

CBA 2004 - XV Congresso Brasileiro de Automática

Centro de Convenções da UFRGS
Gramado - RS • 21 a 24 de Setembro de 2004

ROTEAMENTO ALTERNATIVO EM REDES DE TELECOMUNICAÇÕES BASEADO NO COMPORTAMENTO DE FORMIGAS

ALUÍZIO F. R. ARAÚJO, KARLA VITTORI, RICARDO S. M. FERNANDES

Laboratório de Sistemas Inteligentes, Dept. de Engenharia Elétrica, Universidade de São Paulo,
Av. Trabalhador São-carlense, 400, 13566-590, São Carlos, SP – BRASIL
{aluizioa, karlav}@sel.eesc.sc.usp.br

A6632

Resumo – O roteamento alternativo é aplicado a redes de telecomunicações totalmente conectadas e consiste na utilização de rotas substitutas quando a rota direta não se encontra disponível. Este trabalho apresenta o roteamento alternativo baseado no comportamento coletivo de formigas, formado por um conjunto de agentes que se movem sobre a rede simultaneamente às chamadas telefônicas, coletando informação sobre a situação das linhas de transmissão e atualizando a tabela de roteamento da rede. O objetivo dos agentes é selecionar as melhores rotas alternativas baseados na capacidade de transmissão disponível da rede no momento da escolha e na informação armazenada na tabela de roteamento, realizando o balanceamento de carga. O algoritmo de roteamento desenvolvido foi aplicado a um modelo de rede totalmente conectada, utilizada pela empresa telefônica britânica *British Telecom* (BT) e seu desempenho foi comparado ao do algoritmo DAR, usado pela BT com relação à porcentagem média de chamadas perdidas. Os testes envolveram variações no nível de carga e topologia da rede, de modo individual e em conjunto. O algoritmo baseado em formigas obteve melhores resultados que seu competidor em todas as situações consideradas. Isto sugere a capacidade superior do algoritmo proposto de ajuste às condições estocásticas e não-lineares do problema de roteamento.

Abstract – Alternative routing is applied to fully connected telecommunications networks and concerns using substitute routes when the direct route is not available. This paper presents the alternative routing based on ants colony behavior, composed by a set of agents that move through the network at the same time than calls, collecting information about links conditions and updating the network routing table. The aim of the agents is to select the best alternative routes based on available transmission capacity of the network and information stored in the routing table, performing load balancing. The developed routing algorithm was applied to a fully connected network model, used by the Britain telephony company *British Telecom* (BT) and his performance was compared to the one of the DAR algorithm, used by BT in terms of the mean percentage of lost calls. The tests comprised changes in network load level and topology, done individually and together. The algorithm based on ants reached better results than its competitor in all the considered situations. This suggests the higher capacity of the proposed algorithm to respond to the stochastic and non-linear routing problem conditions.

Keywords – Dynamic routing, Alternative routing, Ants behavior, Telecommunications networks.

1 Introdução

O gerenciamento de uma rede de telecomunicações possui diversos componentes, dentre eles o roteamento, que é responsável pela seleção das rotas a serem percorridas pelas mensagens entre sua origem e destino desejado (Steenstrup, 1995). A constante expansão dos serviços oferecidos pelas redes de telecomunicações e do número de seus usuários gera a necessidade permanente de sistemas de roteamento autônomos, rápidos e adaptativos. Neste sentido, este trabalho apresenta um algoritmo de roteamento baseado no comportamento coletivo de formigas, que consiste na tomada de decisões probabilística e na comunicação indireta entre os indivíduos na busca das melhores soluções (Hölldobler e Wilson, 1990). O algoritmo é composto por um conjunto de agentes que se movem sobre a rede simultaneamente às chamadas, atualizando a tabela de roteamento baseados na informação coletada sobre as linhas de transmissão percorridas. Estes agentes possuem características comuns aos do método de otimização baseado em colônias de formigas (*Ant Colony Optimization* – ACO), (Dorigo et al., 1991; Dorigo, 1992), que tem sido aplicado com sucesso a diversos problemas de otimização complexos, como o roteamento em redes de telecomunicações (Schoonderwoerd et al., 1996; Bonabeau et al., 1998; Sim e Sun, 2003). As chamadas são enviadas de acordo com a tabela de roteamento, caracterizando um sistema dependente

