para se chegar a uma conclusão.

Outras observações podem ser feitas em relação aos demais enlaces. As ligações (1,2) e (1,8) são de grande capacidade e existe uma grande quantidade de nós que podem fazer uso desses enlaces no caso de desconexões. Em contrapartida, os enlaces (9,24) e (14,24) atendem a uma pequena quantidade de nós.

Essa análise subjetiva pode ser feita por um administrador de rede que tome conhecimento das características da rede, porém é preciso diferenciar qual adição apresentará um melhor resultado e qual retirada é mais prejudicial.

O primeiro passo para a utilização do FR proposto é a escolha dos enlaces a serem alterados. Caso o administrador da rede já tenha em mente as alterações que queira considerar, estas poderão ser testadas, porém, no caso de um estudo mais abrangente, podemos utilizar o teste de adição e retirada de enlaces, apresentado nas figuras 4(a) e 4(b).

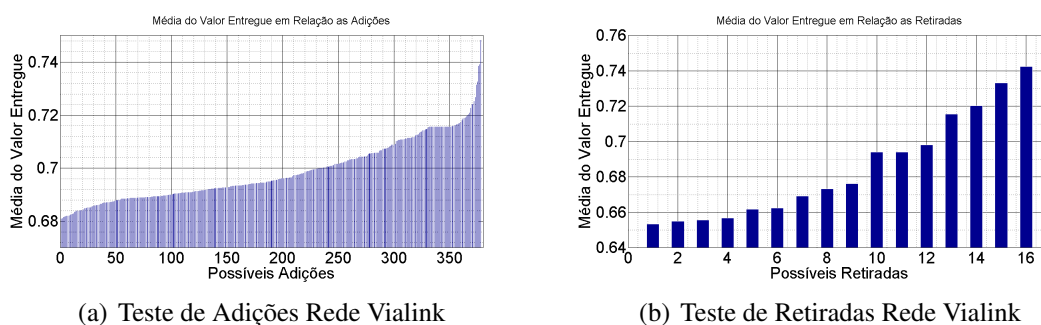


Figure 4. Testes de adições e retiradas

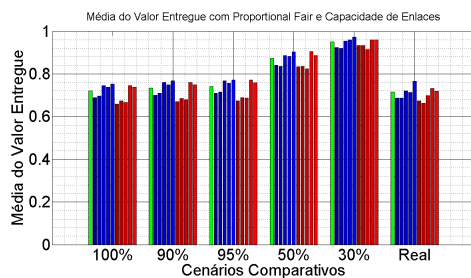
As figuras 4(a) e 4(b) apresentam a MVE em todas as possibilidades de adição de novos enlaces e todas as possibilidades de retiradas de enlaces, que mantenham todos os nós conectados. Para o teste do método em relação às adições, foram escolhidos as duas piores e as três melhores adições. Para o teste em relação às retiradas, foram selecionadas as três piores e as duas melhores retiradas.

As adições e retiradas escolhidas estão na tabela 1, totalizando cinco adições e cinco retiradas de enlaces. As duas primeiras adições contemplam o caso apresentado anteriormente de adição de redundância ao nó 11, as demais adições buscam atender o maior número possível de nós. As três primeiras retiradas afetam um maior número de nós enquanto as duas últimas um menor número de nós. A MVE apresentada na tabela 1 diz respeito ao método de roteamento OSPF e o método de ocupação *maxmin fair* a 100%, como apresentado na figura 6(a).

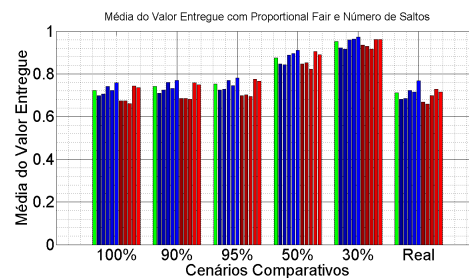
Table 1. Alterações na topologia Vialink

Alteração	Mbps	MVE	Alteração	Mbps	MVE
Inicial	X	0,7156	Inicial	X	0,7156
+(5,11)	45	0,6809	-(1,2)	X	0,6533
+(11,22)	45	0,6792	-(1,8)	X	0,6691
+(9,14)	45	0,7391	-(5,21)	X	0,6567
+(5,16)	45	0,7325	-(9,24)	X	0,7425
+(1,21)	45	0,7482	-(14,24)	X	0,7332

Os resultados para o cálculo da MVE estão apresentados nas figuras 5(a), 5(b), 6(a) e 6(b). Em todas as figuras temos em verde a MVE para a situação inicial, em azul as cinco adições e em vermelho as cinco retiradas, na sequência da tabela 1. A ordem, R , na situação inicial é igual a 6, nas adições iguais a 7 e nas retiradas igual a 5.