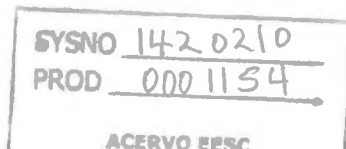
do evento. Este algoritmo foi aplicado a um modelo de rede totalmente conectada e seu desempenho comparado, em termos da porcentagem média de chamadas perdidas, ao de um algoritmo utilizado pela *British Telecom* (BT). Este algoritmo é o Roteamento Dinâmico Alternativo (*Dynamic Alternative Routing* – DAR), (Gibbens, 1988), em que as rotas alternativas são selecionadas aleatoriamente quando a rota direta não se encontra disponível. Os testes envolveram variações do nível de carga e topologia da rede. O algoritmo proposto obteve menores perdas que seu competidor em todas as situações consideradas.

Este trabalho é organizado como segue: na Seção 2 são descritos os aspectos principais do problema de roteamento em redes de telecomunicações, juntamente com as características do algoritmo de roteamento DAR. Na Seção 3, são apresentados alguns algoritmos de roteamento baseados no comportamento coletivo de formigas, seguidos na Seção 4 pela descrição do algoritmo desenvolvido. A Seção 5 apresenta os testes realizados e a Seção 6 mostra as conclusões obtidas ao longo do trabalho e as perspectivas de pesquisa futura.

2 Algoritmos de Roteamento Dinâmicos e Distribuídos

O problema do roteamento em redes de telecomunicações é representado por um grafo não direcionado $G = (R, T)$, onde os nós pertencentes ao

1420210
100205



Gp.

conjunto R representam os roteadores e os arcos pertencentes ao conjunto T representam as linhas de transmissão bidirecionais que interligam os roteadores (Bertsekas e Gallager, 1992). Os roteadores se caracterizam por uma capacidade de processamento e armazenamento de mensagens, enquanto as linhas se caracterizam por uma capacidade de transmissão.

Os roteadores possuem três funções (Steenstrup, 1995): i) reunião de informação sobre as condições da rede; ii) seleção das rotas a serem percorridas pelas mensagens e iii) condução destas pelos caminhos escolhidos ao destino desejado. A escolha das rotas se baseia na estrutura de dados presente em cada nó da rede, denominada tabela de roteamento, onde se encontram informações sobre a qualidade dos caminhos candidatos a integrarem uma rota. As mensagens podem ser enviadas sob duas tecnologias: i) comutação de circuitos e ii) comutação de pacotes. Na primeira abordagem, os recursos da rede são reservados antes do envio da mensagem e permanecem dedicados até o final da conexão entre a origem e destino da mesma. Na segunda tecnologia, as mensagens são divididas em unidades menores, denominadas pacotes, e cada pacote pertencente a um dado par origem-destino pode seguir uma rota diferente sobre a rede. Os recursos da rede não são reservados previamente e permanecem dedicados somente enquanto a mensagem for enviada. As redes de telefonia utilizam a comutação de circuitos, enquanto as redes de computadores empregam a comutação de pacotes.

Os algoritmos de roteamento podem ser: i) centralizados ou distribuídos e ii) estáticos ou dinâmicos. Os sistemas centralizados são aqueles em que as rotas são selecionadas por um único roteador sobre a rede, que as envia aos demais. Esta estratégia exige alta capacidade de processamento da rede e apresenta perda catastrófica em caso de falha ou falta no roteador central. Nos sistemas distribuídos, cada roteador realiza suas funções de forma independente, compartilhando com seus vizinhos informação local sobre a rede. Nos sistemas estáticos, as rotas são escolhidas previamente, baseadas na demanda do tráfego medida, permanecendo inalteradas durante a operação da rede. Em alguns algoritmos, estas rotas podem ser modificadas sob falhas ou faltas em um componente da rede. Os algoritmos dinâmicos selecionam as rotas baseados nas condições atuais da rede. A mudança dos caminhos usados pode ocorrer (Ash, 1997): i) em intervalos de tempo pré-definidos; ii) de acordo com as consequências da escolha de um dado caminho e iii) baseada no status atual da rede. Assim, estes algoritmos são classificados como dependentes do tempo, do evento e do estado, respectivamente, sendo os dois últimos grupos considerados sistemas dinâmicos em tempo real.

Os primeiros algoritmos de roteamento, estáticos e centralizados, vêm sendo substituídos por algoritmos dinâmicos e distribuídos, para lidar com as características estocásticas e não-lineares das redes de telecomunicações. Neste sentido, são apresentadas

a seguir as principais características de um algoritmo dinâmico e distribuído, baseado em evento, utilizado pela empresa britânica BT em uma rede de telefonia totalmente conectada.

2.1 – Roteamento Dinâmico Alternativo (DAR)

O algoritmo de roteamento DAR (Gibbens, 1988) classifica os caminhos de uma rede de telecomunicações em duas categorias: i) caminho direto, formado por um único enlace, que interliga os nós origem e destino de uma mensagem e ii) caminho alternativo, formado por dois ou mais enlaces. Como este algoritmo foi aplicado a uma rede totalmente conectada, os caminhos alternativos possuem no máximo dois enlaces. Entretanto, mesmo em redes que permitem o uso de caminhos mais longos, verifica-se que 98% do tráfego é enviado por rotas com uma ou duas linhas, devido aos custos de utilização dos recursos da rede (Ash, 1995).

Quando se necessita enviar uma chamada telefônica entre o par de nós (i,j) da rede, o algoritmo DAR procura utilizar primeiramente a linha de transmissão que constitui a rota direta. Caso esta linha não exista, não tenha circuitos disponíveis ou esteja desligada temporariamente, seleciona-se um nó alternativo k de forma aleatória. A utilização deste nó alternativo está vinculada à reserva de troncos, um mecanismo de controle que seleciona alguns circuitos de uma linha para o envio de chamadas por uma rota direta. Deste modo, um nó alternativo k previamente selecionado é utilizado somente se as linhas (i,k) e (k,j) possuem um número de circuitos disponíveis superior a reserva considerada. Atendendo a este critério, o nó k é mantido como nó alternativo para as mensagens destinadas ao par (i,j) . Caso contrário, a chamada é considerada perdida e um novo nó alternativo k' é escolhido aleatoriamente para uso futuro, excluindo-se os nós i, j e k .

Este algoritmo é bem rápido, contudo a escolha aleatória do nó alternativo não permite o aprendizado dos melhores caminhos sobre a rede. Além disso, esta estratégia não visa minimizar os recursos da rede usados no envio das chamadas, não realizando o balanceamento de carga sobre a mesma. Tais aspectos comprometem o desempenho do sistema sob variação das condições da rede, como aumento de carga, falta e/ou falha em seus nós e linhas e aumento da rede. Assim, eles podem levar o sistema de roteamento a perder chamadas mesmo quando possui circuitos disponíveis.

Deste modo, faz-se necessário o uso de algoritmos de roteamento dinâmicos e distribuídos que utilizem vários critérios na seleção de rotas, considerando o estado atual dos nós e/ou enlaces, sem necessitar de um controle central, realizando suas ações de forma interdependente. A capacidade de tomar as melhores decisões sob diferentes condições da rede de modo autônomo também é extremamente importante.

A seguir, são apresentados dois algoritmos de roteamento baseados no comportamento de formigas aplicados a redes comutadas por circuitos.

3 Comportamento Coletivo de Formigas para Roteamento

Nesta Seção são descritos os principais aspectos do método de otimização baseado no comportamento de colônias de formigas (*Ant Colony Optimization* - ACO), que constitui a base do algoritmo proposto. Finalmente, são discutidos dois algoritmos de roteamento aplicados a redes comutadas por circuitos baseados nesta estratégia.