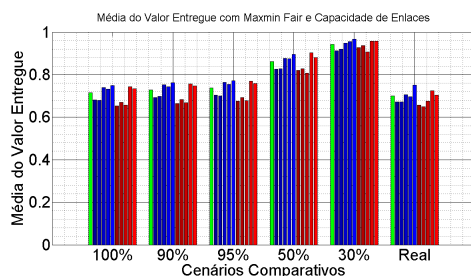


(a) Vialink Proportional Fair e OSPF

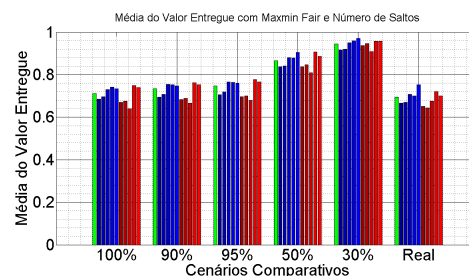


(b) Vialink Proportional Fair e RIP

Figure 5. Método de ocupação *proportional fair*



(a) Vialink Maxmin Fair e OSPF



(b) Vialink Maxmin Fair e RIP

Figure 6. Método de ocupação *maxmin fair*

O primeiro resultado importante diz respeito à consistência do método, apresentado resultados semelhantes, mesmo alterando a forma de roteamento, a carga e distribuição de tráfego.

Os métodos de ocupação de enlace *maxmin fair*, *proportional fair* e o tráfego real da topologia apresentaram pouca diferença, mantendo na maioria dos casos a relação de ordem entre os valores. Com a utilização de informações relativas ao funcionamento histórico da rede, os métodos de ocupação podem ser alterados, mantendo a eficácia do método proposto.

Em relação à adição de redundância ao nó 11, representada nas figuras 5(a), 5(b), 6(a) e 6(b) pelas duas primeiras barras em azul, podemos verificar nas figuras 5(a) e 5(b) que de todos os cenários comparativos, a adição (11,22) (segunda barra azul), é mais indicada para os três casos de maior ocupação. Na figura 6(a) os valores de adição (11,22) apresentam melhores resultados nos cenários de 95%, 50%, 30% e real. Na figura 6(b), todos os resultados indicam a melhor opção é a ligação (11,22). Assim, na maioria das situações verificadas, a adição de um enlace (11,22) apresenta um melhor resultado do que a adição de um enlace (5,11). Sem a utilização de um método matemático, esta conclusão seria difícil de ser obtida.

Nas demais adições, a adição (1,21) é a que mais se destaca, principalmente utilizando as demandas reais da rede.

Para todos os casos de adição de enlace, a viabilidade técnica e financeira é determinante para a tomada de decisão, o método proposto não leva em consideração esses pontos, porém cabe ao administrador da rede realizar a análise criteriosa dessas informações frente aos resultados obtidos.

Nas três primeiras retiradas, o impacto de cada uma delas é muito próximo, dependendo do roteamento, carga e ocupação. A decisão de melhorar a disponibilidade desses enlaces deve ser tomada levando em consideração custos e viabilidade técnica.

As duas últimas retiradas apresentaram um valor elevado de MVE, é importante observar que a retirada de um enlace altera a matriz de roteamento da rede e em certas ocasiões pode levar a uma melhor distribuição de tráfego, fato esse que se reflete na MVE. Porém, a avaliação deve ser pautada no FR como um todo, pois com a retirada, o número de redundâncias diminuiu, diminuindo assim a ordem e consequentemente reduzindo uma componente do FR.

Os resultados obtidos com o método proposto se basearam em alterações sugeridas pelo teste de adições e retiradas. A utilidade do método vai além desse tipo de comparação. Na prática as possibilidades de adição de enlaces são restritas por fatores técnicos e financeiros, reduzindo o total de possibilidades a serem testadas por um administrador. Na Vialink, existem 378 possibilidades de adição e ampliação de enlaces, muitas dessas possibilidades podem ser inviabilizadas por fatores técnicos e financeiros.

6. Conclusão

O tema resiliência é bem atual e o método proposto é de implementação imediata (realizada neste trabalho através do *matlab* [MATLAB 2011]), independente dos equipamentos existentes na rede e suas quantidades. O fator de resiliência proposto possibilitou a formalização, através de um par de valores, das principais características de uma rede em relação ao estudo de suas redundâncias.

Este trabalho apresentou uma metodologia para dar suporte a ações de gerência em redes de computadores através do uso de um fator de resiliência, que leva em consideração

características da topologia da rede, como a quantidade de nós, o número de enlaces disponíveis, suas disposições, capacidades, ocupações e carga. Também foram considerados os métodos de roteamento mais comuns. A abordagem utilizada para a investigação foi a perspectiva de um administrador de redes.

Foi utilizada uma topologia real para a verificação do funcionamento do método, através de adições e retiradas de enlaces. As adições propostas foram escolhidas buscando aumentar a resiliência da rede e as retiradas, foram testadas para identificar os enlaces de maior importância na topologia. Para auxiliar a escolha das alterações, foi utilizado um teste de adições e retiradas de enlaces, que apresenta o comportamento da rede frente a todas as possíveis retiradas de redundâncias e todas as possíveis adições de enlaces entre nós que não estavam conectados, ou estavam conectados com uma capacidade inferior a maior capacidade disponível na rede.