3.1 – Otimização Baseada no Comportamento Coletivo de Formigas

No método de otimização baseado em colônias de formigas (*Ant Colony Optimization* - ACO), um conjunto de agentes coopera para encontrar boas soluções para problemas de otimização discretos e complexos (Dorigo et al., 1991; Dorigo, 1992; Dorigo et al., 1999). Cada ponto do meio visitado pelo agente representa um estado do ambiente. A maioria das idéias do método ACO provém do comportamento de formigas na natureza relacionado com a busca de alimento. Além disto, alguns mecanismos extras foram anexados, como a consideração de estados discretos do meio e de diferentes momentos para o depósito de feromônio, para a obtenção de respostas satisfatórias em problemas de otimização complexos. As principais características do ACO são (Dorigo et al., 1999):

1. Colônia de agentes cooperativos – os agentes cooperam para a obtenção de uma boa solução para o problema, através do compartilhamento da informação por eles coletada em seu deslocamento sobre o meio.
2. Trilhas de feromônio e stigmergia enquanto as formigas reais modificam o meio depositando feromônio sobre o mesmo, os agentes mudam uma informação numérica sobre as condições do ambiente armazenada no estado do meio visitado.
3. Busca do menor caminho e movimentos locais os agentes se movem entre estados adjacentes do meio, buscando os menores caminhos.
4. Política probabilística os agentes selecionam suas ações de forma probabilística, baseados na informação local sobre o meio.
5. Mundo discreto o movimento dos agentes se caracteriza por transições entre estados discretos.
6. Estado interno os agentes possuem capacidade de memória relacionada com as ações passadas.
7. Depósito de feromônio a quantidade de feromônio depositado pode ser função da qualidade da solução obtida e o momento em que este depósito ocorre é dependente do problema.
8. Capacidades extras os agentes podem utilizar mecanismos como otimização local, consideração de ações passadas ou estados futuros.

A seguir são apresentados dois algoritmos que mostram como o método ACO foi aplicado ao roteamento em redes de telecomunicações.

3.2 ACO para Roteamento

O primeiro algoritmo de roteamento baseado no comportamento de formigas é denominado Controle Baseado em Formigas (*Ant-Based Control* - ABC), aplicado a uma rede de comutação de circuitos (Schoonderwoerd et al., 1996). Cada nó da rede possui: (i) uma capacidade máxima de transmissão de chamadas; (ii) uma probabilidade de ser nó destino de uma chamada e (iii) uma tabela de roteamento. Cada linha da tabela representa a preferência de roteamento para cada destino e cada coluna representa a probabilidade de escolher um vizinho a cada passo do agente.

Os agentes são lançados de um nó o a um destino aleatório d e se movem para o destino desejado selecionando probabilisticamente o nó vizinho a ser visitado. A cada nó percorrido, o agente lançado em o e atualmente em j , vindo do nó vizinho i , atualiza a probabilidade armazenada na tabela de roteamento de j de utilizar o nó i para atingir a origem o , $P_j(i,o)$, baseado no tempo transcorrido desde a sua geração. As probabilidades de escolha dos demais vizinhos de j em direção a o são normalizadas. As rotas percorridas pelas chamadas utilizam o nó com maior probabilidade. O algoritmo ABC foi aplicado a uma rede SDH de 30 nós usada pela BT. Seu desempenho foi comparado, em termos da porcentagem média de chamadas perdidas, ao de um algoritmo baseado em agentes desenvolvido pela BT, os quais não seguem o método ACO (Appleby e Steward, 1994). As perdas do ABC foram menores que as de seu competidor sob mudanças no padrão de tráfego da rede.

Este desempenho satisfatório levou ao desenvolvimento o algoritmo ABC com agentes espertos (Bonabeau et al., 1998), onde os agentes atualizam as probabilidades de escolher o último nó visitado com respeito a todos os nós intermediários percorridos e não somente com relação à origem o . As probabilidades relativas aos demais vizinhos de j em direção aos nós intermediários também são normalizadas, como no algoritmo ABC. Os nós utilizados pelas chamadas são novamente aqueles com maior probabilidade. Ao atualizar mais informações da tabela de roteamento de um nó, o algoritmo ABC com agentes espertos aprendeu de forma mais eficiente as melhores rotas da rede, obtendo menores perdas que o algoritmo ABC.

As versões do sistema ABC descritas anteriormente não foram utilizadas neste trabalho, uma vez que consideram características dos nós nas escolhas das rotas e foram aplicadas a modelos de rede parcialmente conectadas, que não correspondem aos critérios aqui considerados.

4 Algoritmo Implementado

Nesta seção é descrito o algoritmo de roteamento baseado no comportamento coletivo de formigas proposto.

4.1 Roteamento Alternativo Baseado em Formigas

O Roteamento Alternativo Baseado em Formigas (RAF) foi desenvolvido com o intuito de descobrir as melhores rotas alternativas sobre uma rede comutada por circuitos quando a rota direta não se encontra disponível, realizando o balanceamento de carga. O algoritmo RAF é composto por um conjunto de agentes que percorrem a rede de forma simultânea às chamadas, buscando os caminhos mais curtos e menos carregados com base na tabela de roteamento e nas condições atuais da rede. A cada instante de tempo t , são lançados m agentes sobre a rede, onde m é o número de nós da mesma. O par de nós origem-destino (o,d) de cada agente i é selecionado de acordo com a distribuição de probabilidade utilizada pelas chamadas.

O valor $P(i,j,t)$ representa a avaliação da linha (i,j) com relação a sua capacidade de transmissão disponível no instante de tempo t . Os caminhos percorridos pelos agentes não possuem limite de comprimento, porém eles não podem percorrer duas vezes uma mesma linha em uma dada rota, para que o seu uso não seja continuamente valorizado ou inibido. Os agentes que se encontram sobre o nó i selecionam o próximo nó j a ser visitado de forma probabilística, segundo $Prob(i,j,t)$, que se baseia na probabilidade $P(i,j,t)$ e na capacidade de transmissão ociosa $O(i,j,t)$ no momento da escolha:

$$Prob(i,j,t) = \frac{P^\alpha(i,j,t) O^\beta(i,j,t)}{\sum_l P^\alpha(i,l,t) O^\beta(i,l,t)} \quad (1)$$

na qual: $O(i,j,t) = C(i,j,t) / M(i,j,t)$ e $0,0 < O(i,j,t) < 1,0$;

$C(i,j,t)$ = circuitos disponíveis em (i,j) ;

$M(i,j,t)$ = capacidade máxima de (i,j) ;

α e β = constantes obtidas empiricamente;

l é nó vizinho de i .

Os parâmetros α e β são o peso atribuído a cada característica da rede considerada nas ações dos agentes. A utilização da informação da tabela de roteamento e de um dado heurístico da rede nestas ações iniciou-se na aplicação do método ACO ao problema do caixeiro viajante (Dorigo et al., 1996). Ela busca anexar informação atual sobre a rede àquela da tabela de roteamento, que pode estar defasada em relação à situação corrente das linhas, de modo a aumentar a flexibilidade dos agentes sob mudanças. O agente coleta informação sobre cada linha (i,j) visitada no instante t , a qual representa um sinal de reforço $r(i,j,t)$ (Kaelbling et al., 1996):

$$r(i,j,t) = (\delta O(i,j,t)) - \sigma \quad (2)$$

na qual δ e σ são constantes obtidas empiricamente.

O parâmetro σ representa um sinal de reforço negativo quando a capacidade disponível de circuitos na linha (i,j) se mostra reduzida. Quando o agente

atinge seu nó destino d , ele atualiza os valores $P(i,j,t)$ de todas as linhas visitadas em sua trajetória:

$$P(i,j,t) = P(i,j,t-1) + r(i,j,t) \quad (3)$$

O agente percorre toda a rota rumo ao destino no instante t em que ele é gerado. Após chegar ao destino desejado e atualizar os valores-P, o agente é eliminado do sistema.