Para validar a proposta, o método foi testado na topologia Vialink em diferentes situações de ocupação, carga e roteamento. Em todos os testes realizados, o comportamento fator de resiliência proposto foi equivalente, indicando consistência do método.

Os resultados apresentados ao longo do trabalho estão em conformidade com a percepção dos administradores de redes e indicam que o fator proposto pode ser utilizado para quantificar as alterações na rede, permitindo a escolha de adições e remanejamentos intuitivos e não intuitivos para os administradores de redes, mas que apresentam maior resiliência. Os resultados também indicaram quais redundâncias são mais importantes e como será o impacto na rede no caso de perdas desses enlaces.

Como trabalhos futuros, a utilização de abordagens mais detalhadas em relação a disponibilidade de enlaces (determinação dos α_i para cada situação de falha), métodos de roteamento, tipos de tráfego e o desenvolvimento de um método automatizado de apoio à decisão podem ser considerados.

References

- Aggelou, G. (2008). *Wireless Mesh Networking*. McGraw-Hill Professional.
- Beygelzimer, A., Grinstein, G., Linsker, R., and Rish, I. (2004). Improving network robustness. In *Proc. Int. Autonomic Computing Conf*, pages 322–323.
- Beygelzimer, A., Kephart, J., and Rish, I. (2007). Evaluation of optimization methods for network bottleneck diagnosis. In *Proc. Fourth Int. Conf. Autonomic Computing ICAC '07*, page 20.
- Durvy, M., Dior, C., Taft, N., and Thiran, P. (1979). Network availability based service differentiation. *Comm. of ACM*, page 22.
- Iannaccone, G., Chuah, C.-n., Mortier, R., Bhattacharyya, S., and Diot, C. (2002). Analysis of link failures in an ip backbone. In *Proc. 2nd ACM SIGCOMM Workshop on Internet measurement, IMW '02*, pages 237–242.
- Kelly, F., Maulloo, A., and Tan, D. (1998). Rate control in communication networks: shadow prices, proportional fairness and stability. In *Journal of the Operational Research Society*, 49(3):237–252.
- Lloyd, C. R. V. (2007). *Service Design Book (Itil)*. The Stationery Office.

- Malkin, G. (1998). RIP Version 2. RFC 2453 (Standard). Updated by RFC 4822.
- Markopoulou, A., Iannaccone, G., Bhattacharyya, S., Chuah, C.-N., and Diot, C. (2004). Characterization of failures in an ip backbone. In *Proc. INFOCOM 2004. Twenty-third Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*, volume 4, pages 2307 – 2317.
- MATLAB(2011). Mathworks - matlab and simulink for technical computing. <http://www.mathworks.com/>.
- Menth, M., Duelli, M., Martin, R., and Milbrandt, J. (2009). Resilience analysis of packet-switched communication networks. *IEEE/ACM Trans. Netw.*, 17(6):1950–1963.
- Menth, M., Martin, R., and Spoerlein, U. (2006). Cam05-1: Impact of unprotected multi-failures in resilient spm networks: a capacity dimensioning approach. In *Proc. IEEE Global Telecommunications Conf. GLOBECOM '06*, pages 1–6.
- Moy, J. T. (2000). *OSPF Complete Implementation*. Addison-Wesley Professional.
- Najjar, W. and Gaudiot, J.-L. (1990). Network resilience: a measure of network fault tolerance. *Computers, IEEE Transactions on*, 39(2):174 –181.
- Nucci, A., Schroeder, B., Bhattacharyya, S., Taft, N., and Diot, C. (2003). Igp link weight assignment for transient link failures. In *in Proc. International Teletraffic Congress*, pages 789–782.
- Omer, M., Nilchiani, R., and Mostashari, A. (2009a). Measuring the resilience of the global internet infrastructure system. In *Proc. 3rd Annual IEEE Systems Conf*, pages 156–162.
- Omer, M., Nilchiani, R., and Mostashari, A. (2009b). Measuring the resilience of the trans-oceanic telecommunication cable system. *IEEE Systems Journal*, 3(3):295–303.
- Salles, R. M. and Marino, D. A. (2011). Strategies and metric for resilience in computer networks. *The Computer Journal*, Published Online.
- Schupke, D. and Prinz, R. (2004). Capacity efficiency and restorability of path protection and rerouting in wdm networks subject to dual failures. Kluwer Academic Publishers, 8(2):191–207.
- Skiena, S. S. (2008). *The Algorithm Design Manual*. Springer, 2nd edition.
- Trivedi, K. S., Kim, D. S., and Ghosh, R. (2009). Resilience in computer systems and networks. In *Proc. IEEE/ACM Int. Conf. Computer-Aided Design - Digest of Technical Papers ICCAD 2009*, pages 74–77.
- Vasseur, J.-P., P. M. and Demeester, P. (2004). *Network Recovery*. Morgan Kaufmann.
- Vialink (2011). Vialink soluções. <http://www.vialink.com.br>.