O roteamento de cada chamada com o par de nós origem-destino (o,d) busca utilizar inicialmente a rota direta, formada pela linha (o,d) . Caso isto não seja possível, o algoritmo RAF busca a rota formada por duas linhas que maximiza o produto $P_i(o,m) \times P_i(m,d)$, onde m é o nó alternativo. Deste modo, o algoritmo RAF é um sistema dependente do evento. Para evitar a convergência prematura do algoritmo desenvolvido para soluções sub-ótimas, aplicou-se um decaimento nos valores-P da tabela de roteamento a cada momento t , após o processamento dos agentes e chamadas da rede, simulando a evaporação do feromônio na natureza:

$$P(i,j,t) = (1,0 - \phi) P(i,j,t) \quad (4)$$

na qual ϕ é uma constante obtida empiricamente.

Os resultados obtidos pelo algoritmo RAF sob variações das condições da rede, juntamente com aqueles do DAR, que também foi implementado neste trabalho, são descritos a seguir.

5 Experimentos Realizados

Nesta Seção, inicialmente são descritas as características da rede utilizada, seguidas pelos valores dos parâmetros do algoritmo proposto e da simulação de modo geral, juntamente com os testes realizados. Finalmente, os resultados obtidos pelos algoritmos implementados são apresentados.

5.1 Características da Rede

Os algoritmos implementados foram aplicados a um modelo composto por 6 nós totalmente conectados, extraído de uma rede real da empresa britânica BT usada por Mitra e Seery (1991), (Figura 1).

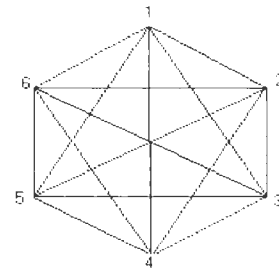


Figura 1— Rede de seis nós, totalmente conectada (Mitra e Seery, 1991).

Os aspectos de cada uma de suas linhas são mostrados na Tabela 1 (Mitra e Seery, 1991). São considerados somente os pares de nós (i, j) para $i < j$.

Tabela 1 – Dados da rede utilizada (Mitra e Seery, 1991).

Linhas	Núm. circuitos	Tráf. oferecido
1-2	36	27,47
1-3	24	6,97
1-4	324	257,81
1-5	48	20,47
1-6	48	29,11
2-3	96	25,11
2-4	96	101,61
2-5	108	76,78
2-6	96	82,56
3-4	12	11,92
3-5	48	6,86
3-6	24	13,25
4-5	192	79,42
4-6	84	83,00
5-6	336	127,11

O tráfego oferecido aos nós segue uma distribuição de Poisson e a duração de cada chamada é de 180 segundos, segundo uma distribuição exponencial.

5.2 Escolha de Parâmetros e Tipos de Testes

O algoritmo desenvolvido utilizou os valores de reserva de tronco R empregados pelo DAR, que variam com o nível de carga oferecido a rede: i) para nível baixo, $R = 0$; ii) moderado, $R = 4$ e iii) alto, $R = 5$. O nível baixo se caracterizou pela multiplicação da taxa de tráfego oferecido (Tabela 1) pelos fatores: 1,0, 1,1, 1,2, 1,3 e 1,4. No nível médio, o fator utilizado foi 1,5, e no alto 2,0. Os valores $P_i(i, j)$ recebem em $t = 0$ o valor 1,0. Os demais parâmetros usados pelo RAF foram obtidos empiricamente, recebendo os seguintes valores: $\alpha = 1,0$, $\beta = 3,0$, $\delta = 0,7$, $\sigma = 0,03$ e $\phi = 0,0001$.

Os experimentos envolveram dez simulações, cada uma com 18.000 passos de tempo para o tráfego moderado e pesado e 180.000 passos de tempo para o leve. Os testes realizados envolveram a variação do nível de carga e topologia da rede (Mitra e Seery, 1991). Foram considerados níveis de carga baixo, moderado e pesado. As linhas de transmissão retiradas da rede foram 1-6 e 2-5, selecionadas por apresentarem características diversas de tráfego e capacidade de transmissão. As faltas ocorreram após 20% do tempo de simulação considerado e se mantiveram até o fim.

O programa com o algoritmo RAF foi implementado em linguagem C, enquanto o DAR em C++.

5.3 Resultados Obtidos

O desempenho dos algoritmos foi medido pela média da porcentagem de chamadas perdidas a cada intervalo de 180s. Os resultados são mostrados a seguir.

5.3.1 Variações no Nível de Carga da Rede

As variações no nível de carga da rede provocaram acréscimos nas perdas dos dois algoritmos analisados. O DAR produziu as maiores perdas sob todos os níveis de carga considerados.

Tabela 2 – Resultados sob mudanças no nível de carga da rede.

Sobrecarga(%)	Média de Chamadas Perdidas (%)	
	DAR	RAF
0	0,04	0,0
10	0,25	0,004
20	0,84	0,084
30	2,95	1,33
40	7,41	4,70
50	10,22	9,24
100	25,77	25,29

O algoritmo desenvolvido RAF se adaptou melhor às mudanças consideradas em relação ao método DAR.

5.3.2 Testes de Robustez a Faltas

As mudanças na topologia da rede, mantendo o nível de carga baixo, causaram menor aumento nas perdas que as variações em seu nível de tráfego.

Tabela 3 – Resultados sob mudanças na topologia da rede.

Linha	Média de Chamadas Perdidas (%)	
	DAR	RAF
1-6	0,26	0,0003
2-5	2,53	1,67

O algoritmo RAF produziu os menores resultados sob as duas situações de falta consideradas. As perdas foram maiores nos dois algoritmos sob falta na linha 2-5, que possui um tráfego médio oferecido igual a 71,09% de sua capacidade máxima, enquanto ele é de 60,64% para a linha 1-6.

5.3.3 Testes com Variações de Tráfego e Faltas

Ao modificar os dois parâmetros variados de forma separada anteriormente, as perdas dos algoritmos foram altamente acrescidas.

Tabela 4 – Resultados sob mudanças no nível de carga e topologia da rede.

Tráfego	Média de Chamadas Perdidas (%)			
	DAR		RAF	
	1-6	2-5	1-6	2-5
Moderado	13,16	16,84	11,54	14,48
Pesado	28,48	31,60	27,09	29,66

Ainda assim, o algoritmo proposto RAF produziu menores perdas que o DAR sob todas as situações consideradas.

6 Conclusões

Este trabalho apresentou um algoritmo de roteamento para redes comutadas por circuitos baseado no comportamento coletivo de formigas. Neste sentido, o Roteamento Alternativo Baseado em Formigas (RAF) proposto, é composto por um conjunto de agentes que se movem sobre o meio coletando informação sobre as linhas e atualizando as variáveis da tabela de roteamento referente a todas as linhas visitadas em uma dada rota. Os caminhos menores e menos carregados são favorecidos, de forma a realizar o balanceamento de carga. O algoritmo proposto não demanda modelo do ambiente e as estimativas sobre a qualidade das ações realizadas pelos agentes são atualizadas de forma incremental, baseadas somente em informação local. A informação sobre as linhas caracteriza um sinal de reforço usado pelos agentes, que alterna valores positivos e negativos, acompanhando o nível de carga da linha visitada. No roteamento das chamadas, simultâneo ao dos agentes, a escolha de um nó alternativo se baseia nos valores-P das linhas de uma dada rota, sendo selecionado o nó que maximiza o produto destes valores. Assim, o algoritmo proposto é um sistema dependente do evento.

O algoritmo RAF foi aplicado a uma rede totalmente conectada e seu desempenho foi avaliado com relação à porcentagem média de chamadas perdidas. Seus resultados foram comparados ao do algoritmo DAR, que também constitui um sistema dependente do evento. Os experimentos envolveram variações no nível de carga e topologia da rede, ocorridos de forma isolada ou conjunta. Os algoritmos foram mais sensíveis às mudanças no nível de carga em relação à topologia da rede, e a variação simultânea deste dois parâmetros da rede provocou as maiores perdas.

Apesar das perdas obtidas pelo algoritmo RAF terem sido inferiores às do DAR sob todas as situações, o RAF apresentou um acréscimo considerável nas perdas sob aumento do nível de carga, de forma isolada ou em conjunto com a variação na topologia da rede, sugerindo uma dificuldade de adaptação do algoritmo a estas situações. Isto está relacionado com a valorização constante de determinadas linhas da rede pelas formigas, que constituem os menores caminhos. Sob mudanças na rede, os mecanismos utilizados pelo algoritmo, o reforço negativo e a evaporação do feromônio, não foram suficientes para a aprendizagem rápida dos melhores caminhos.

Deste modo, a pesquisa futura envolverá o estudo de novos mecanismos de otimização a serem anexados ao RAF, de forma que as mudanças na rede tenham menor efeito sobre as perdas produzidas pelo algoritmo de roteamento proposto.

Agradecimentos

Pelo apoio financeiro, os autores agradecem à FAPESP (processo nº 00/08251-2).

Referências

- Appleby, S. e Steward, S. (1994). Mobile software agents for control in telecommunications networks. *British Telecommunications Technology Journal*, v. 12, n. 2, pp. 104-113.
- Ash, G. R. (1995). Dynamic network evolution, with examples from AT&T's evolving dynamic network. *IEEE Communications Magazine*, v. 33, n. 7, pp. 26-39.
- Ash, G. R. (1997). *Dynamic routing in telecommunications networks*. New York: McGraw-Hill.
- Bertsekas, D. e Gallager, R. (1992). *Data networks*. Prentice-Hall.
- Bonabeau, E., Hénaut, F., Guérin, S., Snyers, D., Kuntz, P. e Theraulaz, G. (1998). Routing in telecommunications networks with ant-like agents. In *Proceedings of Intelligent Agents Telecommunications Applications*, Berlin, Germany.
- Dorigo, M., Maniezzo, V. e Colomi, A. (1991). Positive feedback as a search strategy. Technical Report 91-106, Dipartimento di Elettronica, Politécnico di Milano, IT.
- Dorigo, M. (1992). Optimization, learning and natural algorithms (in Italian). *PhD thesis*, Dipartimento di Elettronica e Informazione, Politecnico di Milano, IT.
- Dorigo M., V. Maniezzo e A. Colomi (1996). The ant system: optimization by a colony of cooperating agents. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part B*, v. 26, n. 1, pp.29-41.
- Dorigo, M., Di Caro, G. e Gambardella, L. M (1999). Ant algorithms for discrete optimization. *Artificial Life*, v. 5, pp. 97-116.
- Gibbens, R. J. (1988). Dynamic routing in circuit-switched networks: the Dynamic Alternative Routing strategy. *Ph.D. thesis*, University of Cambridge.
- Hölldobler, B. e Wilson, E. O (1990). *The Ants*. Cambridge, MA: Belknap Press of Harvard University Press.
- Kaelbling, L. P., Littman, M. L. e Moore, A. W. (1996). Reinforcement learning: A survey. *Journal of AI Research*, v. 4, pp. 237-285.
- Mitra, D. e Serry, J. B. (1991). Comparative Evaluations of Randomized and Dynamic Routing Strategies for Circuit Switched Networks. *IEEE Transactions on Communications*, v. 39, n.1.
- Schoonderwoerd, R., Holland, O., Bruten, J. e Rothkrantz, L. (1996). Ant-based load balancing in telecommunications networks. *Adaptive Behavior*, v.5, n. 2, pp. 169-207.
- Sim, K. M. e Sun, W. H. (2003). A multiple ant colony optimization approach for load balancing. In *Proceedings of the 4th International Conference on Intelligent Data Engineering Automated Learning*, Hong Kong.
- Steenstrup, M. E. (1995). *Routing in telecommunications networks*. Prentice-Hall.